



Trabajo de Grado – Programa de Ingeniería Civil

Viabilidad de uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en
pavimentos permeables.

Presentado por:

Santiago Ruiz Leal

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Mayo de 2025

RESUMEN

En la actualidad la construcción de sistemas de drenaje sostenibles (SuDS) los cuales se consideran una solución para afrontar los desafíos planteados por las aguas pluviales en zonas urbanas, buscando imitar el ciclo hidrológico natural (Bertrand-Krajewski, 2021). Los materiales empleados en su construcción varían de acuerdo a su tipología un ejemplo de esto son los pavimentos permeables. Los cuales contienen en su base de rodadura adoquines, material asfáltico o en concreto, sub-base granular y un sistema de drenado. Estos materiales normalmente son tomados de un flujo lineal donde son extraídos procesados usados y una vez llegue al fin de su vida útil estos son desechados.

En Colombia, se observa un interés creciente en los impactos ambientales de la construcción y se ha visto la necesidad de adoptar enfoques sostenibles (García-Ochoa et al., 2020). Surgiendo una necesidad de encontrar sistemas compatibles con el desarrollo ambiental además de la implementación de materiales alternativos con el tal de que el sector de la construcción adopte la construcción circular y sostenible.

TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS.....	v
INDICE DE TABLAS	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	8
3.1. Formulación del problema.....	8
3.2. Pregunta de investigación.....	8
3. OBJETIVOS.....	9
3.1. General	9
3.2. Específicos.....	9
4. MARCO TEORICO.....	10
4.1. Construcción circular	10
4.2. Pavimento permeable	10
4.3. Material alternativo	10
4.5. Simulación hidráulica o hidrológica	11
4.6. Storm Water Management Model (SWMM).....	11
5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
5.1 Diseño de mezcla capa de rodadura.....	16
5.2 Pruebas hidráulicas	17
5.2.1 Procedimiento en laboratorio.....	18
5.3 Simulación en SWMM.....	21
5.3.1 Definición de condiciones de la simulación	22
5.3.2 Pluviómetro: Entrada de lluvia al sistema	24
5.3.3 Definición de áreas de la cuenca.....	24

5.3.4 Creación de los LID controls	24
5.3.5 Creación de pozos y tuberías	25
5.3.4 Asignación de LID y simulación	25
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	27
6.1. Elaboración de muestras.....	27
6.2. Relación de vacíos	31
6.3. Permeabilidad	32
6.4. Simulación del pavimento permeable en SWMM 5.2	34
6.4.1 Definición condiciones de la simulación.....	35
6.4.2 Creación de lluvia	36
6.4.3 Definición de áreas de la cuenca.....	37
6.4.4 Creación de LID controls	40
6.4.5 Creación de pozos y tuberías	43
6.4.6 Asignación de LID y simulación	47
6.4.6.1 Simulación en sistema de drenaje tradicional	49
6.4.6.2 Simulación con capa de rodadura a base de grava.....	50
6.4.6.3 Simulación con capa de rodadura a base de RCD.....	51
6.4.8. Análisis general.....	53
7. RECOMENDACIONES	57
8. CONCLUSIONES.....	58
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Posible clasificación de las terminologías de drenaje urbano, de acuerdo con la especialidad o enfoque principal en el paso del tiempo Adaptado de:(Fletcher et al., 2015).	2
Figura 2 Pavimento de permeable de adoquín implementado por el Departamento de Gestión de Cuencas Hidrográficas de Atlanta (structuralia blog, 2015).....	4
Figura 3 Pavimento de adoquines ecológicos (Expocihac media., 2023).....	4
Figura 4 Adoquín permeable (climaco)	5
Figura 5 Adoquín permeable aplicación (climaco)	5
Figura 6 Sistema Aquacell de PAVCO Wavin	5
Figura 7 Ejemplo de construcciones desarrolladas con estructuras metálicas de TECMO.	7
Figura 8 Diagrama de Flujo para pruebas Hidráulicas.	13
Figura 9 Diagrama de Flujo para pruebas Hidráulicas.	14
Figura 10 Diagrama de flujo SWMM.....	15
Figura 11 (Ruiz, S;2024) Molde para ensayo Proctor	17
Figura 12 (Ruiz, S;2024) Esquema del planteamiento del sistema de ensayo permeabilidad	18
Figura 13 (Ruiz, S;2024) Preparación Bentonita	19
Figura 14 (Ruiz, S;2024) Proceso de llenado con bentonita.....	19
Figura 15 (Ruiz, S;2024) Armada del sistema.	20
Figura 16 (Ruiz, S;2024) Recolección y lectura de volumen de agua.....	20
Figura 17 Ruta de acceso a la interfaz de Defaults.....	22
Figura 18 Interfaz para definir nombres de accesorios hidráulicos.....	23

Figura 19 Interfaz definición de parámetros de constantes en áreas	23
Figura 20 Interfaz definición de parámetros de constantes en pozos y tuberías.	24
Figura 21 Interfaz definición de parámetros del LID	25
Figura 22 Interfaz de asignación de LID	25
Figura 23 Interfaz de características del LID en cuanto al terreno de estudio	26
Figura 24 (Ruiz, S;2024) Proceso de trituración del RCD.	28
Figura 25 (Ruiz, S;2024) Proceso de trituración del RCD.	28
Figura 26 (Ruiz, S;2024) Tamizado del RCD.....	28
Figura 27 (Ruiz, S;2024) Tamizado Grava.	29
Figura 28 (Ruiz, S;2024) Materiales usados para realizar las muestras del concreto permeable.	29
Figura 29 (Ruiz, S;2024) Decantación por pasta muy fluida.....	30
Figura 30 (Ruiz, S;2024) Caso de Mezcla seca y arenosa.	30
Figura 31 (Ruiz, S;2024) Muestras de concreto permeable.....	31
Figura 32 (Ruiz, S;2024) Ensayo de peso sumergido.....	31
Figura 33 (Ruiz, S;2024) Preparación de muestras.	32
Figura 34 (Ruiz, S;2024) Aplicación de Bentonita hidratada.	32
Figura 35 Plano en planta del parqueadero visitantes Universidad Javeriana Cali cargado en el programa SWMM.....	35
Figura 36 Definición de áreas de cuencas.....	38
Figura 37 Vista en planta del parqueadero.....	43
Figura 38 Perfil a estudiar.	53
Figura 39 Perfil de drenaje sin LID control.	53
Figura 40 Perfil de drenaje con capa de rodadura a base de Grava.....	54
Figura 41 Perfil de drenaje con capa de rodadura a base de RCD.	54

Figura 42 Perfil de pozo 3 a 19 sin LID control.....	55
Figura 43 Perfil de pozo 3 a 19 con capa de rodadura a base de RCD.....	55
Figura 44 Perfil de pozo 3 a 19 con capa de rodadura a base de Grava.	55

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Diseño de mezcla Grava.....	16
Tabla 2 Diseño de mezcla RCD	17
Tabla 3 Volumen acumulado en intervalo de 30 segundos utilizado grava por cada muestra (M)	33
Tabla 4 Volumen acumulado en intervalo de 30 segundo utilizando RCD por cada muestra (M)	33
Tabla 5 Promedio volumen de agua pasante grava	33
Tabla 6 Promedio volumen de agua pasante grava	33
Tabla 7 Peso en kg del agua que pasa por el sistema	34
Tabla 8 Nombre de elementos hidráulicos.....	35
Tabla 9 Parámetros generales áreas	35
Tabla 10 Parámetros generales Pozos y tuberías.....	36
Tabla 11 Parámetros lluvia.....	36
Tabla 12 Secuencia de lluvia tasa de retorno 5 años	37
Tabla 13 Propiedades áreas	38
Tabla 14 Propiedades áreas	39
Tabla 15 Propiedades áreas	40
Tabla 16 Parámetros capa de superficie modelo en Grava	41

Tabla 17	Parámetros capa de pavimento o rodadura modelo en Grava.....	41
Tabla 18	Parámetros capa de almacenamiento modelo en Grava.....	41
Tabla 19	Parámetros capa de drenaje modelo en Grava.....	41
Tabla 20	Parámetros capa de superficie modelo en RCD.....	42
Tabla 21	Parámetros capa de pavimento o rodadura modelo en RCD.....	42
Tabla 22	Parámetros capa de almacenamiento modelo en Grava.....	42
Tabla 23	Parámetros capa de drenaje modelo en RCD.....	42
Tabla 24	Parámetros pozos.....	44
Tabla 25	Parámetros pozos.....	44
Tabla 26	Parámetros pozos.....	44
Tabla 27	Parámetros pozos.....	45
Tabla 28	Parámetros tuberías.....	45
Tabla 29	Parámetros tuberías.....	46
Tabla 30	Parámetros tuberías.....	46
Tabla 31	Parámetros tuberías.....	47
Tabla 32	Parámetros de asignación Pavimento con capa de rodadura base de Grava.....	48
Tabla 33	Parámetros de asignación Pavimento con capa de rodadura base de RCD.....	48
Tabla 34	Reporte de escorrentía.....	49
Tabla 35	Reporte de volumen máximo en pozos sin LID controls.....	49
Tabla 36	Reporte rendimiento PP a base de Grava.....	50
Tabla 37	Reporte de volumen máximo en pozos Grava.....	51
Tabla 38	Reporte rendimiento PP a base de RCD.....	52
Tabla 39	Reporte de volumen máximo en pozos RCD.....	52

1. INTRODUCCIÓN

A partir del siglo XVIII las ciudades experimentaron una expansión apresurada generando la necesidad de sistemas de drenajes. Esta infraestructura de alcantarillado ha servido por décadas transportando el agua lluvia fuera de la ciudad. Lo cual ha contribuido a la salud pública y al confort de sus habitantes, pero este mecanismo de gestión de escorrentía ha generado impactos negativos en los cuerpos de agua receptores y no resuelve completamente los problemas de inundaciones además se ha evidenciado que promueve el ingreso de contaminantes. Por lo tanto, un cambio en la gestión de aguas lluvias se hace necesario para pasar a un enfoque más amplio, que contemple aspectos no solo técnicos si no ambientales, ecológicos, sociales y de gobernanza (Bertrand-Krajewski, 2021).

Este enfoque ha adquirido varios nombres, uno de ellos son los sistemas de drenaje sostenibles (de sus siglas en inglés SuDS – Sustainable Drainage Systems) (Fletcher et al., 2015), los SuDS son una serie de técnicas que hacen parte del nuevo enfoque de la gestión del drenaje urbano. Tal como se evidencia en la Figura 1 los SuDS han presentado una evolución y clasificación de acuerdo con su especialización. Estas técnicas parten del control de inundaciones, incluyen aspectos para mejoramiento calidad del agua, crean espacios con atractivo arquitectónico para descanso y/o recreación e incluye aspectos que fomentan la biodiversidad, como por ejemplo la restauración del flujo natural del agua (Mouritz, M., 1992). Los SuDS son un punto de partida para la implementación del diseño urbano orientado al agua (de sus siglas en inglés WSUD, Water Sensitive Urban Design) (Whelans et al., 1994; Wong, 2007). Dando un enfoque más amplio el cual puede abarcar objetivos ambientales, funcionales, sociales, económicos, sanitarios y de infraestructura (Illman & Wilson, 2017).

Los SuDS constituyen un enfoque que ha tomado fuerza gracias a que es una forma de imitar el ciclo hidrológico dentro del entorno urbano (Bertrand-Krajewski, 2021). Estos pueden ser diseñados como techos verdes, cuencas de detención, humedales construidos, sumideros filtrantes, canales permeables, entre otros (Woods Ballard et al., 2016).

Posible clasificación de las terminologías de drenaje urbano, de acuerdo con la especialidad o enfoque principal en el paso del tiempo Adaptado de:(Fletcher et al., 2015).

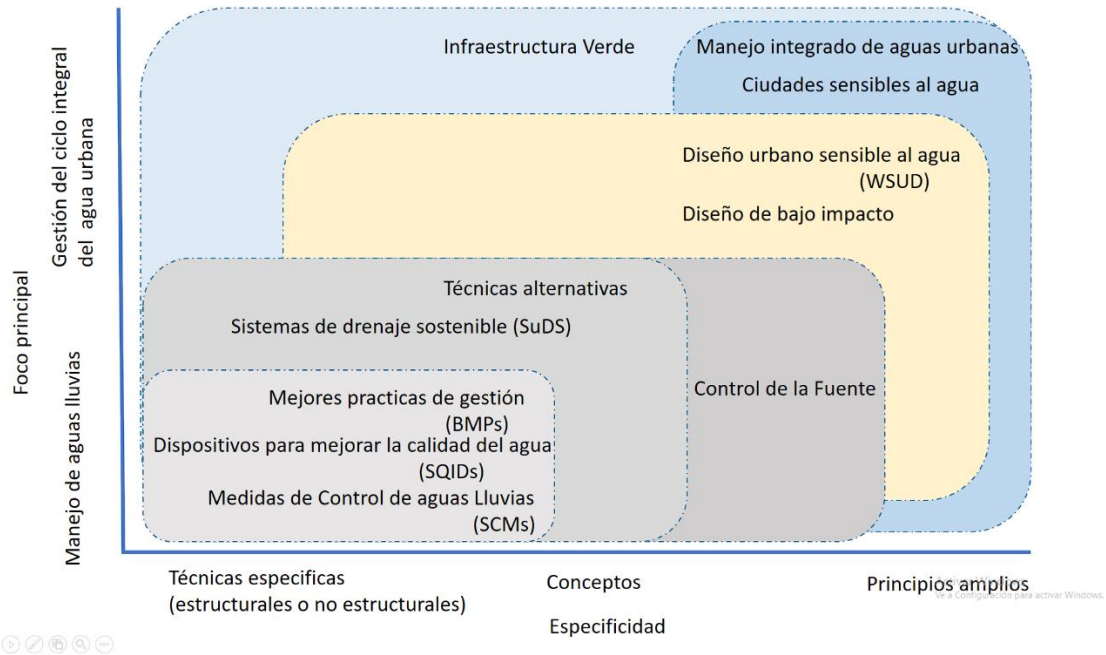


Figura 1 Posible clasificación de las terminologías de drenaje urbano, de acuerdo con la especialidad o enfoque principal en el paso del tiempo Adaptado de: (Fletcher et al., 2015).

La implementación de los SuDS ha tenido un auge a nivel mundial, generándose así unas condiciones y directrices para diseñar estos sistemas los cuales tienden a tener diferencias mínimas dependiendo de las condiciones climáticas y geológicas del país donde se desarrollen, por ejemplo china en el cual se pusieron a prueba 19 sistemas de techos verdes para ver su desempeño en retención de aguas lluvias, además de revisar la calidad con la que el agua quedaba después de pasar por el sistema, estos techos verdes fueron comparados con tejados asfálticos los cuales tenían un sistema de drenaje tradicional. En este estudio se encontró que los techos verdes tenían un mejor desempeño en retención de aguas pluviales además de disminuir contaminantes como los SST (“Sólidos Suspending Totales”) neutralizar el pH (Zhang et al., 2015).

Actualmente, en Colombia los gobiernos municipales, departamentales y el gobierno nacional han generado directrices para la implementación de SuDS, un ejemplo puede ser la “Guía metodológica para la formulación e implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible” del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio departamento nacional de planeación del 30 de junio del 2022. Además, se ha hecho un esfuerzo desde la academia el

investigar y presentar las ventajas que dichos sistemas tienen a la sociedad tal como diseño de un campo de prueba piloto de pavimentos permeables en la ciudad de Cartagena (Díaz & Llorente, 2014).

