

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2014



**DESEMPEÑO Y MANTENIMIENTO DE DISPOSITIVOS DE PRE-
TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA, UTILIZADOS A NIVEL
PREDIAL**
PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL

Sergio Esteban Borda Quintero

Asesor:
Juan G. Saldarriaga Valderrama



Agradecimientos

A Dios, por darme la oportunidad de Culminar esta etapa de mi vida.

A mi familia, por apoyarme a lo largo de este camino y brindarme su apoyo incondicional.

A mi asesor, Juan Saldarriaga por guiarme durante este proceso de aprendizaje e investigación.

A todas aquellas personas que con sus aportes hicieron este proyecto posible.



Tabla de Contenido

Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas.....	viii
1. Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos Generales	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Historia del drenaje de aguas lluvias	3
2 Contextualización	5
2.2 Control en la Fuente	5
2.2.1 Ventajas del Control en la Fuente.....	6
2.2.2 Desventajas del Control en la Fuente	6
3 Manejo Sostenible del Agua Lluvia.....	8
3.2 Tanques de Almacenamiento Temporal (Aquacell)	10
4 Contaminación en el Agua Lluvia.....	11
4.2 Fenómeno del <i>First Flush</i>	12
4.2.1 Caso de estudio del primer lavado: Las Vegas	13
5 Dispositivos de Pre-Tratamiento de Escorrentía Pluvial	17
5.1 Clasificación de los dispositivos de pre-tratamiento según el tipo de instalación.	19
5.2 Clasificación de los dispositivos de pre-tratamiento según el método de remoción de sedimentos del agua lluvia	21
5.2.1 Dispositivos de pre-tratamiento de Separación	21
5.2.2 Dispositivos de pre-tratamiento de Filtración	22
5.2.3 Dispositivos de pre-tratamiento de Inserción.....	23
5.3 Cámaras de Inspección Estándar	24
5.3.1 Estudios de desempeño de la Cámara de Inspección Estándar	27
5.3.1.1 Estudio de Análisis hidráulico de la remoción de sedimentos	27
5.3.1.1.1 Diseño Óptimo de Sumideros	36



5.3.1.2	Estudio de modelos de predicción del desempeño de las cámaras de inspección estándar	36
5.3.1.3	Estudio de resuspensión de sedimentos y mecanismo de lavado	39
5.3.2	Ventajas y Desventajas de las Cámaras de Inspección Estándar.	41
5.4	Vórtice Hidrodinámico	42
5.4.1	Clasificación	43
5.4.2	Remoción de Contaminantes	44
5.4.3	Mantenimiento de los Vórtices Hidrodinámicos	45
5.4.4	Costos de los dispositivos hidrodinámicos	46
5.4.5	Estudio de la eficiencia del Vórtice Hidrodinámico	46
5.5	Filtros de arena	48
5.5.1	Mantenimiento de los Filtros de Arena	49
5.5.2	Ventajas y Desventajas de los Filtros de Arena	50
5.6	Geotextiles	50
5.6.1	Geotextiles Tejidos	51
5.6.2	Geotextiles No Tejidos	51
5.6.3	Ventajas y Desventajas de los Geotextiles	53
5.6.4	Colmatación en los geotextiles	53
5.6.4.1	Ensayo de Relación de Gradiente	55
5.6.5	Desempeño de los geotextiles	55
5.6.5.1	Permeabilidad de los Geotextiles	56
5.6.5.2	Conductividad Hidráulica en geotextiles	57
5.6.6	Estudio de desempeño de Geotextiles vírgenes	58
5.6.7	Estudio de desempeño de Geotextiles parcialmente colmatados	60
6	Comparación entre los dispositivos de pre-tratamiento de Agua Lluvia	63
6.1	Comparación de los dispositivos de pre-tratamiento sedimentadores	63
6.2	Comparación de dispositivos de pre-tratamiento de Filtración	72
7	“Street Cleaning” – Método de limpieza de Barrido de Calles	74
7.1	Tipos de barredoras	76
7.1.1	Barredora de escoba mecánica	76



7.1.2	Barredora de Aire Regenerativo	76
7.1.3	Barredoras de Vacío	77
7.2	Estudios del desempeño del método de barrido de calles	78
7.3	Caso de estudio Livonia, Michigan	79
8	Dispositivo de pre-tratamiento de Agua Lluvia Mixto	80
8.1	Desempeño del Filtro Up-Flow	82
8.2	Mantenimiento del Filtro Up-Flow	83
8.3	Casos de Estudio.....	85
8.3.1	Tuscaloosa, Estado de Alabama.....	86
9	Componentes de Limpieza y Mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento de Agua Lluvia.....	88
9.1	Métodos de Limpieza	89
9.1.1	Camión Váctor	90
9.2	Itinerario de Limpieza.....	91
9.3	Importancia de realizar el mantenimiento	92
9.4	Disposición de sedimentos	92
9.5	Reglamentación del Mantenimiento para los dispositivos de pre-tratamiento	93
9.6	Problemas de la implementación de la inspección y el mantenimiento.....	94
9.7	Mantenimiento de dispositivos de pre-tratamiento	94
9.8	Caso de Estudio	96
10	Viabilidad de la implementación de dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia	98
11	Unificación de métodos de realización y presentación de estudios de desempeño de dispositivos de pre-tratamiento	101
12	Conclusiones.....	103
13	Bibliografía	105



Índice de Figuras

Ilustración 1 Medición del fenómeno del Primer Lavado. Adaptado de Sansalone (1997).	13
Ilustración 2 Variación de la concentración de contaminantes con el tiempo. Adaptado de Anil Acharyaa (2010).	14
Ilustración 3 Variación de la concentración de contaminantes con respecto a la profundidad del agua. Adaptado de Anil Acharyaa (2010).	15
Ilustración 5 Variación de la concentración de TSS con respecto al número de días secos. Adaptado de Anil Acharyaa (2010).	16
Ilustración 6 Esquema de Cámara de Inspección.	25
Ilustración 7 Geometría óptima del Sumidero Convencional. Tomado de Avila (2011).	26
Ilustración 8 Cámara de Inspección Con adición de pantalla. Adaptado de Field (2004).	27
Ilustración 9 Esquema del sumidero utilizado en el laboratorio. Adaptado de Adam K. Howard (2012)	28
Ilustración 10 Eficiencia de remoción de sedimentos. Adaptado de Adam K. Howard (2012). 30	
Ilustración 11 Modelo de eficiencia de remoción de sedimentos. Adaptado de Adam K. Howard (2012).	32
Ilustración 12 Concentración efluente de sedimentos. Adaptado de Adam K. Howard (2012). 33	
Ilustración 13 Modelo de Resuspensión de sedimentos. Adaptado de Adam K. Howard (2012).	34
Ilustración 14 Medición de vectores de velocidad. Adaptado de Adam K. Howard (2012).	35
Ilustración 15 Fenómeno de erosión en el fondo del sumidero. Tomado de Adam K. Howard (2012).	35
Ilustración 16 Desempeño del sumidero en función del número de Péclet. Adaptado de Adam Howard (2009).	37
Ilustración 17 Eficiencia de sumidero estándar y Stormceptor. Adaptado de Adam Howard (2009).	38
Ilustración 18 Masa de sedimentos removida. Adaptado de Ávila (2011).	40
Ilustración 19 Componentes Downstream Defender. Adaptado de Phipps (2008).	42
Ilustración 20 Esquema típico de un filtro de Arena. Adaptado de EPA (1999).	48
Ilustración 21 Obstrucción de los geotextiles. Tomada de López (2005).	54
Ilustración 22 Colmatación de los geotextiles. Tomado de López (2005).	54
Ilustración 23 colmatación prematura del geotextil. Adaptado de Gardoni (2000).	55
Ilustración 24 Concentración afluente y efluente. Adaptado de Carmen A. Franks (2012).	59
Ilustración 25 Efecto pastel en los geotextiles. Adaptado de Aydilek (2011).	60
Ilustración 26 Permeabilidad vs. Esfuerzo Normal. Adaptado de Gardoni (2000).	61
Ilustración 27 Disminución del espesor del geotextil. Adaptado de Gardoni (2000).	62



