



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Vías Terrestres y Movilidad

**EL PAVIMENTO PERMEABLE COMO ESTRUCTURA DE FILTRACION DE
AGUA PLUVIAL PARA UNA POSIBLE REUTILIZACION HUMANA EN MEXICO.**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Vías
Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Luis Antonio Castro Contreras

Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

Centro universitario, Querétaro, Qro.
2023
México



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



El pavimento permeable como estructura de filtración
de agua pluvial para una posible reutilización humana
en México.

por

Luis Antonio Castro Contreras

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](#).

Clave RI: IGMAC-302343



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Vías Terrestres y Movilidad

EL PAVIMENTO PERMEABLE COMO ESTRUCTURA DE FILTRACIÓN DE AGUA PLUVIAL PARA UNA POSIBLE REUTILIZACIÓN HUMANA EN MÉXICO.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Luis Antonio Castro Contreras

Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

SINODALES

Dr. Eusebio Jr Ventura Ramos
Presidente

Dr. Saul Antonio Obregón Biosca
Secretario

Dr. Omar Chávez Alegría
Vocal

M. Roberto I. Hernández Domínguez
Suplente

Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López
Suplente

Dra. Manuel Toledano Anaya
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca
Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro universitario
Querétaro, Qro.
2023
México

RESUMEN

Problemáticas actuales como el cambio climático, el aumento en la demanda hídrica, la sobre explotación del manto acuífero y el déficit en la recarga del mismo, han generado que actualmente se viva una crisis en cuanto a la disponibilidad de agua a nivel mundial, y esto ha derivado en problemas de salud, tal como muertes y enfermedades. Razón por la cual se han generado nuevas alternativas para el abastecimiento del líquido vital mediante la implementación de sistemas de reutilización de agua pluvial. Por esto la presente investigación evalúa la implementación de un sistema de pavimentos permeables como una solución para brindar una reutilización al escurrimiento de agua pluvial generando una mejora en la calidad del agua del efluente. Con ayuda de investigaciones previas se diseñan y construyen tres diferentes estructuras de pavimento permeable, modificando el tamaño de agregado utilizado en cada una. Se analiza la reducción en los niveles de concentración de coliformes fecales, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno, contaminantes mencionados en la NOM-003-ECOL-1997 y en la Guía para la reutilización del agua de la Agencia de Protección Ambiental, las cuales regulan el re uso de agua tratada en México y Estados Unidos, respectivamente. Se realizó la recolección de una muestra de agua pluvial para ser analizada y se realizó la filtración a través de las tres estructuras de pavimento permeable. Las muestras filtradas fueron recolectadas 1, 144 y 244 horas posterior al filtrado para analizar la influencia de los agregados a través de la capa de almacenamiento. En el caso de todos los contaminantes se pudo lograr la reducción en el nivel de concentración, excepto para los coliformes fecales. Las estructuras tuvieron diferentes desempeños siendo la estructura C la que presentó el mejor rendimiento, y a pesar de que ninguna estructura logró el cumplimiento total de las normativas el resultado es alentador para la implementación de este tipo de sistemas, ya que la mayoría de las reducciones se ubicaron alrededor del 80%.

Palabras clave: Pavimento permeable, calidad del agua, reutilización de aguas pluviales.

SUMMARY

Problems such as climate change, the increasing water demand, the overexploitation of the aquifer and the deficit in its recharge, have generated a crisis in terms of the availability of worldwide water, and this has led to health problems, such as deaths and illnesses. Because of this, new alternatives have been generated for the supply of vital liquid through the implementation of rainwater reuse systems. The present investigation evaluates the implementation of a permeable pavement system as a solution to provide a reuse to the runoff water, generating an improvement in the quality of the effluent water. With the help of previous investigations, three different pervious pavement structures are designed and built, modifying the size of aggregate used in each one. The reduction in the concentration levels of fecal coliforms, grease and oils, total suspended solids and biochemical oxygen demand was analyzed. This pollutants are mentioned in NOM-003-ECOL-1997 and in the Guide for the reuse of water from the Environmental Protection Agency, which regulate the reuse of treated water in Mexico and the United States, respectively. A sample of rainwater was collected to be analyzed and filtrated through the three permeable pavement structures. The filtered samples were collected 1, 144 and 244 hours after filtering to analyze the influence of the aggregates through the storage layer. In the case of all contaminants, the reduction in the concentration level could be achieved, except for fecal coliforms. The structures had different performances, being structure C the one that presented the best performance, and despite the fact that no structure achieved full compliance with the regulations, the result is encouraging for the implementation of this type of system, since most of the reductions were located about 80%.

Keywords: Permeable pavement, water quality, reuse of rainwater.

DEDICATORIAS

AGRADECIMIENTOS

INDICE GENERAL

1. Introducción.....	12
1.1. Justificación.....	14
1.2. Descripción del problema.....	17
1.3. Hipótesis y objetivo.....	19
1.3.1. Hipótesis.....	19
1.3.2. Objetivo.....	19
2. Estado del arte.....	20
2.1. Sistemas de aprovechamiento de agua pluvial.....	20
2.1.1. Sistemas domésticos de control y captación de agua de lluvia.....	21
2.1.2. Sistema urbano de drenaje sostenible (SuDS).....	25
2.1.3. Sistemas de recuperación de agua con pavimentos permeables.....	28
2.2. Los pavimentos.....	31
2.2.1. Pavimentos flexibles.....	31
2.2.2. Pavimentos rígidos.....	32
2.2.3. Pavimentos compuestos.....	34
2.3. Los pavimentos permeables.....	34
2.3.1. Cálculos matemáticos.....	39
2.3.2. Pruebas en laboratorio.....	42
2.3.3. Pruebas en campo.....	43
2.3.4. Comparativas.....	47
2.3.5. Calidad del agua en sistemas de pavimentos permeables.....	48
2.4. Requerimiento de calidad para el reúso.....	49
3. Metodología.....	51

3.1. Diagrama.....	51
3.2. Primera etapa. Diseño de estructuras	54
3.3. Segunda etapa. Construcción de los especímenes	59
3.4. Tercera etapa. Captación de las muestras de control	62
3.5. Cuarta etapa. Filtrado del escurrimiento a través de los pavimentos.	62
3.6. Quinta etapa. Recolección de muestras filtradas.	62
3.7. Sexta etapa. Análisis y comparativa del agua filtrada	63
4. Resultados	64
4.1. Diseño y construcción de las estructuras	64
4.2. Sitio de estudio y toma de muestra de control.....	69
4.3. Calidad de agua obtenida y comparativa con la normativa	73
5. Conclusiones.....	87
5.1 Investigaciones futuras.....	89
6. Referencias	91
7. Anexos	100
7.1. Análisis de laboratorio	100

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Límites máximos establecidos en la normativa aplicable.....	50
Tabla 3.1. Estructuras utilizadas por Hammes <i>et al.</i> (2018).	55
Tabla 3.2. Mallas utilizadas para el tamizado.	61
Tabla 4.1. Tabla comparativa de las estructuras utilizadas.	65
Tabla 4.2. Diseño de estructuras.	67
Tabla 4.3. Diseño de estructuras.	74
Tabla 4.4. Porcentajes de reducción de sólidos suspendidos totales.	75
Tabla 4.5. Porcentajes de reducción de grasas y aceites.	78
Tabla 4.6. Porcentajes de reducción de DBO.	81
Tabla 4.7. Cumplimiento con la NOM-003-ECOL-1993.	85
Tabla 4.8. Cumplimiento con la Guía para el reúso del agua – EPA.	86

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema doméstico de captación de agua de lluvia (1).	22
Figura 2.2. Sistema doméstico de captación de agua de lluvia (2).	23
Figura 2.3. Beneficios de los SuDS.	26
Figura 2.4. Sistema con pavimento permeable (1).	29
Figura 2.5. Sistema con pavimento permeable (2).	30
Figura 2.6. Estructura del pavimento flexible.	32
Figura 2.7. Estructura de pavimento rígido.	33
Figura 2.8. Estructura de concreto permeable.	35
Figura 2.9. Estructura de pavimento permeable con asfalto.	35
Figura 2.10. Estructura de pavimento permeable con adoquín.	36
Figura 2.11. Pavimento poroso de vidrio reciclado.	36
Figura 2.12. Estructura de pavimento permeable (1).	44
Figura 2.13. Estructura de pavimento permeable (3).	46
Figura 2.14. Estructura de pavimento permeable (4).	47
Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología.	51
Figura 3.2. Estructura de pavimento permeable (2).	57
Figura 3.3. Reducción de zinc total (Myers <i>et al.</i> , 2011).	58
Figura 3.4. Curva granulométrica de tercer capa filtro de estructura A.	60
Figura 4.1. Estructura base de la experimentación.	66
Figura 4.2. Proceso de compactación.	68
Figura 4.3. Ejemplo de los especímenes construidos.	69
Figura 4.4. Sitio de estudio.	70
Figura 4.5. Recolección de muestras.	71
Figura 4.6. Muestra de control.	72
Figura 4.7. Muestra filtrada.	73
Figura 4.8. Niveles de concentración de sólidos suspendidos totales.	76
Figura 4.9. Tendencia de la concentración de sólidos suspendidos totales.	77

Figura 4.10. Niveles de concentración de grasas y aceites.....	79
Figura 4.11. Tendencia de la concentración de grasas y aceites..	80
Figura 4.12. Niveles de concentración de la DBO.....	82
Figura 4.13. Tendencia de la concentración de la DBO.	83

Capítulo 1

1. Introducción

El crecimiento poblacional junto con el crecimiento económico y la urbanización, han agudizado el problema de la disponibilidad del agua, ya que cada vez la recarga del manto acuífero es menor. Debido a las necesidades cotidianas como transporte y vivienda, se han reemplazado superficies permeables como áreas verdes; por superficies impermeables como vialidades, banquetas y andadores. Este cambio genera problemas que afectan al medio ambiente, como el fenómeno de islas de calor urbano, grandes volúmenes de los escurrimientos, inundaciones y una baja tasa de infiltración al subsuelo (Fassman y Blackbourn, 2010; Mullaney y Lucke, 2013; Vujovic *et al.*, 2021).

Es por esto que recientemente se han puesto a prueba nuevos sistemas que aporten a la solución de estos problemas, tal como los sistemas de pavimento permeable. Se ha demostrado que la utilización de los pavimentos permeables puede generar muchos beneficios como reducción de ruido, reducción en la escorrentía, reducción de la descarga de agua al drenaje y generar un aprovechamiento para la escorrentía pluvial. Lo cual ayudaría a generar una reducción en el consumo de agua de primer uso al brindar una reutilización al agua pluvial.

Para lograr esta reutilización es necesario garantizar la calidad del efluente de agua, al cuidar las cargas contaminantes que adquiere el escurrimiento de las superficies impermeables como sólidos suspendidos totales, metales pesados, cloruros, hidrocarburos, bacterias y nutrientes como menciona Sambito *et al.* (2021). Razón por la cual se debe generar un sistema capaz de filtrar y mejorar la calidad del agua, al punto que esta pueda cumplir con las normativas que establecen límites máximos de contaminantes en cada región o país. En México estos límites son mencionados en la NOM-003-ECOL-1997, la cual establece los límites máximos permisibles de

contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Hasta el momento se han ensayado diferentes estructuras capaces de almacenar y filtrar el agua para que esta pueda ser reutilizada. Esta experimentación cambia, ya que en algunos casos se ponen a prueba estructuras diferentes, pero en algunos otros casos solamente se analiza el cambio de tamaño de agregado y espesores. Hasta el momento solamente se ha logrado, que el agua obtenga la calidad necesaria para que sea utilizada en servicios como riego de jardines y lavado de vehículos, por lo que esta investigación tiene el objetivo de aumentar la reducción de sólidos suspendidos totales, coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), grasas y aceites para que el agua tenga una mayor posibilidad de reúso.

Es por esto que, a través del diseño y construcción de tres diferentes especímenes de prueba, se analiza el comportamiento de los contaminantes y la variación en su concentración a través de diferentes tiempos de almacenamiento dentro de la estructura. Se pretende obtener una estructura capaz de lograr una filtración que permita que el agua sea reutilizada en servicios al público, con la finalidad de reducir la demanda hídrica y de esta manera aminorar los problemas generados por el cambio de superficies.

1.1. Justificación

Actualmente en el planeta se vive un problema, ya que el consumo hídrico ha ido en aumento (CIRIA, 2015), debido al crecimiento poblacional y la irregular distribución del recurso hídrico. Razón por la cual es necesario que se implementen acciones que mitiguen el daño generado en el medio ambiente.

Distintos autores, como Moretti *et al.* (2019), han puesto a prueba técnicas para el abastecimiento del agua, y de esta manera reducir el consumo de agua de primer uso y la sobre explotación del acuífero. Field *et al.* (1982) establecen que la reutilización de aguas pluviales debe ser considerada como una fuente emergente de suministro de agua. Por lo que se han desarrollado distintos sistemas para aprovechar esta agua pluvial, tales como sistemas domésticos (Palla *et al.*, 2017), sistemas urbanos de drenaje sostenible (SuDS) o sistemas compuestos de pavimentos permeables (Joon, 2017). Estas técnicas nos brindan beneficios como la captación de agua de lluvia, filtración de agua, disminución de la temperatura en la superficie, reducción en la escorrentía, reducción de la descarga de agua al drenaje, aprovechamiento del escurrimiento, entre otros (Fassman y Blackbourn, 2010; Mullaney y Lucke, 2014; Vujovic *et al.*, 2021).

Distintos autores han puesto a prueba sistemas de pavimento permeable con el objetivo de hallar los beneficios que brindan su utilización. Por ejemplo, Hammes *et al.* (2018) puso a prueba el potencial de ahorro al incorporar este sistema en un edificio y lograron demostrar que este tipo de sistemas pueden representar hasta un 54% de ahorro de agua potable, utilizando el agua filtrada solamente para descarga de inodoros y urinarios.

Por su parte Brattebo y Booth (2003) han comprobado resultados favorables, en cuanto a absorción y filtración. Los cuatro tipos de pavimentos probados fueron capaces de infiltrar todas las precipitaciones aun cuando estas se presentaban con gran intensidad y la calidad del agua fue mejor presentando una reducción en cobre, zinc y aceites. Como se realizó en el estudio mencionado previamente, es de

consideración el análisis del líquido una vez que este ha escurrido por la superficie del pavimento impermeable, ya que esto genera un aumento en las concentraciones y cambia la composición del agua (Scholz y Grabowiecki, 2006).

Algunos estudios como el de Pagotto *et al.*, (2000) se han enfocado en analizar este comportamiento. En el primer caso se logró una mejora en la calidad del agua reduciendo en 20% la concentración de cobre, 74% el plomo y reteniendo sólidos e hidrocarburos en un 87% y 90% respectivamente. Jiang *et al.* (20015) por su parte, encontró que el modelo que construyó presentaba alta eficiencia en la remoción de cobre, zinc, plomo, cadmio, reducción en la concentración de aceite animal y vegetal (AVO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (CDO), pero destaca la necesidad de mejorar la eficiencia en la eliminación de microorganismos y materia orgánica. Caso contrario a lo que presenta Rushton (2001), el cual detectó un aumento en las concentraciones de nitrógeno total de Kjeldhal y de fósforo total dentro del pavimento permeable, al realizar una comparativa con un pavimento con y sin cunetas. De la misma forma, Bean *et al.* (2007) menciona la necesidad de utilizar una serie de elementos de tratamiento secundario, ya que el sistema utilizado no es lo suficientemente eficaz en la eliminación de nutrientes que son adquiridos por el agua a través del escurrimiento. En este sentido, Drake *et al.* (2013) da cuenta que los elementos que componen el diseño de una estructura de pavimento permeable como geotextiles, agregados y zonas anaeróbicas pueden mejorar la eliminación de contaminantes, por lo que es necesario una mayor investigación en este tema. Siguiendo esta idea Pratt *et al.* (1995) realizó un modelo a través del cual se pudiera medir la tasa de filtración y de reducción de contaminantes potencial para un pavimento permeable según el espesor de capa de la grava, de la escoria de alto horno, de granito y de caliza.

Ya que algunos investigadores (Brattebo y Booth, 2003; Pagotto *et al.*, 2000; Fletcher, 2004) han hallado indicios alentadores en cuanto al proceso de filtración, pero algunos otros (Rushton, 2001; Bean, 2007) han indicado que aún no es posible hallar un sistema que satisfaga la reducción de contaminantes; esta investigación

busca realizar el correcto diseño, construcción y análisis del comportamiento de tres diferentes estructuras, con el objetivo de cumplir con los límites establecidos en las normativas encargadas de establecer los límites máximos permitidos en el reúso de aguas tratadas. Esto con la finalidad de generar un ahorro en el consumo de agua de primer uso y aportar una opción para el abastecimiento de agua y apoyar a la reducción de la crisis hídrica que se vive actualmente.

1.2. Descripción del problema

En años recientes ha crecido la preocupación por el consumo y la sostenibilidad del agua, pero el suministro de agua y el manejo de las aguas residuales son dos de los temas que menos se manejan dentro de las innovaciones.

Aproximadamente 1,000 millones de personas en el mundo no cuentan actualmente con servicio de agua potable (Ojeda *et al.*, 2016) y casi 3,000 millones carecen de servicios de saneamiento de aguas residuales (Jackson *et al.*, 2001), lo cual, como reporta Gleick (2000) genera problemas de salud, ya que estas deficiencias provocan alrededor 250 millones de casos de enfermedades y aproximadamente 5 millones de muertes cada año. El problema de escasez de agua no solo repercute en problemas de salud, en ocasiones también afecta en el aspecto económico a las personas que lo sufren. Restrepo (1995) obtuvo el dato que más del 5% de las personas en la zona metropolitana del Valle de México, deben comprar agua a camiones privados, gasto que representa del 6% al 25% del salario mínimo diario.

Estos problemas también se ven reflejados en México, donde debido al cambio climático, la disponibilidad de agua se ha visto reducida por lo que Spring (2011) menciona que se ubica en el lugar 89 de disponibilidad per cápita a nivel global. Sumado a que se cuenta con la onceava población más numerosa y que existe una irregular distribución en el recurso estos problemas se han vuelto más notorios en la zona centro y norte del país. Como ejemplo se tiene la región de Baja California, donde la escasez de lluvia y la sobreexplotación del manto acuífero han azotado la producción agrícola de la zona (Aulcy *et al.*, 2018). Birkle *et al.* (1998) analizó el problema presentado en la capital del país la cual es la segunda más poblada del mundo solo por detrás de Japón. En ella se presenta un déficit en la recarga del manto acuífero de aproximadamente 32.35 m³/s. Es por esto que Peña Díaz (2019) menciona la necesidad de explorar nuevas técnicas en cuanto al abastecimiento de agua, ya que de los 2,783 hm³/año que se consumen en el Valle de México, el 83% proviene del manto acuífero.

Para el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Querétaro (ZMCQ) la situación es similar, ya que se ha observado un aumento en la demanda hídrica, debido al crecimiento exponencial de la población y la economía dentro de esta zona. Perrusquía (2003) apunta que en 2002 se extrajo un total de 110 millones de m³, de los 324 aprovechamientos subterráneos que abastecen a la (ZMCQ) y naturalmente solo se tenía una recarga de 77 millones de m³, lo que representa una sobreexplotación del 30%. Pero en solo 6 años esta sobreexplotación aumentó, ya que para el 2008, Urquiza (2008) reporta un aumento de hasta el 60% dentro el acuífero del Valle de Querétaro, en relación a su recarga. Esto pone en riesgo la disponibilidad del líquido, por lo que buscar nuevas alternativas de abastecimiento se está convirtiendo en una realidad. Estas alternativas se pueden ver reflejadas en el reúso del agua superficial que en la mayoría de las ocasiones es utilizada para el riego de jardines, lavado de vehículos y en la descarga de sanitarios. La implementación de sistemas que reutilicen el agua superficial puede presentar un potencial ahorro en el agua de primer uso, ya que como lo demostró Hammes *et al.* (2018) en su investigación, el utilizar este recurso solamente en la descarga de inodoros y urinarios puede representar hasta el 54% de ahorro de agua potable.

1.3. Hipótesis y objetivo

1.3.1. Hipótesis

Un pavimento permeable con la estructura y los agregados correctos, es capaz de filtrar el agua pluvial con el fin de tener una reducción de contaminantes tal, que sea posible su reutilización en servicios al público, como se establece en la NOM-003-ECOL-1997 y en la Guía para el reúso del agua de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA).

1.3.2. Objetivo

Realizar la propuesta de una estructura de pavimento permeable, mediante modificación de agregados, la cual pueda ser utilizada para mejorar la calidad del agua pluvial y que esta cumpla con los niveles máximos establecidos en la norma NOM-003-ECOL-1997 y normas internacionales como la Guía para el reúso del agua de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA), con la finalidad que puedan ser utilizadas para generar un ahorro en el consumo del agua de primer uso.

2. Estado del arte

Debido a las necesidades básicas del ser humano, como lo son la vivienda y el transporte se ha generado un cambio necesario en el suelo, esto con el objetivo de tener una superficie con mayor resistencia. Derivado de esto se han perdido las zonas permeables existentes y ha crecido la extensión de los pavimentos, de los cuales es importante abordar su definición, clasificación y algunas características importantes a tener en cuenta. Igualmente, a continuación, se exponen sistemas relativamente nuevos que buscan apoyar al abastecimiento de agua como lo son sistemas de aprovechamiento de agua pluvial, sistemas domésticos de captación de lluvia y sistemas de recuperación de agua pluvial con pavimentos permeables. Se da un panorama general sobre aspectos importantes que han aportado al conocimiento en términos del desarrollo de pavimentos permeables como alternativa al abastecimiento de agua.

2.1. Sistemas de aprovechamiento de agua pluvial

El agua es uno de los recursos, si no que el más importante de todos. Su usos e importancia son incontables y se debe tener presente su importancia. El agua es esencial para la vida diaria, ya que no solamente tienen usos domésticos, también industriales, recreativos, en la agricultura, entre otros. Es por esto que recientemente se han desarrollado diferentes sistemas para lograr el aprovechamiento o la recuperación del agua pluvial previo a la descarga en los sistemas de drenaje hacia sistemas de drenaje. A continuación, se mencionan algunos ejemplos de estas prometedoras alternativas para mostrar el potencial que tienen al utilizarse.