Colombia al ser un país tropical presenta una condición climática en la cual solo se presencia épocas de lluvia o épocas secas, pero se ve afectada por fenómenos como el fenómeno de la niña la cual aumenta el nivel de precipitaciones en el país (Hoyos et al., 2013) y el fenómeno del niño el cual aumenta la temporada de sequía (Córdoba-Machado *et al.*, 2015). Con estos conceptos de la variabilidad climática en mente podemos determinar que el control de agua lluvias en Colombia necesita tomar un enfoque más orientado a la naturaleza en la cual se imite el ciclo natural del agua para evitar afectaciones por la impermeabilización que genera el desarrollo urbanístico.

Con el propósito de conocer cuales materiales se emplean para la construcción de SuDS, realizamos una búsqueda desde el mes de noviembre del 2023 hasta marzo del 2024. Como resultado inicial se encontró dos tipologías de SuDS las cuales tienden a ser más mencionadas en cuanto a factores técnicos y materiales. Una de estas tipologías son los techos verdes, en los cuales para su construcción requieren de bases, sustratos, sistemas de drenaje, vegetación, filtros, protecciones aprueba de agua, termo aisladores, en los cuales presentan el uso de materiales metálicos, polímeros, cerámicos, estratos de suelo natural y especies vegetales endémicas de la zona. Los materiales más usados en techos verdes son los aceros, bases de polipropileno, estructuras filtrantes de polímeros, filtros naturales, PVC, material rocoso, entre otros (Leite & Antunes, 2023).

La otra tipología encontrada son los pavimentos permeables los cuales deben contener materiales que le aporten rigidez y a la vez los poros suficientes para permitir el paso del agua a través de su estructura. Para la capa de rodadura se usa material asfáltico o en concreto, el cual se caracteriza por la ausencia de finos y sus altos volúmenes de vacíos. En otros casos se utilizan adoquines convencionales con separaciones como se ve reflejado en la figura 2, o adoquines con cavidades tal como se ve reflejado en la figura 3 para que el agua pase por las uniones o cavidades presentes hacia a las bases y sub-bases, o se utilizan adoquines porosos figura 4 y figura 5 para que el agua pase a través de ellos. En las bases y sub-bases se utiliza un material de relleno, el cual puede ser granular para que permita el paso

del agua hasta la tubería de drenaje (Sans-Ramos *et al.*, 2022) o pueden ser Aquaceldas
Figura 6.



Figura 2 Pavimento de permeable de adoquín implementado por el Departamento de Gestión de Cuencas Hidrográficas de Atlanta (structuralia blog, 2015).

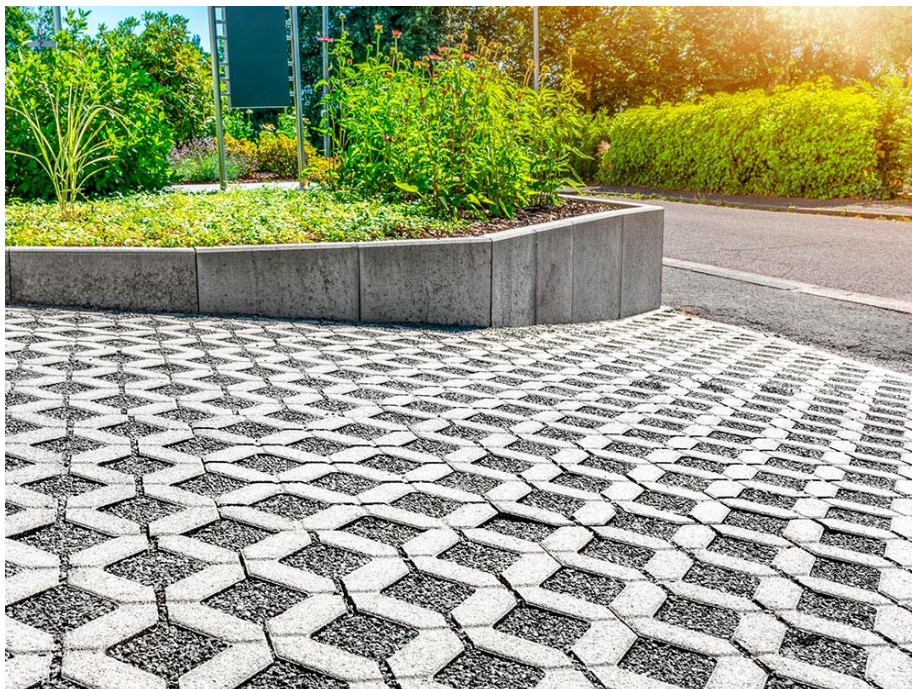


Figura 3 Pavimento de adoquines ecológicos (Expocihac media., 2023).



Figura 4 Adoquín permeable (climaco)



Figura 5 Adoquín permeable aplicación (climaco)



Figura 6 Sistema Aquacell de PAVCO Wavin

Actualmente, la construcción de los SuDS depende de materiales convencionales los cuales provienen de un flujo lineal. Este flujo los materiales son extraídos en su gran mayoría de la explotación de minerales, los cuales una vez cumplen su vida útil son desechados sin posibilidad de aprovecharlos nuevamente (Van Der Zwaag et al., 2023).

La industria de la construcción debe de tomar un cambio y reducir al mínimo el impacto ambiental apoyándose de los conceptos de la economía circular, con el fin de disminuir al mínimo las emisiones, eliminar residuos y crear un circuito cerrado para los recursos en donde todo pueda ser aprovechado (Askar et al., 2022).

En la actualidad se puede estimar que el 40% de la contaminación global está ligada de manera directa e indirecta al sector de la construcción además del 18% de emisión de gases de efecto invernadero, debido a la gran cantidad de recursos necesitados para la realización de obras civiles. Desde la explotación de los recursos hasta su transporte y manufacturación. (García-Ochoa et al., 2020).

En Colombia el sector de la construcción es uno de los motores de la economía y del desarrollo de la sociedad colombiana. En la cual se está empezando a preocupar por los impactos y costos de adaptación de la orientación ambiental tomada por Europa y Estados Unidos respecto a las emisiones generadas por el sector de la construcción.

Caso como el de la empresa bajo el nombre de TECMO la cual tiene más de 5 décadas en experiencia en la manufacturación e instalación de estructuras en acero y aluminio para proyectos grandes y pequeños un ejemplo de proyecto es la torre ATRIO Bancolombia en Bogotá se ve evidenciado en la figura 7.



Figura 7 Ejemplo de construcciones desarrolladas con estructuras metálicas de TECMO.

Esta empresa comenzó a realizar talleres de manera de competición con miembros de su compañía además de estudiantes de maestrías, en los cuales se buscaba lograr procesos en los cuales se generarán la menor cantidad de desperdicios, además de encontrar forma de reintegrar parte de los sobrantes en nuevos procesos de manufacturación (Torres-Guevara et al., 2021).

Todo esto favoreciendo al desarrollo de ciudades sostenibles, mediante fundamentos como la sostenibilidad ambiental, gestión y tratamiento integral de aguas pluviales, mitigación de los impactos por precipitaciones, aportando de esta forma con un enfoque más atractivo y bioamigable a los entornos urbanos además del cumplimiento de diversos tratados y normativas ambientales. Para ello se recurrirá a la literatura relacionada con los materiales de elaboración de SUDS y generar comparativas, desde la parte ambiental, económica, y de manejo del ciclo hidrológico (Bertrand-Krajewski, 2021).

Por lo tanto, surge la necesidad de explorar y probar diversos materiales alternativos para la construcción de los SuDS, para que estos sistemas sean completamente partes de la construcción circular, con el fin de reducir el impacto ambiental. La construcción circular opta por darle un segundo uso a dichos desechos, aportando a la disminución de la huella de carbono, y reducción de la sobre explotación de las materias primas (Van Der Zwaag et al., 2023).

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se describe la definición del problema de investigación incluyendo la identificación del problema y la pregunta de investigación.

3.1. Formulación del problema

En entornos densamente poblados, el manejo de aguas pluviales representa un desafío significativo causante a la impermeabilización del suelo, generando un aumento de la escorrentía superficial, exacerbando los problemas de inundaciones, erosión del suelo, contaminación del agua y pérdida de biodiversidad. Para ello se han desarrollado diversos sistemas que eviten la permeabilización de los desarrollos urbanos, entre ellos los SuDS.

En la actualidad las preocupaciones ambientales y escasez de recursos, en la implementación del desarrollo urbano se opta por la búsqueda de materiales alternativos. A pesar de los avances en tecnología y la disponibilidad de una variedad de opciones, la adopción de estos materiales alternativos sigue siendo limitada en comparación con los materiales convencionales.

Los SuDS son estructuras que buscan recrear las condiciones hidrológicas en zonas urbanas las cuales deben ser diseñadas teniendo en cuenta los factores ambientales de la zona, por lo cual una opción para su correcto diseño es la simulación en la cual se busca imitar el comportamiento de sistemas reales que actúan en el ciclo hidrológico, mediante ecuaciones asociadas a los procesos físicos (González Hernández, 2015).

3.2. Pregunta de investigación

Dada a la importancia de cumplir con los estándares y normativas internacionales en cuanto a control de aguas pluviales, así mismo de la implementación de una construcción sostenible, la presente propuesta pretende responder la siguiente pregunta.

¿Cuáles son los desafíos técnicos y económicos asociados con la implementación de materiales alternativos en SuDS?

¿Cuál es el impacto ambiental de los materiales alternativos en comparación con los materiales convencionales utilizados en SuDS?

3. OBJETIVOS

A continuación, se describen los objetivos que pretende cumplir la presente propuesta de trabajo de grado.

3.1. General

Estudiar el comportamiento del SuDS pavimento permeable con materiales convencionales versus materiales alternativos para encontrar fortalezas y debilidades a través de un prototipo simulado.

3.2. Específicos

- Desarrollar una capa de rodadura con material RCD proveniente de concreto reciclado
- Evaluar el diseño del pavimento permeable teniendo en cuenta las propiedades de los materiales a través del software SWMM u otro.

|

4. MARCO TEORICO

A continuación, se describe la metodología planteada para desarrollar el trabajo de grado, la misma se ha dividido en cuatro etapas como se presenta.

4.1. Construcción circular

La construcción circular es una representación y un cambio en la industria de la construcción, dejando de lado el modelo tradicional lineal donde se extrae, usa y desecha. Para enfocarse en generar un ciclo en donde se reduzcan los residuos dándoles una segunda vida o utilidad e incorporándolos de nuevo en la construcción (Van Der Zwaag et al., 2023).

4.2. Pavimento permeable

De acuerdo con “Guidance on the construction of SuDs” (CIRIA C753)

, los pavimentos permeables se diferencian a los normales, debido a que estos no usan canales o sistemas para drenar el agua, en su lugar el agua pasa a través de poros u orificios de la superficie del pavimento, además de que sus diferentes capas permiten el paso del agua para drenarla o almacenarla.

También se evidencia que estos elementos sirven para filtrar y retirar ciertos contaminantes del agua por medio del filtrado al pasar por cada una de sus capas. (Singer et al., 2022)

4.3. Material alternativo

Es todo material que se obtiene de forma no convencional o proveniente de un proceso diferente a la construcción lineal, caso como los agregados derivados de desechos y demolición de construcción (RCD), para los cuales cada vez mas se le ha encontrado mas utilidad dentro del ámbito de la construcción, estos respaldados por diversos estudios alrededor del mundo (Özalp et al., 2016).

4.5. Simulación hidráulica o hidrológica

la simulación es la acción en la cual se busca imitar el comportamiento de sistemas reales que actúan en el ciclo hidrológico o el comportamiento hidráulico de un cuerpo de agua, mediante a ecuaciones asociadas a los procesos físicos (González Hernández, 2015).

4.6. Storm Water Management Model (SWMM)

Es un software desarrollado por Environmental Protection Agency (EPA) de los E.E.U.U, el cual se usa ampliamente para realizar simulaciones hidráulicas e hidrológicas, permitiendo simular escorrentías, contaminantes, y eficiencia de las estructuras de drenaje

5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En esta investigación, desarrollaremos diferentes modelos de carpeta de rodadura de pavimentos permeables simulados de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS). Estos modelos permitirán analizar el comportamiento hidráulico de las estructuras y poder evaluar su capacidad para infiltrar y gestionar el agua de lluvia de manera más eficiente.

Para nuestro caso de estudio nos basaremos en el Parqueadero de visitantes de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, la cual está ubicada cerca de la cancha de futbol de césped y del edificio Almendros.

Para la simplificación del proceso se realizaron diagramas de flujo con el propósito de resumir el proceso del estudio en el caso de la Figura 8 y Figura 9 en el cual se resume toda la metodología

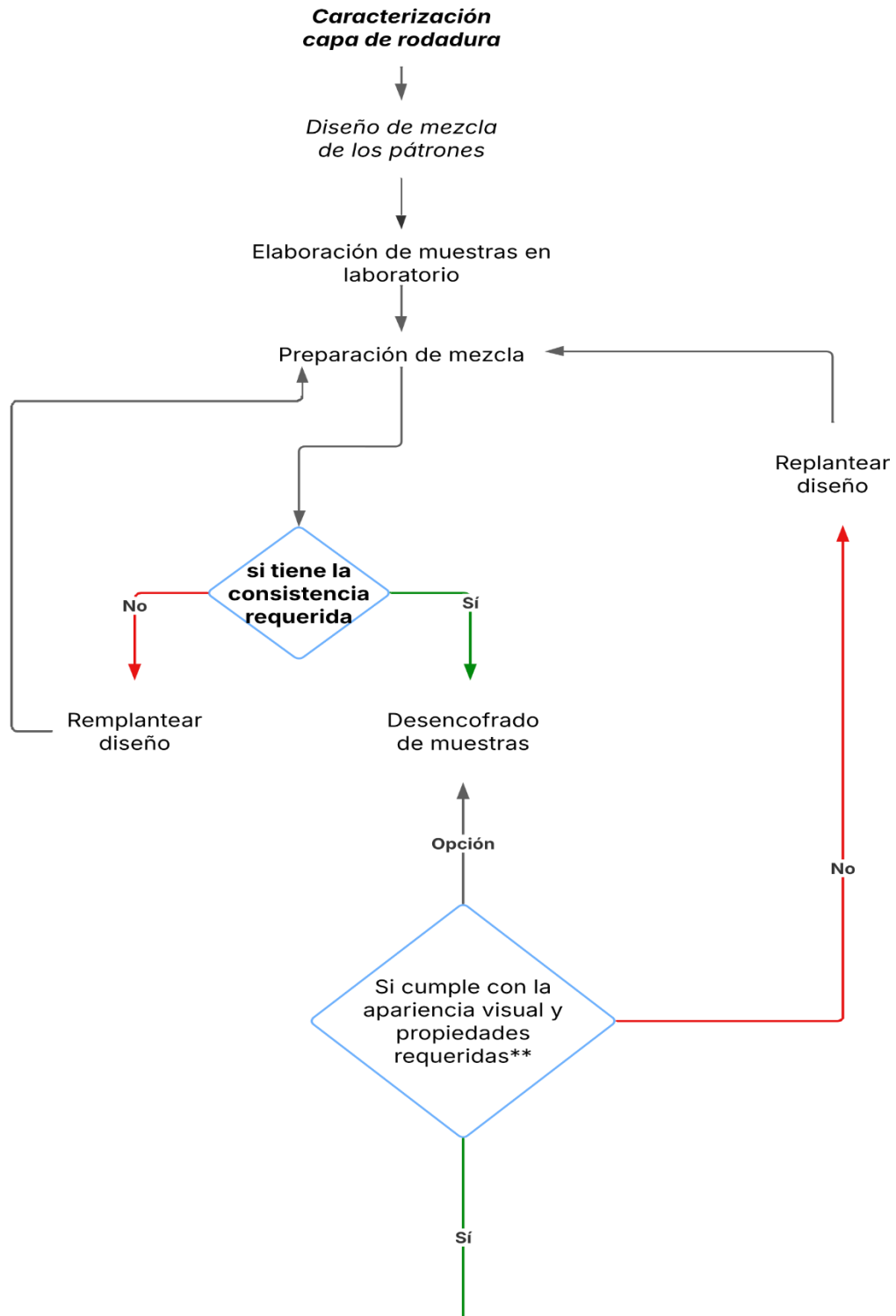


Figura 8 Diagrama de Flujo para pruebas Hidráulicas.