Ilustración 28 Configuración de los dispositivos de sedimentación. Tomado de Harwood (2002).....	64
Ilustración 29 Predicciones de velocidad. Tomado de Harwood (2002).....	65
Ilustración 30 Predicción de la trayectoria del flujo. Tomado de Harwood (2002).....	66
Ilustración 31 Eficiencias de Remoción (A) y Retención (B) de sedimentos. Adaptado de Harwood (2002).....	68
Ilustración 32 Eficiencia de remoción instantánea para caudales afluentes de A – 20 L/s, B – 40 L/s, C – 60 L/s y D – 80 L/s. Adaptado de Harwood (2002).	70
Ilustración 33 Eficiencia de retención instantánea para caudales afluentes de A – 20 L/s, B – 40 L/s, C – 60 L/s y D – 80 L/s. Adaptado de Harwood (2002).	71
Ilustración 34 Concentraciones afluentes y efluentes. Adaptado de Carmen A. Franks (2014).	73
Ilustración 35 Comparación entre los filtros. Adaptado de Carmen A. Franks (2014).	74
Ilustración 36 Barredora de Escoba Mecánica. Tomada de Jones (2012).....	76
Ilustración 37 Barredora de Aire Regenerativo. Tomada de TYMCO Inc (2014).	77
Ilustración 38 Barredora de Vacío. Tomado de Euromec.	78
Ilustración 39 Comparación situación de barrido y no barrido. Adaptado de Kang et al (2009).	79
Ilustración 40 Componentes del Filtro Up-Flow (Hydro International, 2008).....	81
Ilustración 41 Distribución de partículas en caudal Afluyente y Efluente. Adaptado de Uday Khambhammettu (2006).	82
Ilustración 42 Concentración en caudal Afluyente y Efluente. Adaptado de Uday Khambhammettu (2006).....	83
Ilustración 43 Mantenimiento Filtro Up-Flow. Tomado de Hydro International (2008).....	85
Ilustración 44 Masa acumulada según tamaño de partículas. Adaptado de Yezhao Cai (2013).	86
Ilustración 45 Perfil de Camión Váctor. Tomado de Vac-Con®.....	90
Ilustración 46 Acumulación de sedimentos. Adaptado de Guo (2011).	96



Índice de Tablas

Tabla 1 Ventajas y Desventajas Celdas Aquacell. Adaptado de S. Wilson (2004).	10
Tabla 2 Concentraciones típicas de contaminantes en Aguas Residuales y Aguas Lluvias. Adaptado de Michael A. Ports (2009).	11
Tabla 3 Nivel de contaminantes para diferentes volúmenes de escorrentía. Adaptado de Anil Acharyaa (2010).	15
Tabla 4 Dispositivos en línea. Adaptación de GeoSyntec Consultants: Low Impact Development Center (2006).	20
Tabla 5 Porcentajes mínimos de remoción de dispositivos de filtración. Adaptado de South Carolina Department of Transportation (2008).	23
Tabla 6 Valores de variables en pruebas de laboratorio. Adaptado de Adam K. Howard (2012).	29
Tabla 7 Mediciones de concentración de sedimentos en el caudal efluente. Adaptado de Adam Howard (2009).	39
Tabla 8 Ventajas y desventajas de las cámaras de inspección estándar.	41
Tabla 9 Concentración de agentes contaminantes en el caudal efluente. Adaptado de EPA (2003).	45
Tabla 10 Eficiencia de remoción de contaminantes en Filtros de arena. Adaptado de Galli (1990).	49
Tabla 11 Ventajas y desventajas de los filtros de arena. Adaptado de EPA (1999).	50
Tabla 12 Ventajas y desventajas de los geotextiles no tejidos.	53
Tabla 13 Porcentajes de retención de Sólidos. Adaptado de Carmen A. Franks (2014).	73
Tabla 14 Eficiencias de Remoción Filtro Up-Flow. Adaptado de Uday Khambhammettu (2006).	83
Tabla 15 Recomendaciones de frecuencia de mantenimiento. Tomado de Hydro International (2008).	85
Tabla 17 Componentes principales del camión váctor.	91
Tabla 18 Requerimientos generales de mantenimiento. Adaptado de Imbrium Systems Corporation (2011).	93
Tabla 19 Ventajas y Desventajas de realizar mantenimiento. Adaptado de NJDEP (2004) y EPA (1999).	95
Tabla 20 Comparación de precios alternativas de mantenimiento. Adaptado de Comprehensive Environmental, Inc. (2013).	99
Tabla 21 Formato de presentación de estudios de dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia. Adaptado de Robert M. Roseen (2009).	102



1. Introducción

En la actualidad es común evidenciar fenómenos de inundaciones que se presentan en las ciudades, debido al auge que ha tenido la infraestructura urbana a lo largo de las últimas décadas. Las consecuencias de la urbanización y la construcción de avenidas, parqueaderos e infraestructura vial se evidencian en la impermeabilización del suelo. Ante un evento de lluvia de relativa intensidad sobre la superficie impermeabilizada, se genera una escorrentía superficial que es evacuada por el sistema de drenaje urbano. Sin embargo debido al incremento de la superficie urbana, la capacidad del sistema de drenaje se vuelve insuficiente, dando lugar a fenómenos de inundación y estancamiento del agua proveniente de la lluvia. Las inundaciones además de acarrear problemas al sistema de drenaje y al tráfico, traen consigo problemas de salubridad, ya que durante el recorrido que realiza el agua en forma de escorrentía superficial, se combina con material contaminado presente en las calles tal como metales pesados y desechos antropogénicos propios de las actividades cotidianas del hombre (Adam Howard, 2009).

Se han desarrollado dispositivos de tratamiento de aguas lluvias con el fin de realizar un pre-tratamiento a la escorrentía superficial y mejorar la calidad del agua. El presente documento se centra en evaluar la eficiencia de algunos de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia más comunes en los mercados, así como recolectar información acerca de los procedimientos de mantenimiento que se deben llevar a cabo para garantizar su efectivo funcionamiento. Adicionalmente con base a una búsqueda exhaustiva de bibliografía, pretende describir en su totalidad el funcionamiento hidráulico de estos dispositivos.

La importancia de la implementación de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia radica en los beneficios que brindan a las estructuras de retención de aguas lluvias, puesto que al capturar desechos garantizan el correcto funcionamiento de dichas estructuras, así como la prolongación de su vida útil, al evitar fenómenos como el taponamiento. Los dispositivos de pre-tratamiento también han demostrado ser útiles capturando agentes contaminantes presentes en la lluvia en sistemas de evacuación de agua lluvia hacia cuerpos de agua naturales, dado que dichos contaminantes representan una amenaza para los ecosistemas de agua y la calidad de la misma.

Este tipo de dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia se contextualizan en torno al tema de Manejo en la Fuente (SMPs – Source Management Practices). El objetivo de estas prácticas se centra en la reducción de la escorrentía así como de los agentes contaminantes que contiene con el fin de evitar la llegada de estas sustancias



patógenas a los cuerpos de agua receptores. La llegada de contaminantes como metales a los cuerpos de agua trae consigo problemas como la erosión, el desmejoramiento de la calidad del agua y la afectación directa de los ecosistemas acuáticos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

- Realizar una consulta bibliográfica que permita comprender la hidráulica y los principales métodos de mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia.
- Establecer una comparación entre los dispositivos de pre-tratamiento analizados y discernir para encontrar aquel que resulta ser más eficiente.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer las fuentes de sedimentos y desechos que se almacenan en los dispositivos de pre-tratamiento del agua lluvia.
- Indagar acerca de la aplicación de los dispositivos de pre-tratamiento en los sistemas de drenaje urbano.
- Investigar casos de aplicación y estudios de laboratorio que midan la eficiencia de los dispositivos analizados.
- Buscar y documentar el fenómeno de primer lavado, también conocido como *First Flush*.
- Consultar casos de aplicación en los que se utilicen los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia.
- Indagar acerca de los procedimientos de inspección y mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento.



- Consultar empresas de fabricantes de dispositivos de tratamiento de agua lluvia acerca de los procedimientos de mantenimiento y limpieza apropiados.
- Buscar información de técnicas de mantenimiento con ayuda de empresas dedicadas a realizar esta labor.

1.3 Historia del drenaje de aguas lluvias

Las prácticas de manejo de aguas lluvias no son un fenómeno que surgió recientemente. Durante el imperio Mesopotámico, alrededor del Segundo Milenio a.C, se llevaban a cabo labores de control de inundaciones y de almacenamiento de agua lluvia para uso doméstico y riego de los campos. La única diferencia entre el propósito del manejo del agua lluvia hace cuatro milenios y el propósito actual radica en el hecho que ahora existe una preocupación por remover contaminantes del agua lluvia para hacer una efectiva recarga de los acuíferos subterráneos. En el pasado no había problemas relevantes con los contaminantes debido al limitado desarrollo de la industria y la poca impermeabilización de los suelos producto de la urbanización. Los propósitos actuales de manejo del agua lluvia requieren modificaciones a los sistemas tradicionales de drenaje (National Research Council, 2008).

Con la ayuda del Método Racional, desarrollado luego de la Segunda Guerra Mundial para estimar caudales pico, fue posible diseñar el sistema de drenaje urbano. Los sistemas de atenuación de tormentas en los drenajes consistían en unos arreglos de sumideros y tuberías que prevenían las inundaciones al evacuar el agua lluvia hacia el cuerpo de agua más cercano. Sin embargo esta solución generaba inundaciones aguas abajo de los cuerpos receptores y erosión, por ello se agrandaron los canales y se blindaron con concreto para prevenir la erosión.

Aunque los canales de concreto parecían una solución a los problemas de erosión e inundaciones, estaban acabando con los ecosistemas acuáticos. Por ello surgió la necesidad de buscar tecnologías que pudiesen atenuar los picos de las tormentas mediante mecanismos de control de caudal. Estructuras como cuencas de detención surgieron como solución, pero pronto se evidenciaron las limitaciones de la detención y la necesidad de implementar la infiltración para poder recargar los acuíferos y garantizar un flujo de agua constante hacia los cuerpos de agua naturales tales como lagos y humedales.