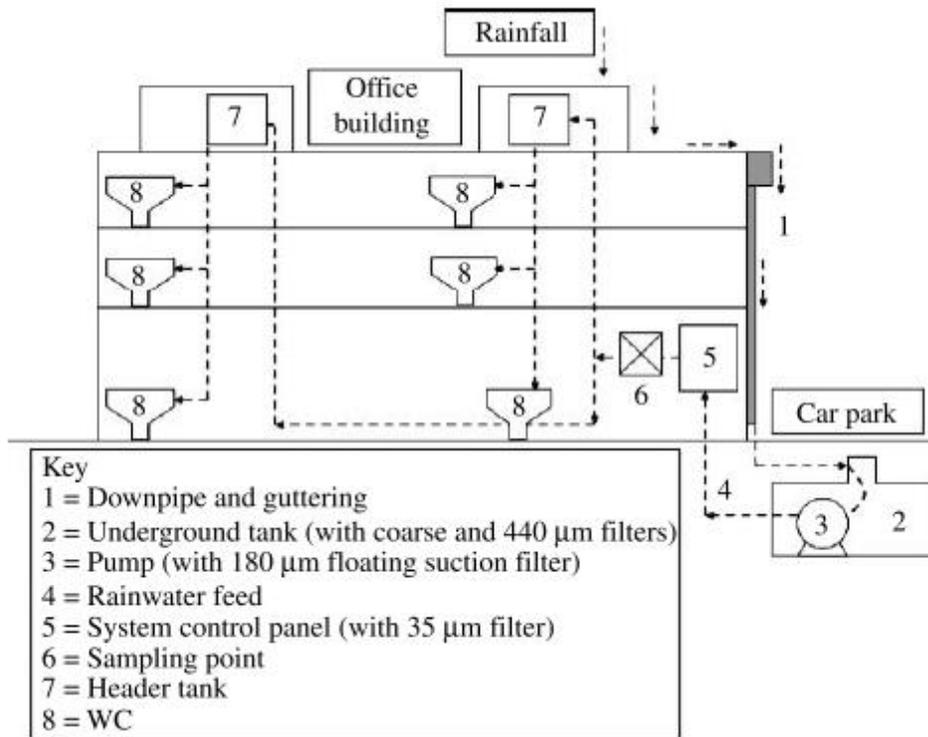
2.1.1. Sistemas domésticos de control y captación de agua de lluvia

Este tipo de sistema, considerado como de desarrollo sencillo, ha sido reconocido como una nueva fuente de abastecimiento de agua. Como indican Campisano *et al.* (2013), estos pueden ser utilizados para darle mayor sustentabilidad a sistemas de drenaje o para aprovechar el agua de lluvia en zonas donde un sistema de tuberías no resulta viable, debido a la dispersión de la población, la difícil topografía que presenta el terreno o que se consideran como zonas de difícil acceso.

Este tipo de sistemas tienen la característica de ser de construcción sencilla como se muestra en la figura 2.1, donde Ward *et al.* (2010) diseñaron un sistema para el aprovechamiento del agua pluvial en la descarga de los sanitarios, dentro de un edificio de oficinas. En la figura se puede ver el procedimiento que pasa el agua pluvial para poder ser aprovechada, inicialmente es captada con ayuda de en la parte alta del edificio y llevada, a través de tuberías, a un tanque subterráneo. En este tanque se lleva a cabo un proceso de filtrado en tres fases. La primera fase consiste en un filtro de desechos gruesos previo a la entrada al tanque, posteriormente un filtro de aspiración flotante para la eliminación de toda la nata generada por los aceites y finalmente se tiene un filtro de retro lavado en línea. Adicionalmente se integró un accesorio a la entrada del tanque para reducir las turbulencias y que los sedimentos se eleven. Una vez filtrada el agua pasa por un sistema de bombeo, donde se dirige hacia los tanques de almacenamiento, y donde se realiza el muestreo para obtener los datos sobre la calidad de la filtración. Por último, el líquido es distribuido hacia los sanitarios del edificio, donde se da su aprovechamiento.

Gracias a esta investigación pudo concluir que la variabilidad en la calidad del agua se ve influenciada por factores locales, así como por el diseño y construcción del sistema.

Figura 2.1. Sistema doméstico de captación de agua de lluvia (1).

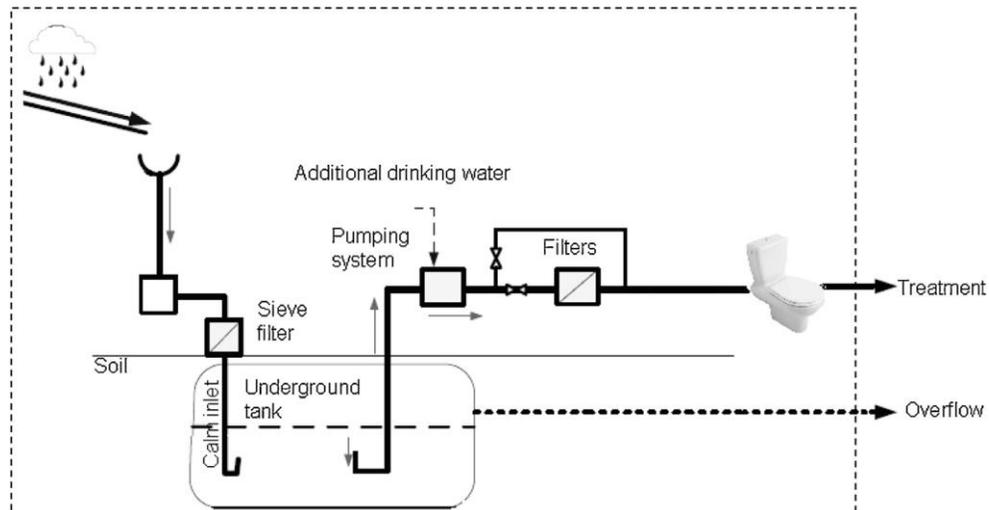


FUENTE: Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2010). *Harvested rainwater quality: the importance of appropriate design.*

Otro ejemplo de estos sistemas es mostrado en la figura 2.2, en donde Vialle *et al.* (2015) incorpora un sistema de filtración más elaborado. Este tipo de sistema es utilizado en casas de hasta cuatro personas. Al igual que el mostrado previamente, este sistema cuenta con el sistema de recolección que canaliza el agua a través de canaletas y bajas pluviales, y se otorga un primer filtrado en filtros de malla de alambre, previo a su depósito en un tanque subterráneo. Posteriormente esta agua se trata según el fin para el cual haya sido bombeada. Para la descarga de inodoros de descarga de 9 litros, solamente se bombea y se pasa por un filtro para retirar los sólidos de gran tamaño. Para la producción de agua potable, el sistema de filtrado se compone de ajuste del color, filtración a través de carbón activado, tratamiento de pesticidas, ajuste del pH, esterilizado por reactores UV y desinfección. Estos

sistemas de generación de agua potable pueden proveer hasta 1,400,000 m³ de agua potable al año.

Figura 2.2. Sistema doméstico de captación de agua de lluvia (2).



FUENTE: Vialle, C., Busset, G., Tanfin, L., Montrejaud-Vignoles, M., Huau, M.-C., & Sablayrolles, C. (2015). *Environmental analysis of a domestic rainwater harvesting system: A case study in France.*

Dos de los puntos a considerar que se agregan a este sistema es el sistema de desalojo de excedentes y la implementación de filtros de carbón activado. El sistema de desalojo libera el agua excedente y lo conducen a través de un canal cercano a contenedores, estas se utilizan con fines no públicos, como descarga de inodoros o regado de áreas verdes. La utilización de filtros de carbón activado se da en la segunda etapa de filtración y juegan un papel clave en la materia orgánica respiratoria.

Como se puede observar los sistemas domésticos de control y captación de agua pluvial se componen de las mismas secciones básicas, aunque algunas incorporan algunas variables principalmente en la fase de filtración. Los principales componentes son los siguientes:

- **Captación:** Se recolecta el agua pluvial proveniente de la superficie impermeable, en este tipo de sistema es principalmente de azoteas. Estas aguas son llevadas por medio de tuberías a tanques subterráneos.

- **Almacenado:** Estas aguas son llevadas por medio de tuberías a tanques subterráneos y almacenadas para su posterior utilización según la demanda que se tenga.
- **Bombeo:** El agua puede ser llevada a tanques elevados o hasta su aprovechamiento final.
- **Filtrado:** Puede ser previo o posterior al bombeo, generalmente es simple y solamente busca eliminar residuos de gran tamaño dentro del líquido. Se recomienda se realice previo al bombeo para evitar tener daños dentro de la bomba.
- **Aprovechamiento:** El agua es utilizada con la calidad de agua necesaria según el fin que se establezca.

Las inundaciones son un gran desafío ambiental para las ciudades, pero se ha demostrado que la utilización de este tipo de sistemas es muy benéfica en aspectos como la reducción de escurrimientos. Palla *et al.* (2017) muestra que este tipo de sistemas mejoran el desempeño hidrológico de bloques urbanizados como edificios o desarrollos habitacionales, en donde se puede reducir entre el 33% y el 26% del agua que es enviada al drenaje, lo que genera un alivio en los sistemas municipales. Sepehri *et al.* (2018) se encargó de realizar un estudio con el supuesto de que todos los edificios residenciales usan estos sistemas, el resultado indicó que el sistema logró captar entre 145,950 m³ y 333,060 m³ lo que representa una reducción de entre el 19% y el 20%. Estos beneficios también se observan en el tema económico donde se observa un ahorro de aproximadamente 5,004 dólares al año.

En cuanto al aprovechamiento del agua pluvial, Ward *et al.* (2012) analizó el ahorro de un sistema instalado en un edificio de oficinas en el Reino Unido, el cual únicamente se utilizó para la descarga de urinarios e inodoros y presentó un ahorro de agua del 21% respecto a la demanda de agua del edificio. En este mismo sentido, Avelar (2019) logró implementar un sistema pequeño y de auto construcción dentro de una comunidad marginada. Gracias a su exitosa implementación logró dotar de agua para uso doméstico y consumo humano a una población de 11 hogares.

2.1.2. Sistema urbano de drenaje sostenible (SuDS)

Debido a la urbanización los usos de suelo se han visto modificados, ya que gran cantidad de áreas permeables como pasto o vegetación, son remplazados por áreas revestidas con concreto, asfalto o algún otro tipo de recubrimiento impermeable, en busca de superficies que cuenten con una mayor resistencia y una menor deformabilidad para poder permitir la circulación de vehículos pesados. Esto se ve traducido en la utilización de permeabilidad nula lo que nos lleva a una reducción en la tasa de infiltración de las aguas pluviales. Es por esto que han surgido nuevas técnicas de desalojo de agua como lo son los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SuDS) los cuales reducen potencialmente el impacto de esta urbanización.

Durante mucho tiempo los sistemas convencionales de drenaje se enfocaron en desalojar rápidamente el agua hacia afuera de las ciudades, teniendo como sitio de disposición final ríos y lagos naturales. A causa de esto, Gómez *et al.* (2004) nos menciona que los cauces naturales han perdido tanto su riqueza natural, como su capacidad de respuesta ante las crecidas y por el crecimiento de la población los sistemas de drenaje suman cada vez más volumen a su flujo. Estos sistemas están diseñados para gestionar los riesgos que se presentan debido a la escorrentía urbana y buscan contribuir a la mejora ambiental. Se busca generar controles de agua pluvial en unidades pequeñas y que sigan la idea del desarrollo sostenible (CIRIA, 2015).

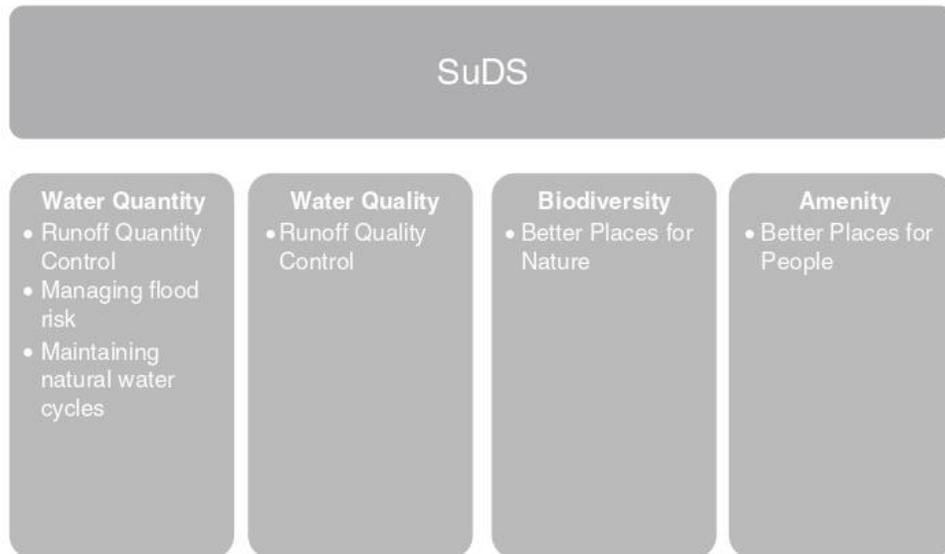
La implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible busca cumplir diferentes objetivos (EPA, 1999):

- Proteger la calidad del agua
- Permitir la recarga de mantos acuíferos
- Mejorar la calidad del agua
- Evitar inundaciones

- Permitir el desarrollo urbano en zonas con sistemas de alcantarillado deficientes

El control de escorrentía no es el único beneficio de este sistema proveniente del Reino Unido, como lo menciona Green (2019), en la figura 2.3 se muestran los beneficios que brinda la utilización de los SuDS divididos en 4 pilares principales; la cantidad de agua que aborda objetivos de control de escurrimientos; la calidad del agua que brindan estos sistemas; biodiversidad que toma en cuenta la mejora en la naturaleza y la amenidad, ya que se brindan mejores sitios para el desarrollo humano.

Figura 2.3. Beneficios de los SuDS.



FUENTE: Green, A. (2019). *Sustainable Drainage Systems (SuDS) in the UK*.

Los SuDS intentan replicar sistemas naturales, de bajo costo y con un bajo impacto ambiental, donde los escurrimientos se canalicen, almacenen y se limpien previo a ser descargados hacia el suelo natural o corrientes naturales de agua (Joon, 2017). La esencia de estos sistemas urbanos de drenaje sostenible se encuentra en reducir la escorrentía superficial aumentando las zonas permeables y sub dividir las cuencas para evitar que grandes volúmenes de agua descarguen en un reducido

número de puntos colectores, que es lo que actualmente sucede al implementar los sistemas convencionales de drenaje pluvial compuesto por alcantarillas y colectores.

Estas zonas permeables, según Pratt *et al.* (2002), también funcionan como filtro, buscando mejorar la calidad del agua para evitar que los sitios de disposición final sean contaminados. Algunos de estos sistemas cuentan en la parte inferior de su estructura con una capa de almacenamiento, la cual tiene la función de aumentar la capacidad de retención del agua para mejorar la infiltración de la escorrentía superficial, o recuperar el escurrimiento para un aprovechamiento, según sea el caso. Esto pone como un objetivo secundario la reutilización de estas aguas filtradas previniendo que este líquido tenga la calidad necesaria para poder entrar en contacto con el usuario. (MINVU-DICTUC, 1996).

Dentro de estos sistemas se pueden incluir las siguientes instalaciones:

- **Pozos y zanjas de infiltración:** Perforaciones rellenas de material granular en las que se recoge y almacenan los escurrimientos hasta que se infiltra al terreno natural. Los pozos resultan ser más efectivos, ya que las zanjas son más estrechas y menos profundas (National SuDS Working Group, 2003).
- **Depósitos de infiltración:** Jiménez (1999) los define como embalses poco profundos donde se almacena el líquido hasta que logra su infiltración. Es necesaria la construcción de un desagüe de emergencia para aliviar el depósito en caso de que se supere la capacidad de este.
- **Drenes filtrantes o franceses:** Zanjas recubiertas de geotextil y rellenas de grava en las cuales circula el agua proveniente de superficies de drenaje o de tuberías de aportación.
- **Cunetas verdes:** Canales anchos y poco profundos, cubiertos de hierba y vegetación, diseñados para recoger los escurrimientos de las carreteras y conducirlos a los sistemas de almacenaje, de alcantarillado o infiltrarlo en el suelo si es que las condiciones lo permiten.

- **Franjas filtrantes:** Secciones de área ancha de tierra con vegetación densa en su superficie, que cuentan con cierta pendiente encargada de recibir la escorrentía superficial y permitir su filtración. Debe de ser capaz de retener sólidos y aceites.
- **Depósitos de detención:** Depresiones construidas con el objetivo de permitir la sedimentación de los sólidos en suspensión, frenando la escorrentía en situaciones de tormenta.
- **Estanques de retención:** Depresiones en el terreno que en todo momento cuentan con líquido en su interior, con el objetivo de ocultar bancos de sedimentos, lo cual aumenta la capacidad de eliminación de nutrientes, metales pesados, coliformes y materia orgánica.
- **Humedales:** Amplias superficies con poca profundidad. Este sistema proporciona un mayor grado de filtración y eliminación de nutrientes gracias a la vegetación que se encuentra en la superficie.

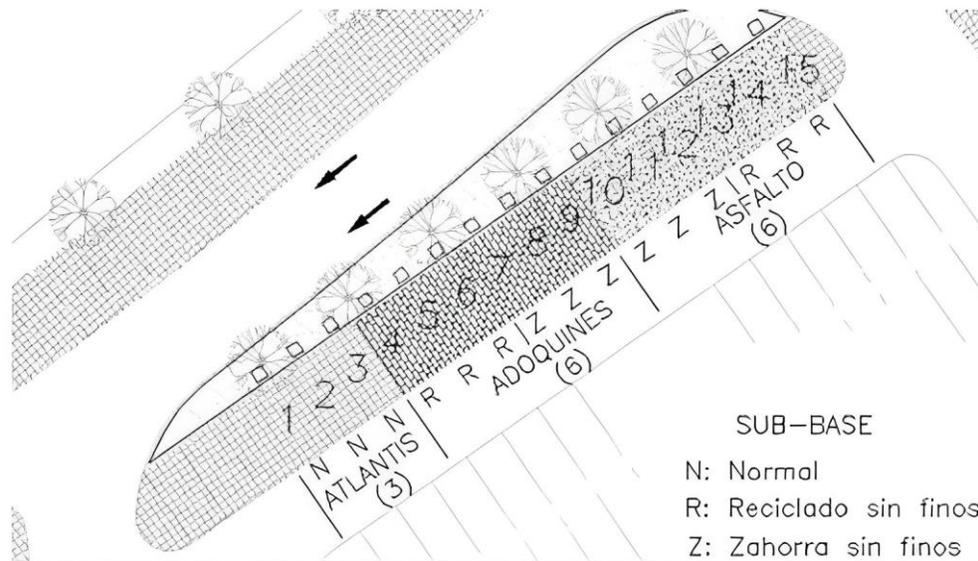
2.1.3. Sistemas de recuperación de agua con pavimentos permeables

Se tratan de sistemas que en alguna parte del proceso se incorporan estructuras con pavimentos permeables. Estas estructuras pueden hacer la función de captación, filtrado o almacenamiento del agua pluvial, para posteriormente realizar al aprovechamiento de la misma.

Por ejemplo, tenemos el sistema de Hernández *et al.* (2006). Este se basó en diferentes estructuras de pavimento permeable y probó la capacidad para el control de la escorrentía en el sistema. A continuación, en la figura 2.4 se puede observar la distribución de estos cajones de estacionamiento. Los tres primeros mantuvieron la estructura semejante a la del resto de cajones de estacionamiento con una superficie de pasto reforzado, sobre base y subbase de relleno de desperdicio. En los 12 cajones restantes se colocaron 4 combinaciones diferentes de adoquín o mezcla asfáltica porosa con base de relleno de desperdicio y material granular sin arena. Además, se emplearon geotextiles no tejidos punzonados con el objetivo de

dar soporte y refuerzo a la estructura, pero que al mismo tiempo pudiera realizar la función de filtro.

Figura 2.4. Sistema con pavimento permeable (1).



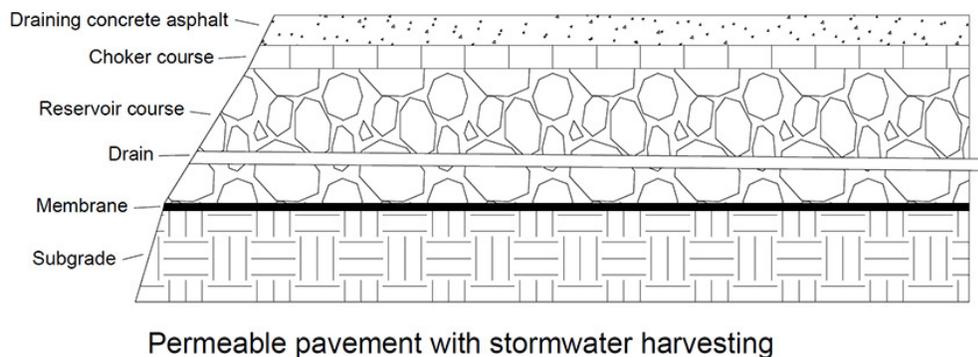
FUENTE: Hernández, J. R., Bayón, J. R., Fresno, D. C., Pérez, M. Á. C., Jordana, J. C. C., Muñoz, F. B., & Lasa, P. (2006). *Construcción de pavimentos permeables para el control en origen de la escorrentía urbana: ejemplo práctico del aparcamiento del palacio de deportes de la guía.*

Se monitoreó la capacidad y la profundidad filtrante de los pavimentos que tenían como principal objetivo reducir la concentración de hidrocarburos. Como resultado se obtuvo que su utilización reduce la formación de escorrentía superficial, ya que retrasa la llegada de la lluvia al sistema de drenaje, lo que evita los gastos pico que causan inundaciones y desbordamiento de las bocas de tormenta. Reduce la cantidad de agua enviada al sistema de drenaje. Es importante destacar que se menciona que, tras el lavado inicial de los materiales utilizados para la construcción, la calidad del efluente mejora, en comparativa con el agua de escorrentía superficial; y que se debe tener una mayor supervisión y control de la calidad en el momento

de la construcción de este tipo de pavimentos, ya que un mal proceso constructivo repercute en la vida útil del sistema.

Antunes *et al.* (2020) instalaron en el estacionamiento de un edificio público, un modelo de pavimento permeable con una capa de concreto drenante, una capa de base, capa de almacenamiento con una tubería ranurada para la recolección de la precipitación y una membrana impermeable en el fondo. Se colocó esta membrana para evitar que el agua se infiltrara en el suelo natural y pudiera ser aprovechada. La estructura exacta del pavimento se muestra en la figura 2.5.

Figura 2.5. Sistema con pavimento permeable (2).



FUENTE: Antunes, L. N., Ghisi, E., & Severis, R. M. (2020). *Environmental assessment of a permeable pavement system used to harvest stormwater for non-potable water uses in a building.*

Después de analizar las alternativas entre reutilizar el agua proveniente de una estructura de pavimento permeable y del consumo tradicional del sistema de agua potable, se pudo hallar que la reutilización del agua representa un ahorro en el 69.6% que es equivalente al ahorro de 5260 litros/día en el edificio. Igualmente se presentó un ahorro en el consumo eléctrico de 8.9%. Se menciona que la reducción en la demanda de agua trae consigo beneficios ambientales significativos y disminuyen la solicitud de agua de los servicios públicos.