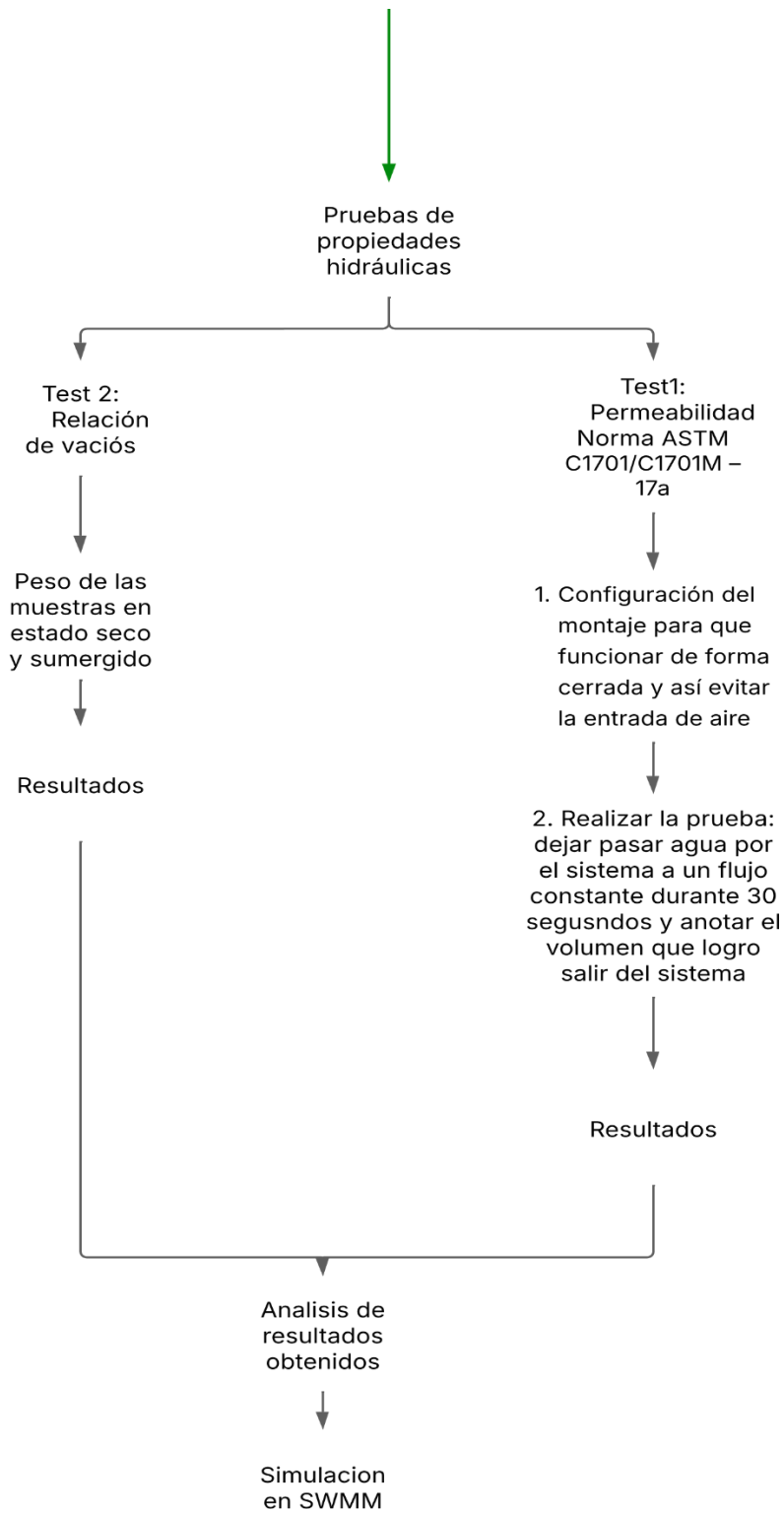


Figura 9 Diagrama de Flujo para pruebas Hidráulicas.

Y la figura 10 donde se busca resumir el procedimiento realizado en SWMM.

Diagrama metodología SWMM

Santiago Ruiz Leal

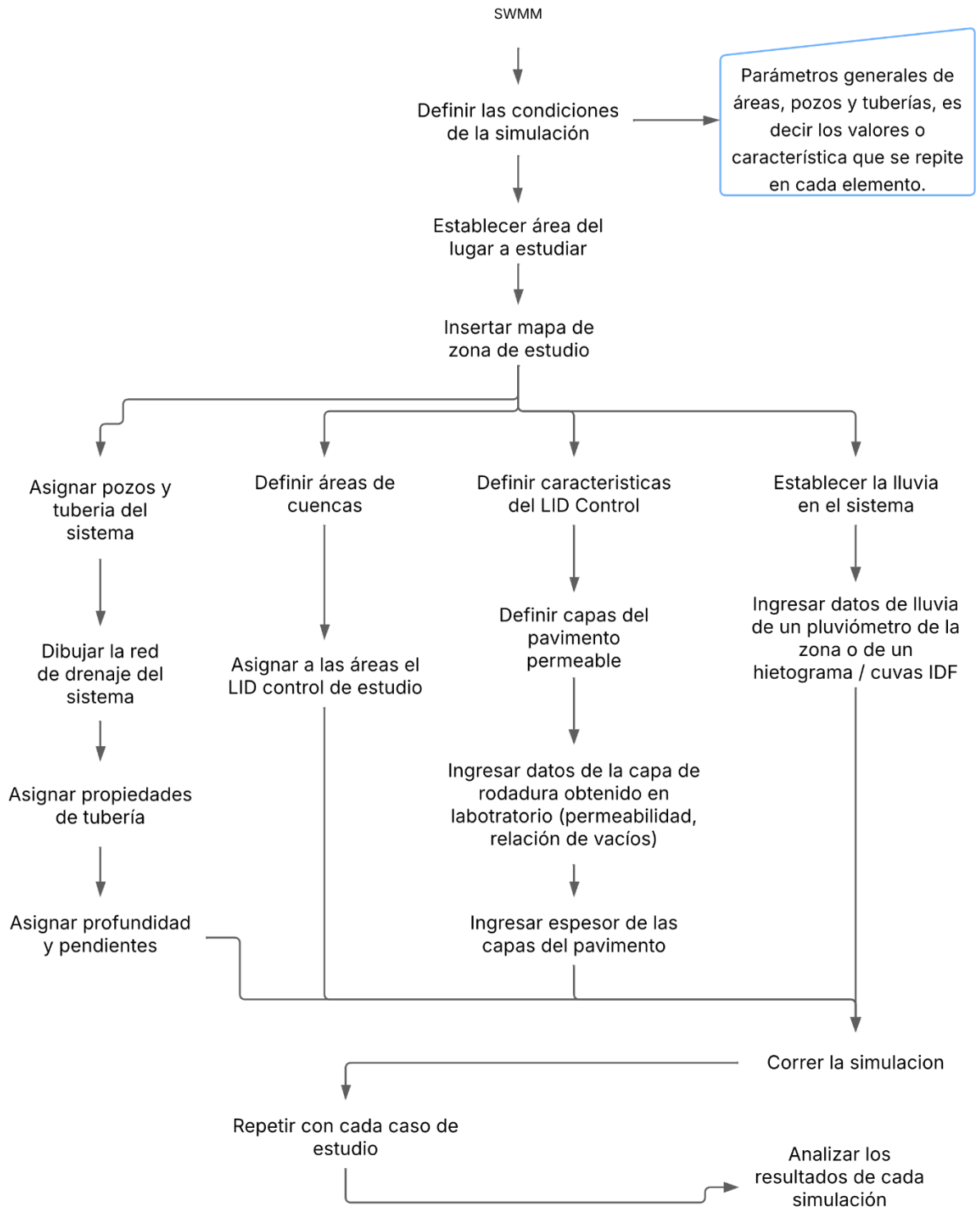


Figura 10 Diagrama de flujo SWMM

5.1 Diseño de mezcla capa de rodadura

Fabricaremos cuerpos patrón de concreto permeable con dos tipos de agregados: uno convencional (grava natural) y otro reciclado (residuos de construcción y demolición, o RCD). previamente triturados y procesados. Para garantizar que las mezclas cumplan los requisitos del estudio, estableceremos una matriz de diseño que equilibre permeabilidad y resistencia estructural. Esto significa que las mezclas deberán disponer de un porcentaje suficiente de vacíos interconectados para permitir el paso del agua sin obstrucciones, mientras, al mismo tiempo, deberán mantener la rigidez estructural necesaria para soportar cargas y resistir las condiciones a las que serán sometidas durante el desarrollo de la investigación.

Para el proceso de diseño y fabricación de las muestras se ejecutaron siguiendo las recomendaciones establecidas en las normativas reconocidas, tales como la ACI 522R-10 y la ACI 522.1-08, las cuales proporcionan lineamientos específicos para la producción y caracterización del concreto permeable. No obstante, también se consideraron referencias de investigaciones previas en las que se ha demostrado la efectividad del uso de este tipo de concreto en aplicaciones de pavimentos urbanos y sistemas de drenaje sostenible.

Para el diseño de la mezcla, seguiremos las recomendaciones de la norma ACI 522-10, utilizando una relación agua-cemento entre 0.28 y 0.40, según lo estipulado en la norma ACI 522-10. Asimismo, se empleará grava con un tamaño de partícula comprendido entre 1/2" y 3/8", buscando optimizar la distribución granulométrica para maximizar la conectividad de los vacíos y mejorar el desempeño hidráulico del material. Dándonos como resultado el diseño planteado en la tabla 1 y tabla 2

Tabla 1 Diseño de mezcla Grava

Patrón con Grava		
Modelo 1		
Grava	3.6	Kg
Cemento	0.44	Kg
Agua	1000	Kg

Tabla 2 Diseño de mezcla RCD

Patrón con RCD		
Modelo 1		
RCD	3.6	Kg
Cemento	0.44	Kg
Agua	1000	Kg

Para las muestras de concreto permeable se utilizaron las dimensiones de 11 cm de altura y 10 cm de diámetro para asegurar que los ensayos sean uniformes. Utilizando un molde Proctor para compactar el material de manera homogénea y obtener probetas consistentes Figura 11. Esto ayuda a garantizar que las muestras cumplan con los parámetros de la investigación y evitar variaciones en la estructura interna del concreto que puedan afectar los resultados hidráulicos y mecánicos.



Figura 11 (Ruiz, S;2024) Molde para ensayo Proctor

5.2 Pruebas hidráulicas

Una vez fabricadas y curadas las muestras, se seguirá el procedimiento establecido en la norma ASTM C1701/C1701M – 17a, la cual proporciona una metodología estandarizada para la medición de la tasa de infiltración de pavimentos permeables.

La prueba consistirá en aplicar un sistema de carga constante, vertiendo un volumen controlado de agua sobre la superficie de cada muestra. Mediremos el tiempo que tarda el agua en atravesar la estructura porosa del concreto y calcularemos la tasa de permeabilidad. Este procedimiento nos permitirá analizar la eficiencia de drenaje de cada formulación y compararlas entre sí, con el objetivo de identificar la combinación de materiales más adecuada para garantizar un óptimo desempeño hidráulico en futuras aplicaciones de pavimentos permeables.

Para simplificar este proceso se realizó un diagrama de flujo para la Caracterización de la capa de rodadura por medio de las pruebas hidráulicas ver Figura 9 y Figura 10.

5.2.1 Procedimiento en laboratorio

El ensayo de permeabilidad se llevará a cabo siguiendo un protocolo sencillo y repetitivo. Este procedimiento se ilustra en la Figura 12

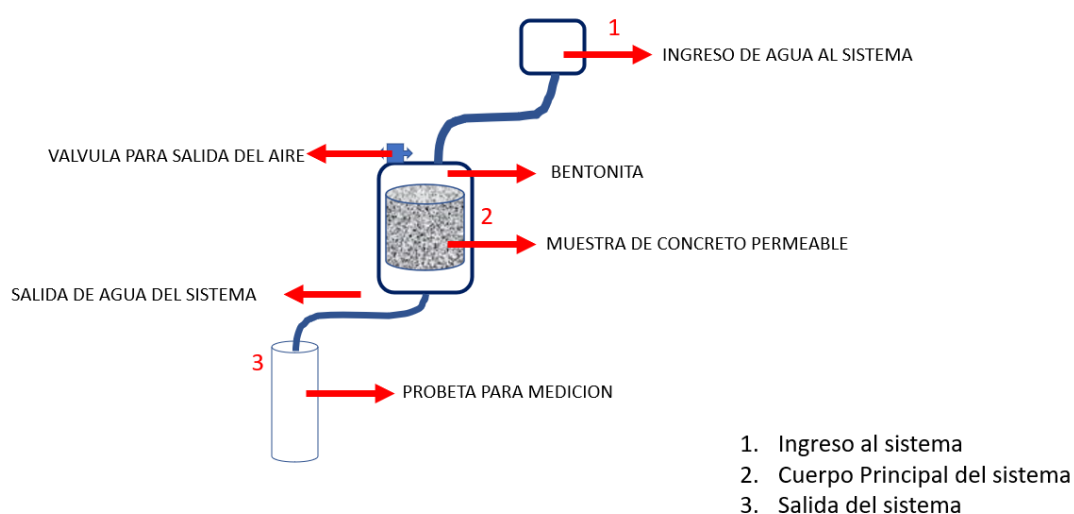


Figura 12 (Ruiz, S;2024) Esquema del planteamiento del sistema de ensayo permeabilidad

Para este ensayo se preparan tres muestras de cada material para obtener un valor más estandarizado, después se procederá con la preparación de la bentonita, hidratando la bentonita poco a poco hasta conseguir una consistencia moldeable y fácil de manipular ver Figura 12. Esto para poder formar una capa impermeable en los laterales de la muestra y obligar al agua a seguir el flujo deseado a través de la muestra y el sistema.



Figura 13 (Ruiz, S;2024) Preparación Bentonita

Posteriormente, se procede a colocar la muestra dentro del cilindro de prueba y se empieza a rellenar con bentonita los espacios que quedan entre la muestra y las paredes internas del cilindro Figura 14, una vez hecho esto se procede a terminar de instalar el sistema Figura 15 para empezar con la depuración de aire.



Figura 14 (Ruiz, S;2024) Proceso de llenado con bentonita



Figura 15 (Ruiz, S;2024) Armada del sistema.