El concepto de Desarrollo de Bajo Impacto (LID) surge de la necesidad de controlar el volumen de esorrentía. Adicionalmente debido a estudios realizados entre los años 70 y 80 por la EPA se incluyó el tratamiento de los contaminantes en los objetivos del manejo de aguas lluvias. Según un estudio publicado por Bannerman (1979), el río de Menomonee en Wisconsin mostró altas concentraciones de metales pesados y sedimentos. Estudios posteriores adhirieron mayor evidencia a la problemática de los contaminantes evidenciada por Bannerman.

Con el rápido desarrollo urbanístico y los altos impactos sobre el medio ambiente, se hace imperativo desarrollar técnicas de manejo del agua lluvia efectiva que permitan reducir la huella ambiental causada por la impermeabilización de los suelos en las ciudades y el desarrollo de la industria. El reto de los desarrolladores urbanísticos es generar prácticas de manejo de agua lluvia aplicable a los nuevos proyectos y zonas de desarrollo, así como adecuar la infraestructura de drenaje existente a las nuevas necesidades mediante la implementación de nuevas tecnologías.



2 Contextualización

Los primeros diseños de sistema de drenaje urbano se basaron en la idea de transportar el agua lo más rápido posible desde la fuente hacia el punto de disposición o lugar de tratamiento. Con la urbanización, se incrementaron las superficies impermeables y con ello el volumen de escorrentía proveniente de la lluvia. Los diseños tradicionales de drenaje requieren cambios para poder manejar controlar los mayores volúmenes producidos en los eventos de lluvia.

Uno de los diseños modernos para el drenaje consiste en el control y el tratamiento del agua lluvia cerca de la fuente. A partir de esta tendencia filosófica de diseño surgen prácticas sostenibles como Best Management Practices (BMP), Low Impact Development (LID) y Sustainable Drainage Systems (SuDS) para el manejo de aguas lluvias. Estas corrientes buscan en la mayoría de los casos maximizar la infiltración del agua en la zona de captación, imitando las condiciones de respuesta de una cuenca natural. Estudios como el de Stovin y Swan (2007) han demostrado reducciones en los costos, al utilizar tecnología derivadas de estas corrientes como tanques de almacenamiento, comparado con los costos de un sistema de drenaje tradicional.

En países como Estados Unidos la masiva implementación de sistemas de drenaje sostenible ha dado lugar al desarrollo de guías metodológicas acerca del funcionamiento, instalación y mantenimiento de las tecnologías sostenibles. Adicionalmente han surgido figuras de orden legal que regulan la implementación de estas tecnologías (D. S. Jarman, 2011).

2.2 Control en la Fuente

El concepto de control en la fuente surge de la idea de prevenir la contaminación que llega al sistema principal de alcantarillado, o en su defecto a los cuerpos de agua receptores. El hecho de implementar el control en la fuente brindar ciertas ventajas sobre el sistema tradicional, también conocido como solución al final de tubo.

El control en la fuente representa un ahorro significativo del presupuesto destinado para el tratamiento del agua lluvia en las ciudades y municipios. Al tomar ciertas medidas como disminuir la cantidad de pesticidas o recolectar la basura de las mascotas se puede reducir la carga de sedimentos que llega a los sistemas de



alcantarillado, y por ende los costos del tratamiento de las aguas (Michael A. Ports, 2009). En otras palabras se podría decir que el control en la fuente transfiere el costo de la contaminación a quienes la producen y no a toda la población que se ve afectada.

El sistema tradicional de drenaje (solución al final del tubo) no tiene la capacidad de hacer el tratamiento adecuado a la contaminación presente en el agua lluvia debido a los mayores volúmenes generados y a la normativa más exigente en cuanto a los parámetros de calidad del agua. La filosofía de control en la fuente es más fácil de implementar en nuevos proyectos, durante las primeras etapas de construcción, que no cuentan con sistema de drenaje. Sin embargo es posible realizar algunas modificaciones a los sistemas tradicionales para adecuar el control en la fuente (Michael A. Ports, 2009).

2.2.1 Ventajas del Control en la Fuente

Tal vez una de las mayores ventajas de las medidas de tratamiento en la fuente es que previenen los altos costos asociados con la rehabilitación de ecosistemas naturales afectados por la contaminación (Water Security Agency, 2014). Algunas de las técnicas de control en la fuente disminuyen la cantidad de contaminantes tales como: aceites, grasas de origen industrial, compuestos metálicos, sedimentos, bacterias y basura.

Las soluciones al final del tubo requieren un alto presupuesto inicial ya que en muchas ocasiones están relacionadas con grandes estructuras civiles como plantas de tratamiento para poder llevar a cabo el control sobre los contaminantes de las aguas provenientes del sistema de alcantarillado. Por su parte, las técnicas de solución en la fuente pueden ser implementadas rápidamente y en general consisten en la extensión de limpieza sobre la superficie.

2.2.2 Desventajas del Control en la Fuente

Anteriormente no se prestaba tanta atención a la protección de los ecosistemas acuáticos y a la prevención de la contaminación como ocurre en el presente, donde el manejo y tratamiento del agua lluvia se ha vuelto un problema que concierne a múltiples disciplinas. Una de las razones por las cuales el control en la fuente no fue implementado a gran escala en el pasado se debía a la dificultad de predecir la efectividad, puesto que muchos de los proyectos de control en la fuente



comprometían parámetros no medibles físicamente como la educación de una población para llevar a cabo labores de limpieza (Water Security Agency, 2014). En cambio las mediciones para cuantificar la efectividad de las técnicas de control al final del tubo si se podían resolver con la ayuda de modelos computacionales que predecían la efectividad de las estructuras. En otras palabras, no era posible comparar los valores reportados de efectividad de las medidas al final del tubo con las estadísticas obtenidas de los proyectos de educación de control en la fuente que no arrojaban datos tangibles en cuanto a eficiencia de remoción de contaminantes de la escorrentía superficial.

Para poder cuantificar la efectividad de los métodos de control en la fuente se necesita implementar otras herramientas que permitan hacer una evaluación cualitativa. Dadas las nuevas variables que intervienen en la problemática del manejo del agua lluvia en la actualidad, técnicas de análisis multidisciplinarias son requeridas para medir la efectividad, de las soluciones en la fuente adoptadas.

Un verdadero manejo de los contaminantes de las aguas lluvias debe considerar la suma de los esfuerzos individuales de todas las técnicas disponibles, ya sean de control en la fuente o de solución al final del tubo. Algunas de las prácticas no parecen ser efectivas por sí solas, pero en conjunto con otras se pueden obtener sistemas de alta efectividad.



3 Manejo Sostenible del Agua lluvia

En países industrializados como Estados Unidos y el Reino Unido se realizan prácticas sostenibles de manejo aguas lluvias conocidas como *Sustainable Urban Drainage System (SUDS)* y *Best Management Practices (BMPs)* respectivamente. Dichas prácticas, como se mencionó anteriormente, se basan en la idea de drenar el agua de la escorrentía superficial bajo el principio de sostenibilidad con el fin de mitigar la contaminación que llega al sistema de alcantarillado y reducir su carga bajo los eventos de lluvia. Aunque estas filosofías de drenaje sostenible van en contra del pensamiento tradicional, en Estados Unidos y Reino Unido se ha reconocido su importancia como sistemas de drenaje efectivos, además de contribuir con el mejoramiento de la calidad del agua, la reducción de los caudales pico y recargando los acuíferos (M. Scholz, 2005).

Low Impact Development (LID) es una forma de desarrollo multivariada, que busca planear y diseñar desarrollos urbanos de un modo que se minimicen los daños a los ecosistemas acuáticos por parte de los contaminantes que se encuentran en la escorrentía superficial producida por los eventos de lluvia. En Australia esta filosofía se conoce como *Water Sensitive Urban Design (WSUD)*, que busca optimizar los procesos de planeación y diseño urbano con el manejo del agua lluvia y las aguas residuales (Eddy Akinyemi, 2008). Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) tiene como objetivo principal capturar y tratar el agua lluvia de la superficie de estructuras como pavimentos vía infiltración y almacenamiento.

La idea detrás de SUDS es asemejar los escenarios lo más parecido posible a las condiciones naturales, a priori la urbanización y el desarrollo industrial. Esta filosofía comprende una amplia gama de soluciones que varía desde pozos de absorción hasta tanques de almacenamiento subterráneo. Dichas técnicas se clasifican en cuatro grupos principales: superficies permeables, franjas filtrantes, dispositivos de filtración y cuencas. Los principales objetivos de estas técnicas de drenaje sostenible se describen a continuación:

- **Prevención:** Consiste en medidas de limpieza a nivel predial para disminuir las basuras y material contaminado que se pueda mezclar con el agua lluvia.
- **Control en la fuente:** Utilizar técnicas de drenaje sostenible tan cerca del lugar de generación de escorrentía superficial como sea posible.