2.2. Los pavimentos

Tal como lo indica Brown (1996), los pavimentos son estructuras de ingeniería civil que se utilizan con el fin de permitir que los vehículos puedan circular de forma segura y económica. Para Mallick y El-Korchi (2013) su principal función es brindar una superficie uniforme, con la textura apropiada para el tránsito y que pueda soportar la carga aplicada por un vehículo al circular, sin sufrir una deformación excesiva. Están conformados por una estructura multicapa, colocada una sobre la otra. Estas capas pueden estar hechas de material asfáltico, concreto o agregados pétreos. Cada uno de los materiales presentan diferentes respuestas mecánicas según el esfuerzo aplicado, el tiempo y la temperatura (Das, 2014).

Huang (2004) menciona la existencia de tres tipos de pavimentos: los flexibles, rígidos o de concreto y los pavimentos compuestos. La principal diferencia entre los tipos de pavimentos es el número de capas, espesor de la capa superficial y la manera en la que distribuyen y disipan la carga.

2.2.1. Pavimentos flexibles

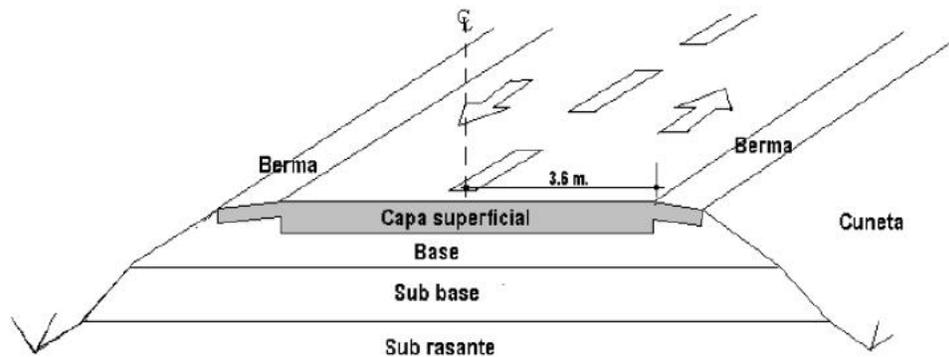
Los pavimentos flexibles cuentan con una carpeta asfáltica, la cual será la capa superficial y de rodamiento, y las cargas, esfuerzos y deflexiones generadas por los vehículos se distribuyen hacia las capas inferiores de manera uniforme y se transfieren por medio de características de fricción y cohesión de los materiales que componen cada una de las capas (Olivera, 2009; Papagiannakis y Masad, 2017). Monsalve *et al.* (2012) nos indica como se compone la estructura de un pavimento flexible:

- **Subbase:** Su principal función es de carácter económico, ya que sirve para formar el espeso requerido por la estructura del pavimento, con el material más barato posible. Otra función es la de generar una transición entre la base (material granular) y la subrasante. También sirve como una capa rompedora de capilaridad, ya que drena el agua

procedente de la terracería, evitando que esta llegue a la capa base.

- **Base:** Una de las funcionalidades es que permite reducir el espesor de la carpeta, la cual es más costosa. Pero su principal función es la de proporcionar resistencia ante los esfuerzos producidos por el tránsito, y que estos se vean reducidos al ser transmitidos a la subbase y a la sub rasante. De igual forma, rompe la ascensión capilar y drena el agua que atraviesa la carpeta.
- **Carpeta:** Brinda una superficie adecuada al tránsito, con textura y color adecuados para resistir los efectos del tránsito.

Figura 2.6. Estructura del pavimento flexible.



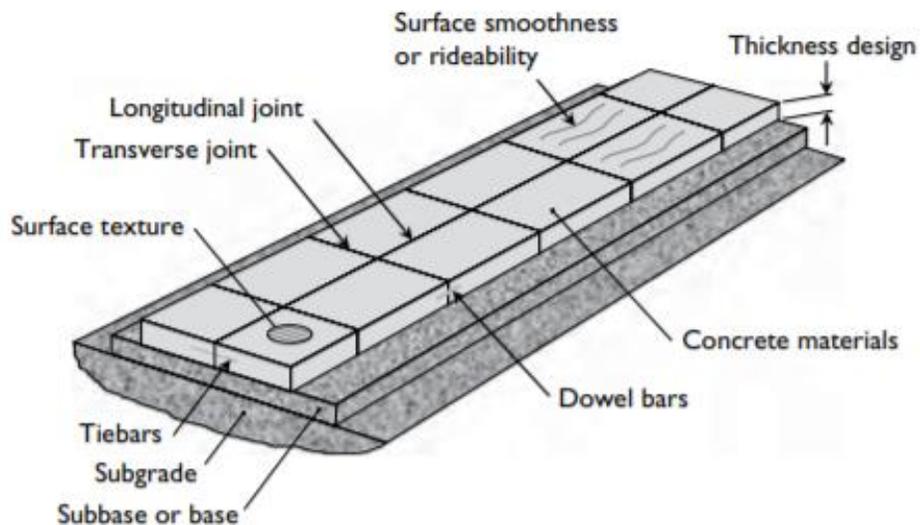
FUENTE: Monsalve, L., Giraldo, L., Maya, J., (2012). *Diseño de pavimento flexible y rígido.* Universidad del Quindío.

2.2.2. Pavimentos rígidos

Por su parte los pavimentos rígidos tienen como elemento principal una losa de concreto hidráulico, la cual recibe las cargas generadas por los vehículos y debe contar con un soporte de material seleccionado lo suficientemente uniforme y estable para que no exista falta de soporte hacia la losa (Rico y Del Castillo, 2005). Los pavimentos de concreto, debido a su rigidez y elevado módulo de elasticidad, distribuyen la carga en una amplia área del suelo (Yoder, 1991). Este tipo de pavimento puede contener acero de refuerzo para reducir o eliminar juntas. Dentro

de la figura 2.7, se pueden observar la estructura típica de un pavimento rígido, así como las capas que lo sustentan (Delatte, 2008).

Figura 2.7. Estructura de pavimento rígido.



FUENTE: Delatte, N. (2008). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*. Taylor & Francis.

Una vez conocidas las capas que componen cada uno de los tipos de pavimentos, es necesario conocer las características de cada una de ellas y el objetivo para el cual son utilizadas. Juárez (2002) nos indica que función cumple cada una de las capas:

- **Base:** Brinda prestaciones muy similares a las de la subbase en el pavimento flexible. Facilita el colado de la losa, brinda apoyo uniforme a la misma y protege a la losa de cambios volumétricos que pueda sufrir la sub rasante. En este caso la base no se utiliza con fines estructurales.
- **Losa de concreto:** Su principal característica es la de aportar

capacidad estructural para poder soportar y transmitir de manera adecuada los esfuerzos aplicados. Igual que la carpeta asfáltica en el pavimento flexible, proporciona una superficie adecuada al tránsito.

2.2.3. Pavimentos compuestos

Se pueden definir como estructuras compuestas por una capa superior flexible (asfalto), y debajo de esta una capa rígida que puede ser base tratada con cemento, pavimento de concreto, entre otros. La capa superior brinda una superficie regular para la conducción, segura y silenciosa, mientras que la capa inferior proporciona una base rígida y estructuralmente fuerte. La diferencia con los otros dos tipos de pavimentos es el orden de las capas, donde los módulos de las capas disminuyen conforme aumenta la profundidad de estas. En este caso observamos que la capa base cuenta con un módulo mayor al de la capa superficial (Flintsch, 2008).

Se pueden encontrar diferentes combinaciones dentro para el diseño de esta estructura, pero Rith (2017) nos menciona algunas de las principales como lo son la combinación de mezclas asfálticas en caliente con un sustento inferior compuesto por una losa de concreto sin refuerzo, con refuerzo en las juntas o continuamente reforzada.

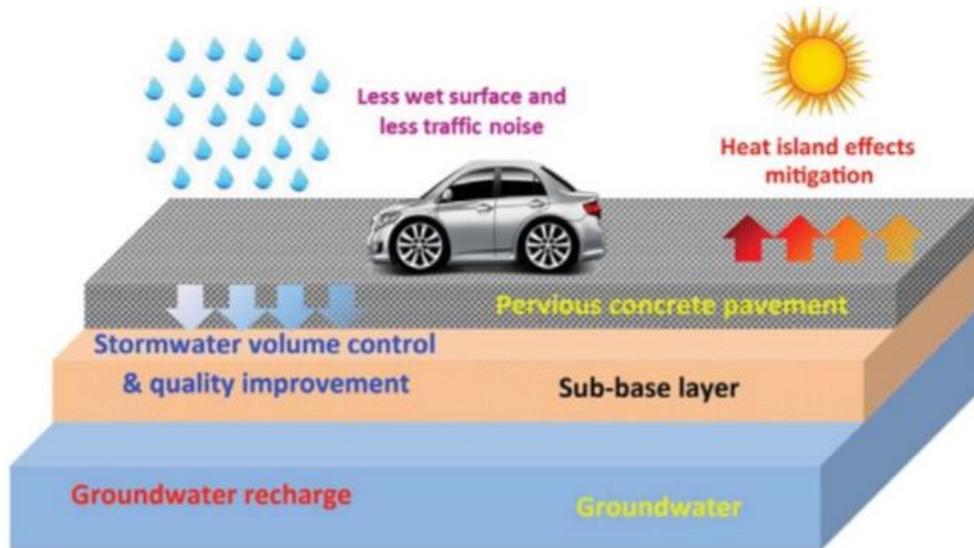
2.3. Los pavimentos permeables

Debido a que es un tema que actualmente se encuentra en desarrollo, es necesario dar contexto sobre los tipos de pavimentos permeables que actualmente se pueden encontrar, así como la estructura típica, el proceso de diseño y construcción que se debe llevar y los beneficios que conlleva su utilización.

Joon (2017) nos menciona que existen diferentes tipos de pavimentos permeables entre los que están:

- **Concreto permeable:** Puede soportar tráfico y es universalmente accesible.

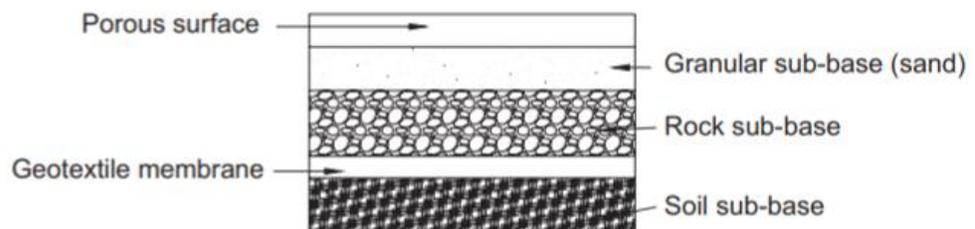
Figura 2.8. Estructura de concreto permeable.



FUENTE: Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2018). *Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability.*

- **Asfalto permeable:** Se omiten los agregados finos que se colocan en el pavimento tradicional, lo cual deja vacíos abiertos que dan porosidad y permeabilidad a la mezcla. Se pueden utilizar aglutinantes de asfalto modificado con polímeros, para dar mayor resistencia. Generalmente diseñado con depósitos subterráneos que guardan el agua que se filtra a través del pavimento lo que permite que se filtre lentamente el agua.

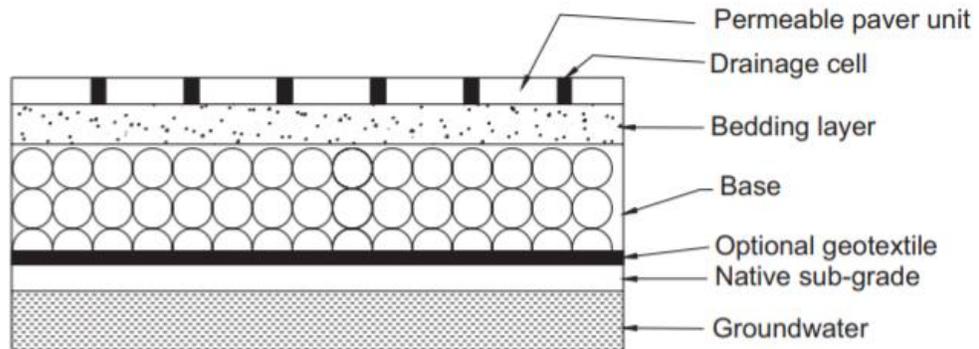
Figura 2.9. Estructura de pavimento permeable con asfalto.



FUENTE: Scholz, M. y Grabowiecki, P. (2007). *Review of permeable pavement systems, Building and environment.*

- **Adoquines:** Cuentan con espacios entre cada pieza, dan apariencia arquitectónica. Pueden ser para tráfico pesado y ligero, pero no para velocidades o volúmenes altos.

Figura 2.10. Estructura de pavimento permeable con adoquín.



Fuente: Scholz, M. y Grabowiecki, P. (2007). *Review of permeable pavement systems, Building and environment.*

- **Pavimento poroso de vidrio reciclado:** Consiste en unir vidrio procesado post consumo con una mezcla de resina, pigmentos, granito y agentes aglutinantes.

Figura 2.11. Pavimento poroso de vidrio reciclado.



Fuente: Emersleben, A., & Meyer, N. (2012). *The Use of Recycled Glass for the Construction of Pavements.*

En los años recientes gracias a que la investigación en torno a los pavimentos permeables ha aumentado, se ha podido demostrar los beneficios que se consiguen

al utilizar este tipo de estructuras. Ferguson (2005) ha logrado observar que este tipo de pavimentos pueden mejorar el ambiente en cualquier lugar que se instale, y que cuentan con la porosidad y permeabilidad suficiente alta, como para influenciar la hidrología, el hábitat y cualquier otro ambiente. Una de las ventajas es mencionada por Pagotto *et al.* (2000), el cual nos indica que este tipo de pavimentos evita el fenómeno del hidro planeo debido a que en un pavimento permeable el drenaje se realiza a través de la capa superior de pavimento y en dirección hacia los hombros del camino. El realizar el drenaje del agua a través de la estructura hace que la adherencia y la visibilidad sea mayor, lo que brinda una mayor seguridad a los usuarios del camino durante los lapsos de precipitaciones severas. Yang y Jiang (2003) se encargaron de destacar algunos otros beneficios como lo son:

- ❖ Regeneración del agua subterránea debido a que la escorrentía se filtra rápidamente hacia el suelo.
- ❖ El suelo debajo del pavimento puede mantenerse húmedo, lo que reduce el calor generado por el mismo pavimento.
- ❖ Disminución del ruido generado por el tránsito de los vehículos, lo que genera un ambiente silencioso y cómodo para el automovilista.

Dentro de los beneficios más citados se encuentran las ventajas que presenta este tipo de pavimento en temas de drenaje, ya que los poros dentro de la estructura del pavimento pueden eliminar rápidamente la precipitación que cae sobre la superficie (Yu *et al.*, 2020).

Los diseños de pavimento permeables pueden ser muy variados, pero todos trabajan bajo el mismo principio general, donde recolectan, tratan e infiltran libremente cualquier escorrentía superficial. Scholz (2007) menciona que este tipo de pavimentos deben ser capaces de satisfacer la demanda de aguas pluviales,

pero con el fin de tener una superficie dura, capaz de ser utilizada en áreas urbanas. La textura del asfalto permeable es muy similar a la de un pavimento convencional, pero con terminado más poroso. Esta porosidad se genera gracias a la omisión de agregados finos.

El tener una superficie con una cantidad reducida o libre de finos hace que los pavimentos permeables sean capaces de filtrar todas las precipitaciones, incluso cuando estas son muy intensas (Brattebo y Booth, 2003; Bean *et al.*, 2007).

Un pavimento permeable de sistema multicapa, con el diseño correcto, es capaz de capturar y almacenar el agua de lluvia hasta que esta se infiltre en el subsuelo (Kayhanian *et al.*, 2019), pero además puede ser capaz de mejorar la calidad del agua escurrida por el pavimento.

Según Rushton (2001) el uso de suelo que más cargas contaminantes genera es el de las superficies impermeables, tal como estacionamientos, carreteras y techos, ya que generan gran cantidad de escorrentía pluvial. Joon (2017) nos menciona que los caminos presentan diferentes tipos de contaminación, resultado de la derrama de aceites o combustibles, residuos de llantas o hasta polvo generado por el mismo ambiente. En los pavimentos convencionales esta contaminación es lavada y adquirida por el agua que escurre, y es llevada hacia las áreas urbanas en forma de contaminación difusa. Al utilizar superficies permeables se evita esparcir esta contaminación y se reduce el caudal de escorrentía generado por el pavimento, lo que genera menor carga en el drenaje, evita erosión en los canales y transporte de sedimentos. Razón por la cual la utilización de este tipo de pavimentos nos brinda más de un beneficio en comparativa con el convencional.

En cuanto a la reutilización de esta agua drenada o almacenada por parte del pavimento permeable, se han desarrollado diferentes investigaciones, las cuales se pueden clasificar en 4 metodologías de análisis diferentes:

➤ Cálculos matemáticos

- Pruebas en laboratorio
- Pruebas en campo
- Comparativas

2.3.1. Cálculos matemáticos

Dentro de la literatura se ha tratado de establecer algunos modelos que puedan predecir la concentración de ciertos contaminantes y la reducción que se generaría en caso de una filtración. Por ejemplo, Hahn y Stumm (1968) estudian el comportamiento de coagulantes y materiales filtrantes en el que establecen la existencia de un “factor de eficiencia de colisión” donde se determina la capacidad de coagulantes y de materiales filtrantes para desestabilizar y permitir la unión cuando se producen los contactos.

La reducción de las partículas en suspensión se puede dar mediante estos dos procesos, filtración y coagulación. Para ambos procesos las partículas deben desarrollar la capacidad de adherirse al medio filtrante. Para que se de cualquiera de los dos procesos las partículas en suspensión deben ser transportadas para lograr el contacto y la adsorción.

Con ayuda de esto Yao et al. (1971) desarrolló un modelo de filtración de sedimentos que se centra en la reducción de sólidos suspendidos totales en líquidos recolectados por un colector único lo que se pudiera equiparar con lo que se desea lograr con el pavimento permeable. El rendimiento de una capa de agregado se determina por:

$$\frac{dC}{dL} = -\frac{3(1-f)}{2d} \alpha \eta C \quad (1)$$

Donde f es la porosidad de la capa de la estructura, L es el espesor total de la estructura del pavimento en m , C es la concentración de sólidos suspendidos totales en mg/L , α se define como la relación del número de contactos que logran la

adhesión de los sólidos al agregado entre el número total de colisiones entre las partículas suspendidas y el medio filtrante. Idealmente esta relación debería ser igual o cercano a 1. Para agregar el efecto del colector y acercarlo al comportamiento presentado en el pavimento permeable se agrega η que expresa la relación del número de partículas que golpean el colector entre la cantidad de partículas que fluyen a través del colector. En este sentido, el transporte de estas partículas puede darse por 3 métodos, intercepción, sedimentación y difusión. Tufenkji y Elimelech (2004) definen estos parámetros como se menciona a continuación:

$$\eta_d = 0.9 \left(\frac{kT}{\mu d_p dv} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$\eta_{in} = \frac{3}{2} \left(\frac{d_p}{d} \right)^2 \quad (3)$$

$$\eta_s = \frac{(\rho_p - \rho)gd_p^2}{18\mu v} \quad (4)$$

La ecuación dos calcula el parámetro η por difusión donde k es la constante de Boltzmann (1.3805×10^{-23} J/K); T es la temperatura de la precipitación en $^{\circ}\text{K}$; d_p es el diámetro de la partícula de sólido de los SST en m; ρ_p es la densidad de las partículas de los SST en kg/m^3 ; v es la velocidad vertical del flujo en m/s; μ es la viscosidad del agua a infiltrar en m^2/s y g es la aceleración de la gravedad en m^2/s . Por lo que la ecuación inicial puede ser escrita como se muestra a continuación:

$$\frac{dC}{dL} = -\frac{3(1-f)}{2} \frac{1}{d} \propto \left[0.9 \left(\frac{kT}{\mu d_p dv} \right)^{\frac{2}{3}} + \frac{3}{2} \left(\frac{d_p}{d} \right)^2 + \frac{(\rho_p - \rho)gd_p^2}{18\mu v} \right] C \quad (5)$$

Otro método para realizar el pre cálculo de la reducción de contaminantes es el mostrado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en la determinación de las condiciones particulares de descarga de los principales cuerpos de descarga. Las condiciones particulares de descarga son el conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos, así como de los niveles máximos de contaminación permitidos en la descarga de aguas residuales o aguas tratadas. Las condiciones particulares de descarga se pueden obtener con la siguiente ecuación:

$$CPD_i = \frac{(Q_i C_i / \sum_{i=1}^n Q_i C_i)(LMD)}{(0.0864)(Q_i)} \quad (1)$$

Donde CPDi indica la condición particular de descarga en la descarga i (mg/L); QiCi es la carga no restringida del contaminante en cuestión en la descarga i y se obtiene multiplicando el caudal de la descarga Qi (L/s) por la concentración no restringida del contaminante Ci en mg/L; $\sum_{i=1}^n Q_i C_i$ es la suma de las cargas no restringidas del contaminante de la descarga i hasta la descarga n (mg/s); LMD es el límite máximo de descarga del contaminante (kg/d) establecido en la Declaratoria de Clasificación de Cuerpos de Aguas Nacionales. Este método es mayormente utilizado para poder establecer el límite de algún contaminante para otorgar un permiso de descarga al usuario. Si este límite calculado no se cumple es necesario que se dé un tratamiento adicional al agua residual.

Algunos de estos modelos nos pueden dar idea de cómo se pudiera comportar la filtración del agua para dar un panorama previo a la experimentación, y así poder determinar si la implementación del sistema pudiera ser factible para los objetivos particulares.

2.3.2. Pruebas en laboratorio

Como ejemplo en las pruebas en laboratorio tenemos a Myers et al. (2011) los cuales probaron una estructura de pavimento ensambladas en contenedores de polipropileno y compuestas por tres capas. La primera capa de base de 30 mm con diámetro de material de 5 mm de diámetro nominal, debajo un geotextil permeable A34 y al final una capa de 380 mm de subbase con dolomita o cuarcita como agregados; esta última capa fungió como depósito del agua previamente filtrada. Para la recolección de la muestra de agua se colocó una tubería perforada. Después de 144 horas de reposo pudo observar que la dolomita y la cuarcita tienen potenciales resultados positivos al filtrar el agua, aunque aumentaron el pH y la conductividad del líquido.

Hammes et al. (2018) desarrollaron, dentro de cajas de acrílico, dos estructuras completamente diferentes, la primera con 5 capas de diferentes espesores, que tenía el 70.1% de capacidad de filtración, y la segunda con solo tres capas, que contaba con el 80% de capacidad de filtración. Quiso comprobar si el agua captada podría ser reutilizada y encontró que estos modelos reducen la cantidad de ciertos contaminantes, aunque la precipitación necesitaría otro tratamiento adicional para poder garantizar el reúso.