Para la depuración del aire se debe empezar a suministrar el agua para que esta misma empuje el aire contenido, además de tener una válvula la cual sirva para la circulación y evacuación del aire. Una vez finalizado la depuración del aire se puede empezar con el ensayo en el cual se deberá llenar una probeta con el agua circulante del sistema en un intervalo de 30 segundos y anotar los resultados ver Figura 16.

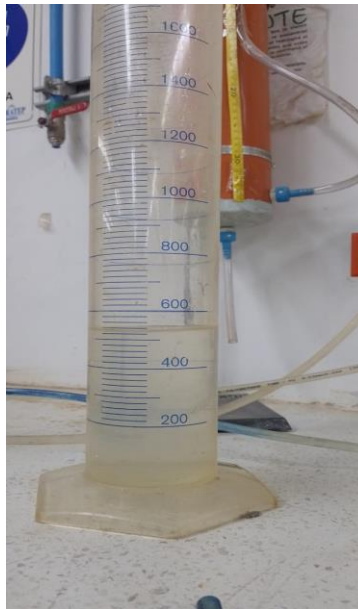


Figura 16 (Ruiz, S;2024) Recolección y lectura de volumen de agua

Una vez terminado las pruebas de laboratorio podemos proseguir con los cálculos matemáticos para obtener la tasa de infiltración de cada patrón de concreto, usando la siguiente formula (Ecuación 1):

$$I = \frac{KM}{(D^2 * t)}$$

Ecuación 1 Tasa de infiltración ASTM C1701/C1701M – 17a

Donde:

I = Tasa de infiltración, mm/h [pulg./h],

M = Masa de agua infiltrada, kg [lb],

D = Diámetro interior del anillo de infiltración, mm [pulg.],

t = tiempo necesario para que se infiltre la cantidad medida de agua
el concreto

K= 458366.6000 en unidades SI o 126870 en [pulgada-libra]

El siguiente ensayo es un ensayo de relación de vacíos, el cual es un valor requerido para la definición de la capa de rodadura del pavimento permeable en SWMM. En donde se buscará el peso seco y peso sumergido de la muestra usando la Ecuación 2.

$$e = \frac{G_s * \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

Ecuación 2 Relación de vacíos

5.3 Simulación en SWMM

Una vez obtenidos y analizados todos los datos experimentales, se procederá a realizar la simulación computacional con el objetivo de evaluar el comportamiento hidráulico de las dos muestras de concreto permeable. Para ello, se empleará el software EPA SWMM 5.1, la cual es una herramienta de modelación de sistemas de drenaje urbano y procesos hidrológicos.

La simulación se realizará en tres escenarios diferentes, el primero sin SuDS y el segundo representará el pavimento permeable elaborado con grava natural. El tercero considerará el uso de residuos de construcción y demolición (RCD) como sustituto del

agregado grueso. Para mejor comprensión se realizó un diagrama de flujo el cual busca simplificar el paso a paso del uso del programa ver Figura 23

5.3.1 Definición de condiciones de la simulación

Primero debemos alimentar la configuración por defecto del proyecto, el uso de estas definiciones puede ayudar a simplificar el ingreso de datos en el proyecto.

Para ingresar a esta seleccionamos la opción Project, Valores por Defaults tal como se ve en la Figura 17.

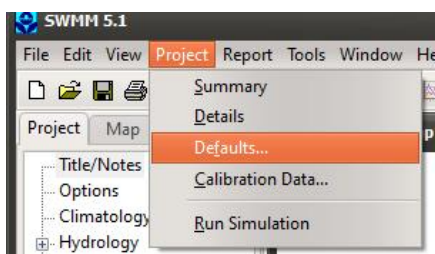


Figura 17 Ruta de acceso a la interfaz de Defaults

Se mostrará una interfaz la cual nos dará un menú de tres opciones ID Labels Figura 17 el cual nos permitirá darles nombre a los accesorios hidráulicos de la simulación, Subcatchment Figura 18 y Nodes/Links Figura 19 y Figura 20, estos dos últimos nos permiten darle valores estándar para las áreas, nodos y tuberías esto ayudara a que todas tengan los mismos valores de ciertas características.

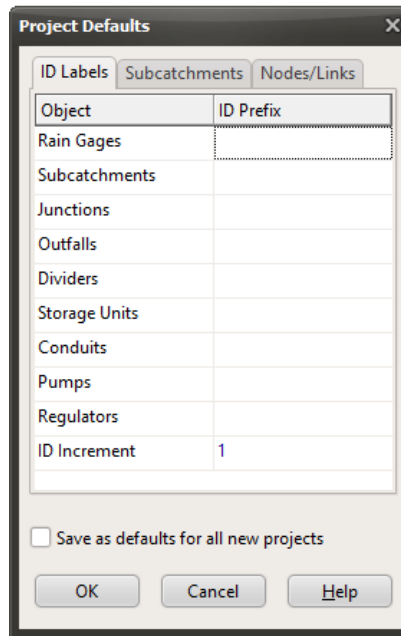


Figura 18 Interfaz para definir nombres de accesorios hidráulicos

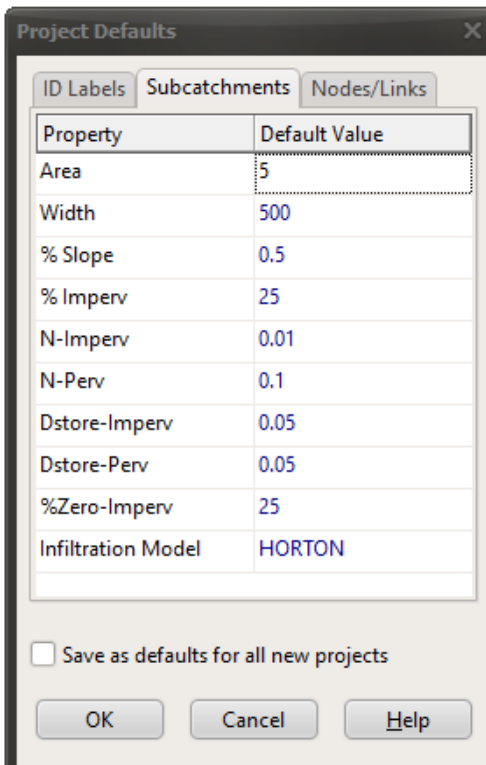


Figura 19 Interfaz definición de parámetros de constantes en áreas

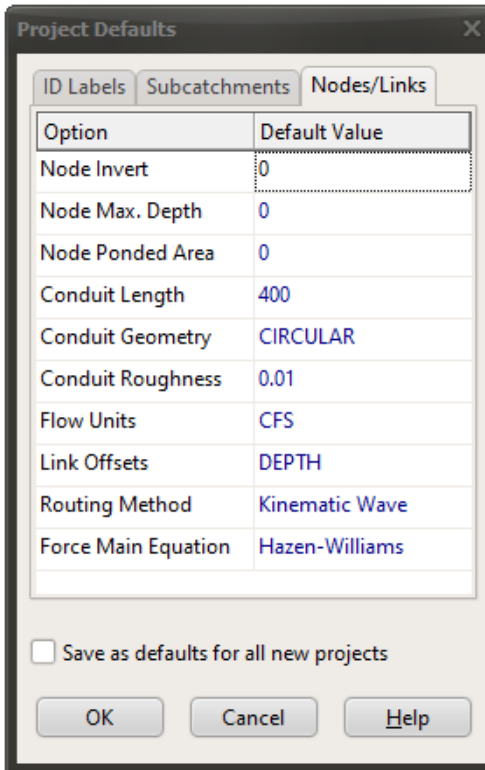


Figura 20 Interfaz definición de parámetros de constantes en pozos y tuberías.

5.3.2 Pluviómetro: Entrada de lluvia al sistema

Por medio de la herramienta pluviómetro creamos nuestra entrada de lluvia, establecemos las propiedades de esta los cuales serían Rain Format, Time Interval, Snow Catch Factor y Data Source. Para el Data source debemos definir una serie temporal de datos en el cual se describirá las intensidades de lluvia en intervalos de tiempo.

5.3.3 Definición de áreas de la cuenca

Procederemos a dibujar en el programa las áreas de lo que sería nuestra cuenca, en nuestro caso de estudio sería el parqueadero de la universidad, además de esto definiremos a cada área sus respectivas características.

5.3.4 Creación de los LID controls

En este caso seleccionaremos en la opción Hidrology – LID controls en la interfaz seleccionaremos Permeable Pavement y comenzaremos a diligenciar cada característica de las capas del pavimento. Tal como se ve evidenciado en la Figura 21.

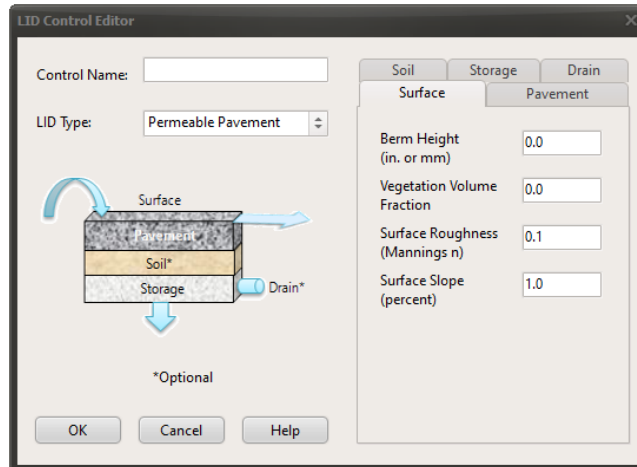


Figura 21 Interfaz definición de parámetros del LID

5.3.5 Creación de pozos y tuberías

Se procede a realizar el trazado de la red de drenaje definiendo en cada accesorio hidráulico sus respectivas características tales como cotas, profundidades, pendientes diámetros, longitudes entre otras.

5.3.4 Asignación de LID y simulación

Una vez se cuente con todos los elementos creados y definidos se procederá a asignar la lid correspondiente al caso, en este estudio será el Pavimento con capa de rodadura a base de grava y el pavimento con capa de rodadura a base de RCD, para esto en el apartado de propiedades de áreas o subcatchments. Nos saldrá una primera interfaz en la cual seleccionaremos la opción de añadir Figura 22.

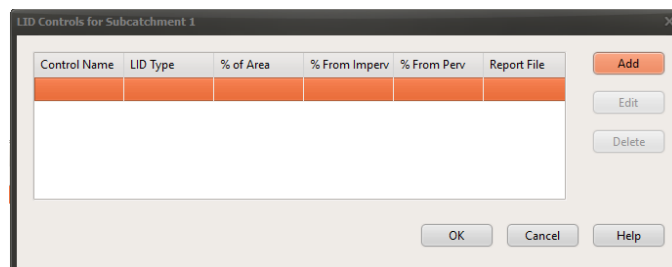


Figura 22 Interfaz de asignación de LID

Después nos aparecerá la siguiente interfaz donde le daremos la configuración final a nuestro pavimento permeable Figura 23.

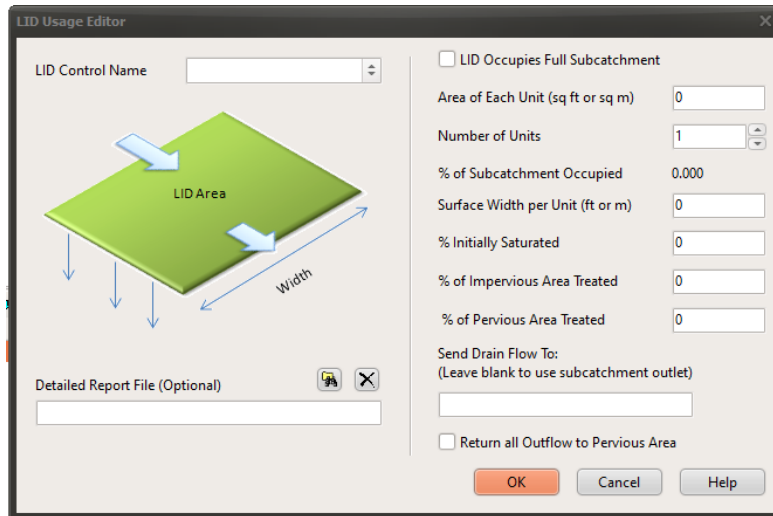


Figura 23 Interfaz de características del LID en cuanto al terreno de estudio

Se correrá la simulación con cada caso de estudio además de simular el escenario sin presencia de LID para revisar y comparar el aporte que generan estos mismos.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Esta sección consta de la elaboración de los procesos mencionados en la metodología, donde veremos las implicaciones, errores, observaciones y resultados obtenidos, además de evidenciar de manera más precisa como se elabora el procedimiento de laboratorio y de simulación para la definición de las capas de rodadura.

6.1. Elaboración de muestras

Para la elaboración de las muestras se aplicó el diseño de mezcla previamente establecido, en la Tabla 1 Diseño de mezcla Grava y Tabla 2 Diseño de mezcla RCD. En el caso de las muestras que contienen residuos de construcción y demolición (RCD), se utilizaron bloques de concreto reciclado como materia prima, los cuales fueron procesados para obtener un agregado con las características adecuadas para la fabricación del concreto permeable.

El proceso de preparación del RCD incluyó varias etapas. En primer lugar, los bloques de concreto fueron sometidos a trituración mediante un equipo especializado, reduciendo su tamaño a partículas más manejables. Posteriormente, el material triturado fue tamizado utilizando una serie de tamices normalizados N° 3/4", 1/2" y 3/8", asegurando así una distribución granulométrica adecuada para su incorporación en la mezcla de concreto. Este procedimiento permitió obtener un agregado reciclado con un tamaño de partícula controlado, optimizando su desempeño en términos de resistencia mecánica y permeabilidad.

Todo el proceso de preparación del RCD, desde la selección del material hasta su clasificación granulométrica, se encuentra en las Figuras 24, Figura 25, Figura 26, donde se muestra cada una de las etapas empleadas en la investigación.



Figura 24 (Ruiz, S;2024) Proceso de trituración del RCD.



Figura 25 (Ruiz, S;2024) Proceso de trituración del RCD.



Figura 26 (Ruiz, S;2024) Tamizado del RCD.

En el caso de la grava natural, no fue necesario someterla a un proceso de trituración, ya que su tamaño y forma ya eran adecuados para su uso en la mezcla de concreto permeable.

No obstante, se realizó un proceso de tamizado, utilizando tamices normalizados, con el fin de seleccionar únicamente las partículas dentro del rango granulométrico establecido para el estudio. Este proceso se encuentra ilustrado en la Figura 27.



Figura 27 (Ruiz, S;2024) Tamizado Grava.

Para la fabricación de las muestras, se empleó un molde de ensayo tipo Proctor, como se muestra en la Figura 11 (Ruiz, S;2024) Molde para ensayo Proctor. Este molde permitió dar forma a las probetas de manera uniforme, asegurando dimensiones estandarizadas y una compactación adecuada del concreto permeable.

Siguiendo el diseño de mezcla establecido, se prepararon los materiales para el concreto. Seleccionando los agregados de grava natural y de y RCD, verificando que cumplieran con las especificaciones de tamaño definidas en la investigación, ver en la Figura 28.



Figura 28 (Ruiz, S;2024) Materiales usados para realizar las muestras del concreto permeable.