- **Control en el sitio:** Consiste en direccionar la escorrentía proveniente de varias fuentes hacia un punto específico donde se disponga una alternativa de drenaje sostenible como una cuenca.
- **Control Regional:** Disposición de las aguas provenientes de varias estructuras de control en el sitio hacia un lugar de mayor capacidad como un humedal.

Las prácticas sostenibles de manejo de agua lluvia se clasifican en tres clases según el tipo de tratamiento y destino que le dan al agua lluvia que recolectan:

- **Reciclar el agua recolectada:** Para reutilizarla en predios como aguas grises, para inodoros y máquinas de lavado.
- **Infiltrarla para recargar los acuíferos:** Utilizando una geo-membrana permeable que permite el paso del agua hacia el suelo natural circundante. La velocidad de infiltración depende de las características del suelo.
- **Funcionar como un tanque de tormenta:** Liberar paulatinamente el agua recolectada al sistema de alcantarillado, posterior al evento de lluvia, para no saturar el sistema y evitar los eventos de inundación.

Aunque las guías de manejo sostenible del agua lluvia varían de país en país, en esencia, Sustainable Urban Drainage System (SUDS), Best Management Practices (BMPs), Low Impact Development (LID) y Water Sensitive Urban Design (WSUD) comparten el mismo objetivo: tratar y remover sedimentos y material contaminado del agua lluvia en área donde es posible realizar control en la fuente.

En las últimas décadas se ha evidenciado un auge de los dispositivos de tratamiento de agua lluvia a nivel predial que se ajustan a las legislaciones en cuanto a la calidad del agua en países. Dichas regulaciones al agua por parte de los gobiernos se han vuelto más exigentes debido a la creciente preocupación por la contaminación de los cuerpos de agua y los problemas generados a nivel urbano como las inundaciones. Los dispositivos de tratamiento de agua lluvia han demostrado ser efectivos en la remoción de partículas inorgánicas, respaldado por varios estudios realizados sobre el tema (Adam K. Howard, 2012).



3.2 Tanques de Almacenamiento Temporal (Aquacell)

Los Aquacell, desarrollados por la empresa WAVIN, pertenecen a las tecnologías de tratamiento de agua lluvia sostenible. Básicamente consisten en unas geo-celdas modulares de polipropileno que se pueden agrupar para formar tanques de diferentes dimensiones para atenuar picos de tormenta. Su instalación es subterránea, por lo cual requieren un diseño estructural para soportar las cargas generadas por el suelo inmediatamente encima de los tanques, así como las cargas de tráfico, cuando se instalan bajo autopistas (Wavin, 2005).

Las celdas Aquacell forman parte de los dispositivos de infiltración, dentro del marco del manejo sostenible del agua lluvia. Este tipo de dispositivos usualmente prestan un servicio de almacenamiento temporal de caudales pico, para luego infiltrar el agua almacenada al suelo circundante. El tamaño de los dispositivos de filtración varía según las características del área de captación. La calidad del agua que se filtra al suelo se mejora con la ayuda de filtros y estructuras de pre-tratamiento que remueven basuras y partículas contaminadas (P.B. Spillett, 2005).

Como todas las tecnologías presentan ciertas adversidades durante su instalación o a lo largo de su vida útil. En la siguiente tabla se muestran algunas de las ventajas y desventajas de las geo-celdas.

Ventajas	Desventajas
Fácil de instalar y de diseñar (teoría de diseño estructural).	Sólo almacenan el agua lluvia. Requieren otros dispositivos para hacer un tratamiento a la esorrentía.
Pueden ser instaladas en gran variedad de lugares y no requieren grandes extensiones de tierra para tal fin.	Requieren un diseño minucioso en cuanto a sedimentación ya que su mantenimiento es muy complicado.

Tabla 1 Ventajas y Desventajas Celdas Aquacell. Adaptado de S. Wilson (2004).



4 Contaminación en el Agua Lluvia

Las partículas contaminadas que son transportadas por la escorrentía superficial producida por la impermeabilización de las superficies en las urbes es una realidad. Varios estudios se han basado sus estudios en la medición de la concentración de ciertos contaminantes en la escorrentía superficial. La concentración y la cantidad de contaminantes presentes en el agua lluvia varía de lugar en lugar, pues depende de diversas variables como la actividad humana llevada a cabo en la zona de generación de escorrentía. En la siguiente tabla se presentan las concentraciones típicas de los contaminantes más comunes encontrados en el agua lluvia y se compara con las concentraciones típicas de las aguas residuales.

Contaminante	Aguas Negras	Escorrentía
Total Sólidos Suspendidos (TSS) (mg/L)	100 - 350	2 - 11300
Total Nitrógeno (TN) (mg/L)	20 - 85	0.4 - 5.0
Total Fósforo (TP) (mg/L)	4 - 15	0.5 - 2.0
Plomo (mg/L)	0.1	0 - 1.9
Zinc (mg/L)	0.28	0.02
Cobre (mg/L)	0.22	0.05
Coliformes Fecales (cont/100 ml)	$10^7 - 10^9$	$10^3 - 10^7$

Tabla 2 Concentraciones típicas de contaminantes en Aguas Residuales y Aguas Lluvias. Adaptado de Michael A. Ports (2009).

Como se puede apreciar en la tabla las concentraciones de los contaminantes presentes en el agua lluvia son importantes, y merecen tener algún tipo de tratamiento, especialmente cuando el agua recolectada desemboca en cuerpos de agua naturales como ríos y lagunas, representando una amenaza para los ecosistemas acuáticos.

Los estudios llevados a cabo en campo para evidenciar la presencia de contaminantes en el agua lluvia han mostrado que la mayor concentración de contaminantes se encuentra en una fase inicial de la escorrentía producida por el agua lluvia. Este fenómeno se ha denominado *First Flush*. En la siguiente sección se describen sus características y se citan algunos casos de estudios donde se le han hecho mediciones.



4.2 Fenómeno del *First Flush*

Normalmente cuando se presenta un evento de lluvia en un área impermeabilizada como lo es un parqueadero o una calle pavimentada, se genera una escorrentía superficial, que se evidencia como un flujo de agua lluvia, que típicamente se dirige hacia los puntos de captación del agua superficial de los drenajes urbanos de las ciudades. El flujo de agua lluvia superficial que se crea inicialmente arrastra los sedimentos y partículas que se encuentran sobre la superficie, generados por la cotidianidad de las actividades humanas. Las partículas sobre la superficie se encuentran ligadas a contaminantes como metales y residuos de hidrocarburos (Water Security Agency, 2014). El fenómeno de transporte de las partículas de la superficie por la escorrentía producida por el agua lluvia se conoce como *First Flush*. El fenómeno del *Primer Lavado*, como se podría traducir al castellano, ha sido objeto de distintos estudios puesto que está asociado con la mayor concentración de contaminantes en la escorrentía durante un evento de lluvia.

Según Howard (2012) la escorrentía superficial generada en las áreas impermeabilizadas urbanas es considerada una de las mayores fuentes de contaminación de los cuerpos de agua receptores como ríos y lagunas. La medición del fenómeno del primer lavado no es tan sencilla de realizar, pues sucede con relativa rapidez, y por lo tanto se requiere un alto grado de precisión en el intervalo de tiempo seleccionado y la localización de los aparatos de medición. Una de las maneras de medición del fenómeno del primer lavado fue propuesta por Sansalone (1997), quien argumentaba que el fenómeno del primer lavado se presentaba cuando la cantidad de masa de contaminantes acumulada superaba el volumen de escorrentía acumulado normalizado, al graficar la masa contra el tiempo de duración del evento de lluvia. En la siguiente ilustración se muestra el método de observación del primer lavado de Sansalone.

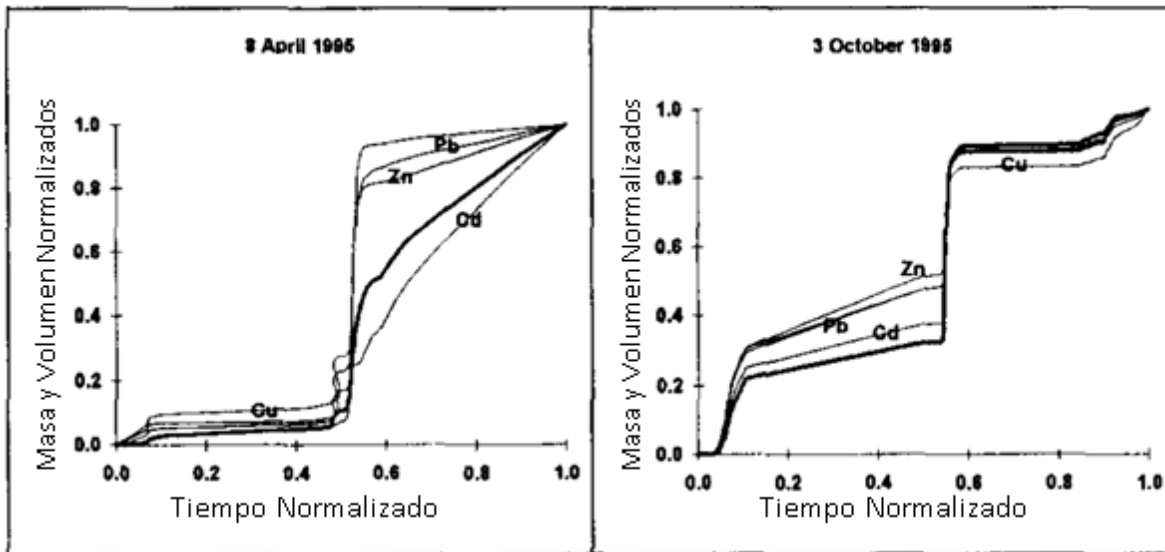


Ilustración 1 Medición del fenómeno del Primer Lavado. Adaptado de Sansalone (1997).