Otro ejemplo es el de Jiang *et al.* (2015), que desarrollaron un aparato dentro de laboratorio el cual fue útil para probar la eficacia del pavimento, dentro de la muestra de agua que midió 16 diferentes contaminantes y pudo observar que el pavimento resulta eficaz para la eliminación de cobre, zinc plomo y cadmio, y un poco menos eficaz para contaminantes de petróleo, aceite animal, aceite vegetal y nitrógeno amoniacal.

Todos ellos construyeron sus especímenes en el laboratorio y probaron la filtración bajo condiciones específicas, llegando a la conclusión que ninguna de las opciones estudiadas tenía un beneficio absoluto, ya que presentaban inconsistencias para la reutilización del agua tratada.

2.3.3. Pruebas en campo

Para las pruebas en campo tenemos como muestra a Pratt (1995) el cual realizó pruebas sobre un pavimento permeable revestido con bloques de concreto permeable en la ciudad de Nottingham. Aprovechó la instalación existente de este pavimento permeable y solamente colocó una membrana impermeable para evitar que parte del líquido se filtrara al suelo, y así poder analizar el líquido en su totalidad. Añadió cuatro diferentes agregados en la base (grava, granito, piedra caliza y escoria de alto horno) para poder analizar el beneficio de cada uno. Después de probar el sistema con lluvia del sitio, se dio cuenta de que todos mostraron reducciones significativas tanto en volumen de salida, como en concentración de contaminantes en comparación con los pavimentos tradicionales.

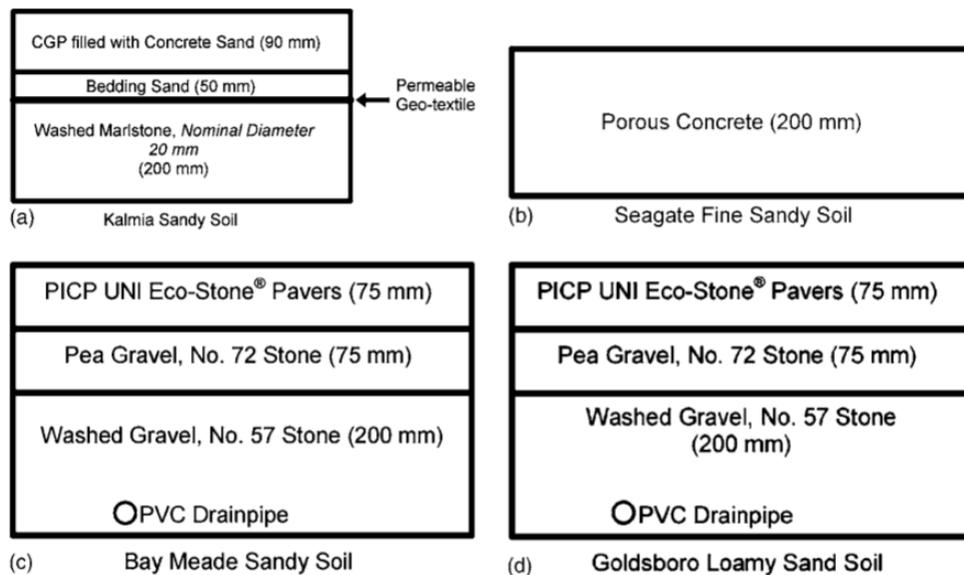
Pagotto *et al.* (2000) lograron realizar una comparativa del comportamiento entre un pavimento permeable y un pavimento tradicional. Realizó dos mediciones de un año cada una a una autopista francesa con pavimento convencional, y posteriormente se realizó la sustitución de este pavimento por pavimento permeable, para poder realizar las mismas mediciones. Se logró observar que el cobre se redujo en un 20%, el plomo en un 74% y también hubo reducciones en la cantidad de hidrocarburos y metales, por lo que pudo concluir que existe una retención de partículas gruesas por filtración y reducción de metales sueltos por medio de adsorción.

Otra metodología que se ha probado es la de analizar cajones de estacionamiento, donde se prueban uno o varios pavimentos y en ocasiones se monitorean por varios meses para determinar la eficacia de las diferentes estructuras (Pratt, 1999). Regularmente se utilizan cajones donde estén construidos diferentes tipos de pavimentos permeables para su aprovechamiento (Booth y Leavitt, 1999). Se considera la ubicación de capas con capacidad de depósito, ya que posterior al filtrado es probable que esta agua sea útil para su reutilización con fines no potables en edificaciones e instalaciones cercanas a la de la ubicación del pavimento permeable (Kayhanian *et al.*, 2019; Pratt, 1999; Braswell *et al.*, 2018). Se pudo

observar que el agua que había escurrido a través del pavimento convencional presentaba aceite de motor debido a los vehículos que utilizaban el estacionamiento (Brattebo y Booth, 2003). En este tipo de investigación experimental se observaron mejoras en la calidad del efluente, reducciones en contaminantes como el nitrógeno, amonio, fósforo total, zinc, cobre y plomo (Brattebo y Booth 2003; Bean *et al.*, 2004). El tener estas construcciones por muchos años permitió también realizar un análisis del desgaste y pérdida de capacidad de filtración de las estructuras (Brattebo y Booth, 2003).

Por ejemplo, Bean *et al.* (2007) realizó pruebas en 4 diferentes estructuras construidas dentro de un estacionamiento. Dos de las estructuras contaban con una superficie compuesta de adoquines de concreto interconectados, una más de concreto poroso y la última con adoquines de concreto tipo rejilla. Estas estructuras se complementaron con capas inferiores, tal como se muestra en la figura 2.12.

Figura 2.12. Estructura de pavimento permeable (1)



FUENTE: Bean, E., Hunt, W., Bidelspach, D. (2007). *Evaluation of four permeable pavement sites in eastern North Carolina for runoff reduction and water quality impacts*

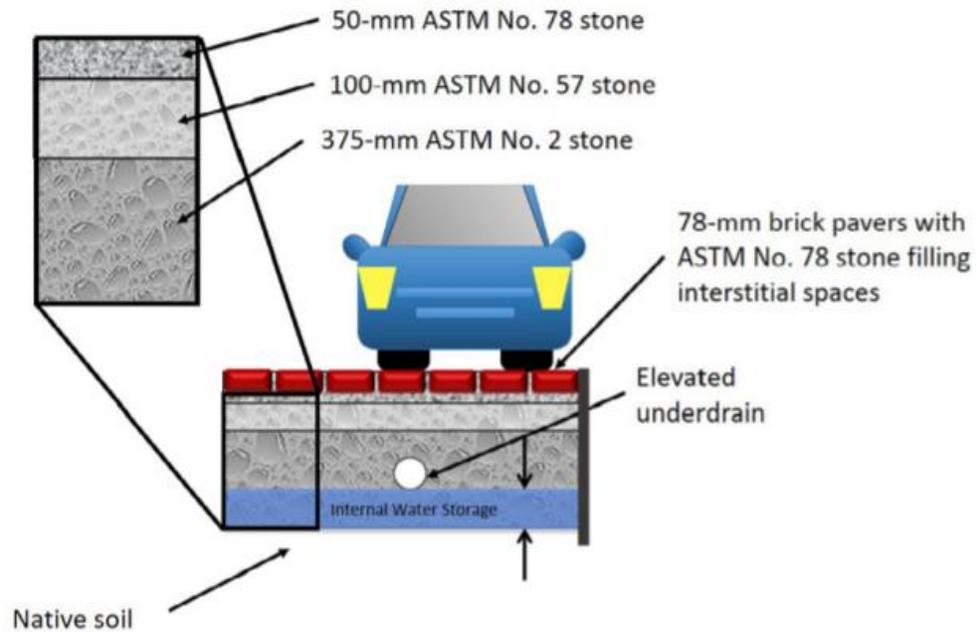
El análisis de la calidad del agua se realizó solamente en los pavimentos de adoquines de concreto interconectado. La comparativa entre el agua que escurre y el efluente, con base en 16 muestras obtenidas, arrojó como resultado una reducción en fósforo, nitrógeno y zinc. Se menciona que la construcción de pavimentos con la misma estructura que la analizada, pueden experimentar una retención de contaminantes como la que se demostró en la investigación.

Kayhanian *et al.* (2019) utilizaron una metodología un tanto diferente, él aprovechó el acotamiento de algunas secciones de carreteras y construyó pavimento permeable en ellos, y así pudo analizar el escurrimiento real de los pavimentos que sufren el paso de vehículos. Pudo determinar que la mayoría de los contaminantes medidos en los desagües pluviales de las carreteras son atribuibles a actividades del transporte y la agricultura.

Ambos estudios resultaron con una reducción significativa en la concentración de contaminantes y retención de partículas gruesas en las capas superiores de la estructura.

Otra investigación fue la realizada por Braswell et al (2018) donde se puso a prueba una estructura con capa de rodadura de adoquines de ladrillo y 3 capas inferiores de gravas de diferentes tamaños para terminar con un dren el cual ayudó al aprovechamiento del agua almacenada, esta estructura se puede observar en la figura 2.13.

Figura 2.13. Estructura de pavimento permeable (3).



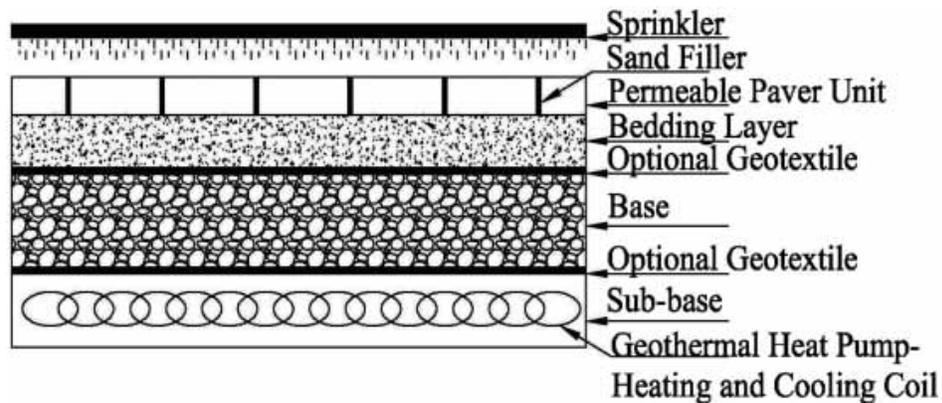
FUENTE: Braswell, A. S., Winston, R. J., & Hunt, W. F. (2018). *Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina.*

Se menciona que la utilización de esta estructura de pavimento permeable resultó en una evidente reducción en cargas y concentraciones de contaminantes, así como en el volumen de escorrentía lo que se ve traducido en un impacto positivo en la hidrología urbana. Todos los contaminantes analizados se vieron reducidos después de transcurrir a través de la estructura del pavimento, en comparativa con los que escurrieron por el pavimento convencional. El total de sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, cobre, zinc y plomo se redujeron en al menos 85%.

Por último, Imran *et al.* (2013) demostró 87% de reducción de la demanda química de oxígeno y de al menos el 90% para la demanda bioquímica de oxígeno, amonio y nitrógeno. Este análisis se realizó con una estructura compuesta como se muestra en la figura 2.14, donde se presenta una capa superior de adoquines de tabique de 60 a 80 mm de espesor, después la capa inferior al adoquín de entre 200 y 250 mm de arena, un filtro de roca triturada que actúa como plataforma para el pavimento y

brinda una capacidad filtrante con un espesor de 50 a 100 mm, por último, de 350 a 400 mm de base para poder realizar un aporte estructural importante.

Figura 2.14. Estructura de pavimento permeable (4).



FUENTE: Imran, H. M., Akib, S., & Karim, M. R. (2013). *Permeable pavement and stormwater management systems: a review.*

2.3.4. Comparativas

Un método menos experimental y más teórico consiste en realizar una comparativa entre los pavimentos convencionales y los permeables. En este tipo de investigaciones se ponen a prueba los dos pavimentos y se destacan las ventajas y desventajas de cada uno. En cuanto a los pavimentos convencionales se pudo observar que favorecen a la resistencia estructural (Gutiérrez et al, 2016), pero presentan más contaminantes en cuanto al escurrimiento del agua (Scholz y Grabowiecki 2006; Gutiérrez et al, 2016). Para los pavimentos permeables se observó la reducción de aceite, grasa, hidrocarburos de petróleo, metales nutrientes y sólidos en suspensión total (Drake *et al.*, 2014; Scholz y Grabowiecki, 2006). Collins *et al.* (2007) también observaron que el material de relleno influye en gran medida en la filtración del agua.

Fach y Geiger (2005) realizaron un estudio diferente al de todos los demás, ya que él obtuvo ciertos datos como coeficientes de sorción, y los llevó a un modelo para simular pruebas a gran escala donde demostró que el sustrato de ladrillo es buen agregado para la eliminación de metales pesados.

2.3.5. Calidad del agua en sistemas de pavimentos permeables

En cuanto a este tema se han realizado diferentes pruebas que han arrojado resultados diversos. Pratt *et al.* (1995) encontraron reducciones significativas en la concentración de contaminantes al probar diferentes agregados dentro de la sub base, para un pavimento de adoquines de concreto. Utilizó grava redondeada de 10 mm, escoria de alto horno de 40 mm, granito de entre 5 y 40 mm y caliza carbonífera de entre 5 y 40 mm. Midió el pH, la dureza, la conductividad, la alcalinidad, sólidos suspendidos, entre otros. Se hallaron diferencias en las mediciones según el tipo de pavimento analizado, lo cual fue directamente relacionado con el tipo de agregado utilizado en la base, aunque todos mostraron mejorías.

Igualmente se han hallado reducciones en otro tipo de contaminantes, por ejemplo, Pagotto *et al.* (2000) demostraron una reducción de 20%, 74% y 87% en concentraciones de cobre, plomo e hidrocarburos respectivamente; Rushton (2001) obtuvo una reducción en concentración de metales en cuencas con pavimento permeable; Brattebo y Booth (2003) reportan reducción en cobre, zinc y desapareció aceite; por último Bean *et al.* (2007) indican una reducción significativa en la concentración de nitrógeno, amonio, fósforo total y zinc.

Como se observa el agregado dentro de la estructura también puede aportar al mejoramiento de la calidad de agua obtenida. Myers *et al.* (2011) realizaron pruebas con cuarcita y dolomita hallando cierto potencial positivo para el mejoramiento de la calidad del agua.

Se ha identificado que, debido al paso del tiempo, el pavimento reduce su capacidad filtrante, por lo que es importante realizar una programación del mantenimiento, que

puede ser aireación y lavado a alta presión, por periodos de entre cada 6 meses y 12 meses, lo cual puede recuperar la permeabilidad hasta en un 90% (Sansalone *et al.* 2008; Sansalone *et al.*, 2012; Kuang y Fu, 2012;).

Es una realidad que la utilización de este tipo de pavimentos significa una inversión inicial mayor en comparativa con un pavimento convencional, pero su popularización y constante demanda, debido a los beneficios sociales y ambientales que aportan, generarían que los costos se redujeran de manera significativa (Hammes *et al.* 2018).

2.4. Requerimiento de calidad para el reúso

Para poder realizar la medición cuantitativa del desempeño de cada estructura, en cuanto a la reducción de contaminantes, es necesario conocer las normativas que servirán como parámetro. Con esto se asegura que el agua efectivamente pueda ser reutilizada posteriormente.

Ya que la experimentación fue realizada en México se toma en consideración la NOM-003-ECOL-1997, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúse en servicios al público. Dentro de ella se mencionan dos diferentes tipos de usos permitidos, con contacto directo al público y con contacto indirecto u ocasional. En el primero se considera el llenado de lagos y canales artificiales recreativos, lavado de vehículos y riego de parques y jardines, entre otros. Mientras que para el de contacto indirecto se utiliza cuando el usuario solamente entre en contacto físico incidental con el agua como en el riego de camellones en vialidades, abastecimiento de hidrantes, lagos artificiales no recreativos, entre otros.

En ocasiones la comparativa con normas mexicanas no es suficiente, por lo que también se realiza el análisis y comparativa con los límites mencionados por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) en la “Guía para la reutilización del agua”.

Ahí se mencionan diferentes fines que se le pueden dar al agua para su uso, por ejemplo uso urbano, para agricultura, medioambiental, industrial y recarga del manto acuífero. Por el objetivo de la investigación se decide considerar el uso urbano, el cual se divide en uso ilimitado y uso limitado. El uso ilimitado se da cuando el usuario puede tener contacto con el agua, y el otro cuando se tienen barreras físicas o institucionales para el contacto al público.

A continuación en la tabla 2.1, se muestran los límites que estudia cada norma, así como los límites máximos permisibles.

Tabla 2.1. Límites máximos establecidos en la normativa aplicable.

Contaminante	NOM-003-ECOL-1997		Guía para el reúso del agua - EPA	
	Servicios al público con contacto directo	Servicios al público con contacto indirecto	Ilimitado	Restringido
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	≤ 240	≤ 1000	No detectable	≤ 200
Grasas y aceites (mg/L)	≤ 15	≤ 15	N/A	N/A
DBO5 (mg/L)	≤ 20	≤ 30	≤ 10	≤ 30
SST (mg/L)	≤ 20	≤ 30	N/A	≤ 30

FUENTE: Elaboración propia.

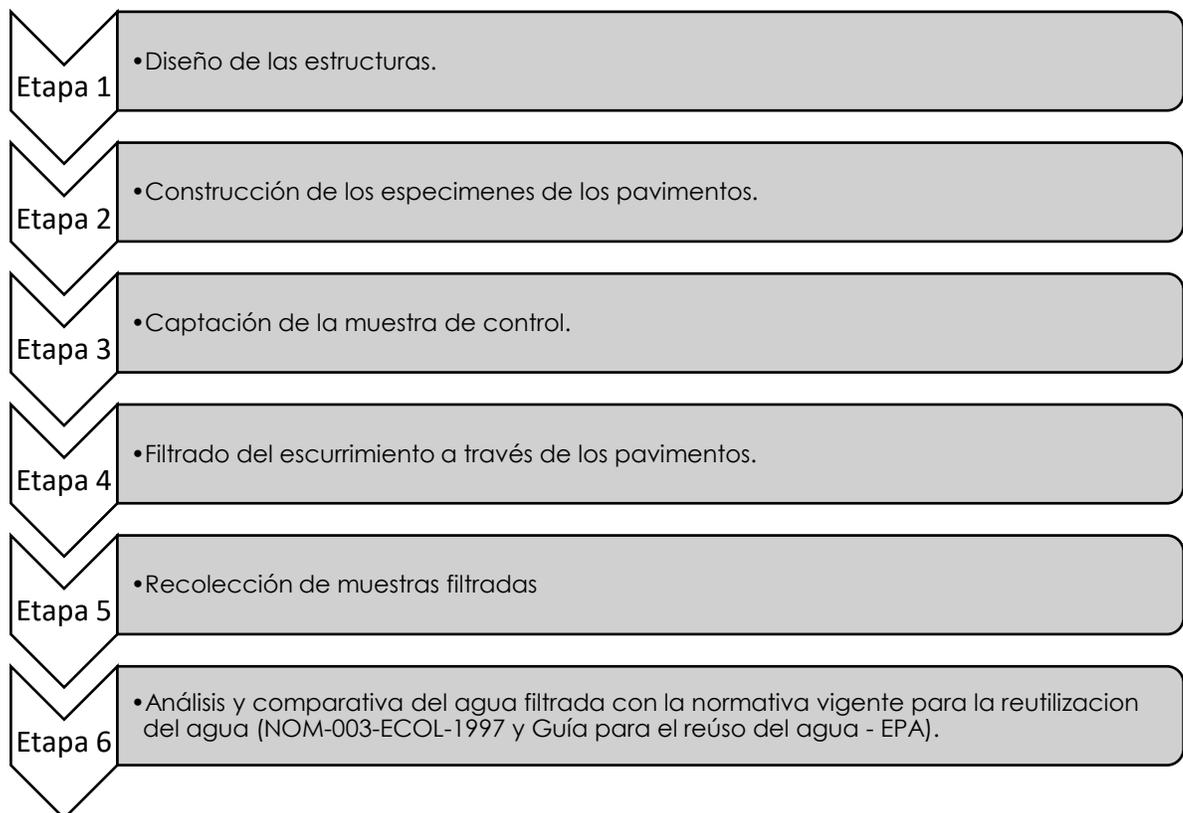
3. Metodología

3.1. Diagrama

Con base en las investigaciones previamente analizadas, se decide realizar una metodología que conforme las siguientes etapas para de esta forma dar cumplimiento a la hipótesis planteada o considerar los puntos a mejorar cuando se requiera el diseño de un sistema que busque la mejora en la calidad del efluente.

La metodología se divide en 6 etapas, que son enlistadas en la figura 3.1.

Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología.



FUENTE: *Elaboración propia.*

A continuación, se enlistan actividades específicas de cada una de las etapas

1. Diseño de estructuras.

- a. Consulta de la literatura con resultados favorecedores.
- b. Especificación de la estructura base la cual servirá para modificar características de los materiales, así como tamaño de los agregados.
- c. Definición de las estructuras finales, que serán construidas a escala real.

2. Construcción de los especímenes

- a. Obtención de los materiales a ser utilizados en los diferentes pavimentos.
- b. Realizar pruebas para garantizar, principalmente, la granulometría de los materiales, debido a que estos son parte esencial en el proceso de filtrado.
- c. Construcción de las estructuras a escala real y con longitud limitada dentro de los contenedores.

3. Captación de la muestra de control

- a. Recolección de muestras hídricas, dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Ciudad Universitaria.
- b. La recolección se debe realizar posterior al escurrimiento sobre la superficie.
- c. Conservar las muestras para su procesado, asegurando siempre que estas no sean alteradas y realizar el filtrado en un corto periodo de tiempo para evitar la modificación de las propiedades de las muestras.

4. Filtrado del escurrimiento a través de los pavimentos.

- a. Realizar el vertido de las muestras de control obtenidas para obtener la filtración a través de las estructuras de pavimento permeable.
- b. La recolección de las muestras ya filtradas se realiza con diferentes tiempos de reposo dentro de la capa de almacenamiento, ya que se ha demostrado que esto permite una mayor reducción en la concentración de contaminantes.

5. Recolección de muestras filtradas

- a. Obtención de las muestras filtradas por las estructuras permeables considerando los diferentes periodos de reposo.
- b. Encapsulado y etiquetado de muestras filtradas por el pavimento.
- c. Envío a laboratorio para obtención de niveles de concentración de las muestras obtenidas.

6. Análisis y comparativa del agua filtrada con la normativa vigente

- a. Evaluación visual y de consistencia del líquido para observar algún cambio.
- b. Elaboración de tabla comparativa destacando los contaminantes con mayor reducción.
- c. Realizar comparativa y análisis del comportamiento en la concentración de los contaminantes, considerados dentro de las pruebas.
- d. Se consultan las normas NOM-003-ECOL-1997 y la Guía para el reúso del agua – EPA, para observar si el líquido cumple con los límites máximos establecidos para poder ser reutilizada con alguna de las dos clasificaciones que menciona cada una de las normas, y así mismo destacar las actividades que se permiten para las cuales puede

ser utilizado el líquido filtrado.