Durante el proceso de elaboración del concreto se identificaron ciertos inconvenientes, los cuales complicaron la elaboración de las muestras, en el caso de las muestras con grava la pasta de cemento quedo demasiada fluida lo cual genero una segregación de la muestra evidenciada en la Figura 29.



Figura 29 (Ruiz, S;2024) Decantación por pasta muy fluida

En el caso de la muestra elaborada con residuos de construcción, se observó que la pasta resultante presentaba una consistencia seca Figura 30, adquiriendo una textura arenosa. Esto dificultó la adhesión de la pasta al agregado, lo que podría afectar la cohesión y resistencia final del material.



Figura 30 (Ruiz, S;2024) Caso de Mezcla seca y arenosa.

Una vez identificada la deficiencia en la adhesión de la pasta al agregado reciclado, se decidió modificar el diseño inicial mediante la implementación de una nueva matriz de mezcla. Para ello, se realizaron ajustes en la relación agua-cemento mediante un proceso de prueba y error, buscando una combinación óptima que mejorara la cohesión del concreto sin comprometer su resistencia estructural ni su capacidad de permeabilidad, dando como resultado las muestras evidenciadas en la Figura 31.



Figura 31 (Ruiz, S;2024) Muestras de concreto permeable.

6.2. Relación de vacíos

Se procede a pesar las muestras en estado seco y en estado sumergido, esto con el fin de sacar la relación de vacíos, la cual es un parámetro necesario en la definición de la capa de rodadura Figura 32.



Figura 32 (Ruiz, S;2024) Ensayo de peso sumergido

6.3. Permeabilidad

Primero se escogieron tres muestras de cada material ver Figura 33. Las cuales fueron marcadas con un punto de pintura blanca los de RCD para diferenciarlos.



Figura 33 (Ruiz, S;2024) Preparación de muestras.

Para la preparación de la bentonita se logró conseguir una textura similar a crema de maní esto ayudo a que se pudiera adherir a las capas laterales de las muestras ver Figura 34, pero una recomendación es realizar parte de bentonita más seca que pueda moldearse como plastilina para tener mejor control del llenado y evitar desperdicios ya que la textura obtenida complicaba la aplicación al pegarse a toda superficie



Figura 34 (Ruiz, S;2024) Aplicación de Bentonita hidratada.

Durante la depuración del aire puede que queden algunas burbujas de aire esto se puede solucionar sacudiendo ligeramente el contenedor donde se encuentra la muestra, al circular el agua se apuntó los valores medidos en la probeta Tabla 3 y Tabla 4. Donde cada muestra se nombró M con su respectiva numeración de acuerdo en el orden que se sometió a esta prueba.

Tabla 3 Volumen acumulado en intervalo de 30 segundos utilizando grava por cada muestra (M)

M1		M2		M3	
Vol (ml)	Seg	Vol (ml)	Seg	Vol (ml)	Seg
490	30	480	30	480	30
500	30	490	30	495	30
490	30	490	30	490	30

Tabla 4 Volumen acumulado en intervalo de 30 segundo utilizando RCD por cada muestra (M)

M1		M2		M3	
Vol (ml)	Seg	Vol (ml)	Seg	Vol (ml)	Seg
360	30	350	30	360	30
360	30	340	30	360	30
340	30	355	30	350	30

Se promediaron los datos obtenidos para tener un valor más representativo, ver tabla 5 y 6.

Tabla 5 Promedio volumen de agua pasante grava

Grava (ml)	
M1	493
M2	487
M3	488
PROMEDIO	489

Tabla 6 Promedio volumen de agua pasante grava

RCD (ml)	
M1	353
M2	350
M3	340
PROMEDIO	348

Después de revisar los resultados obtenidos podemos intuir que el agua circula más rápido por el concreto permeable a base de grava esto podría significar que sus poros y vacíos son de mayor tamaño.

Luego se procederá a pasar el volumen en masa tabla 7, para poder aplicar la Ecuación 1 Tasa de infiltración ASTM C1701/C1701M – 17a

Tabla 7 Peso en kg del agua que pasa por el sistema

GRAVA (KG)	0.489
RCD (KG)	0.348

$$I_G = \frac{458366.6000 * 0.489}{(100^2 * 0.083)} = 0.270$$

$$I_{RCD} = \frac{458366.6000 * 0.348}{(100^2 * 0.083)} = 0.192$$

I_G = Infiltración Grava; I_{RCD} = Infiltración RCD

6.4. Simulación del pavimento permeable en SWMM 5.2

Como se planteó anteriormente se usará como caso de estudio el parqueadero de visitantes de la universidad Javeriana Cali. Para empezar, pondremos nuestra vista en planta del parqueadero para usarlo como nuestra referencia de la simulación. Figura 35.

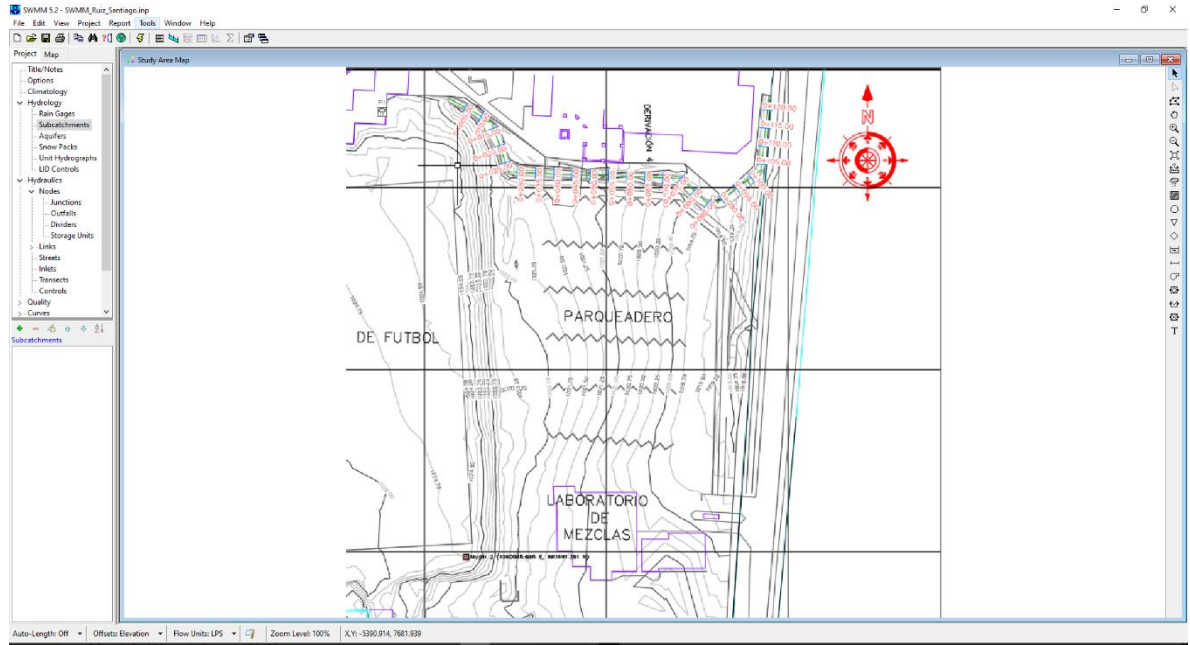


Figura 35 Plano en planta del parqueadero visitantes Universidad Javeriana Cali cargado en el programa SWMM

6.4.1 Definición condiciones de la simulación

Las condiciones generales del proyecto se definieron de manera de configurar todo lo que sería igual o general para los accesorios y sus respectivos nombres. Estos datos serán reflejados en tabla 8, Tabla 9 Y Tabla 10.

Tabla 8 Nombre de elementos hidráulicos

Object	ID Prefix
Rain Gages	PI
Subcatchments	SubA
Junctions	Poz
Outfalls	Salida
Conduits	Tub

Tabla 9 Parámetros generales áreas

Property	Default Value
% Slope	1.5
N-Imperv	0
N-Perv	0
Dstore_imperv	0.02

Dstore_Perv	0
%Zero.Imperv	0
Infiltration model	CURVE_NUMBER

Tabla 10 Parámetros generales Pozos y tuberías

Option	Default Value
Node Invert	0
Node max.Depth	0
Node Poned Area	0
Conduit length	0
Conduit Geometry	CIRCULAR
Conduit Roughness	0.007
Flow Units	LPS
Link Offsets	ELEVATION

6.4.2 Creación de lluvia

Primero debemos crear el pluviómetro seleccionando en la barra de herramientas e insertándolo en el área de trabajo, después en el editor de propiedades modificaremos las siguientes propiedades Tabla 11.

Tabla 11 Parámetros lluvia

Rain Format	INTENSITY
Time Interveal	0:10
Data Socurce	TIMESERIES
Rain Units	MM

Ahora se procede a generar la serie temporal denominada TR05anhos la cual contendrá los intervalos horarios e intensidades de lluvia para nuestro caso el cual seguirá la secuencia descrita en la Tabla 12.

Tabla 12 Secuencia de lluvia tasa de retorno 5 años

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
11/27/2022	0:10	13.6
11/27/2022	0:20	15.4
11/27/2022	0:30	18.1
11/27/2022	0:40	22.8
11/27/2022	0:50	34.1
11/27/2022	1:00	89.3
11/27/2022	1:10	47.2
11/27/2022	1:20	32.7
11/27/2022	1:30	26.2
11/27/2022	1:40	22.4
11/27/2022	1:50	19.9
11/27/2022	2:00	18
11/27/2022	2:10	16.5
11/27/2022	2:20	15.4
11/27/2022	2:30	14.4
11/27/2022	2:40	13.6
11/27/2022	2:50	12.9
11/27/2022	3:00	12.3
11/27/2022	3:10	0

6.4.3 Definición de áreas de la cuenca

Para nuestro caso se realizará una división del parqueadero en varios tramos para hacer más fácil su estudio generando un total de 12 áreas tal como se presencia en la Figura36.

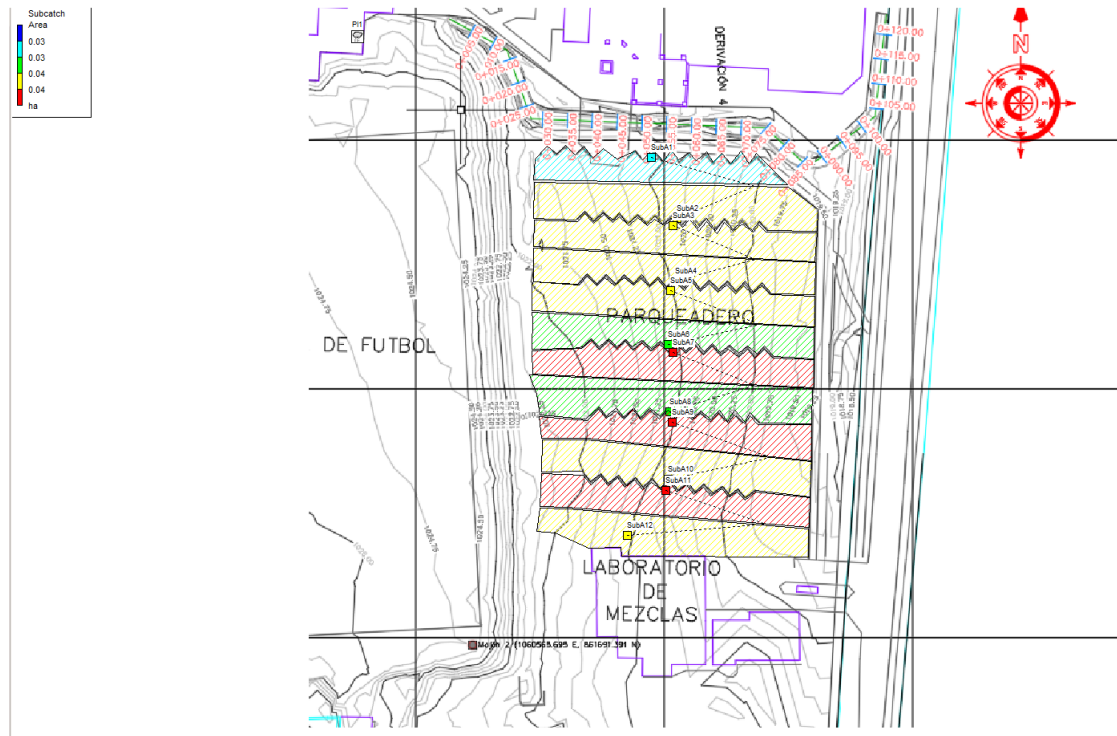


Figura 36 Definición de áreas de cuencas

Cada área tendrá sus respectivas propiedades las cuales se obtuvieron gracias al uso del programa civil 3D donde se calcularon sus respectivas longitudes y se ubicó de acuerdo con su topografía real ver Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15.

Tabla 13 Propiedades áreas

name	SubA1	SubA2	SubA3	SubA4	SubA5
Rain gage	PI1	PI1	PI1	PI1	PI1
outlet	Salida 1	Salida 1	Salida 1	Salida 1	Salida 1
Area (m)	283.791	371.965	353.123	363.802	391.047
Area (hect)	0.028	0.037	0.035	0.036	0.039
Witdh	7.62	7.0924	7.6496	6.8474	7.9209
%Slope	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
%Imperv	0	0	0	0	0
N-imperv	0	0	0	0	0
N-perv	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Dstore-imper	0	0	0	0	0
Dstore-perv	0	0	0	0	0
%Zero-imper	0	0	0	0	0
subarea					
Routing	OUTLET	OUTLET	OUTLET	OUTLET	OUTLET
Percent Routed	100	100	100	100	100

Infiltration data	Curve_Number	Curve_Number	Curve_Number	Curve_Number	Curve_Number
Groundwater	no	no	no	no	no
Snow pack	0	0	0	0	0
LID Controls	Varía según el caso (Grava o RCD)				
Land Uses	0	0	0	0	0
Initial Builddup	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE
Crub length	0	0	0	0	0
N-perv Pattern	0	0	0	0	0
Dstore Pattern	0	0	0	0	0
Infil. Pattern	0	0	0	0	0

Tabla 14 Propiedades áreas

name	SubA6	SubA7	SubA8	SubA9	SubA10
Rain gage	PI1	PI1	PI1	PI1	PI1
outlet	Salida 1	Salida 1	Salida 1	Salida 1	Salida 1
Area (m)	337.555	417.497	328.961	415.507	357.17
Area (hect)	0.034	0.042	0.033	0.042	0.036
Witdh	6.4335	8.7181	6.6267	8.432	7.5804
%Slope	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
%Imperv	0	0	0	0	0
N-imperv	0	0	0	0	0
N-perv	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Dstore-imper	0	0	0	0	0
Dstore-perv	0	0	0	0	0
%Zero-imper	0	0	0	0	0
subarea					
Routing	OUTLET	OUTLET	OUTLET	OUTLET	OUTLET
Percent Routed	100	100	100	100	100
Infiltration data	Curve_Number	Curve_Number	Curve_Number	Curve_Number	Curve_Number
Groundwater	no	no	no	no	no
Snow pack	0	0	0	0	0
LID Controls	Varía según el caso (Grava o RCD)				
Land Uses	0	0	0	0	0
Initial Builddup	NONE	NONE	NONE	NONE	NONE
Crub length	0	0	0	0	0
N-perv Pattern	0	0	0	0	0
Dstore Pattern	0	0	0	0	0
Infil. Pattern	0	0	0	0	0

Tabla 15 Propiedades áreas

name	SubA11	SubA12
Rain gage	PI1	PI1
outlet	Salida 1	Salida 1
Area (m)	398.846	374.955
Area (hect)	0.04	0.037
Witdh	7.4987	8.1163
%Slope	1.5	1.5
%Imperv	0	0
N-imperv	0	0
N-perv	0.02	0.02
Dstore-imper	0	0
Dstore-perv	0	0
%Zero-imper	0	0
subarea		
Routing	OUTLET	OUTLET
Percent Routed	100	100
Infiltration data	Curve_Number	Curve_Number
Groundwater	no	no
Snow pack	0	0
LID Controls	Varía según el caso (Grava o RCD)	
Land Uses	0	0
Initial Builddup	NONE	NONE
Crub length	0	0
N-perv Pattern	0	0
Dstore Pattern	0	0
Infil. Patttern	0	0

6.4.4 Creación de LID controls

En el apartado de LID controls seleccionaremos la opción de Permeable pavement y llenaremos todas las capas a excepción de la capa Soil*, esto es debido a que esta capa puede ser opcional (citar diapo) y solo nos interesa saber el comportamiento hidráulico de la capa de rodadura.