En la ilustración se puede ver que el fenómeno del primer lavado se presenta durante el inicio del evento de lluvia, cuando la masa de los metales analizados - Zinc (Zn), Plomo (Pb), Cobre (Cu) y Cadmio (Cd) - es superior al volumen de escorrentía, representado por línea más oscura.

4.2.1 Caso de estudio del primer lavado: Las Vegas

Un estudio de apreciación del fenómeno del primer lavado fue realizado por Acharyaa (2010) y llevado a cabo en la ciudad de Las Vegas, en el Estado de Nevada. El estudio se desarrolló en una de las avenidas de la ciudad y constó en la observación y toma de datos en varios puntos de captación de agua distribuidos a lo largo de la avenida en un período de tiempo de 23 meses.

Durante las mediciones en los eventos de lluvia se observó que la concentración de los contaminantes disminuía conforme aumentaba el tiempo del evento de lluvia. Las mayores concentraciones estaban relacionadas a los eventos de lluvia con una mayor cantidad de días secos previos. Conforme aumentaba la intensidad y la duración del evento de lluvia la concentración de contaminantes disminuía. En la siguiente ilustración se muestra la disminución de concentración de contaminantes con el paso del tiempo para seis eventos de precipitación medidos. El primer evento corresponde al evento de lluvia posterior al periodo seco más extenso. El aumento en la

concentración del evento 5 hacia el final del evento de lluvia se debe a la unión con el agua recolectada en otros puntos a lo largo de la avenida.

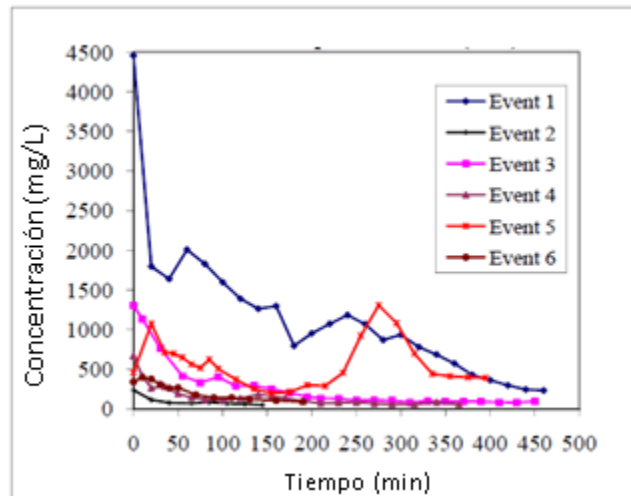


Ilustración 2 Variación de la concentración de contaminantes con el tiempo. Adaptado de Anil Acharyaa (2010).

En la siguiente ilustración se presenta la variación de la concentración de los contaminantes con respecto a la concentración máxima, y con respecto a la profundidad del agua a lo largo del tiempo del evento de lluvia. Los contaminantes medidos fueron TN (Nitrógeno Total) y TP (Fósforo Total); adicionalmente se midió el Total de Sólidos Suspendedos (TSS). Se puede apreciar que al comienzo del evento de lluvia la concentración es alta en comparación con la profundidad del agua. El aumento en la concentración de TSS y TP hacia el final se debió a cambios en el caudal medido por los aparatos durante la toma de datos.

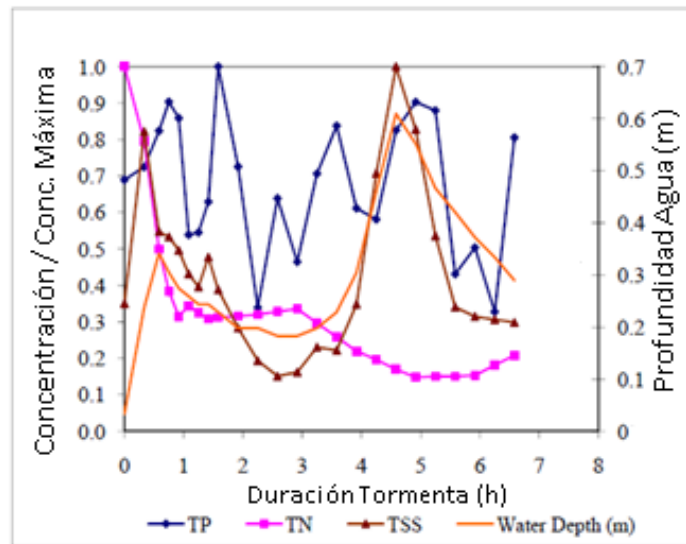


Ilustración 3 Variación de la concentración de contaminantes con respecto a la profundidad del agua.
 Adaptado de Anil Acharyaa (2010).

Otro modo de evidenciar el fenómeno del primer lavado fue mediante la medición de la concentración de contaminantes en ciertos volúmenes de la escorrentía. Los porcentajes típicos, medidos en los eventos de lluvia analizados, de concentración de sedimentos en los diferentes percentiles del volumen de escorrentía se presentan en la siguiente tabla. El fenómeno del primer lavado se consideró durante el primer 30 % de la escorrentía, la concentración de contaminantes medida en este punto debería ser la mínima concentración objetivo de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia. Para el 30% de la escorrentía se encontró que la mayor concentración de contaminantes era representada por nitrógeno.

% Volumen de Escorrentía	% Carga Total Contaminantes
20	28
30	38
50	58
80	85

Tabla 3 Nivel de contaminantes para diferentes volúmenes de escorrentía. Adaptado de Anil Acharyaa (2010).

La acumulación de sedimentos y contaminantes en la superficie está altamente relacionada con la cantidad de días secos antes del evento de lluvia. Resulta lógico

pensar que durante un período seco, se acumularan mayor cantidad de sedimentos y contaminantes sobre la superficie, debido a la actividad humana. La acumulación de sedimentos será mayor en lugares donde el suelo esté destinado a ser utilizado para comercio o para industria. La concentración del Total de Sólidos Suspendidos (TSS) fue medida a lo largo del muestreo en la avenida de la ciudad de Las Vegas, teniendo en cuenta los días secos anterior al evento de lluvia. Los resultados muestran que hay una mayor concentración de TSS cuando el período seco previo a al evento de precipitación ha sido mayor.

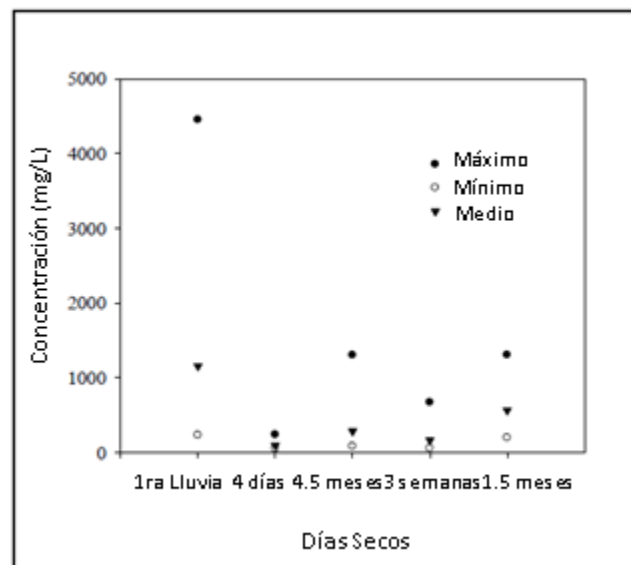


Ilustración 4 Variación de la concentración de TSS con respecto al número de días secos. Adaptado de Anil Acharyaa (2010).



5 Dispositivos de Pre-Tratamiento de Escorrentía Pluvial

Bajo las actuales circunstancias de contaminación evidenciadas en los sistemas de alcantarillado, inundaciones y erosión de la infraestructura de drenaje, se hacen necesaria la adición de dispositivos de tratamiento de la escorrentía producida durante los eventos de lluvia. Dichos dispositivos denominados de *pre-tratamiento* deben garantizar la remoción efectiva de un rango de contaminantes como metales y la captura de sedimentos y basuras, bajo condiciones de un caudal acorde al evidenciado durante los picos de los eventos de lluvia, para prevenir la contaminación de los cuerpos de agua receptores y el taponamiento de las estructuras de retención de aguas lluvias (Yezhao Cai, 2013).