3.2. Primera etapa. Diseño de estructuras

En años recientes se han desarrollado distintas investigaciones, las cuales indican que la composición de la estructura del pavimento, puede variar la eficacia del efecto de filtrado que se realiza dentro del pavimento permeable. Debido a la falta de normativa en cuanto al diseño y construcción de pavimentos permeables, se realizó la búsqueda de trabajos que cuenten con avances considerables para el cumplimiento de los objetivos actuales. Para ello fue necesario considerar diferentes investigaciones, ya que cada una se centra en diferentes aspectos importantes como la composición general de la estructura, la capa de almacenamiento o el tipo de agregado a utilizar para la conformación del modelo.

Como se menciona, la investigación en torno a las capas inferiores es diversa, pero se encontró que la información en torno a la influencia de las capas superficiales en este tipo de estructuras es escasa. En algunas investigaciones se utilizan adoquines como capa de rodadura y en algunos otros no se colocan capas de rodadura y solo se realizan las pruebas de filtración a las capas inferiores de la estructura. En esta investigación se busca la incorporación de mezclas *open graded* o de granulometría abierta.

Las mezclas *open graded* se caracterizan por ser porosas, con vacíos conectados dentro de ellas y una permeabilidad alta, se recomienda su utilización en ubicaciones donde existe gran cantidad de precipitación, ya que se reduce el fenómeno del hidro planeo y el spray dentro de las carreteras (Huber, 2000). Se diseñan con un tamaño de agregado uniforme con el propósito que se facilite el drenaje a través de la base o de la superficie del pavimento. Regularmente están conformadas con agregados de un tamaño máximo de agregado de entre 19 y 25 mm (Asphalt Institute, 2014).

Razón por la cual se toma en cuenta lo realizado por Hammes *et al.* (2018) para el diseño de la estructura principal. Ellos utilizan la influencia de las capas dentro de la estructura, ya que miden el desempeño de dos composiciones totalmente diferentes. A continuación, se enlistan las capas que conforme cada una de las estructuras:

Tabla 3.1. Estructuras utilizadas por Hammes *et al.* (2018).

Estructura 1	Estructura 2
<ul style="list-style-type: none"> • Capa superior de mezcla asfáltica porosa con un contenido de asfalto del 5% de 5 cm de espesor. • Capa filtrante superior de grava con un TMA de 19 mm de 3 cm de espesor • Capa de filtración gruesa de grava con TMA de 9.5 mm de 4 cm de espesor • Capa filtrante de arena con TMA de 4.75 mm de 25 cm de espesor • Capa de almacenamiento de 5 cm de espesor con agregado grueso con un TMA igual a 37.5 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Capa superior de mezcla asfáltica porosa con un contenido de asfalto del 5% de 5 cm de espesor. • Capa filtrante superior de grava con un TMA de 19 mm de 3 cm de espesor • Capa de almacenamiento de 5 cm de espesor con agregado grueso con un TMA igual a 37.5 mm

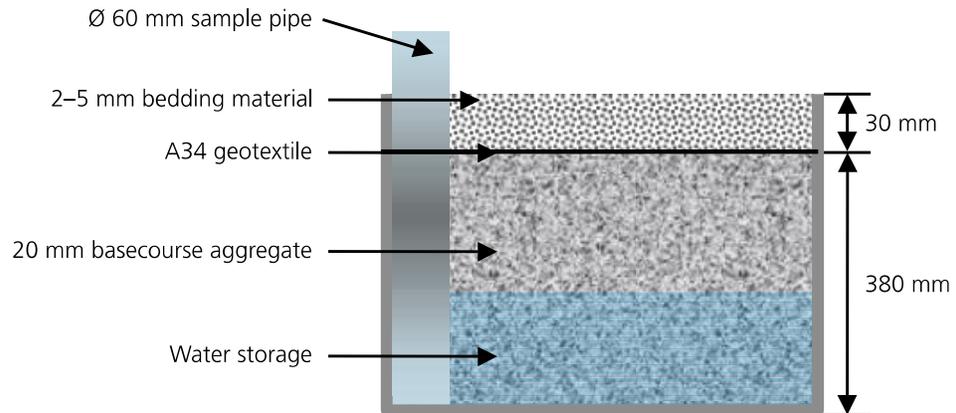
FUENTE: *Elaboración propia.*

Ambas estructuras presentaron reducciones en coliformes fecales, sólidos suspendidos totales, color, turbidez y nitritos. Los dos primeros contaminantes son mencionados dentro de las dos normas consideradas en la presente investigación por lo que se toma en cuenta lo investigado para conformar la estructura general a prueba. Hammes *et al.* (2008) menciona que la primera estructura es la que presenta un mejor desempeño, ya que tuvo la capacidad de filtrar aproximadamente un 10% más de agua. Adicionalmente tuvo un mejor desempeño en cuanto a la reducción de coliformes fecales, color, turbidez, nitritos y sólidos suspendidos totales.

Es importante la consideración de capas de almacenamiento debido a que, como se menciona anteriormente y como lo indican Huang y Liang (2018), el tiempo de reposo y el agregado dentro de estas capas tienen cierta influencia en la mejora de la calidad del agua y es importante la magnitud de esta influencia. De igual forma, esta capa ayuda en casos de tormentas debido a que puede captar una mayor cantidad de escorrentías y permite que sea filtrada adecuadamente.

Por ejemplo, Myers *et al.* (2011) analiza el almacenar el recurso hídrico por un tiempo determinado, para identificar si los agregados dentro de la capa de almacenamiento generaban algún cambio en la calidad del agua. Realizó la construcción de una estructura compuesta de una superficie de rodadura de adoquín, debajo una capa de 30 mm de cuarcita y dolomita de un TMA entre 2 y 5 mm, y por último una base de 380 mm de espesor con un TMA de 20 mm. La estructura se detalla a continuación dentro de la figura 3.2.

Figura 3.2. Estructura de pavimento permeable (2).

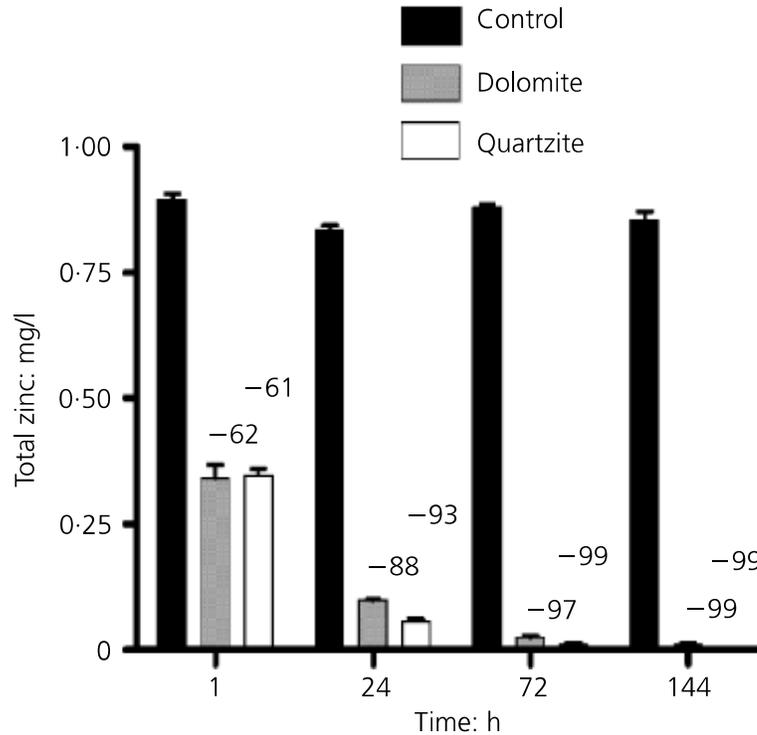


FUENTE: Myers, B., Beecham, S., & van Leeuwen, J. A. (2011). *Water quality with storage in permeable pavement basecourse.*

El análisis se realizó sin colocar la capa superior compuesta de adoquines, ya que se centró principalmente en la influencia de los agregados de la capa de almacenamiento, así como el tiempo de reposo del agua dentro de ella. Es por esto que se coloca la tubería de 60 mm de diámetro, para que no se dé ningún proceso de filtración por escurrimiento y pueda determinarse la reacción del agua con el mineral.

Los resultados obtenidos se categorizaron según el tiempo de reposo del líquido (1, 24, 72 o 144 horas), y si la capa inferior contiene cuarcita o dolomita, tal como se muestra en la figura 3.3, en la cual se muestran los valores obtenidos para la concentración total de zinc.

Figura 3.3. Reducción de zinc total (Myers *et al.*, 2011).



FUENTE: Myers, B., Beecham, S., & van Leeuwen, J. A. (2011). *Water quality with storage in permeable pavement basecourse.*

Myers *et al.* (2011) pudo concluir que la capa de dolomita y de cuarcita le otorgan un gran número de ventajas al efluente de agua. Ambos aumentaron el pH y la conductividad, y redujeron significativamente las concentraciones de color, nitrógeno, fósforo, cobre, plomo y zinc. También se pudo observar que el tiempo de almacenamiento influye mucho en la calidad brindada, ya que para el lapso entre 72 y 144 horas se obtuvieron las menores concentraciones de contaminantes en comparativa con los demás lapsos de tiempo. Como el tiempo con un mejor desempeño fue a las 144 horas de residencia dentro de la estructura, se menciona la importancia de la experimentación en un mayor periodo, para poder determinar si el desempeño mejora o se estanca.

Una vez teniendo los espesores de capa, tamaños de agregado y el tipo de mineral utilizado en la capa de almacenamiento, se busca el tipo de agregado que se va a

emplear en las capas base. Para esto se utiliza lo desarrollado por Silva-Juárez *et al.* (2021) ellos realizaron pruebas con cilindros de concreto permeable y se incluía el basalto como principal agregado. Los análisis se realizaron con lluvia artificial, utilizando diferentes concentraciones de metales pesados. La prueba de adsorción se realizó sumergiendo los cilindros en vasos de precipitado por 96 horas. Los resultados mostraron la disminución en concentraciones de cadmio, arsénico y zinc.

3.3. Segunda etapa. Construcción de los especímenes

Para iniciar con la segunda etapa del proceso de experimentación es necesario contar con los agregados de especificaciones dadas dentro del apartado de diseño de estructuras. El material debe cumplir con el tipo de mineral especificado, tamaño mencionado y cantidad necesaria para cubrir el espesor de diseño de cada una de las capas.

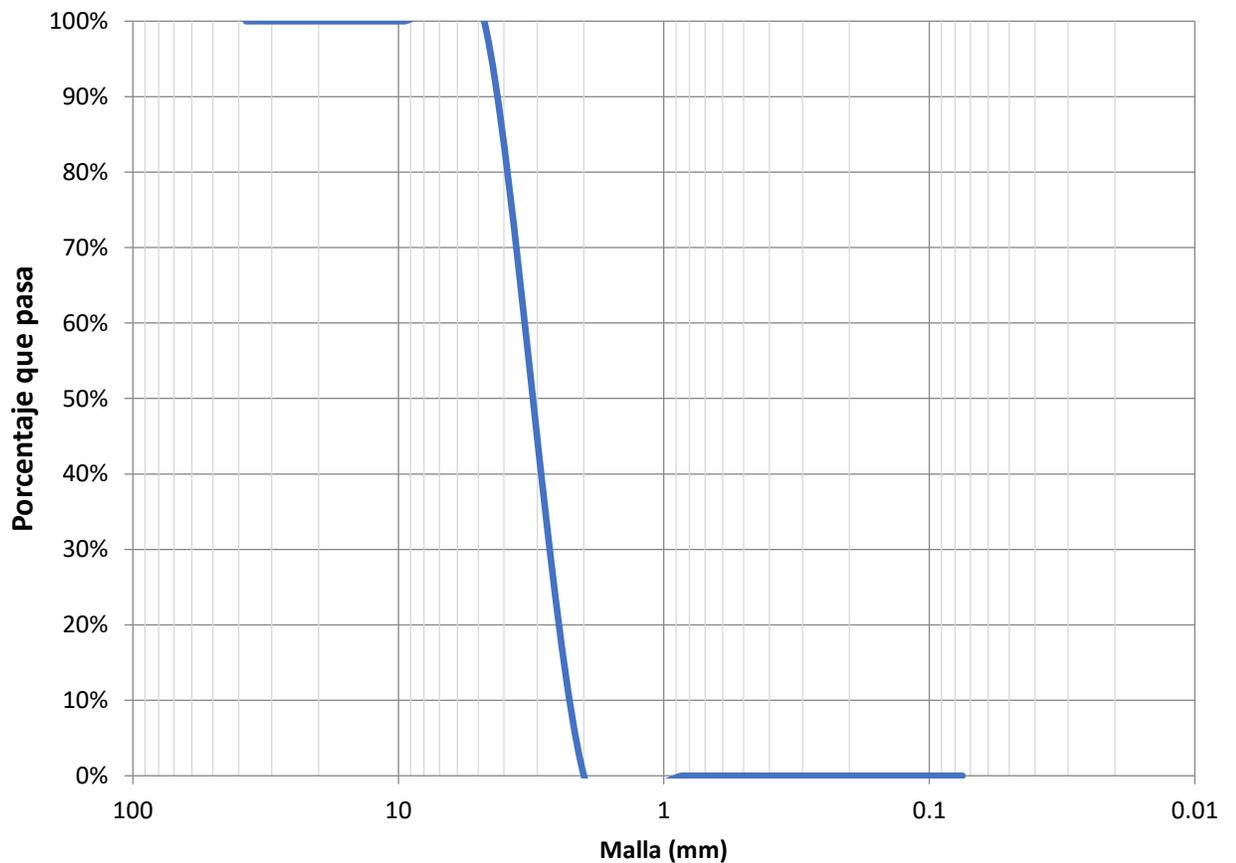
Para la obtención de dolomita se recurre a lo reportado por SGM (2019), donde se indican los principales puntos de explotación de minerales dentro del estado de Hidalgo. Gracias a esto es posible localizar la mina de nombre “San Pedro” (con coordenadas 20.734236, -99.390266) en el estado de Zimapan, donde actualmente se cuenta con el permiso de explotación de dolomita por parte de la empresa “MOLIENDAS Y MEZCLAS MINERALES, S.A. DE C.V.” Por su parte Silva-Juárez *et al.* (2021), mencionan dentro de su investigación el lugar de obtención del material. Este fue hallado en la mina “La Cañada” (con coordenadas 20.734236, -99.390266) ubicada en Querétaro de Arteaga, Querétaro, por lo que se recurre a este mismo punto para la obtención del basalto.

Debido a que el material será empleado en un pavimento permeable se considera necesario que cumpla con lo que establece la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para características de materiales utilizados en bases hidráulicas. En ella se establecen requisitos de calidad de los materiales en los que se indican valores máximos o mínimos, dependiendo el caso, para ciertas pruebas que se deben realizar al material. Algunas pruebas que se mencionan son

aplicables únicamente cuando el material contiene cierto porcentaje de finos, como los límites de consistencia y equivalente de arena. Estas pruebas no son aplicables en este caso, ya que el material será limpiado de finos para evitar que estos sean arrastrados en el proceso de filtración y reducir la probabilidad de taponamiento.

Debido a las características de los especímenes, es necesario que el material sea clasificado por tamaño para poder garantizar que se tengan capas de granulometría uniforme, ya que como indica Cruz (2008), cuando un filtro está compuesto de dos o más capas, estas deben estar constituidas por material uniforme y dispuestas de forma gradual, de manera que las capas con material de menor tamaño sean las capas finales del filtro.

Figura 3.4. Curva granulométrica de tercer capa filtro de estructura A.



FUENTE: *Elaboración propia.*

Es por esto que resulta necesario realizar el tamizado de los materiales a emplear con ayuda de las mallas indicadas a continuación.

Tabla 3.2. Mallas utilizadas para el tamizado.

Malla	
Abertura (mm)	Designación
25	1"
19	¾"
9.5	3/8"
4.75	N.º 4
2	N.º 10
0.85	N.º 20

FUENTE: *Elaboración propia.*

Se consideran estas mallas, ya que son parte de las mencionadas en la N-CMT-4-02-002/16 que indica las características de los materiales para bases hidráulicas. Se utilizan inicialmente los tamaños de agregado indicado por Hammes *et al.* (2018) y por Myers (2011) para respetar las características de los modelos descritos.

Es importante que la construcción sea a escala real para tener resultados significativos, por lo que los contenedores deben de contar con ciertas características. Inicialmente deben de tener la altura necesaria para contener la estructura y proveer al modelo de un sellado hermético para asegurar que no se introduzcan agentes externos durante el periodo de reposo y se evite la alteración de las muestras. Es por esto que se considera la utilización de bidones de polietileno de 60 litros de 700 mm de altura, con tapa y aro de sellado.

3.4. Tercera etapa. Captación de las muestras de control

Se realiza en contenedores limpios y que no afecten a la calidad real del agua. La recolección se realiza posterior a que el agua pluvial escurra por la superficie, ya que al contacto con el pavimento convencional se arrastran agentes contaminantes que modifican la composición del agua. De igual forma se debe de cuidar que se recolecten en un punto donde el agua no se encuentre estancada, ya que como menciona Trick *et al.* (2008) el estancamiento del agua puede generar alteraciones en la concentración de los contaminantes. Inmediatamente después de recolectadas las muestras se deben envasar en contenedores esterilizados tal como indica el laboratorio, para evitar su alteración. Esta etapa de análisis nos servirá como control y punto de comparación para analizar el nivel de mejora que presenta cada uno de los especímenes posterior a que se realice el filtrado por las estructuras.

3.5. Cuarta etapa. Filtrado del escurrimiento a través de los pavimentos.

Inmediatamente después de la recolección de la muestra se realiza el vaciado del líquido en los modelos construidos para que se inicie el proceso de filtrado dentro de ellos, cuidando siempre que no se introduzcan agentes externos a las muestras pluviales. Este es el punto donde se coloca tapa y aro de sellado a los contenedores y se conservan de esta manera hasta terminada la recolección de las muestras filtradas.

3.6. Quinta etapa. Recolección de muestras filtradas.

Se toman muestras de cada uno de los especímenes posterior al filtrado y con diferentes tiempos de reposo dentro de la estructura. Como menciona Myers (2011) el tipo de material y el tiempo de reposo influyen en la calidad del agua, es por esto que se considera esta variable para tener diferentes puntos de comparación. Myers

(2011) llevó su investigación hasta las 144 horas de reposo, teniendo los mejores resultados en este lapso de tiempo. Es por esto que esta investigación amplía este tiempo de reposo para observar lo que sucede posterior a estas 144 horas.

Se toman muestras inmediatamente después a la prueba de filtrado, para decidir si es posible la reutilización del agua inmediatamente después a la precipitación. Y se toman muestras a las 144 y 240 horas posteriores al filtrado para poder observar cómo se comportan los contaminantes estudiados.

3.7. Sexta etapa. Análisis y comparativa del agua filtrada

En este punto, se obtienen las reducciones en la concentración de los contaminantes y se puede determinar que estructura tuvo un mejor desempeño, y si es que el tamaño del agregado influye en el nivel de filtración. Igualmente se realiza la comparativa con los límites que se establecen en las normativas para determinar si el agua cumple con la calidad necesaria para ser reutilizada. Resulta importante destacar los niveles de reducción, aun si estos no lograron cumplir con los límites máximos establecidos por las normativas.

4. Resultados

Con base en lo mostrado dentro de la metodología este apartado se divide en tres secciones. En la primera se describe a detalle cada una de las tres estructuras diseñadas, así como el proceso que se llevó a cabo para su conformación. La segunda, menciona el sitio de estudio, el proceso para la filtración y toma de muestras. Por último, se muestran los niveles obtenidos posteriores al análisis de los contaminantes en las muestras, los porcentajes de reducción y que estructura se coloca cómo la indicada para su implementación en este tipo de sistemas.

4.1. Diseño y construcción de las estructuras

Cómo se mencionó previamente se toman en cuenta tres principales investigaciones para apoyar el diseño de las estructuras. La tabla 4.1 muestra aspectos importantes a considerar de cada una de ellas, así como las estructuras que influenciaron el diseño de los especímenes de la presente investigación.

Tabla 4.1. Tabla comparativa de las estructuras utilizadas.

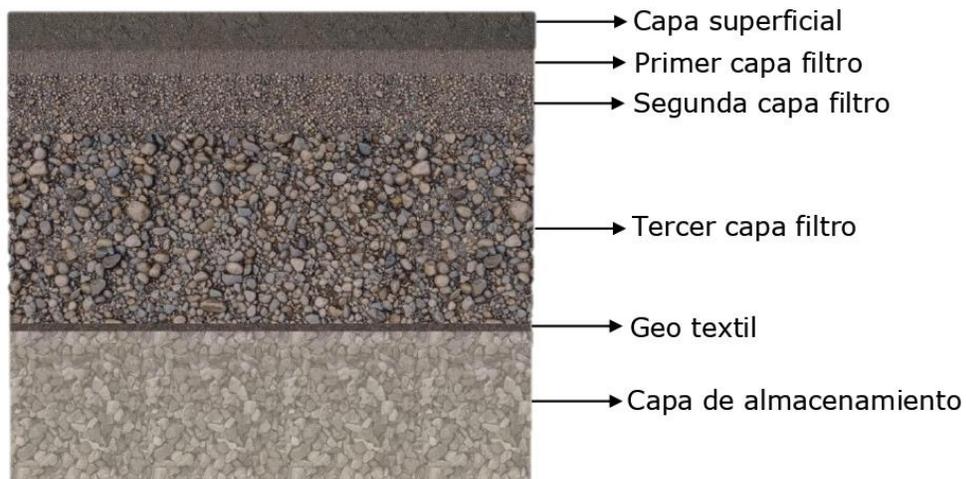
	Hammes <i>et al.</i> (2018)	Myers <i>et al.</i> (2011)	Silva-Juárez <i>et al.</i> (2021)
Ventajas	Reducción de coliformes fecales, color, turbidez, nitrito y sólidos suspendidos totales.	Reducción significativa de color, TKN, TP, cobre total, plomo total, zinc total, reducción de turbidez y SST entre 77 y 144 hrs de almacenamiento.	Reducción de cadmio, zinc y arsénico
Desventajas	No indica el comportamiento de huevos de helminto, grasas, aceites y DBO5	Falta investigación a un mayor tiempo	Se toma en cuenta reducción de metales pesados y no se consideran los contaminantes mencionados en la normativa
Descripción de las estructuras	<ul style="list-style-type: none"> • Capa superior de mezcla asfáltica porosa sobre capas granulares permeables. Mezcla asfáltica con agregados de granito con 5% de asfalto. • Choker course: 3 cm de grava con TMA igual a 19 mm • Capa filtrante: 25 cm de arena con TMA igual 4.75 mm • Capa filtración gruesa: 4 cm de arena de TMA 9.5 mm • Capa de almacenamiento: 5 cm de agregado grueso con un TMA igual a 37.5 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Generados en contenedores de polipropileno • Capa superior de adoquín • Capa de 30 mm de agregado permeable • Geotextil A34 • Capa de agregado con TMA de 20 mm de dolomita o cuarcita de 380 mm de espesor 	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindros (50 x 100 mm) con lechada de concreto y rocas basálticas con un TMA igual a 9.5 mm

FUENTE: *Elaboración propia.*

Considerando los datos anteriores se diseña una estructura central, sobre la que se varían los tamaños de agregado para realizar una comparativa y observar cómo influye el tamaño de los agregados en la calidad del agua obtenida.