En el caso de la capa de rodadura a base de Grava se usaron los datos registrados en la Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 16 Parámetros capa de superficie modelo en Grava

· Surface Layer	
Berm Height (mm)	110
Vegetation Volume Fraction	0
Surface Roughness (maninings n)	0.1
Surface Slope (percent)	1

Tabla 17 Parámetros capa de pavimento o rodadura modelo en Grava

· Pavement Layer	
Thickness (mm)	110
Void Ratio	0.15
Impervious Surface Fraction	0
Permeability (mm/hr)	270
Clogging Factor	0
Regeneration Interval (days)	0
Regeneration Fraction	0

Tabla 18 Parámetros capa de almacenamiento modelo en Grava

· Storage Layer	
Thickness (mm)	300
Void Ratio	0.75
Seepage Rate (mm/hr)	0.5
Clogging Factor	0

Tabla 19 Parámetros capa de drenaje modelo en Grava

· Drain System	
Flow Coefficient	0.15
Flow Exponent	0.5
Offset	10

En el caso de la capa de rodadura a base de RCD se usaron los datos registrados en la Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23.

Tabla 20 Parámetros capa de superficie modelo en RCD

· Surface Layer	
Berm Height (mm)	110
Vegetation Volume Fraction	0
Surface Roughness (maninings n)	0.1
Surface Slope (percent)	1

Tabla 21 Parámetros capa de pavimento o rodadura modelo en RCD

· Pavement Layer	
Thickness (mm)	110
Void Ratio	0.15
Impervious Surface Fraction	0
Permeability (mm/hr)	192
Clogging Factor	0
Regeneration Interval (days)	0
Regeneration Fraction	0

Tabla 22 Parámetros capa de almacenamiento modelo en Grava

· Storage Layer	
Thickness (mm)	300
Void Ratio	0.75
Seepage Rate (mm/hr)	0.5
Clogging Factor	0

Tabla 23 Parámetros capa de drenaje modelo en RCD

· Drain System	
Flow Coefficient	0
Flow Exponent	0.5
Offset	6

6.4.5 Creación de pozos y tuberías

Por medio de la herramienta de Civil 3D se realizó el dibujo en planta y cotas de nivel que se debían tener encuneta nuestro caso de estudio Figura 37.

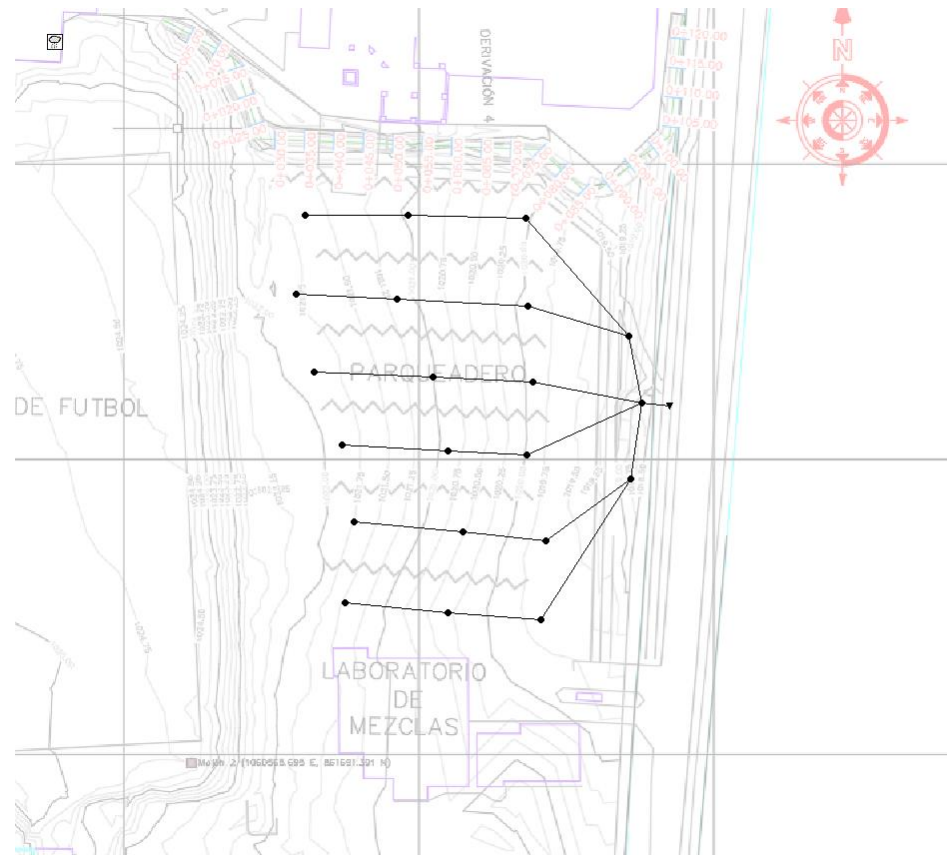


Figura 37 Vista en planta del parqueadero.

Para poder definir estos accesorios se deben calcular medidas reales de cada área y longitudes de tubería. También las cotas de nivel que debe tener cada pozo y las pendientes que tendrán cada tubería.

En el caso de las tuberías los parámetros de initial Flow, Máximum Flow, Entry Loss Coef, Exit Loss Coeff y Avg. Loss Coef, se definieron con valore cero porque no se consideró agua residual.

Dándonos como resultado las tablas 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31.

Tabla 24 Parámetros pozos

Name	Poz1	Poz2	Poz3	Poz4	Poz5
Inflows	NO	NO	NO	NO	NO
Treatment	NO	NO	NO	NO	NO
Invert El.	1020.7	1019.3	1018.8	1020.2	1019.1
Max Depth	1	1	1	1	1
Initial Depth	0	0	0	0	0
Pounded Area	0	0	0	0	0

Tabla 25 Parámetros pozos

Name	Poz6	Poz7	Poz8	Poz9	Poz10
Inflows	NO	NO	NO	NO	NO
Treatment	NO	NO	NO	NO	NO
Invert El.	1018.7	1021	1020	1018.8	1021
Max Depth	1	1	1	1	1
Initial Depth	0	0	0	0	0
Pounded Area	0	0	0	0	0

Tabla 26 Parámetros pozos

Name	Poz11	Poz12	Poz13	Poz14	Poz15
Inflows	NO	NO	NO	NO	NO
Treatment	NO	NO	NO	NO	NO
Invert El.	1019.9	1018.9	1021	1019.1	1018.7
Max Depth	1	1	1	1	1
Initial Depth	0	0	0	0	0
Pounded Area	0	0	0	0	0

Tabla 27 Parámetros pozos

Name	Poz16	Poz17	Poz18	Poz19	Poz20	Poz21
Inflows	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Treatment	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Invert El.	1020.7	1018.9	1018.1	1017.3	1017	1017.4
Max Depth	1	1	1	1	1	1
Initial Depth	0	0	0	0	0	0
Pounded Area	0	0	0	0	0	0

Tabla 28 Parámetros tuberías

Name	Tub1	Tub2	Tub3	Tub4	Tub5
Inlet Node	Poz1	Poz2	Poz4	Poz5	Poz7
Outlet Node	Poz2	Poz3	Poz5	Poz6	Poz8
Description					
Tag					
Shape	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR
Max. Depth	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Length	18.941	19.025	18.095	22.849	19.973
Roughness	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Inlet Offset	1020.7	1019.3	1020.2	1019.1	1021
Outlet Offset	1019.5	1019	1019.3	1018.85	1020.2
Initial Flow	0	0	0	0	0
Maximum Flow	0	0	0	0	0
Entry Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Exit Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Avg. Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Flap Gate	no	no	no	no	no

Culvert Code	no	no	no	no	no
Inlet Structure	no	no	no	no	no

Tabla 29 Parámetros tuberías

Name	Tub6	Tub7	Tub8	Tub9	Tub10
Inlet Node	Poz8	Poz10	Poz11	Poz13	Poz14
Outlet Node	Poz9	Poz11	Poz12	Poz14	Poz15
Description					
Tag					
Shape	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR
Max. Depth	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Length	17.493	19.025	12.43	18.461	16.604
Roughness	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Inlet Offset	1020	1021	1019.9	1020.95	1019.05
Outlet Offset	1019	1020.1	1019.05	1019.25	1018.9
Initial Flow	0	0	0	0	0
Maximum Flow	0	0	0	0	0
Entry Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Exit Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Avg. Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Flap Gate	no	no	no	no	no
Culvert Code	no	no	no	no	no
Inlet Structure	no	no	no	no	no

Tabla 30 Parámetros tuberías

Name	Tub11	Tub12	Tub13	Tub14	Tub15
Inlet Node	Poz16	Poz17	Poz18	Poz15	Poz12
Outlet Node	Poz17	Poz18	Poz21	Poz21	Poz20
Description					
Tag					
Shape	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR
Max. Depth	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Length	19.052	17.866	32.223	20.632	17.677
Roughness	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Inlet Offset	1020.7	1018.9	1018.1	1018.7	1018.85
Outlet Offset	1019.1	1018.3	1017.8	1017.8	1017.15

Initial Flow	0	0	0	0	0
Maximum Flow	0	0	0	0	0
Entry Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Exit Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Avg. Loss Coeff.	0	0	0	0	0
Flap Gate	no	no	no	no	no
Culvert Code	no	no	no	no	no
Inlet Structure	no	no	no	no	no

Tabla 31 Parámetros tuberías

Name	Tub16	Tub17	Tub18	Tub19	Tub20	Tub21
Inlet Node	Poz9	Poz6	Poz3	poz19	Poz21	Poz20
Outlet Node	Poz20	Poz19	Poz19	poz20	Poz20	salida
Description						
Tag						
Shape	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR	CIRCULAR
Max. Depth	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Length	15.814	16.079	24.305	13.017	5.763	9.6
Roughness	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Inlet Offset	1018.8	1018.65	1018.8	1017.3	1017.6	1016.95
Outlet Offset	1017.15	1017.5	1017.5	1017.15	1017.15	1016.81
Initial Flow	0	0	0	0	0	0
Maximum Flow	0	0	0	0	0	0
Entry Loss Coeff.	0	0	0	0	0	0
Exit Loss Coeff.	0	0	0	0	0	0
Avg. Loss Coeff.	0	0	0	0	0	0
Flap Gate	no	no	no	no	no	no
Culvert Code	no	no	no	no	no	no
Inlet Structure	no	no	no	no	no	no

6.4.6 Asignación de LID y simulación

Debemos de asignar un solo tipo de pavimento a cada área para cada caso de estudio esto nos dará un total de tres simulaciones donde dos son con el uso de pavimentos permeables y una tercera con un sistema de drenaje convencional.

Para nuestro primer caso el cual será un pavimento cuya capa de rodadura será a base de grava usaremos los datos reflejados en Tabla 32, una nota importante es que el valor de surface width per Unid es el mismo del ancho del área en este caso al no ser una figura uniforme se tomó el ancho más largo calculado.

Tabla 32 Parámetros de asignación Pavimento con capa de rodadura base de Grava

LID control name	Grava
LID Occupies full Subcatchment	si
surface width per Unid	varia por área
% initially saturated	0
% of imprevious Area Treated	0
% of Previous Area Treated	100

Para nuestro Segundo caso el cual será un pavimento cuya capa de rodadura será a base de RCD usaremos los datos reflejados en Tabla 33.

Tabla 33 Parámetros de asignación Pavimento con capa de rodadura base de RCD

LID control name	RCD
LID Occupies full Subcatchment	si
surface width per Unid	varia por área
% initially saturated	0
% of imprevious Area Treated	0
% of Previous Area Treated	100

Una vez ya definido cada parámetro de la simulación podemos proceder a simular cada una, un aporte importante es que SWMM te dice si hay algún error en alguna definición o en algún accesorio que no permite correr el programa, en caso de que no reporte ningún error pero el programa no corre como es debido o en el caso de que se no se presencie la interacción requerida entre los elementos podemos recurrir a copiar el archivo *.inp* que genera el programa y subirlo a una IA para que esta analice y busque alguna irregularidad.

En mi caso en particular presente un problema con la interacción entre el LID con el sistema de Drenaje ya que el pavimento permeable pese a estar creado y asignado no presentaba aportes o en caso se infiltraba toda la escorrentía y no llegaba nada a los pozos.

se procedió a abrir el lector de texto con el archivo *.inp* después se copió lo que estaba en este archivo y lo sometí a un análisis por medio de Chat GPT, Gemini, y Deepseek los cuales ayudan a encontrar ciertas irregularidades en el código y definición de los valores,

también generan aportes de optimización de la simulación en caso de que desees algo más específico.

6.4.6.1 Simulación en sistema de drenaje tradicional

En esta simulación se planteó un sistema de drenaje convencional en el cual las cuencas fueron consideradas impermeables, presentando así escorrentía superficial en el parqueadero la cual está reflejado en la Tabla 34.

Tabla 34 Reporte de escorrentía

Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Imperv Runoff mm	Perv Runoff mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 ⁶ ltr	Peak Runoff LPS	Runoff Coeff
SubA1	76.18	0.00	0.00	28.36	0.00	47.95	47.95	0.01	4.33	0.629
SubA2	76.18	0.00	0.00	28.36	0.00	47.95	47.95	0.02	5.55	0.629
SubA3	76.18	0.00	0.00	29.92	0.00	46.26	46.26	0.02	2.91	0.607
SubA4	76.18	0.00	0.00	30.21	0.00	45.96	45.96	0.02	2.85	0.603
SubA5	76.18	0.00	0.00	30.06	0.00	46.11	46.11	0.02	3.16	0.605
SubA6	76.18	0.00	0.00	30.21	0.00	45.96	45.96	0.02	2.68	0.603
SubA7	76.18	0.00	0.00	30.06	0.00	46.12	46.12	0.02	3.43	0.605
SubA8	76.18	0.00	0.00	30.06	0.00	46.11	46.11	0.02	2.66	0.605
SubA9	76.18	0.00	0.00	30.06	0.00	46.11	46.11	0.02	3.39	0.605
SubA10	76.18	0.00	0.00	30.06	0.00	46.12	46.12	0.02	2.95	0.605
SubA11	76.18	0.00	0.00	30.21	0.00	45.96	45.96	0.02	3.15	0.603
SubA12	76.18	0.00	0.00	29.92	0.00	46.26	46.26	0.02	3.08	0.607

Además, podemos ver que en la Tabla 35 se muestra el valor máximo que recibió cada pozo del sistema de drenaje.