Los dispositivos de tratamiento de agua lluvia, Stormwater Manufactured Treatment Devices (MTDs), por sus siglas en inglés, sirven como un mecanismo de tratamiento inicial del agua proveniente de la escorrentía superficial antes de ser descargada a los cuerpos de agua receptores. El tratamiento consiste en la remoción de sedimentos y material contaminado mediante métodos como la separación de densidad o la separación por tamaño de partículas. Por ello los MTDs hacen parte de las prácticas de manejo sostenible de agua lluvia denominadas BMPs (South Carolina Department of Transportation, 2008).

La eficiencia de los dispositivos es independiente de su capacidad de almacenamiento, por otro lado, es altamente dependiente de las características del entorno. La remoción de contaminantes de los dispositivos de agua lluvia depende de factores como la intensidad del evento de lluvia y las concentraciones de contaminantes en el área de captación.

Los dispositivos de pre-tratamiento son diseñados normalmente bajo el principio de atrapar basuras, aceites, metales, escombros y grasas. Existe una variada oferta de dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia en el mercado. Algunos más especializados que otros traen ciertas modificaciones como filtros y diseños modificaciones de recámaras que permiten atrapar contaminantes específicos como productos derivados del petróleo. Más adelante se explicará en detalle el funcionamiento y las características de los dispositivos de pre-tratamiento más comunes, y también se analizará un dispositivo innovador denominado Up-Flow Filter.



Los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia deben cumplir como mínimo ciertos requerimientos en cuanto a almacenamiento de sedimentos y tratamiento del caudal de agua lluvia que pasa a través de él. Los objetivos de un dispositivo de entrada a un drenaje de aguas lluvias son (Field, 2004):

- No causar inundaciones cuando el dispositivo se tapona por acumulación de basuras.
- No disminuir la altura hidráulica del flujo hacia el sistema de drenaje.
- Capturar la mayor cantidad de sedimentos y basuras posible.
- No forzar el agua lluvia a través de los desechos capturados.
- Requerir mantenimiento de bajo costo e itinerario de inspección y limpieza de baja frecuencia.

Uno de los dispositivos de pre-tratamiento más comunes debido a su efectividad y a su bajo costo es el sumidero convencional, el cual consta de una tubería de entrada y salida, y una cámara de almacenamiento donde se almacenan los sedimentos y contaminantes capturados provenientes de la escorrentía superficial. El sumidero estándar ha demostrado ser efectivo para la captura de sedimentos con un tamaño superior a cinco milímetros. En cuanto a su efectividad en la captura de aceites, se ha evidenciado ser efectivo en la retención de aquellos que se acumulan en la superficie del agua.

La función que cumple el dispositivo de pre-tratamiento en un sistema de drenajes es la de reducir la probabilidad de obstrucción y taponamiento del sistema, en alguno de los componentes aguas abajo del dispositivo de pre-tratamiento. Al ser concebidos con un propósito de retener sedimentos y contaminantes, los dispositivos de pre-tratamiento hacen parte de la variedad de tecnologías que ofrecen la corriente de Best Management Practices (BMP). Es común encontrar diseños de prácticas sostenibles de drenaje que incorporan dispositivos de pre-tratamiento antes de otras estructuras como el tanque de almacenamiento temporal compuesto por geo-celdas Aquacell. Lo anterior debido a la facilidad y menor costo del mantenimiento que presentan los dispositivos de pre-tratamiento en comparación con otras prácticas de drenaje sostenible.



Además de estar altamente relacionado con las características de los fenómenos de lluvia y el tipo de contaminantes y sedimentación de la zona de captación, la eficiencia de remoción de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia también está ligada en un alto grado con las características físicas de los dispositivos de tratamiento (Avila H. P., 2011). Por tal motivo en la actualidad se encuentra una gran variedad de dispositivos que han demostrado cumplir con las exigencias, en cuanto a remoción de contaminantes, de las autoridades competentes. Los avances tecnológicos han dado lugar al surgimiento de dispositivos de filtración y de sedimentación más eficientes y con mayor capacidad que los que se tenían dos décadas atrás. Más adelante se describen los tipos de dispositivos más comunes encontrados en el mercado, sus ventajas, desventajas y las características que comparten entre ellos.

5.1 Clasificación de los dispositivos de pre-tratamiento según el tipo de instalación.

Dadas las diferentes configuraciones de instalación y los diferentes fines para los cuales son desarrollados, los dispositivos de pre-tratamiento se pueden clasificar en tres grupos según su localización en el sistema de drenaje de aguas lluvias: Dispositivos de entrada, dispositivos en línea y trampas de flotadores (GeoSyntec Consultants. Low Impact Development Center, 2006).

- **Dispositivos de entrada:** Conjunto de dispositivos que se sitúan muy cerca de los accesos o entradas al sistema de drenaje urbano, diseñados para retener y remover basuras y sedimentos gruesos principalmente. Dispositivos como pantallas, rejillas metálicas, sumideros estándar y bastidores de barras metálicas pertenecen a esta categoría. Otra de las funciones que cumplen los dispositivos de pre-tratamiento de entrada es la de proteger los elementos del sistema de drenaje como tuberías de daños producidos por elementos como rocas. El tratamiento de partículas finas y contaminantes como metales no es uno de los objetivos los dispositivos de esta categoría. Al ser estructuras de captación y retención de basuras y sedimentos, están expuestas a la obstrucción por acumulación de basuras. El taponamiento disminuye su eficiencia y da lugar a problemas como represamiento de agua; por ello se requiere establecer un plan de mantenimiento para prevenir los problemas de taponamiento en los dispositivos de pre-tratamiento de entrada.

- **Dispositivos en línea:** Típicamente son dispositivos instalados más allá del lugar de captación. Son diseñados para retener partículas sólidas y desechos flotables como aceites y grasas. Dada su capacidad de retener aceites derivados de hidrocarburos, la instalación de dispositivos de pre-tratamiento en línea es ideal para lugares que producen este tipo de desechos como parqueaderos y avenidas. A continuación se presentan los dispositivos típicos de pre-tratamiento en línea y sus respectivos métodos de separación de sedimentos y material contaminante. Al igual que los dispositivos de entrada, requieren mantenimiento a lo largo de su vida útil para evitar el taponamiento.

Dispositivo	Proceso de Remoción o Captura
Pantallas	Separación por tamaño
Deflectores	Separación por densidad
Manholes	Separación por densidad
Mallas	Separación por tamaño
Bastidores de basuras	Separación por tamaño

Tabla 4 Dispositivos en línea. Adaptación de GeoSyntec Consultants: Low Impact Development Center (2006).

- **Trampas de flotadores:** Dispositivos que remueven sólidos flotantes presentes en el agua lluvia. Usualmente se sitúan sobre la superficie del agua presente en los sistemas de drenaje, aprovechando el principio de flotabilidad por el cual algunas basuras y sedimentos presentes en el agua lluvia emergen a la superficie del flujo. Tienen la ventaja de representar un bajo costo en comparación con otros métodos de pre-tratamiento y ser fáciles de usar al adaptarse a diferentes situaciones. Sin embargo su eficiencia de remoción de contaminantes y sedimentos es limitada al restringirse a capturar sólo aquellos que se encuentran en la superficie del agua.



5.2 Clasificación de los dispositivos de pre-tratamiento según el método de remoción de sedimentos del agua lluvia

El diseño de los MTDs depende del tipo de sólidos o materiales contaminados que se deseen retener. Dependiendo del material o sustancia objeto de remoción, los dispositivos pueden incluir filtros o modificaciones de las partes internas de los mismos. Con el fin de establecer una categorización de los MTDs se clasificaron en tres grupos principales.

5.2.1 Dispositivos de pre-tratamiento de Separación

Son diseñados con el fin de retener sedimentos y contaminantes en sus compartimientos. Están compuestos por un sumidero, donde se depositan los sedimentos atrapados. En este sumidero también es posible encontrar sistemas de filtración como pantallas para hacer una separación por tamaño de partículas. Adicionalmente algunos dispositivos cuentan con un sistema de “By-pass” que permite que, ante un evento de lluvia de alta duración e intensidad, los sedimentos capturados sean resuspendidos y posiblemente salgan del dispositivo de separación. El mecanismo de By-pass impide la entrada del flujo de agua hacia el sumidero, direccionando el flujo directamente hacia el punto de salida del dispositivo.

Cuando los sumideros no cuentan con el mecanismo de By-pass, se requieren pruebas de laboratorio para verificar la no recirculación o re-suspensión de los sedimentos en éste. Se puede obviar el uso del By-pass cuando se complementan los dispositivos de separación con otras técnicas de tratamiento de agua lluvia.

En general los dispositivos de separación se diseñan mediante un método de capacidad hidráulica por unidad de área. Se diseñan para una tasa máxima de carga hidráulica de 25 gpm/sf (galones por minuto por pie cuadrado), y para una carga hidráulica objetivo de 20 gpm/sf. Las anteriores especificaciones se establecieron con base en estudios de laboratorio de la eficiencia en remoción de contaminantes bajo estas cargas. Para diseñar dispositivos que soporten una mayor carga, se requiere realizar estudios que midan la efectividad de remoción de contaminantes de los dispositivos bajo mayores solicitaciones flujo de agua pasando a través de éstos.