A continuación, en la figura 4.1, se muestra la estructura general sobre la que se dieron tamaños máximos de agregado (TMA) a las capas.

Figura 4.1. Estructura base de la experimentación.



FUENTE: *Elaboración propia.*

La estructura A se provee de un TMA intermedio en comparativa con las siguientes estructuras, es por esto que se respetan los tamaños mencionados por Hammes *et al.* (2018) y Myers *et al.* (2011). Dentro de sus trabajos de investigación. Para las estructuras B y C el TMA fue modificado. En la estructura B se ubica un tamaño de agregado menor reduciendo un tamaño de abertura de malla respetando los tamices indicados previamente, y para la estructura C se aumentó un tamaño de malla en comparativa con la estructura A. Quedando constituidos los modelos como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Diseño de estructuras.

	Capa superficial	Primer capa filtro	Segunda capa filtro	Tercer capa filtro	Geotextil	Capa de almacenamiento
Estructura A	50 mm de asfalto poroso	30 mm de basalto con TMA igual a 19 mm	80 mm de basalto con TMA igual a 9.5 mm	250 mm de basalto con TMA igual a 4.75 mm	Geotextil permeable	200 mm de dolomita con cuarcita con TMA igual a 19 mm
Estructura B		30 mm de basalto con TMA igual a 9.5 mm	80 mm de basalto con TMA igual a 4.75 mm	250 mm de basalto con TMA igual a 2 mm		200 mm de dolomita con cuarcita con TMA igual a 9.5 mm
Estructura C		30 mm de basalto con TMA igual a 25 mm	80 mm de basalto con TMA igual a 19 mm	250 mm de basalto con TMA igual a 9.5 mm		200 mm de dolomita con cuarcita con TMA igual a 25 mm

FUENTE: Elaboración propia.

Como se puede observar se toma la estructura general propuesta por Hammes (2008), añadiendo la dolomita y cuarcita en la capa de almacenamiento como indica Myers (2011) y se utiliza el agregado de basalto que analizaron Silva *et al.* (2021). Se realiza un pequeño cambio al mover la capa de 25 cm a la parte baja de la estructura, ya que esta capa se compone de un material de mayor TMA que la capa de 8 cm y como lo menciona Cruz (2008) cuando se tiene un sistema de filtros de diferente tamaño de agregados es necesario que estén ubicados del agregado de mayor tamaño al más pequeño. Es por esto que se decide incorporar un geotextil permeable para impedir el intercambio de materiales entre la tercera capa filtro y la capa de almacenamiento.

Previo a la construcción de las estructuras permeables, se adaptó una llave de nariz a la base de cada uno de los bidones de polietileno, esto para facilitar la recuperación de las muestras filtradas, simulando la reutilización de las mismas.

Una vez teniendo los materiales caracterizados por tamaño y sin contenido de finos, solamente se realizó la colocación del material dentro de los contenedores respetando el espesor de capa mencionado previamente. El material se fue colocando en capas de 100 mm y se realizó una ligera compactación con ayuda de una varilla con punta de bala realizando 35 penetraciones en el sentido de las

manecillas del reloj y avanzando en forma espiral hacia el centro, proceso que se muestra en la figura 4.2. En las capas de un espesor menor a 20 cm la compactación se realizó al completar el espesor total de la capa. Esto se realiza con el objetivo de dar un mayor acomodo a los agregados y que se tenga un mejor filtrado al reducir el espacio de vacíos.

Figura 4.2. Proceso de compactación.



Tan pronto se terminó la construcción de los especímenes estos fueron colocados a la sombra a temperatura ambiente y fueron sellados con ayuda de la tapa y el aro para evitar la introducción de agentes externos al sistema.

Figura 4.3. Ejemplo de los especímenes construidos.



4.2. Sitio de estudio y toma de muestra de control

Gracias a las amplias vialidades y zonas de estacionamiento con las que cuenta el campus Centro Universitario de la Universidad Autónoma de Querétaro se consideró este punto como la zona de estudio. Como se ha mencionado previamente algunas de las zonas susceptibles a instalar este tipo de sistemas son los cajones de estacionamiento y las más de 13 zonas con las que cuenta este campus, y que se muestran en la figura 4.4, hacen de este lugar el adecuado para su intervención. La instalación de este tipo de sistemas en el lugar de estudio, hace que se pudiera tener un potencial aprovechamiento en el regado de jardines y descarga de sanitario, ya que los jardines y sanitario regularmente se ubican cercanos a alguna vialidad o estacionamiento.

Figura 4.4. Sitio de estudio.



En cuanto se decide el sitio de estudio se procede a la toma de la muestra de control. El día 23 de mayo del 2022 se presenta la primera precipitación de la temporada dentro de la zona de Querétaro, la cual fue aprovechada para la recolección de las muestras de agua pluvial iniciales. Para la recolección fue necesario ubicar una pendiente donde se halló agua escurriendo previo a su estancamiento. Se realizó la recolección de 100 litros de agua pluvial en cubetas previamente lavadas.

Figura 4.5. Recolección de muestras.



El agua fue mezclada posterior a su recolección con la finalidad de tener muestras uniformes y con la misma cantidad de contaminantes.

Inmediatamente después del mezclado del agua pluvial, se realiza la recolección de muestras de control con las medidas brindadas por el laboratorio de Ingeniería y Estudios Ambientales (INESA) ubicado en Santiago de Querétaro, Querétaro. Este laboratorio cuenta con certificaciones de la entidad mexicana de acreditación, para evaluar los parámetros a estudiar, mismos que son evaluados por la NOM-003-ECOL-1997. El análisis de las muestras se realizó conforme los procedimientos

descritos dentro de la normativa mexicana. La NMX-AA-005-SCFI-2013 indica los parámetros para realizar la prueba de medición de grasas y aceites en aguas naturales, residuales y tratadas; por su parte, la NMX-AA-028-SCFI-2001 nos muestra el marco para determinar la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales y tratadas; la medición de sólidos suspendidos totales en aguas naturales, residuales y aguas tratadas es regida por la NMX-AA-034-SCFI-2015; por último la NMX-AA-042-SCFI-2015 muestra el método adecuado para la determinación y enumeración del NMP de coliformes fecales en agua residual.

La recolección se realizó en contenedores esterilizados de 4 litros, 1 litro y 345 ml para cada una de las diferentes muestras. Estos contenedores se observan en la figura 4.6. Se conservan las muestras a una temperatura entre 2°C y 8°C para su traslado y posterior análisis.

Figura 4.6. Muestra de control.

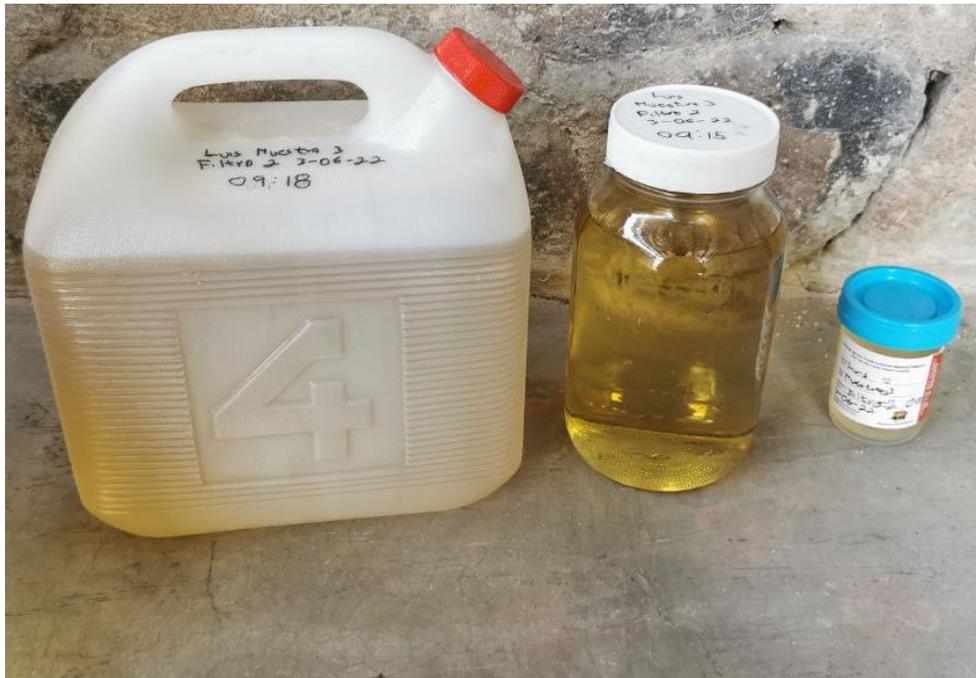


De los 100 litros obtenidos, 10 fueron reservados para su análisis como muestras de control. Estas muestras fueron de utilidad para tener un punto de comparación en cuanto a la reducción de contaminantes. Los 90 litros restantes fueron repartidos uniformemente y vaciados en las tres estructuras construidas. Se realiza el vertido

del líquido dentro de los contenedores con las estructuras cuidando que la muestra tomada previamente no sea alterada y presente variación dentro de su análisis.

Una hora posterior al vertido del agua pluvial se toma la primera muestra de agua filtrada por cada una de las estructuras. Esta servirá como punto inicial de comparación. Pasadas 144 y 240 horas se toman las dos muestras restantes de cada una de las estructuras, con las medidas previamente descritas y son enviadas a laboratorio para su análisis. Se obtuvieron un total de 10 muestras, una muestra de control y nueve muestras filtradas.

Figura 4.7. Muestra filtrada.



4.3. Calidad de agua obtenida y comparativa con la normativa

La primera diferencia que se puede observar al obtener las muestras es el color, olor y la consistencia que presentan las muestras. En las figuras 4.6 y 4.7 se pueden observar muestras de diferentes periodos de tiempo y es evidente el cambio de color que se presenta posterior a la filtración. Así mismo con el olor, ya que, con el paso del tiempo del agua dentro de la estructura, este se vuelve menos molesto.

Inicialmente las muestras presentaban una consistencia mayormente espesa en comparativa con las muestras finales, esto a causa del alto contenido en sólidos suspendidos totales, los cuales se reducen desde el primer proceso de filtración.

Para poder realizar un análisis más profundo del comportamiento y desempeño de las estructuras es necesario que se tengan resultados cuantificables y no solamente la inspección visual. Es por esto que a continuación, en la tabla 4.3, se muestran resultados de las concentraciones de contaminantes obtenidos de las pruebas de laboratorio.

Tabla 4.3. Diseño de estructuras.

Tiempo (h)	Coliformes fecales (NMP/100ml)			Sólidos suspendidos totales (mg/L)			Grasas y aceites (mg/L)			DBO (mg/L)		
	1	144	240	1	144	240	1	144	240	1	144	240
Muestra de control	≥2,400	NA	NA	1,065	NA	NA	17.1	NA	NA	1,622	NA	NA
Estructura A	≥2,400	≥2,400	≥2,400	66	242	45	2.7	3.3	2.6	76.4	370	99.2
Estructura B	≥2,400	≥2,400	≥2,400	22	18	45	≤1.95	5.6	2.5	30.8	1503.3	90
Estructura C	≥2,400	≥2,400	≥2,400	18	14	50	≤1.95	4.3	7.3	24.1	270	100.2

*Nota: NA = No aplica.

FUENTE: *Elaboración propia.*

Como se puede observar los coliformes fecales no presentaron variación en los niveles reportados, ya que todas las mediciones se encuentran por encima de los 2,400 NMP/100 ml. Este resultado se presenta de tal manera, ya que este es el límite máximo detectable por la prueba. Esto nos hace pensar que, si se tuvieron ciertas reducciones en el nivel de coliformes fecales, pero debido a que la muestra de control presenta un gran nivel de contaminación, las reducciones no fueron capaces de reflejarse dentro del análisis. Este alto nivel de coliformes fecales se encuentra ligado a que las muestras fueron obtenidas de la primera precipitación de la temporada, por lo que el escurrimiento genera un lavado de la superficie y adquiere una mayor cantidad de contaminantes que en las precipitaciones

subsecuentes. Otra razón por la que no se encuentra reducción en este contaminante es que debido al proceso de filtración y los diferentes tiempos de residencia de las muestras dentro de las estructuras, estas se mantienen saturadas, lo que permite el transporte, acoplamiento y rebrote de los coliformes dentro de la estructura (Kooij y Wielen, 2014; Sepehrnia *et al.*, 2018).

El tema de los sólidos suspendidos totales es un tanto diferente, ya que aquí se pueden observar reducciones notables. La concentración para la muestra de control se colocó en los 1,065 mg/l y la muestra filtrada con una menor reducción fue la segunda muestra con 244 mg/l que representa el 77.28% de reducción. En cambio, la estructura que mejor desempeño mostró fue la estructura C a las 144 horas de reposo con un 98.69 % de reducción. En la tabla 4.4 se muestran los porcentajes de reducción obtenidos de cada muestra analizada.

Tabla 4.4. Porcentajes de reducción de sólidos suspendidos totales.

Tiempo (h)	Porcentaje de reducción de sólidos suspendidos totales		
	1	144	240
Estructura A	93.8%	77.28%	95.77%
Estructura B	97.93%	98.31%	95.77%
Estructura C	98.31%	98.69%	95.31%

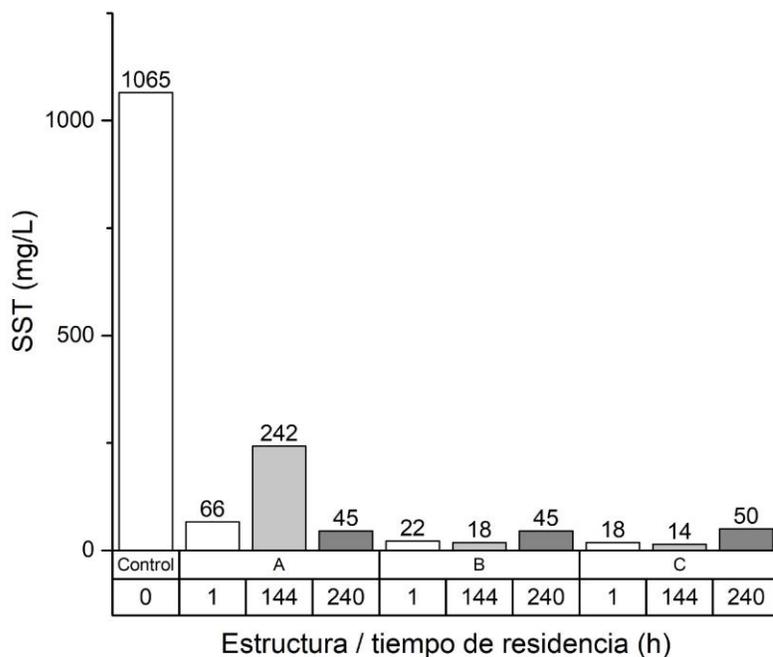
*Nota: NA = No aplica.

FUENTE: *Elaboración propia.*

A pesar de que las reducciones se presentan en diferentes magnitudes, todas presentan una reducción considerable en comparativa con la muestra de control, lo cual se deja ver gráficamente en la figura 4.8. La estructura A fue la que obtuvo el desempeño menos favorable, ya que a pesar de que la primera muestra presenta una reducción en la concentración; la segunda muestra indica un repunte en el contenido de sólidos suspendidos totales, pero sin llegar a equipararse con lo obtenido en la muestra de control; la tercera muestra presenta el menor nivel presentado en esta estructura.

En cambio, las estructuras B y C nos indican una reducción más favorable en comparativa con lo antes mencionado. Ambas estructuras presentan un comportamiento similar, ya que indican una reducción en la primera muestra con 22 mg/l y 18 mg/l respectivamente, esto para seguir reduciéndose 4 mg/l para la segunda muestra y terminar con un ligero aumento a las 240 horas de reposo, colocándose en un nivel similar a lo presentado por la estructura A.

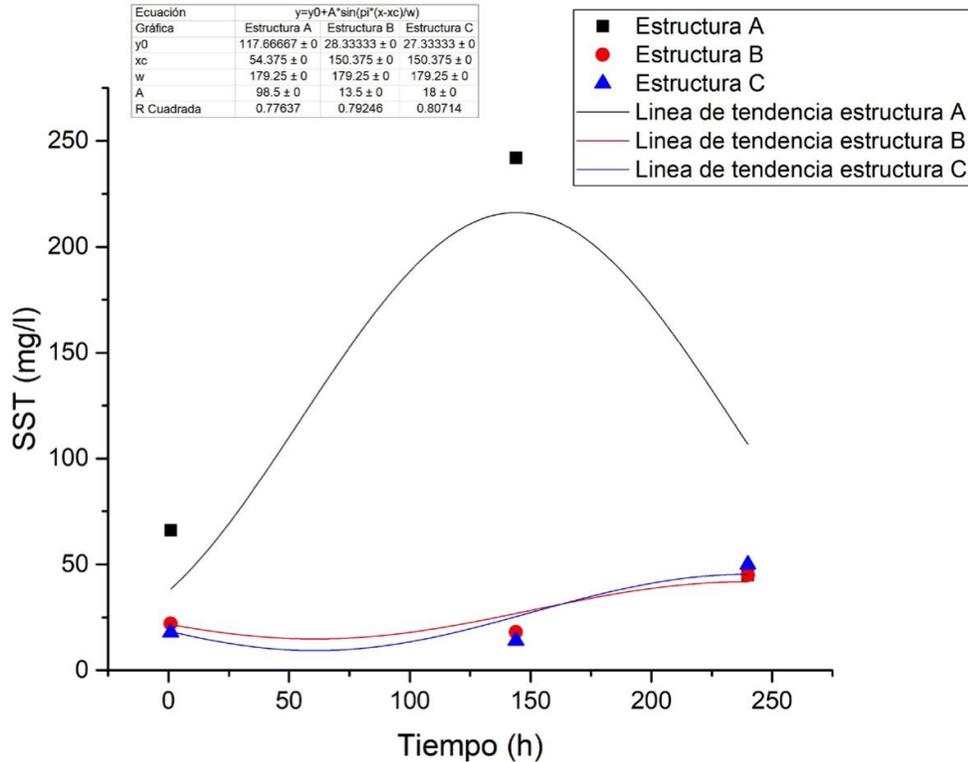
Figura 4.8. Niveles de concentración de sólidos suspendidos totales.



FUENTE: Elaboración propia.

Analizando las fluctuaciones que se presentan en los niveles de concentración y de acuerdo a la línea de tendencia obtenida en la figura 4.9, podemos determinar que las tres estructuras presentan una tendencia reducir su contenido de sólidos suspendidos totales. Los niveles de las tres estructuras llegan a una estabilización posterior a las 244 horas de reposo, colocándose entre los 45 mg/l y los 50 mg/l.

Figura 4.9. Tendencia de la concentración de sólidos suspendidos totales.



FUENTE: Elaboración propia.

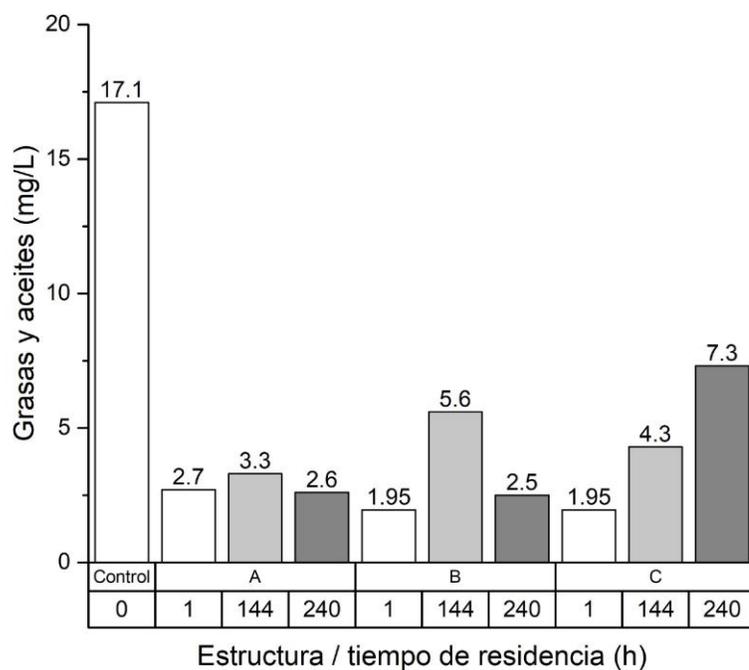
Respecto a las grasas y aceites, estas fueron las que presentaron una menor concentración, colocándose todas las muestras por debajo de los 7.3 mg/l. Inclusive la estructura B y C, en el inicio del periodo temporal, obtuvieron un nivel menor al 1.95 mg/l que es la concentración mínima detectable por la prueba de laboratorio. La muestra de control se colocó en los 17.1 mg/l y todas las muestras tuvieron reducciones de entre un 57.31% y un 88.6%, como se puede observar en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Porcentajes de reducción de grasas y aceites.

Tiempo (h)	Porcentaje de reducción de grasas y aceites		
	1	144	240
Estructura A	84.21%	80.70%	84.80%
Estructura B	88.60%	67.25%	85.38%
Estructura C	88.60%	74.85%	57.31%

Con base en lo mostrado en la figura 4.10, se puede observar que la estructura A presenta una reducción en el inicio de la filtración y a pesar de tener un aumento en la segunda muestra el último análisis muestra el menor nivel de las 3 muestras con 2.6 mg/l. La estructura B tiene un comportamiento similar que la estructura A, pero esta última presenta su menor nivel de concentración inmediatamente después de la filtración. Por su parte la estructura C encuentra su menor concentración al inicio del filtrado y posteriormente sufre un aumento en para terminar el periodo de estudio en 7.3 mg/l.