Tabla 35 Reporte de volumen máximo en pozos sin LID controls

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 ⁶ ltr	Total Inflow Volume 10 ⁶ ltr	Flow Balance Error Percent
Poz1	JUNCTION	9.88	9.88	0	01:10	0.0312	0.0312	0.002
Poz2	JUNCTION	0.00	9.85	0	01:10	0	0.0312	0.004
Poz3	JUNCTION	0.00	9.82	0	01:10	0	0.0312	0.002
Poz4	JUNCTION	5.75	5.75	0	01:20	0.0327	0.0327	0.002
Poz5	JUNCTION	0.00	5.75	0	01:20	0	0.0327	0.002
Poz6	JUNCTION	0.00	5.74	0	01:20	0	0.0327	0.002
Poz7	JUNCTION	5.84	5.84	0	01:20	0.0336	0.0336	0.003
Poz8	JUNCTION	0.00	5.84	0	01:20	0	0.0336	0.002
Poz9	JUNCTION	0.00	5.84	0	01:20	0	0.0336	0.003
Poz10	JUNCTION	6.09	6.09	0	01:20	0.0346	0.0346	0.002
Poz11	JUNCTION	0.00	6.09	0	01:20	0	0.0346	0.002
Poz12	JUNCTION	0.00	6.08	0	01:20	0	0.0346	0.002
Poz13	JUNCTION	6.34	6.34	0	01:20	0.036	0.036	0.002
Poz14	JUNCTION	0.00	6.34	0	01:20	0	0.036	0.002
Poz15	JUNCTION	0.00	6.33	0	01:20	0	0.036	0.002
Poz16	JUNCTION	6.22	6.22	0	01:20	0.0355	0.0355	0.002
Poz17	JUNCTION	0.00	6.22	0	01:20	0	0.0355	0.002
Poz18	JUNCTION	0.00	6.22	0	01:20	0	0.0355	0.002
Poz19	JUNCTION	0.00	14.73	0	01:10	0	0.0639	0.002
Poz20	JUNCTION	0.00	36.47	0	01:20	0	0.203	0.000
Poz21	JUNCTION	0.00	12.54	0	01:20	0	0.0715	0.329
Salida1	OUTFALL	0.00	36.47	0	01:20	0	0.203	0.000

6.4.6.2 Simulación con capa de rodadura a base de grava

En esta simulación se incluyó el pavimento permeable con capa de rodadura a base de grava, en este al tener todas las áreas como superficie permeable no se presenta escorrentía, por lo cual para su análisis se revisará el comportamiento del LID control.

En la Tabla 36 podemos observar que en todas las áreas al tener los mismos parámetros de calibración almacenaron de los 76.18 mm de la precipitación un total de 30.48 mm representando el 45% de la precipitación, se infiltró al medio 11.50mm representando un 15% y se drenó hacia el sistema de pozos 34.34 mm representando un 40%.

Tabla 36 Reporte rendimiento PP a base de Grava

Subcatchment	LID Control	Total Inflow mm	Evap Loss mm	Infil Loss mm	Surface Outflow mm	Drain Outflow mm	Initial Storage mm	Final Storage mm	Continuity Error %
SubA1	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA2	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA3	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA4	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA5	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA6	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA7	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA8	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA9	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA10	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA11	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA12	Grava	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18

En la Tabla 37 se evidencia como la cantidad de agua que drena a los pozos disminuye significativamente.

Tabla 37 Reporte de volumen máximo en pozos Grava

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 ^{^6} ltr	Total Inflow Volume 10 ^{^6} ltr	Flow Balance Error Percent
Poz1	JUNCTION	0.37	0.37	0	03:15	0.0223	0.0223	0.029
Poz2	JUNCTION	0.00	0.37	0	03:15	0	0.0223	0.042
Poz3	JUNCTION	0.00	0.37	0	03:15	0	0.0223	0.033
Poz4	JUNCTION	0.41	0.41	0	03:15	0.0243	0.0243	0.030
Poz5	JUNCTION	0.00	0.41	0	03:15	0	0.0243	0.053
Poz6	JUNCTION	0.00	0.41	0	03:16	0	0.0243	0.027
Poz7	JUNCTION	0.42	0.42	0	03:15	0.025	0.025	0.032
Poz8	JUNCTION	0.00	0.42	0	03:15	0	0.025	0.028
Poz9	JUNCTION	0.00	0.42	0	03:15	0	0.025	0.025
Poz10	JUNCTION	0.43	0.43	0	03:15	0.0257	0.0257	0.029
Poz11	JUNCTION	0.00	0.43	0	03:15	0	0.0257	0.029
Poz12	JUNCTION	0.00	0.43	0	03:15	0	0.0257	0.025
Poz13	JUNCTION	0.45	0.45	0	03:15	0.0267	0.0267	0.024
Poz14	JUNCTION	0.00	0.45	0	03:15	0	0.0267	0.040
Poz15	JUNCTION	0.00	0.45	0	03:15	0	0.0267	0.030
Poz16	JUNCTION	0.44	0.44	0	03:15	0.0264	0.0264	0.025
Poz17	JUNCTION	0.00	0.44	0	03:15	0	0.0264	0.031
Poz18	JUNCTION	0.00	0.44	0	03:15	0	0.0264	0.066
Poz19	JUNCTION	0.00	0.78	0	03:16	0	0.0466	0.033
Poz20	JUNCTION	0.00	2.52	0	03:16	0	0.15	0.011
Poz21	JUNCTION	0.00	0.89	0	03:16	0	0.0531	0.460
Salida1	OUTFALL	0.00	2.52	0	03:16	0	0.15	0.000

6.4.6.3 Simulación con capa de rodadura a base de RCD

En esta simulación se incluyó el pavimento permeable con capa de rodadura a base de RCD, en este al tener todas las áreas como superficie permeable no se presenta escorrentía, por lo cual para su análisis se revisará el comportamiento del LID control.

En la Tabla 38 podemos observar que tuvo un comportamiento similar al pavimento permeable con capa de rodadura a base de Grava presentando los mismos valores de almacenaje, drenado e infiltración. Donde se almaceno el 45% de la precipitación, se infiltró el 15% y se drenó hacia el sistema de pozos el 40%.

Tabla 38 Reporte rendimiento PP a base de RCD

Subcatchment	LID Control	Total Inflow mm	Evap Loss mm	Infil Loss mm	Surface Outflow mm	Drain Outflow mm	Initial Storage mm	Final Storage mm	Continuity Error %
SubA1	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA2	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA3	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA4	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA5	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA6	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA7	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA8	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA9	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA10	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA11	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18
SubA12	RCD	76.18	0.00	11.50	0.00	34.34	0.00	30.48	-0.18

De igual manera podemos ver en la Tabla 39 también se redujo el volumen drenado a los pozos.

Tabla 39 Reporte de volumen máximo en pozos RCD

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 ^{^6} ltr	Total Inflow Volume 10 ^{^6} ltr	Flow Balance Error Percent
Poz1	JUNCTION	0.37	0.37	0	03:15	0.0223	0.0223	0.029
Poz2	JUNCTION	0.00	0.37	0	03:15	0	0.0223	0.042
Poz3	JUNCTION	0.00	0.37	0	03:15	0	0.0223	0.033
Poz4	JUNCTION	0.41	0.41	0	03:15	0.0243	0.0243	0.030
Poz5	JUNCTION	0.00	0.41	0	03:15	0	0.0243	0.053
Poz6	JUNCTION	0.00	0.41	0	03:16	0	0.0243	0.027
Poz7	JUNCTION	0.42	0.42	0	03:15	0.025	0.025	0.032
Poz8	JUNCTION	0.00	0.42	0	03:15	0	0.025	0.028
Poz9	JUNCTION	0.00	0.42	0	03:15	0	0.025	0.025
Poz10	JUNCTION	0.43	0.43	0	03:15	0.0257	0.0257	0.029
Poz11	JUNCTION	0.00	0.43	0	03:15	0	0.0257	0.029
Poz12	JUNCTION	0.00	0.43	0	03:15	0	0.0257	0.025
Poz13	JUNCTION	0.45	0.45	0	03:15	0.0267	0.0267	0.024
Poz14	JUNCTION	0.00	0.45	0	03:15	0	0.0267	0.040
Poz15	JUNCTION	0.00	0.45	0	03:15	0	0.0267	0.030
Poz16	JUNCTION	0.44	0.44	0	03:15	0.0264	0.0264	0.025
Poz17	JUNCTION	0.00	0.44	0	03:15	0	0.0264	0.031
Poz18	JUNCTION	0.00	0.44	0	03:15	0	0.0264	0.066
Poz19	JUNCTION	0.00	0.78	0	03:16	0	0.0466	0.033
Poz20	JUNCTION	0.00	2.52	0	03:16	0	0.15	0.011
Poz21	JUNCTION	0.00	0.89	0	03:16	0	0.0531	0.460
Salida1	OUTFALL	0.00	2.52	0	03:16	0	0.15	0.000

6.4.8. Análisis general

Para tener una perspectiva más localizada tomaremos como referencia un perfil de drenaje ver Figura 38, compararemos el comportamiento de dicho drenaje en la hora con flujo crítico. El cual está conformado por los pozos 1,2,3,19,20 y salida. Ver Figuras 38 ,39, 40 y 41.

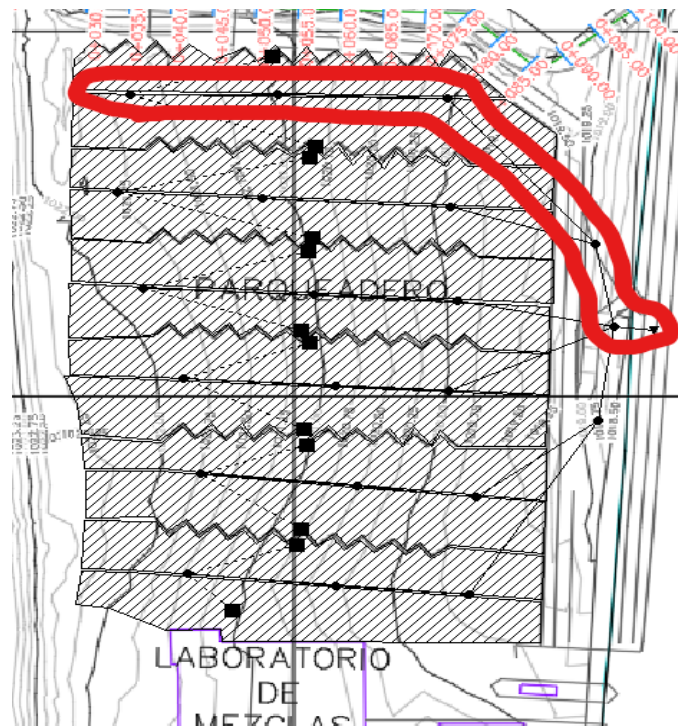


Figura 38 Perfil a estudiar.

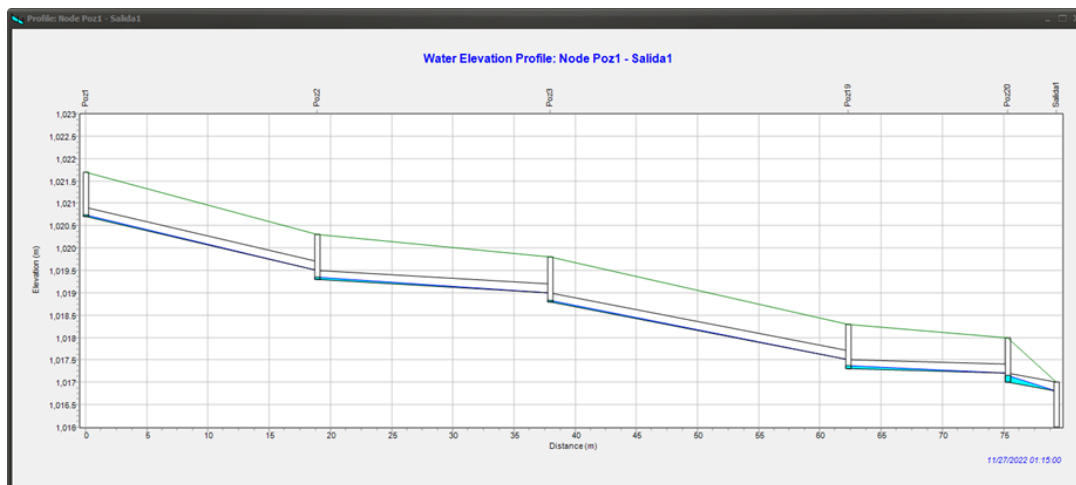


Figura 39 Perfil de drenaje sin LID control.

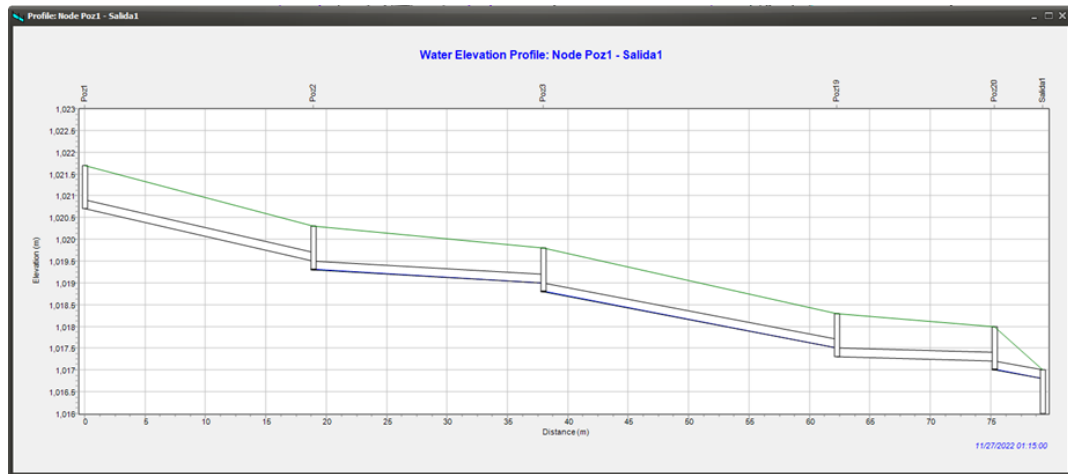


Figura 40 Perfil de drenaje con capa de rodadura a base de Grava

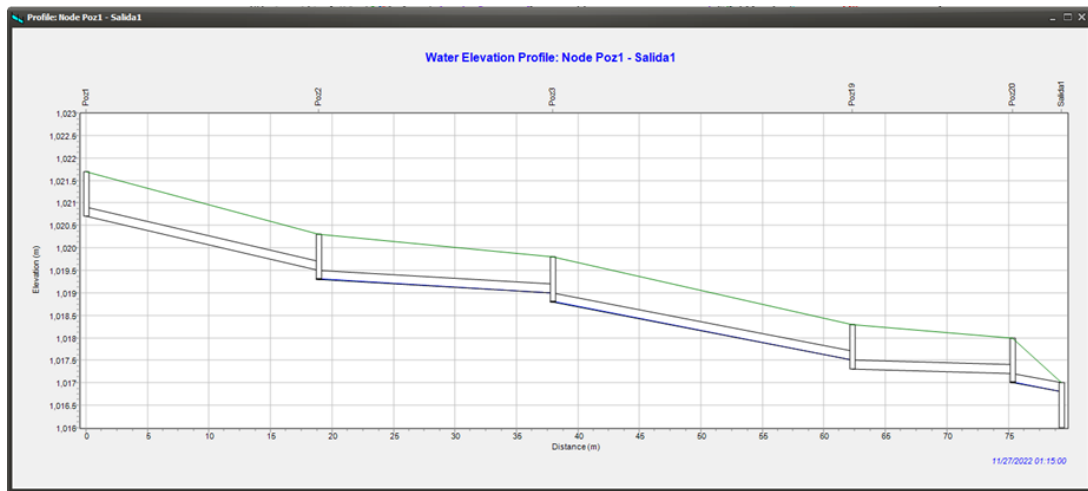


Figura 41 Perfil de drenaje con capa de rodadura a base de RCD.