Los dispositivos de separación deben cumplir las siguientes especificaciones, dictadas por organismos de control ambiental y de materiales:



- ✓ Remover como mínimo el 80% del total de Sólidos Suspendidos, (TSS, Total Suspended Solids), de arenas con un tamaño medio de 150 micrones, con una concentración que varía entre 100 y 300 mg/L (miligramos por litro). La eficiencia de remoción de arenas se rige bajo la norma ASTM D-3977-77 SSC.
- ✓ La extracción de los contaminantes y sedimentos presentes en la escorrentía superficial se debe hacer por medio de técnicas como la separación, asentamiento o acción de fuerza centrífuga.
- ✓ No es permitido el uso de equipos o accesorios que requieran una fuente de producción de energía como la electricidad, dentro de los dispositivos de tratamiento de agua lluvia.

5.2.2 Dispositivos de pre-tratamiento de Filtración

Este tipo de dispositivos tiene el mismo objetivo que los dispositivos de separación, con la diferencia que cuenta con sistemas de filtro adicionales, que brindan una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes del agua lluvia. Son utilizados en lugares que presentan una alta concentración de contaminante, tales como zonas industriales. Los sistemas de filtración permiten capturar partículas finas como metales y bacterias, con un tamaño medio inferior a 100 micrones. Los dispositivos de filtración se deben complementar con otros dispositivos de tratamiento de agua lluvia como dispositivos de separación, rejillas o pantallas que retengan las partículas gruesas, basuras y sedimentos, presentes en el agua lluvia.

A continuación se presentan las especificaciones que deben cumplir los dispositivos de filtración:

- ✓ Remover como mínimo el 80% del total de Sólidos Suspendidos, (TSS, Total Suspended Solids) de arcillas con un tamaño medio de 67 micrones, con una concentración que varía entre 100 y 300 mg/L (miligramos por litro). La eficiencia de remoción de arenas se rige bajo la norma ASTM D-3977-77 SSC.
- ✓ Usar sistemas de filtración para remover contaminantes presentes en partículas finas del agua lluvia.



Al tratarse de dispositivos de remoción de contaminantes especializados, deben garantizar el porcentaje de remoción de contaminantes como se muestra en la siguiente tabla.

Sustancia o Material	Porcentaje mínimo de Remoción
Hidrocarburos de Petróleo	≥80%
TSS	≥80%
Cobre	≥50%
Zinc	≥50%
Aceites y Grasas	≥80%
Plomo	≥50%

Tabla 5 Porcentajes mínimos de remoción de dispositivos de filtración. Adaptado de South Carolina Department of Transportation (2008).

5.2.3 Dispositivos de pre-tratamiento de Inserción

Este tipo de dispositivos surgió como solución a la no capacidad de poder instalar dispositivos de separación o de filtración debido a restricciones de espacio. Tiene la desventaja de no poder ser instalado en zonas o en proyectos que cuentan con muchas entradas de agua lluvia a lo largo de su extensión. Con el fin de ocupar el menor espacio posible, fueron diseñados para ser instalados justo de los puntos de captación de agua lluvia.

En algunos casos estos dispositivos pueden incorporar la presencia de mecanismos de filtración, con el fin de remover cierto tipo de contaminante específico. Las inserciones de sumideros proveen características contra el desbordamiento que no afectan la capacidad de almacenamiento de los mismos. Al igual que las dos clases de dispositivos descritos con anterioridad, la eficiencia en cuanto a remoción de sedimentos y agentes contaminantes está altamente ligada a las condiciones ambientales de la zona como la intensidad de los eventos de lluvia y la concentración de contaminantes derivada del tipo de actividad humana desarrollada en la zona de captación.

Los sumideros de inserción deben cumplir las siguientes especificaciones, dictadas por organismos de control ambiental y de materiales:



- ✓ Remover como mínimo el 80% del Total de Sólidos Suspendidos, (TSS, Total Suspended Solids) de arenas con un tamaño medio de 150 micrones, con una concentración que varía entre 100 y 300 mg/L (miligramos por litro). La eficiencia de remoción de arenas se rige bajo la norma ASTM D-3977-77 SSC.
- ✓ La extracción de los contaminantes y sedimentos presentes en la escorrentía superficial se debe hacer por medio de técnicas como la separación, asentamiento o acción de fuerza centrífuga.
- ✓ No es permitido el uso de equipos o accesorios que requieran una fuente de producción de energía como la electricidad, dentro de los dispositivos de tratamiento de agua lluvia.

5.3 Cámaras de Inspección Estándar

Las cámaras de inspección estándar han sido objeto de varios estudios desde la década de los 70s. Dichos estudios además de mostrar los métodos para los cuales se debe realizar el diseño de las cámaras de inspección, han estudiado su efectividad en cuanto a la captura de sedimentos. Estudios como los realizados por Robert Pitt entre 1979 y 1985, han demostrado que las cámaras son muy efectivas capturando material grueso. También se ha encontrado que los sumideros de las cámaras retienen efectivamente los sedimentos hasta alcanzar aproximadamente el 60% de su capacidad, lo que equivale a alrededor de 30 centímetros por debajo de la tubería de salida de la cámara (Field, 2004).

Las cámaras de inspección estándar son una pieza clave de un sistema de drenaje. Son vitales para realizar mantenimiento, puesto que representan un punto de acceso al sistema de alcantarillado en las uniones y a su sistema de tuberías. La geometría típica de la cámara de inspección y de los sumideros, donde almacenan los sedimentos, es una forma cilíndrica con una mayor magnitud de la altura en relación al diámetro.

La remoción y captura de sedimentos en el sumidero es posible gracias a la disposición de las tuberías de entrada y de salida. En la mayoría de los casos estas se instalan una en frente de otra permitiendo una leve caída entre ellas como se muestra en la siguiente ilustración.

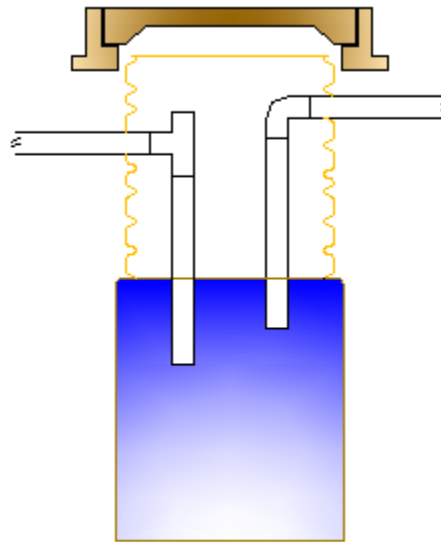


Ilustración 5 Esquema de Cámara de Inspección.

Esta disposición de las tuberías dentro de la cámara de inspección hace que el sumidero se encuentre permanentemente con cierta cantidad de agua en su interior. Los sedimentos capturados en el sumidero se almacenan en la parte inferior de la cámara hasta ser removidos durante el mantenimiento. En el mercado es posible encontrar cámaras con una altura típica que varía en los 60 y 180 centímetros; sin embargo también existen diseños inusuales que pueden llegar a tener una altura de hasta tres metros (Adam K. Howard, 2012).

Aunque el propósito principal de las cámaras de inspección en un sistema de drenaje es el de servir como puntos de mantenimiento y evaluación del estado de tuberías, se catalogan indirectamente como un dispositivo de pre-tratamiento por el hecho de capturar y remover sedimentos del flujo de agua. Este efecto se produce debido al asentamiento que sufren las partículas suspendidas en el flujo cuando ingresan al dispositivo.

Las cámaras de inspección estándar han demostrado ser efectivas en la remoción de partículas grandes; sin embargo los resultados no son los mismos para partículas finas, donde el porcentaje de retención de sedimentos es bajo. Estudios sobre la material han demostrado que un porcentaje significativo de los sedimentos presentes

en el agua lluvia están compuestos por partículas finas, con tamaños medio inferior a los $75 \mu\text{m}$ (micrómetros).

Además de la tasa de efectividad de remoción de sedimentos, las facilidades de instalación y la baja inversión inicial, el uso de sumideros convencionales se ha generalizado en países como Estados Unidos, donde los departamentos de Ambiente y Transporte de cada estado los consideran como una de las opciones dentro de sus regulaciones de tratamiento de aguas lluvias. Departamentos de transportes como el del Estado de New Jersey han llevado a cabo estudios para determinar la frecuencia de mantenimiento y eficiencia de remoción de sedimentos. Algunos de estos estudios se analizarán más adelante. El sumidero convencional garantiza la retención de la mayoría de los sedimentos (con un porcentaje de eficiencia del 75%), incluyendo la captura de sólidos suspendidos, asociados con agentes contaminantes como metales.