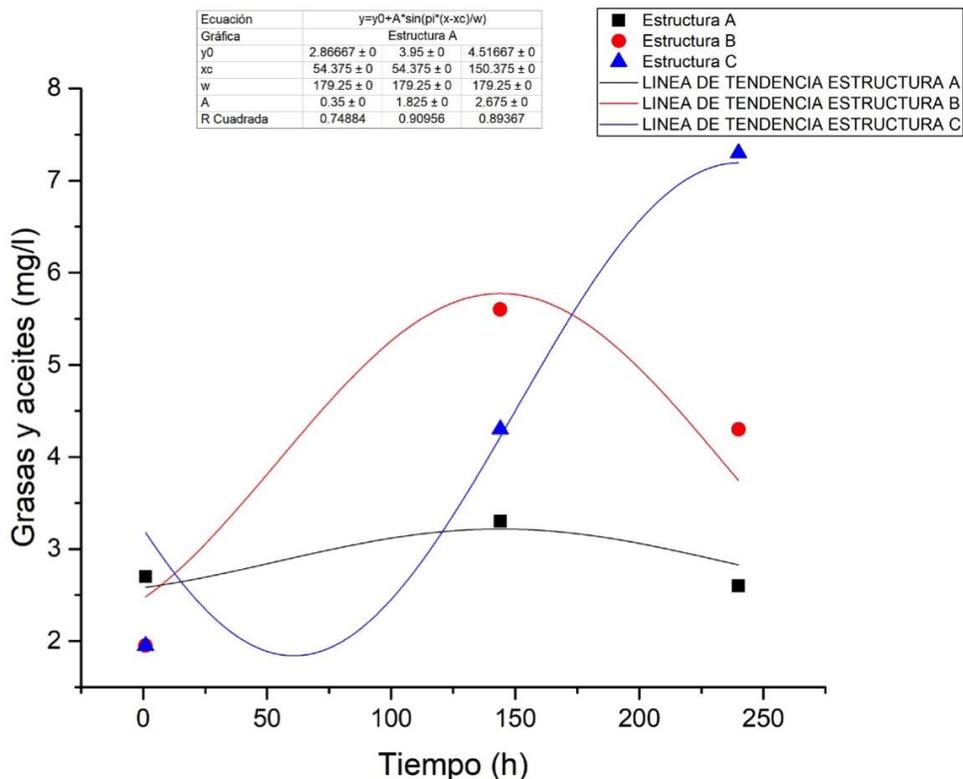
Figura 4.10. Niveles de concentración de grasas y aceites.



FUENTE: *Elaboración propia.*

A pesar de tener aumentos en las segundas e inclusive en las terceras muestras analizadas, dos de las tres estructuras presentan una clara estabilización cercana a los 2.6 mg/l y la estructura C a pesar de tener una tendencia ascendente el nivel no lo suficientemente elevado para equipararse con lo obtenido de la muestra de control. Estas tendencias se pueden observar claramente en la figura 4.11 que muestra modelos del comportamiento de las concentraciones de grasas y aceites.

Figura 4.11. Tendencia de la concentración de grasas y aceites..



FUENTE: Elaboración propia.

Ese aumento final, mostrado por la estructura C, puede explicarse gracias a método por el cual se obtuvieron las muestras filtradas. Inicialmente las concentraciones presentan un nivel menor, ya que quedan adheridas a los agregados lo que genera su estancamiento dentro de la estructura. Al momento de obtener las muestras posteriores a las 144 horas, se realiza la apertura de la llave de nariz instalada en la parte baja de los contenedores lo que genera un primer *flush* o lavado que en muchas ocasiones presenta un mayor arrastre de contaminantes (Gwenzi *et al.*, 2015). Esto se confirma, ya que posteriormente se puede encontrar una disminución en los niveles. Debido a que este contaminante es muy complejo para su descomposición por parte de los microorganismos su eliminación solamente se da por su expulsión a través de las muestras. Por ejemplo, en la estructura C tenemos concentraciones de 1.95 mg/l, 4.3 mg/l y 7.3 mg/l, lo que da un total de 13.55 mg/l

por lo que una teórica cuarta muestra presentaría 3.55 mg/l o menos, para alcanzar los 17.1 mg/l que se contenían en la muestra de control.

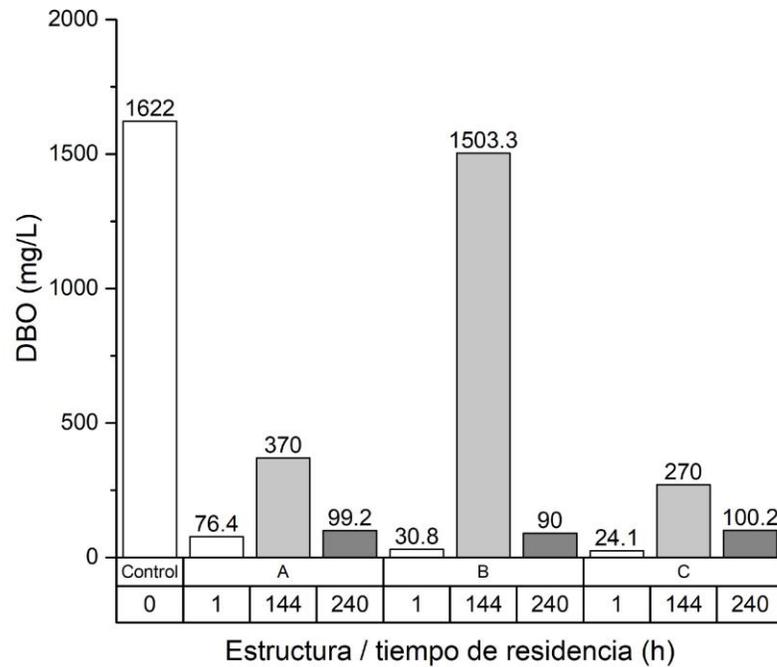
Por último, se tiene el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). En el cual se presenta un caso muy particular. Todas las muestras presentan porcentajes de reducción de entre 77% y 99%, excepto la muestra de la estructura B a 144 horas de residencia, esta solamente pudo alcanzar el 7.32% de disminución como lo indica la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Porcentajes de reducción de DBO.

Tiempo (h)	Porcentaje de reducción de DBO		
	1	144	240
Estructura A	95.29%	77.19%	93.88%
Estructura B	98.1%	7.32%	94.45%
Estructura C	98.51%	83.35%	93.82%

La figura 4.12 indica que la mayor reducción se encuentra en el inicio de la filtración, presentando las concentraciones más bajas de DBO entre 24 mg/l y 76 mg/l. La estructura con mejor desempeño fue la C, ya que en la muestra captada posterior a la filtración alcanza más del 98% de reducción, colocándose en 24.1 mg/L.

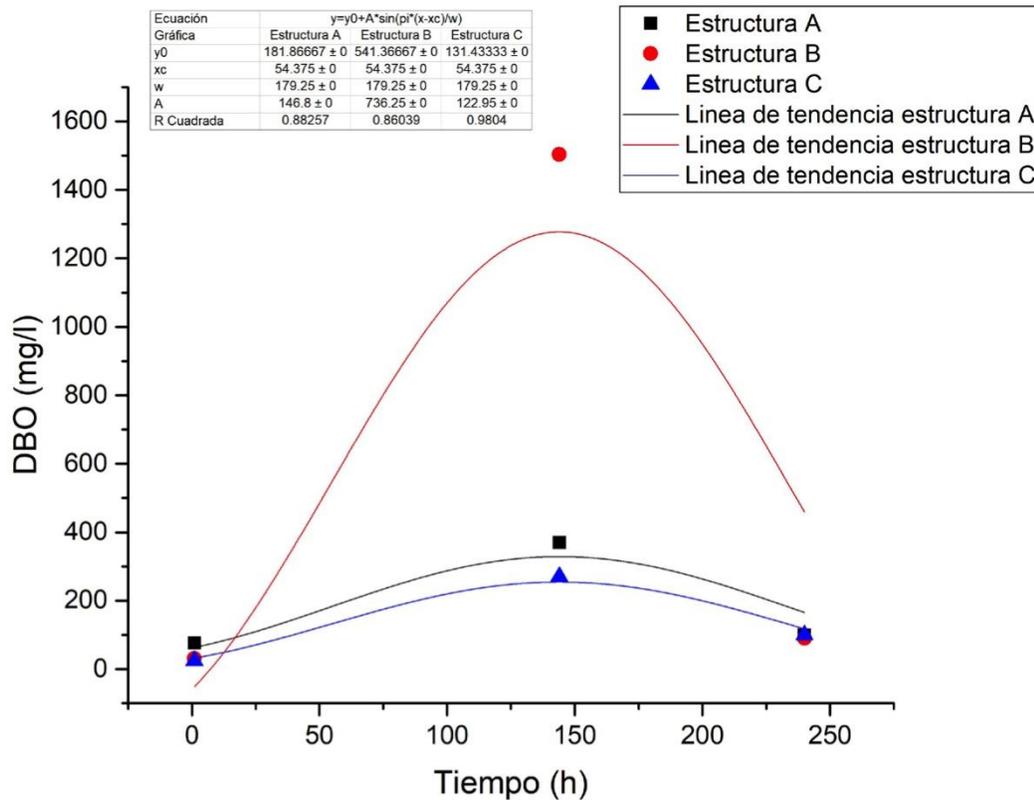
Figura 4.12. Niveles de concentración de la DBO.



FUENTE: *Elaboración propia.*

De la figura 4.13 se puede decir que las tres estructuras presentan un comportamiento similar. Cada una presenta su menor concentración de DBO en el primer análisis. Posteriormente se muestra un aumento y finalizan con una segunda disminución estableciéndose la concentración de las tres estructuras en un nivel similar. Igualmente se puede observar que la estructura con un mejor desempeño es la C, ya que la línea que marca su tendencia siempre se colocó por debajo de las mostradas por las demás estructuras.

Figura 4.13. Tendencia de la concentración de la DBO.



FUENTE: Elaboración propia.

Es importante recordar que la DBO refiere a la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan o consumen en la degradación de materia orgánica presente en el agua. Razón por la cual se presentan estos aumentos en la concentración de DBO, ya que los microorganismos al contar con materia orgánica disponible y algunos de ellos al estar en contacto con ciertos agregados, pueden reproducirse solicitando una mayor cantidad de oxígeno tanto para la reproducción, como para la degradación de la materia (Kooij y Wielen, 2014).

La razón por la que se tiene una reducción final de la DBO y una estabilización entre los 90 y los 100 mg/L es porque, a medida que la disponibilidad de materia orgánica disminuye por lo que la subsistencia de los microorganismos se ve comprometida y ya que, la degradación de las grasas y aceites llevan un proceso complejo, algunos

microorganismos mueren o se comen unos a los otros (Head y Swannell, 1999; Masciandaro *et al.*, 2013).

Una vez teniendo los resultados y la comparativa, podemos determinar que la estructura A fue la que presentó el desempeño más pobre, ya que, a pesar de tener reducciones en sólidos suspendidos totales y DBO, estas no fueron las suficientes como para colocarse por debajo de los límites permitidos en las normas. La reducción del 84.21% que se presenta en las grasas y aceites hace cumplir en este parámetro lo establecido por la norma mexicana, ya que la Guía EPA no establece límite para este contaminante.

La reducción de contaminantes tiene una mejora para la estructura B porque se cumple con la normativa en más de una muestra y como ejemplo se tienen los sólidos suspendidos totales y las grasas y aceites. En el primer caso solamente la muestra inicial y a las 144 horas cumple con el reúso con contacto indirecto u ocasional para la NOM-003-ECOL-1997 y el uso restringido en la Guía para el reúso del agua-EPA. En cuanto a las grasas y aceites la reducción de entre el 88% y el 67% hacen posible el cumplimiento de la norma mexicana. Las muestras y contaminantes no mencionados ubican su concentración por encima de lo permitido.

Por último, podemos mencionar a la estructura C como la que presentó un mejor desempeño de las tres, ya que no solamente cumple en sólidos suspendidos totales y grasas y aceites, sino que también logró cumplir parcialmente para la DBO. La reducción a 24.1 mg/l de la primera muestra permite el cumplimiento de la NOM-003-ECOL-1997 y la Guía EPA en términos de DBO. Para el tema de los sólidos suspendidos totales el caso es similar a lo encontrado con la estructura B, ya que se tiene el cumplimiento parcial de ambas normas en la primera y segunda muestra. Y para las grasas y aceites las tres muestras cumplen el límite máximo establecido en la norma.

A manera de resumen se presenta la tabla 4.7 en la que se indica si cada una de las 10 muestras tomadas cumple, cumple parcialmente (se permite el reúso con contacto directo u ocasional del usuario) o no cumple con lo mencionado en la NOM-003-ECOL-1993.

Tabla 4.7. Cumplimiento con la NOM-003-ECOL-1993.

Tiempo (h)	Coliformes fecales (NMP/100ml)			Sólidos suspendidos totales (mg/L)			Grasas y aceites (mg/L)			DBO (mg/L)		
	1	144	240	1	144	240	1	144	240	1	144	240
Muestra de control	×	N/A	N/A	×	N/A	N/A	×	N/A	N/A	×	N/A	N/A
Estructura A	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	×
Estructura B	×	×	×	+	+	×	✓	✓	✓	×	×	×
Estructura C	×	×	×	+	+	×	✓	✓	✓	+	×	×

*Nota: Cumplimiento de la normativa ✓✓ = Cumple; + = cumple parcialmente; × = No cumple; N/A = No aplica.

FUENTE: *Elaboración propia.*

De la misma forma se indica en la tabla 4.8 el comportamiento de las muestras respecto a la Guía para el reúso del agua – EPA y si es que se cumple, se cumple parcialmente (permite el uso limitado del agua) o no se cumple con lo que menciona la norma.

Tabla 4.8. Cumplimiento con la Guía para el reúso del agua – EPA.

Tiempo (h)	Coliformes fecales (NMP/100ml)			Sólidos suspendidos totales (mg/L)			DBO (mg/L)		
	1	144	240	1	144	240	1	144	240
Muestra de control	×	N/A	N/A	×	N/A	N/A	×	N/A	N/A
Estructura A	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Estructura B	×	×	×	✓	✓	×	×	×	×
Estructura C	×	×	×	✓	✓	×	+	×	×

*Nota: Cumplimiento de la normativa ✓✓ = Cumple; + = cumple parcialmente; × = No cumple; N/A = No aplica.

FUENTE: Elaboración propia.

5. Conclusiones

Tal como en algunas de las investigaciones reportadas anteriormente, se pudo confirmar que la utilización de estos sistemas mejoran la calidad del escurrimiento pluvial reduciendo la concentración de más de un contaminante. A pesar de que ninguna estructura ni ninguna de las variables estudiadas pudo cumplir por completo con las normas analizadas, esta investigación presenta resultados importantes que aportan al conocimiento y que pueden servir como una guía para continuar la investigación con estos sistemas.

La muestra de control tuvo concentraciones elevadas posicionando los niveles de coliformes fecales, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, grasas y aceites por encima de lo establecido por la NOM-003-ECOL-1997 y la Guía para la reutilización del agua – EPA., las cuales rigen la reutilización de agua tratada en México y Estados Unidos, respectivamente. El cambio en los tamaños de agregado, así como los diferentes tiempos de residencia dentro de la estructura (1, 144 y 240 horas), lograron que se presentaran diferentes comportamientos. Como ejemplo se tiene La estructura C con tiempo de reposo de una hora tiene la reducción en la concentración, suficiente para cumplir con los límites máximos en 3 de los cuatro contaminantes estudiados; sólidos suspendidos totales, DBO, grasas y aceites. Posterior a esta estructura podemos posicionar a los modelos B y A que cumplieron la reducción en dos y un contaminante respectivamente; sólidos suspendidos totales y grasas y aceites para la estructura C, y únicamente grasas y aceites para la estructura A.

Los coliformes fecales fue el único contaminante que no mostró reducción en ninguna de las muestras analizadas, ya que todas se ubicaron por encima del nivel máximo detectable por la prueba. Esto porque, regularmente el primer escurrimiento de la temporada tiende a presentar una mayor concentración de contaminantes, y es por esto que en ocasiones se recomienda programar descargas de lavado para

propiciar el lavado de la superficie (Sansalone y Buchberger, 1997; Gikas y Tsihrintzis, 2012). Es importante que se considere en futuras investigaciones la programación de algunos escurrimientos para permitir la limpieza de la superficie o que la toma de muestras se realice posterior a algunas descargas programadas.

Igualmente es importante destacar que dentro del Centro Universitario se generan micro cuencas debido a la topografía del lugar. El punto de recolección se ubica en el punto bajo de una de estas micro cuencas por lo que recibe el arrastre de contaminantes generado aguas arriba. Durante un recorrido por la zona se pudieron ubicar diferentes puntos donde existía estancamiento de materia orgánica debido a la caída de residuos de árboles y arrastre de contaminantes debido a la ubicación de basureros en puntos altos de la cuenca. Para evitar que exista un aumento de contaminantes debido a estas eventualidades se deben tomar medidas como la limpieza regular de sólidos caídos de árboles, de basura y de materia orgánica; igualmente realizar la ubicación estratégica de basureros en puntos donde no se genere gran cantidad de escurrimiento o dentro de zonas aisladas en puntos bajos de la cuenca, donde se dé un tratamiento especial al fluido desprendido por los residuos durante eventos de precipitación.

Cada una de las partes de la estructura permeable trabaja en diferentes fases del filtrado. Por ejemplo, la primera muestra obtenida una hora posterior al proceso de filtración se ve determinada por la constitución de las capas filtrantes y el geotextil. En cambio las muestras a las 144 y 240 horas tienen una mayor influencia por el trabajo en conjunto de las capas de filtración, el geotextil y la capa de almacenamiento. Como se pudo observar, gran parte del trabajo y de la reducción se da por parte de las capas de basalto, pero posteriormente los minerales incluidos en la capa de almacenamiento tienen un trabajo clave, que fue estabilizar posteriormente la concentración de contaminantes para terminar teniendo niveles similares en la mayoría de las muestras.

Es por esto que es importante analizar cómo se piensa dar la reutilización del agua. Si se desea dar un reúso inmediato se debe poner mayor atención en las capas

superiores, pudiendo aumentar el espesor de las capas de agregado de basalto para mejorar la calidad del agua, igualmente sería bueno probar la combinación de dos tamaños de agregado buscando que los vacíos sean menos y la intercepción de las partículas contaminantes sea mayor, recordando que el material debe ser granular y libre de finos.

Si es posible que el agua tenga cierto reposo previo al bombeo se puede aumentar el espesor de la capa de almacenamiento o probar con nuevos minerales para mejorar su desempeño, buscando siempre que sea apoyado de referencias previas para limitar las opciones disponibles. El tiempo de residencia es otra variable a ser considerada para poder determinar en qué momento disminuye la reducción de los contaminantes y poder indicar el tiempo adecuado de reposo para brindar la reutilización.

La utilización de este tipo de estructuras brinda un pretratamiento importante al escurrimiento y a pesar de no cumplir con la reducción necesaria para poder ser utilizada como opción previo a la descarga final del drenaje pluvial para mejorar la calidad del agua y evitar la contaminación de los cuerpos receptores.

5.1 Investigaciones futuras

Como se mencionó previamente, el *flush* generado por la naturaleza del experimento arroja resultados variables dependiendo del número de muestra que se obtenga, teniendo un aumento generalizado en la segunda obtención de muestras. Este fenómeno puede reducirse si se considera implementar una recirculación en el sistema. Regularmente esta recirculación no se genera en este tipo de sistemas, ya que no se considera algún mecanismo que se encargue de ello, es por esto que resulta necesario el diseño de un sistema que considere el bombeo del agua filtrada para pasar por un segundo o tercer proceso de filtrado. Esto puede causar la homogeneización las muestras y buscar si es que la repetición del proceso mejora la calidad de agua obtenida.

Se puede considerar efectuar el análisis de las muestras a un mayor tiempo de residencia con la finalidad de determinar la variabilidad que continúen presentando las concentraciones o si es que las muestras comienzan a tener una estabilización. Si es que se presenta una estabilización constante es posible la obtención de un modelo matemático que prediga con mayor exactitud la eficacia en la implementación de este sistema.

Por último es importante la comparativa entre la concentración presentada en esta primer precipitación de la temporada de lluvias y de las subsecuentes, esto para determinar si es necesario que se programe un cierto número de precipitaciones que funcionen como lavado de la superficie para que la captación del líquido con fines de aprovechamiento sea de agua con menores niveles de concentración de contaminantes.

6. Referencias

1. Antunes, L. N., Ghisi, E., & Severis, R. M. (2020). Environmental assessment of a permeable pavement system used to harvest stormwater for non-potable water uses in a building. *Science of The Total Environment*, 141087. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.1410
2. Asphalt Institute. (2014). Asphalt mix design methods. Library of Congress. 7th edition. Usa.
3. Avelar Roblero, Juan Uriel, Sánchez Bravo, Juan Rafael, Domínguez Acevedo, Abraham, Lobato de La Cruz, Claudio, & Mancilla Villa, Oscar Raúl. (2019). Validación de un prototipo de sistema captación de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano. *Idesia (Arica)*, 37(1), 53-59. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000302>
4. Bean, E. Z., Hunt, W. F., & Bidelspach, D. A. (2004). Study on the Surface Infiltration Rate of Permeable Pavements. *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*. doi:10.1061/40737(2004)72
5. Bean, E., Hunt, W., Bidelspach, D. (2007). Evaluation of four permeable pavement sites in eastern North Carolina for runoff reduction and water quality impacts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133(6). 583-592.
6. Birkle, P., Torres, V., González, E. (1998). The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption. *Hydrogeology Journal*. (6). 500-517.
7. Booth DB, Leavitt J. (1999). Field evaluation of permeable pavement systems for improved storm water management. *American Planning Association Journal* 1999;65(3):314–25.
8. Braswell, A. S., Winston, R. J., & Hunt, W. F. (2018). Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over

a clay soil in Durham, North Carolina. *Journal of Environmental Management*, 224, 277–287. doi:10.1016/j.jenvman.2018.07.040

9. Brattebo, B., Booth, D. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water research*. 37 (2003). 4369-4376. doi:10.1016/S0043-1354(03)00410-X
10. Brown, S. F. (1996). Soil mechanics in pavement engineering. *Géotechnique*, 46(3), 383–426. doi:10.1680/geot.1996.46.3.383
11. Campisano, A., Gnecco, I., Modica, C., & Palla, A. (2013). Designing domestic rainwater harvesting systems under different climatic regimes in Italy. *Water Science and Technology*, 67(11), 2511-2518.
12. CIRIA, (2015). *The Sustainable Drainage Systems (SuDS) Manual*. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), London, U.K978-086017-760-9 Version 5. C
13. Collins, K. A., Hunt, W. F., & Hathaway, J. M. (2007). Evaluation of Various Types of Permeable Pavements with Respect to Water Quality Improvement and Flood Control. *World Environmental and Water Resources Congress 2007*. doi:10.1061/40927(243)435
14. Das, Animesh. (2014). *Analysis of pavement Structures*. CRC Press. ISBN: 1466558555.
15. Delatte, N. (2008). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*. Taylor & Francis.
16. Drake, J., Bradford, A. y Marsalek, J. (2013). Revisión del desempeño ambiental de los sistemas de pavimentos permeables: estado del conocimiento. *Revista de investigación de la calidad del agua*, 48(3), 203–222. doi:10.2166/wqrjc.2013.055
17. Drake, J., Bradford, A., & Van Seters, T. (2014). Stormwater quality of spring–summer–fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement. *Journal of Environmental Management*, 139, 69-79 doi:10.1016/j.jenvman.2013.11.056

18. EPA (1999) Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices. Office of Water, United States Environmental Protection Agency. Washington DC, EE.UU. EPA-821-R-99-012. 210 pp.
19. Emersleben, A., & Meyer, N. (2012). The Use of Recycled Glass for the Construction of Pavements. GeoCongress 2012. doi:10.1061/9780784412121.169
20. Fach, S., & Geiger, W. F. (2005). Effective pollutant retention capacity of permeable pavements for infiltrated road runoffs determined by laboratory tests. *Water Science and Technology*, 51(2), 37-45. doi:10.2166/wst.2005.0030
21. Fassman, E. A., & Blackbourn, S. (2010). Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. *Journal of hydrologic engineering*, 15(6), 475-485.
22. Ferguson, B. (2005). Porous pavements integrative studies in water management & land deve. Unites States of America. CRC Press.
23. Field, R., Masters, H., Singer, M. (1982). Status of porous pavement research. *Water Research*. 16 (6), 849-858. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90014-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90014-8)
24. Fletcher, T., Duncan, H., Poelsma, P., Lloyd, S. (2004). Stormwater flow and quality, and the effectiveness of non-proprietary stormwater treatment measures – a review and gap analysis. Cooperative research centre for catchment hydrology.
25. Flintsch, G., Diefenderfer, B., Nuñez, O. (2008). Composite pavement systems: synthesis of design and Construction practices. Virginia Transportation Research Council. http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/09-cr2.pdf
26. Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. *Journal of Hydrology*, 466, 115-126.