A simple vista podemos ver como la cantidad de agua presente en el sistema de drenaje el cual es representado con el color azul es menor en los sistemas de pavimentos permeables en comparación al drenaje tradicional, en el siguiente caso visualizaremos el tramo entre el pozo 3 y 19 para dar una vista más simplificada ver Figuras 42, 43 y 44.

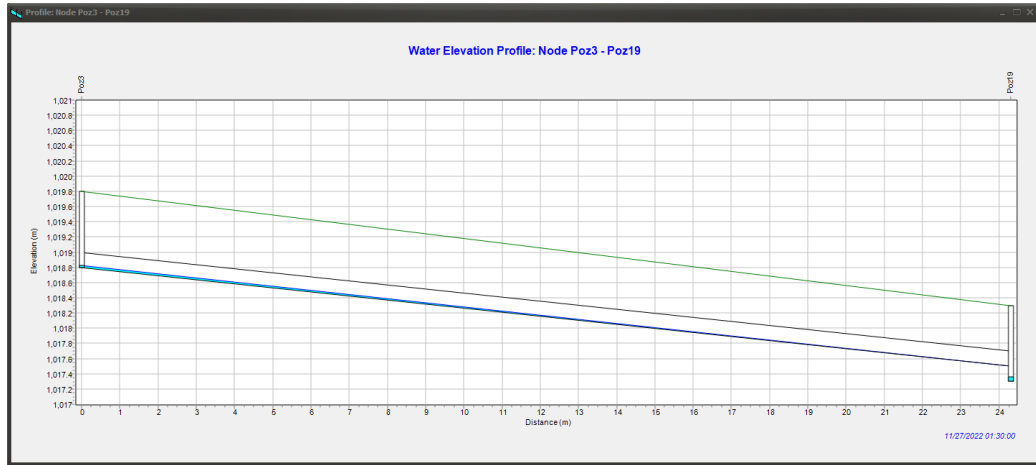


Figura 42 Perfil de pozo 3 a 19 sin LID control.

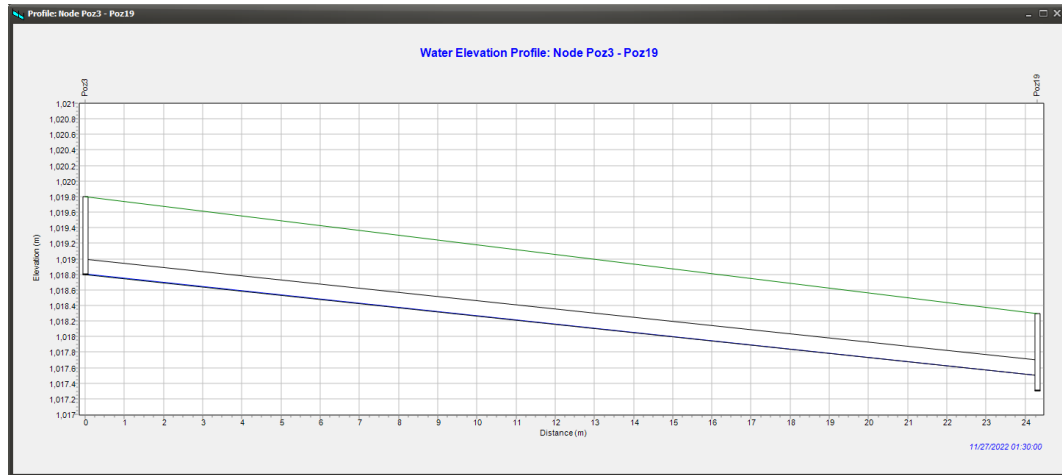


Figura 43 Perfil de pozo 3 a 19 con capa de rodadura a base de RCD.

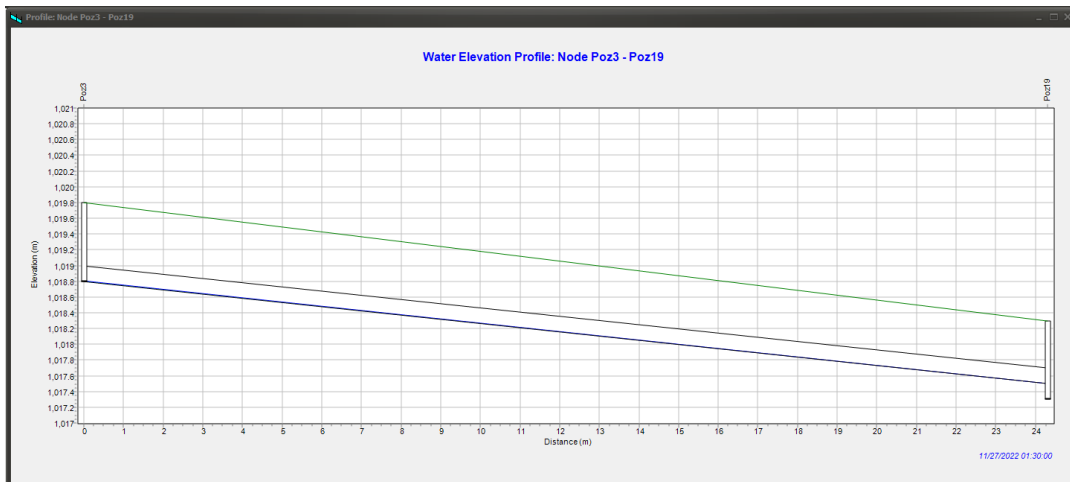


Figura 44 Perfil de pozo 3 a 19 con capa de rodadura a base de Grava.

En adición revisando los datos obtenidos anteriormente en las tablas nos damos cuenta de cómo el comportamiento hidráulico de los dos elementos de pavimento permeables es muy similar incluso parecido, dando a entender que el RCD puede remplazar sin problema alguno a la grava en la elaboración de pavimentos permeables a base de concreto permeable.

Podemos observar que presentaron un mejor manejo en el control de aguas lluvias lo que podría ayudar a prevenir los colapsos que se pueden presentar el drenaje causado por las crecientes lluvias que se han estado presentando en nuestra actualidad.

Esto en caso de pasarlo a la realidad podría disminuir costos en productos provenientes cantera, además de cumplir con las cuotas o metas de sostenibilidad en el manejo adecuado de aguas lluvias.

7. RECOMENDACIONES

Profundizar en el estudio de calidad de agua ya que este estudio se desarrolló solo enfocándose en el comportamiento hidrológico e hidráulico.

Realizar estudios de las condiciones técnicas y vida útil de los SuDS, para evaluar factores de mantenimiento, desgaste, y efectividad a medida del uso de estos mismos.

Implementar un sistema en escala real que sea sometido a el paso de vehículos, exposición solar y de la lluvia, para obtener datos ligados a un contexto más amplio.

Incentivar a la academia y entidades gubernamentales para crear estándares y estatutos de materiales alternativos y sistemas de drenaje sostenible en el país.

8. CONCLUSIONES.

La efectividad hidráulica de estos sistemas construidos con material alternativo puede ser un gran aporte para el desarrollo urbano y puede llegar a mejorar y promover una nueva era esto a que se evidencio que puede reducir hasta un 40% la ocupación de los pozos del sistema de drenaje.

La adopción de estos sistemas debe de estudiarse más profundidad para crear estrategias y aportes significativos que ayuden a combatir los diversos inconvenientes respecto a la gestión de aguas pluviales.

En conclusión, la implementación de SuDS elaborados con materiales alternativos es una propuesta prometedora la cual debe de promoverse con campañas y normativas adecuadas además de una constante investigación de estos sistemas.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

American Concrete Institute, Report on Pervius Concrete ACI 522R-10, Farmington, USA, 2010.

American Concrete Institute, Specification for Pervius Concrete. ACI 522.1-08, Farmington, USA, 2008.

American Society for Testing and Materials, Pervious Concrete, Standarization, News, October 2006, pp 16

Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2022). Design for Adaptability (DfA)— Frameworks and Assessment Models for Enhanced Circularity in Buildings. *Applied System Innovation*, 5(1), 24. <https://doi.org/10.3390/asi5010024>

Bertrand-Krajewski, J.-L. (2021). Integrated urban stormwater management: Evolution and multidisciplinary perspective. *Journal of Hydro-Environment Research*, 38, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2020.11.003>

Cely, P. M. R. (2018). *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE: CASO DE ESTUDIO PARQUE METROPOLITANO SAN CRISTÓBAL SUR.*

Charlesworth, S. M., Nnadi, E., Oyelola, O., Bennett, J., Warwick, F., Jackson, R., & Lawson, D. (2012). Laboratory based experiments to assess the use of green and food based compost to improve water quality in a Sustainable Drainage (SUDS) device such as a swale. *Science of The Total Environment*, 424, 337-343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.075>

Cheng, J. T. S., Jiang, I.-M., & Liu, Y.-H. (2015). Technological Innovation, Product Life Cycle and Market Power: A Real Options Approach. *International Journal of*

Information Technology & Decision Making, 14(01), 93-113.

<https://doi.org/10.1142/S0219622014500874>

Chung, E. (2018, 19 abril). *Exercise of Low Impact Development Simulation in SWMM*

5.1 [Diapositivas]. slideshare. <https://es.slideshare.net/slideshow/swmm-example-3-low-impact-development-94400602/94400602>

Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y. & Esteban-Parra, M. J. (2015). Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change*, 124.

<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.003>

Cortés Oyanedel, J. M. (2014). *Modelación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*

(SUDS), usando SWMM 5.1 [Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil, Universidad de Valparaíso].

<https://repositoriobibliotecas.uv.cl/serveruv/api/core/bitstreams/3b3f7dae-f8fe-4fa3-ab49-e8c6eaa3cd7f/content>

Díaz, B. H., & Llorente, O. M. (2014). *DISEÑO DE UN CAMPO DE PRUEBA PILOTO DE PAVIMENTOS PERMEABLES EN LA CIUDAD DE CARTAGENA.*

Díaz, B. H., & Llorente, O. M. (2014). *DISEÑO DE UN CAMPO DE PRUEBA PILOTO DE PAVIMENTOS PERMEABLES EN LA CIUDAD DE CARTAGENA.*

Dickinson, R. (2015, 28 febrero). *How do you define LID Low Impact Development Control Units in InfoSWMM, SWMM5 and H2OMap SWMM* [Vídeo]. YouTube.

https://youtu.be/FFrpcdBk81I?si=qYrBo0e5twBqFb_t

Example 10. LID Controls. (2021, 22 junio). Innovyze.

<https://help.innovyze.com/space/infoswmm/17596691/Example+10.+LID+Controls>

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale,

S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S.,

Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage.

Urban Water Journal, 12(7), 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

García-Ochoa, J. A., Quito-Rodríguez, J. C., & Moreno, J. A. P. (s. f.). Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente.

González Hernández, I. J. (2015). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Escuela Superior de Ciudad Sahagún. Obtenido de Simulación:

<https://slideplayer.es/slide/5515603/>

Hong, Y.-M. (2021). The simplified design method of permeable pavement system for urban catchment. *Environmental Challenges*, 2, 100014.

<https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100014>

Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. & Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018>

<https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/211/>

Illman, S., & Wilson, S. (s. f.). *Guidance on the construction of SuDs*.

Jiménez Ariza, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P.,

Camacho, L. A., & Díaz-Granados, M. (2019). A Multicriteria Planning Framework to

Locate and Select Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Consolidated Urban

Areas. *Sustainability*, 11(8), 2312. <https://doi.org/10.3390/su11082312>

Kazemi, F., & Hill, K. (2015). Effect of permeable pavement basecourse aggregates on stormwater quality for irrigation reuse. *Ecological Engineering*, 77, 189-195.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.020>

Leite, F. R., & Antunes, M. L. P. (2023). Green roof recent designs to runoff control: A review of building materials and plant species used in studies. *Ecological Engineering*, 189, 106924. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106924>

Masseck, T., París-Viviana, O., Habibi, S., & Pons-Valladares, O. (2024). Integrated sustainability assessment of construction waste-based shading devices for the refurbishment of obsolete educational public building stock. *Journal of Building Engineering*, 87, 109024. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.109024>

Mays, Larry W., ed. 2001. Stormwater Collection Systems Design Handbook. 1st ed. New York: McGRAW-HILL. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071354714>

Morote, A., Enrique, C., Ulloa, B., Carlos, J., Carrillo, T., & Victoria, A. (s. f.). *Para optar el título profesional de Ingeniero Civil*.

Mouritz, M. (1996). Sustainable urban water systems: policy and professional praxis. . Nam, B. H. (s. f.). *Field Study of Recycled Concrete Aggregate in French Drain*.

Orsini, F., & Marrone, P. (2019). Approaches for a low-carbon production of building materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118380>

Pla, C., Benavente, D., Valdes-Abellan, J., & Kovacova, Z. (2021). Effectiveness of two lightweight aggregates for the removal of heavy metals from contaminated urban stormwater. *Journal of Contaminant Hydrology*, 239, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103778>

Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Green-ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), 62-70.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62))

Rossman, L. A. (s. f.). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1.*

Selbig, W. R., Buer, N., & Danz, M. E. (2019). Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems. *Journal of Environmental Management*, 251, 109510.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109510>

Singer, M. N., Hamouda, M. A., El-Hassan, H., & Hinge, G. (2022). Permeable Pavement Systems for Effective Management of Stormwater Quantity and Quality: A Bibliometric Analysis and Highlights of Recent Advancements. *Sustainability*, 14(20), 13061. <https://doi.org/10.3390/su142013061>

Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., & Méndez, G. (2021). Integration of the circular economy paradigm under the just and safe operating space narrative: Twelve operational principles based on circularity, sustainability and resilience. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129071>

Sustainability (Switzerland), 13(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su13031350>

Torres-Guevara, L. E., Prieto-Sandoval, V., & Mejia-Villa, A. (2021). Success drivers for implementing circular economy: A case study from the building sector in colombia.

Van Der Zwaag, M., Wang, T., Bakker, H., Van Nederveen, S., Schuurman, A. C. B., & Bosma, D. (2023). Evaluating building circularity in the early design phase. *Automation in Construction*, 152, 104941. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104941>

Woods-Ballard, B., Udale-Clarke, H. & Kellagher, R. (2016). International approaches to the hydraulic control of surface water runoff in mitigating flood and environmental risks. . <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160712004>

Zan, R., Stirling, R., Blackburn, A., Walsh, C., & Werner, D. (2024). Activated carbon amendment of sand in the base of a permeable pavement reduces total nitrogen and nitrate leaching. *Science of The Total Environment*, 931, 172831. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172831>

Zhang, Q., Miao, L., Wang, X., Liu, D., Zhu, L., Zhou, B., Sun, J., & Liu, J. (2015). The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning*, 144, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.017>