27. Gleick, P. H. (2000). *The world's water 2000–2001*. Island Press, Washington, D. C., USA
28. Gómez M, Sánchez H, Dolz J, López R, Nania L, Cabrera E, Espert V, García-Serra J, Malgrat P, Puertas J (2004) *Curso de Hidrología Urbana*. 5ª ed. Universitat Politècnica de Catalunya, España. 389 pp.
29. Green, A. (2019). Sustainable Drainage Systems (SuDS) in the UK. *Respiratory Ailments in Context*, 69–101. doi:10.1007/978-3-030-11818-1_4
30. Gutiérrez, E., Rodríguez, A., Jaramillo, J. (2016). Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas en la preservación del recurso del agua. *Espacio del divulgador*.
31. Gwenzi, W., Dunjana, N., Pisa, C., Tauro, T., & Nyamadzawo, G. (2015). Water quality and public health risks associated with roof rainwater harvesting systems for potable supply: Review and perspectives. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 6, 107-118.
32. Hahn, H., & Stumm, W. (1968). Kinetics of coagulation with hydrolyzed Al (III): The rate-determining step. *Journal of colloid and interface science*, 28(1), 134-144.
33. Hammes, G., Thives, L. P., & Ghisi, E. (2018). Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings. *Journal of Environmental Management*, 222, 338–347. doi:10.1016/j.jenvman.2018.05.094
34. Hernández, J. R., Bayón, J. R., Fresno, D. C., Pérez, M. Á. C., Jordana, J. C. C., Muñoz, F. B., & Lasa, P. (2006). Construcción de pavimentos permeables para el control en origen de la escorrentía urbana: ejemplo práctico del aparcamiento del palacio de deportes de la guía. Paper presentado en el III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Universidad de Cantabria, Universidad de Oviedo y Ayuntamiento de Gijón.
35. Huang, S., & Liang, C. (2018). A conceptual study on the formulation of a permeable reactive pavement with activated carbon additives for controlling the fate of non-point source environmental organic contaminants.

- Chemosphere, 193, 438–446. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.11.028
36. Huber, G. (2000). Performance survey on Open-Graded friction course mixes. Transportation Research Board.
37. Imran, H. M., Akib, S., & Karim, M. R. (2013). Permeable pavement and stormwater management systems: a review. *Environmental Technology*, 34(18), 2649–2656. doi:10.1080/09593330.2013.782573
38. Jackson, R., Carpenter, S., Dahm, C., McKnoche, D., Naiman, R., Postel, S., y Running, S. (2001). Water in a changing world. *Ecological Applications*, 11(4), 1027-1045. Doi:10.1890/1051-0761(2001)011[1027:wiacw]2.0.co;2
39. Jiang, W., Sha, A., Xiao, J., Li, Y., & Huang, Y. (2015). Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 100, 102–110. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055
40. Jiménez, B. (1999) Contaminación por escorrentía urbana. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; Colección SEINOR No. 22. Madrid, España. 495 pp.
41. Joon, P. (2017). Permeable Pavement System. *International Journal of Engineering Sciences & Management IDSTM*: January.
42. Juarez, E. (2002). *Mecánica de Suelos II, Volumen 2*. Editorial Limusa.
43. Kayhanian, M., Li, H., Harvey, J. T., & Liang, X. (2019). Application of permeable pavements in highways for stormwater runoff management and pollution prevention: California research experiences. *International Journal of Transportation Science and Technology*. doi:10.1016/j.ijtst.2019.01.001
44. Kooij, D., & Wielen, P. W. J. J. (2014). Microbial growth in drinking-water supplies: Problems, causes, control and research needs.
45. Kuang, X., & Fu, Y. (2012). Coupled infiltration and filtration behaviours of concrete porous pavement for stormwater management. *Hydrological Processes*, 27(4), 532–540. doi:10.1002/hyp.9279
46. Mallick, R. & El-Korchi, T. (2013). *Pavement Engineering: Principles and*

- Practice, Second Edition. United States. CRC Press. ISBN: 1439870357.
47. MINVU-DICTUC (1996) Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de diseño. Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Santiago, Chile. 670 pp.
 48. Monsalve, L., Giraldo, L., Maya, J., (2012). Diseño de pavimento flexible y rígido. Universidad del Quindío.
 49. Moretti, L., Di Mascio, P. y Fusco, C. (2019), Porous concrete for pedestrian pavements, MDPI Water, 11(2105), doi:<http://dx.doi.org/10.3390/w11102105>
 50. Mullaney, J., & Lucke, T. (2014). Practical review of pervious pavement designs. CLEAN–Soil, Air, Water, 42(2), 111-124.
 51. Myers, B., Beecham, S., & van Leeuwen, J. A. (2011). Water quality with storage in permeable pavement basecourse. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (Vol. 164, No. 7, pp. 361-372). Thomas Telford Ltd.
 52. National SUDS Working Group (2003) Framework for Sustainable Drainage Systems (SUDS) in England and Wales. TH-5/03-3k-C-BHEY. 75 pp.
 53. Ojeda, A., Álvarez, C. R., Ramos, M., Soto, F. (2016). Determinants of domestic water consumption in Hermosillo, Sonora, Mexico. Journal of Cleaner Production. , doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.094.
 54. Olivera, F., (2009). Estructuración de vías terrestres. Editorial Patria.
 55. Pagotto, C., Legret, M., Cloirec, P. (2000). Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement. Water Research. 34 (18). 4446-4454. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00221-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00221-9)
 56. Palla, A., Gnecco, I., La Barbera, P. (2017). The impact of domestic rainwater harvesting systems in stormwater runoff mitigation at the urban block scale. J. Environ. Manag. 191, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.025>.

57. Papagiannakis, A. & Masad, E. (2017). *Pavement Design and Materials*. United States. John Wiley & Sons. ISBN: 1119412773
58. Perrusquía, G., (2009). *Sistemas acuáticos sustentables*. Estudio para la Ciudad de Querétaro y sus Alrededores. Proyecto sabático octubre 2002-marzo 2003. Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro.
59. Pratt, C., Mantle, J., Schofield, P. (1995). UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality. *Water Science and Technology*. 32(1). 63-69.
60. Pratt, C.J. (1999). Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for reuse. *Water Science and Technology* 39(5): 145–151.
61. Pratt C.J, Wilson S, Cooper P (2002) Source control using constructed pervious surfaces. Hydraulic, structural and water quality performance issues. CIRIA. Londres, RU. C582, RP637. 152 pp.
62. Restrepo, I. (1995). *Agua, Salud y Derechos Humanos*. Comisión Nacional de Derechos Humanos, México, 409 pp.
63. Rico, A., Del Castillo, H., (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Limusa. México.
64. Rith, M., Kim, Y., & Lee, & Woo, S. (2017). *Development of RCC-Base Composite Pavement Design Guide for Highway*.
65. Rushton, B. (2001) Low impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 127(3). 172-179.
66. Sambito, M., Severino, A., Freni, G., & Neduzha, L. (2021). A systematic review of the hydrological, environmental and durability performance of permeable pavement systems. *Sustainability*, 13(8), 4509.
67. Sansalone, J. J., & Buchberger, S. G. (1997). Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental engineering*, 123(2), 134-143.

68. Sansalone, J., Kuang, X., & Ranieri, V. (2008). Permeable Pavement as a Hydraulic and Filtration Interface for Urban Drainage. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(5), 666–674. doi:10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:5(666)
69. Sansalone, J., Kuang, X., Ying, G., & Ranieri, V. (2012). Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage. *Water Research*, 46(20), 6763–6774. doi:10.1016/j.watres.2011.10.018
70. Scholz, M. y Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems, *Building and environment*, 42(2007), 3830-3836, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>
71. Sepehrnia, N., Memarianfard, L., Moosavi, A., Bachmann, J., Rezanezhad, F., & Sepehri, M. (2018). Retention modes of manure-fecal coliforms in soil under saturated hydraulic condition. *Journal of Environmental Management*, 227, 209–215. doi:10.1016/j.jenvman.2018.08.
72. SGM. (2018). Panorama minero del estado de Hidalgo. Servicio Geológico Minero, Subsecretaría de minería. Recuperado de: https://www.sgm.gob.mx/Gobmx/productos/panoramas/HIDALGO_dic2018.pdf
73. Spring, U. O.. (2011). *Water Resources in Mexico: Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy*. México: Springer Science + Business Media. Doi: 10.1007/978-3-642-05432-7
74. Tufenkji, N., & Elimelech, M. (2004). Correlation equation for predicting single-collector efficiency in physicochemical filtration in saturated porous media. *Environmental science & technology*, 38(2), 529-536.
75. Urquiza, M., (2008). *Uso sostenible del agua en la ciudad de Querétaro*. En Expo Zaragoza 2008. Zaragoza, España.
76. Vialle, C., Busset, G., Tanfin, L., Montrejaud-Vignoles, M., Huau, M.-C., & Sablayrolles, C. (2015). Environmental analysis of a domestic rainwater

harvesting system: A case study in France. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 178–184. doi:10.1016/j.resconrec.2015.07.0

77. Vujovic, S., Haddad, B., Karaky, H., Sebaibi, N., & Boutouil, M. (2021). Urban heat Island: Causes, consequences, and mitigation measures with emphasis on reflective and permeable pavements. *CivilEng*, 2(2), 459-484.
78. Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2010). Harvested rainwater quality: the importance of appropriate design. *Water Science and Technology*, 61(7), 1707–1714. doi:10.2166/wst.2010.102
79. Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2012). Performance of a large building rainwater harvesting system. *Water Research*, 46(16), 5127–5134. doi:10.1016/j.watres.2012.06.043
80. Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2018). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.134
81. Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 381–386. doi:10.1016/s0008-8846(02)00966-3
82. Yao, K.-M., Habibian, M. T., & O'Melia, C. R. (1971). Water and waste water filtration. Concepts and applications. *Environmental Science & Technology*, 5(11), 1105–1112. doi:10.1021/es60058a005
83. Yoder, E. & Witczak, M. (1991). *Principles of Pavement Design*. Canadá. John Wiley & Sons.
84. Yu, T., Zhang, H., & Wang, Y. (2020). Interaction of asphalt and water between porous asphalt pavement voids with different aging stage and its significance to drainage. *Construction and Building Materials*, 252, 119085. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119085

7. Anexos

7.1. Análisis de laboratorio



Tel. Oficina
 (442) 213 0612
 (442) 223 5878
 (442) 220 5049
 www.inesa.com.mx

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

AQ-011
 Hoja 1 de 1
 OTEXAG-1078-22
 CC-1343-22

Cliente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Servicio/Recepción: 25 de Mayo de 2022 / 26 de Mayo de 2022.
Hora Servicio/Recepción: 17:21 hrs. / 08:30 hrs.
Resp. del servicio: El Cliente.
Descripción de la muestra: Muestra líquida color café oscuro, con sedimento en envase de plástico.
Cantidad recibida: 3 100 mL. aprox.
Fecha de informe: 15 de Marzo de 2022.

Identificación de la muestra: Luis muestras 1 Filtro 1.
Número único: 1343-22-1.

Parámetros	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	26-05-22 (AAN)	$\geq 2\ 400$	N.A.	NMP/100mL
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	30-05-22 (MOM)	2.7	1.95	mg/L
Sólidos Suspendedos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	26-05-22 (RLNC)	66	5.09	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	26-05-22 (MRB)	76.4	2.6	mg/L

OBSERVACIONES
 N.D. = No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, SE: Solución de Enjuague, SM: Superficie Muestreada, VE: Valor Estimado.
 El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
 Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.
 Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


 Q.F.B. Irma Retana Caballero.
 Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.

AQ-011

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

Hoja 1 de 1
OTEXAG-1078-22
CC-1343-22

Ciente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Servicio/Recepción: 25 de Mayo de 2022 / 26 de Mayo de 2022.
Hora Servicio/Recepción: 17:15 hrs. / 08:30 hrs.
Resp. del servicio: El Cliente.
Descripción de la muestra: Muestra líquida color café oscuro, con sedimento en envase de plástico.
Cantidad recibida: 3 100 mL. aprox.
Fecha de informe: 15 de Marzo de 2022.

Identificación de la muestra: Luis muestras I Filtro 2.
Número único: 1343-22-2.

Parámetros	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	26-05-22 (AAN)	≥ 2 400	N.A.	NMP/100mL
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	30-05-22 (MOM)	< 1.95	1.95	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	26-05-22 (RLNC)	22	5.09	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	26-05-22 (MRB)	30.8	2.6	mg/L

OBSERVACIONES

N.D. = No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, SE: Solución de Enjuague, SM: Superficie Muestreada, VE: Valor Estimado.
El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.

Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.

AQ-011

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

Hoja 1 de 1
OTEXAG-1078-22
CC-1343-22

Cliente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Servicio/Recepción: 25 de Mayo de 2022 / 26 de Mayo de 2022.
Hora Servicio/Recepción: 17:05 hrs. / 08:30 hrs.
Resp. del servicio: El Cliente.
Descripción de la muestra: Muestra líquida color café oscuro, con sedimento en envase de plástico.
Cantidad recibida: 3 100 mL. aprox.
Fecha de informe: 15 de Marzo de 2022.

Identificación de la muestra: Luis muestras 1 Filtro 3.
Número único: 1343-22-3.

Parámetros	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	26-05-22 (AAN)	$\geq 2\ 400$	N.A.	NMP/100mL
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	30-05-22 (MOM)	< 1.95	1.95	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	26-05-22 (RLNC)	18	5.09	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	26-05-22 (MRB)	24.1	2.6	mg/L

OBSERVACIONES												
N.D. = No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, SE: Solución de Enjuague, SM: Superficie Muestreada, VE: Valor Estimado. El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica. Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.												
Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM												


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.

AQ-011

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

Hoja 1 de 1
OTEXAG-1078-22
CC-1343-22

Cliente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Servicio/Recepción: 25 de Mayo de 2022 / 26 de Mayo de 2022.
Hora Servicio/Recepción: 16:50 hrs. / 08:30 hrs.
Resp. del servicio: El Cliente.
Descripción de la muestra: Muestra líquida color café oscuro, con sedimento en envase de plástico.
Cantidad recibida: 3 100 mL. aprox.
Fecha de informe: 15 de Marzo de 2022.

Identificación de la muestra: Luis control.
Número único: 1343-22-4.

Parámetros	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	26-05-22 (AAN)	≥ 2 400	N.A.	NMP/100mL
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	30-05-22 (MOM)	17.1	1.95	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	26-05-22 (RLNC)	1 065	5.09	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	26-05-22 (MRB)	1 622	2.6	mg/L

OBSERVACIONES

N.D. = No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, SE: Solución de Enjuague, SM: Superficie Muestreada, VE: Valor Estimado.
El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.

Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

AQ-011

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

Hoja 1 de 1
OTEXAG-1168-22
CC-1399-22

Cliente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Servicio/Recepción: 31 de Mayo de 2022 / 31 de Mayo de 2022.
Hora Servicio/Recepción: 16:06 hrs. / 16:59 hrs.
Responsable del servicio: El Cliente.
Descripción de la muestra: Muestra en contenedor adecuado presentan color amarillo.
Cantidad recibida: 16 125 mL. aprox.
Fecha de informe: 15 de Junio de 2022.

Identificación de la muestra: Luis muestras 2 Filtro 1.
Número único: 1399-22-1.

Parámetros	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	31-05-22 (AAN)	≥ 2 400	N.A.	NMP/100mL
Sólidos Suspendedos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	02-06-22 (RLNC)	242	5.09	mg/L
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	03-06-22 (MOM)	3.3	1.95	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	31-05-22 (MRB)	370.00	2.6	mg/L

OBSERVACIONES
N.D. = No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, SE: Solución de Enjuague, SM: Superficie Muestreada, VE: Valor Estimado.
El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.
Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.

AQ-011

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

Hoja 1 de 1
OTEXAG-1168-22
CC-1399-22

Cliente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Servicio/Recepción: 31 de Mayo de 2022 / 31 de Mayo de 2022.
Hora Servicio/Recepción: 16:11 hrs. / 16:59 hrs.
Responsable del servicio: El Cliente.
Descripción de la muestra: Muestra en contenedor adecuado presentan color amarillo.
Cantidad recibida: 16 125 mL. aprox.
Fecha de informe: 15 de Junio de 2022.

Identificación de la muestra: Luis muestras 2 Filtro 2.
Número único: 1399-22-2.

Parámetros	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	31-05-22 (AAN)	≥ 2 400	N.A.	NMP/100mL
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	02-06-22 (RLNC)	18	5.09	mg/L
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	03-06-22 (MOM)	5.6	1.95	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	31-05-22 (MRB)	1 503.03	2.6	mg/L

OBSERVACIONES

N.D. = No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, SE: Solución de Enjuague, SM: Superficie Muestreada, VE: Valor Estimado.
El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.
Personal que realizó el ensayo: AAN MBB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

AQ-011

Hoja 1 de 1
OTEXAG-1168-22
CC-1399-22

Cliente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Servicio/Recepción: 31 de Mayo de 2022 / 31 de Mayo de 2022.
Hora Servicio/Recepción: 16:44 hrs. / 16:59 hrs.
Responsable del servicio: El Cliente.
Descripción de la muestra: Muestra en contenedor adecuado presentan color amarillo.
Cantidad recibida: 16 l25 mL. aprox.
Fecha de informe: 15 de Junio de 2022.

Identificación de la muestra: Luis muestras 2 Filtro 3.
Número único: 1399-22-3.

Parámetros	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	31-05-22 (AAN)	≥ 2 400	N.A.	NMP/100mL
Sólidos Suspendedos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	02-06-22 (RLNC)	14	5.09	mg/L
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	03-06-22 (MOM)	4.3	1.95	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	31-05-22 (MRB)	270.00	2.6	mg/L

OBSERVACIONES
N.D. = No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, SE: Solución de Enjuague, SM: Superficie Muestreada, VE: Valor Estimado.
El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.
Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

AQ-011

Hoja 1 de 1
OTEXAG-1168-22
CC-1461-22

Cliente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Muestreo-Recepción: 03 de Junio de 2022 / 03 de Junio de 2022.
Hora Muestreo/Recepción: 09:20 hrs. / 09:50 hrs.
Responsable del muestreo: El Cliente.
Descripción de la Muestra: Muestras líquida color amarillo.
Cantidad de la muestra: 5 000 L.
Fecha de Emisión del Informe: 27 de Junio de 2022.

Identificación de la Muestra: Luis muestras 3 filtro 1.
Número único: 1461-22-1.

Determinación	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	03-06-22 (AAN)	≥ 2 400	N.A.	NMP/100mL
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	08-06-22 (MOM)	2.6	1.95	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	10-06-22 (RLNC)	45	5.09	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	03-06-22 (MRB)	99.20	2.6	mg/L

OBSERVACIONES

ND: No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, VE: Valor Estimado, LC: Límite de Cuantificación.
El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.
Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

AQ-011

Hoja 1 de 1
OTEXAG-1168-22
CC-1461-22

Ciente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Muestreo-Recepción: 03 de Junio de 2022 / 03 de Junio de 2022.
Hora Muestreo/Recepción: 09:15 hrs. / 09:50 hrs.
Responsable del muestreo: El Cliente.
Descripción de la Muestra: Muestras líquida color amarillo.
Cantidad de la muestra: 5 000 L.
Fecha de Emisión del Informe: 27 de Junio de 2022.

Identificación de la Muestra: Luis muestras 3 filtro 2.
Número único: 1461-22-2.

Determinación	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	03-06-22 (AAN)	≥ 2 400	N.A.	NMP/100mL
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	08-06-22 (MOM)	2.5	1.95	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	10-06-22 (RLNC)	45	5.09	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	03-06-22 (MRB)	90.00	2.6	mg/L

OBSERVACIONES

ND: No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, VE: Valor Estimado, LC: Límite de Cuantificación.
El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A. de C.V.
Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.

INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

Cliente: LUIS ANTONIO CASTRO CONTRERAS.
Dirección: Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, Qro. México.
At'n: Luis Antonio Castro Contreras.
Fecha Muestreo-Recepción: 03 de Junio de 2022 / 03 de Junio de 2022.
Hora Muestreo/Recepción: 09:20 hrs. / 09:50 hrs.
Responsable del muestreo: El Cliente.
Descripción de la Muestra: Muestras líquida color amarillo.
Cantidad de la muestra: 5 000 L.
Fecha de Emisión del Informe: 27 de Junio de 2022.

Identificación de la Muestra: Luis muestras 3 filtro 3.
Número único: 1461-22-3.

Determinación	Método Analítico	Fecha de inicio y quien realizó el ensayo	Resultado	Límite de Cuantificación o Unidad mínima cuantificable	Unidad
Coliformes Fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	03-06-22 (AAN)	≥ 2 400	N.A.	NMP/100mL
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	08-06-22 (MOM)	7.3	1.95	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	10-06-22 (RLNC)	50	5.09	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001	03-06-22 (MRB)	100.20	2.6	mg/L

OBSERVACIONES
ND: No detectado, NMP: Número Más Probable, UFC: Unidades Formadoras de Colonias, VE: Valor Estimado, LC: Límite de Cuantificación.
El término < indica que el parámetro se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
Este informe representa las características de la muestra, más no del universo de donde deriva, los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas, no podrá ser alterado o reproducido total y/o parcialmente sin autorización de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A de C.V.
Personal que realizó el ensayo: AAN MRB RLNC MOM EOM MACV EBG AGF LCZ MRL HMPS MAM FGM


Q.F.B. Irma Retana Caballero.
Director General

Fin de Informe

CAMINO A EX HACIENDA MENCHACA #285 C.P. 76147 QUERETARO, QRO.