Varios estudios se han enfocado en hallar la relación adecuada entre diámetro y altura del sumidero, para la cual se alcanza el mejor desempeño del sistema. Una relación óptima fue propuesta por Larger (1977). Dicho autor encontró que la altura del sumidero debería satisfacer una relación de 6.5 a 1 con respecto al diámetro de la tubería de salida del dispositivo; el diámetro del sumidero debería equivaler a 4 veces el diámetro de la tubería de salida. En la siguiente ilustración se muestra la geometría propuesta por Larger.

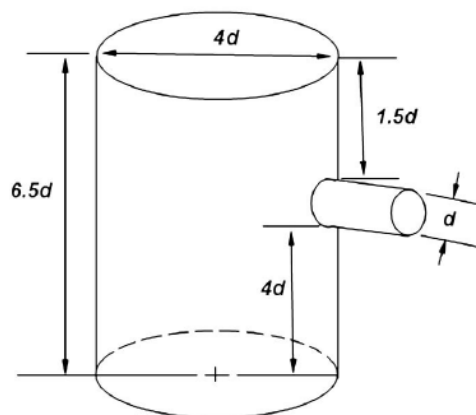


Ilustración 6 Geometría óptima del Sumidero Convencional. Tomado de Avila (2011).

Las cámaras de inspección ofrecen la posibilidad de adicionar ciertos accesorios que mejoran el desempeño del sumidero. Dichos accesorios pueden ser filtros que garanticen la captación de partículas específicas que residuos industriales o derivados

del petróleo. También pueden ser pantallas que eviten el ingreso de partículas gruesas a la tubería de salida de la cámara de inspección. En el siguiente esquema se muestra un sumidero con la adición de una pantalla que además de evitar la salida de partículas gruesas de la cámara de inspección, brinda un mecanismo de protección al sumidero ante eventos de lluvia de alta intensidad.

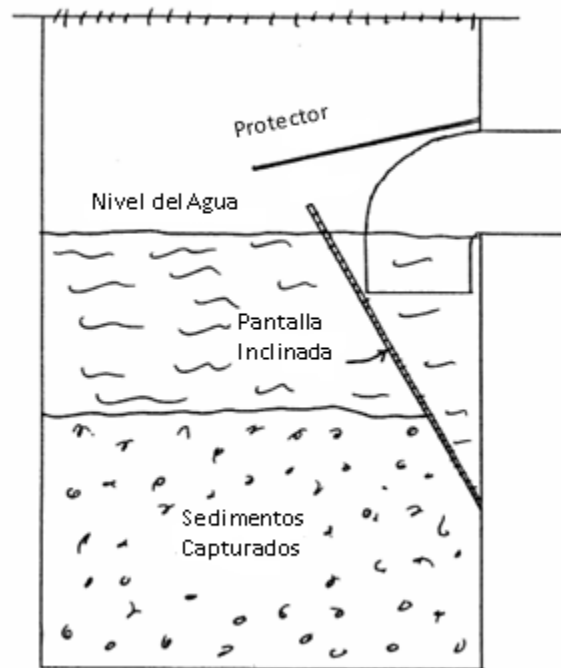


Ilustración 7 Cámara de Inspección Con adición de pantalla. Adaptado de Field (2004).

5.3.1 Estudios de desempeño de la Cámara de Inspección Estándar

5.3.1.1 Estudio de Análisis hidráulico de la remoción de sedimentos

Dado la aplicabilidad de los sumideros estándar a los sistemas de drenaje tradicionales, existen varios manuales que explican el diseño de los sumideros y el mantenimiento de los mismos. Por el hecho de ser un dispositivo de pre-tratamiento se han realizado varios estudios en el laboratorio para evaluar su efectividad en cuanto a remoción de sedimentos. A lo largo de esta sección se mostrarán los resultados y procedimientos de algunos estudios relevantes sobre el material.

Howard (2012) realizó varios ensayos en laboratorio con el fin de hacer un análisis hidráulico, y poder evaluar la efectividad de remoción de sólidos suspendidos en el flujo que pasaba a través de las cámaras de inspección estándar. El estudio también pretendía evaluar la cantidad de sedimentos que salían del dispositivo por la acción de fenómenos como la resuspensión de sedimentos.

Las muestras tomadas en el laboratorio durante las pruebas fueron analizadas por el método de balance de masas, el cual mostró ser más efectivo que el método de toma de muestras tradicional. El método de toma de muestras demostró ser poco efectivo, cuando se pretendían analizar partículas de tamaño superior al tamaño medio de los limos. Para evaluar la eficiencia de remoción del sumidero se hizo una descarga controlada de sedimentos en la tubería de entrada al dispositivo. Con la ayuda de un manómetro se midieron los cambios de elevación en las tuberías de entrada y de salida, y en el sumidero. Para evaluar el fenómeno de lavado de sedimentos, es decir, de salida de sedimentos del sumidero se utilizaron pruebas de peso en unas células de carga. La idea era medir el peso seco de los sedimentos acumulados en el sumidero a lo largo del tiempo; la disminución del peso indicaría que una fracción del material retenido estaría siendo evacuada. El esquema de uno de los sumideros utilizados se muestra a continuación.

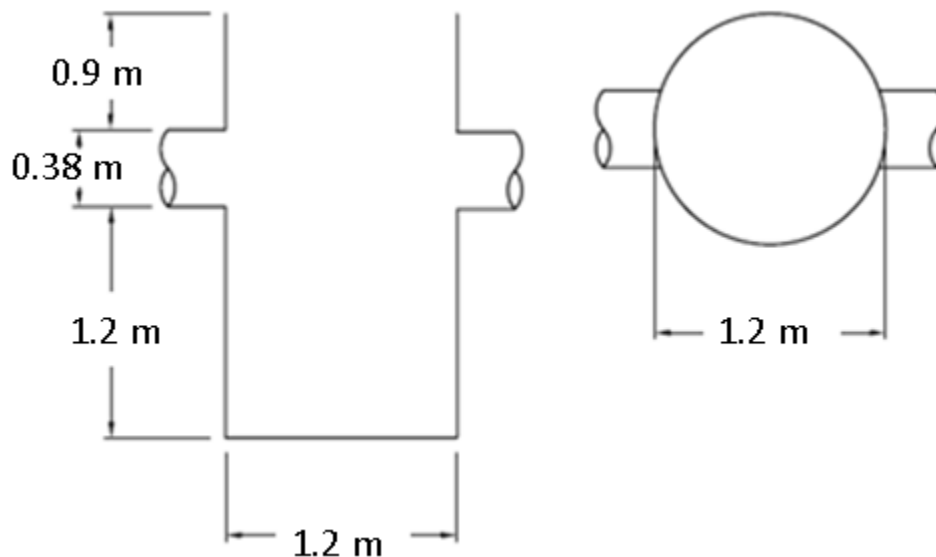


Ilustración 8 Esquema del sumidero utilizado en el laboratorio. Adaptado de Adam K. Howard (2012)



En la siguiente tabla se muestran valores de las variables tenidas en cuenta para las pruebas de eficiencia de remoción de sedimentos, realizadas en los dos tipos de sumideros utilizados durante este estudio de laboratorio.

Variable	Sumidero h = 1.2 m	Sumidero h = 1.8 m
Caudales	17, 34 51 y 68 L/s	51, 99, 150 y 200 L/s
Número de repetición de pruebas con cada caudal	3	
Tamaño medio de partículas de sedimentos	545 μm (500–589 μm) 303 μm (250–355 μm) 107 μm (88–125 μm)	

Tabla 6 Valores de variables en pruebas de laboratorio. Adaptado de Adam K. Howard (2012).

Las pruebas para evaluar el lavado de los sedimentos del sumidero consistieron en hacer una pre carga de sedimentos en el sumidero, y luego aplicar altos caudales a través de este. La pre carga de sedimentos en el sumidero era de aproximadamente 30 centímetros de arena de sílice, muy común en algunas muestras de sedimentos presentes en el agua lluvia recolectada, con un tamaño medio de partículas de 110 μm . Las tasas de descarga para utilizadas variaron en 78 y 156 L/s para el sumidero de 1.2 metros, y entre 142 y 538 L/s para el sumidero de 1.8 metros de profundidad. La tasa a la cual salían los sedimentos del sumidero se midió bajo dos tipos de procedimientos:

- **Método basado en el volumen:** Consistía en medir la profundidad en 24 puntos, luego se utilizaba el valor medio de las mediciones de profundidad para determinar el peso de los sedimentos removidos por acción de lavado de sedimentos, conociendo en área de la base del sumidero y la densidad de los sedimentos húmedos.
- **Método basado en la masa:** Con la ayuda de unas células de carga dispuestas debajo de los dos tipos de sumideros evaluados. Se tomaban mediciones antes y después de realizar las pruebas; adicionalmente se tomaban mediciones con el manómetro. El total de sedimentos lavados por el flujo de que pasa a través del sumidero se determina con ambas mediciones del cambio en el peso y el cambio en la profundidad de los sedimentos.

Uno de los principales objetivos del estudio era evaluar la capacidad de remoción y retención de sedimentos de la cámara de inspección estándar. Los resultados de la evaluación de las dos medidas de eficiencia del dispositivo, y otras variables como la velocidad del flujo se muestran a continuación.

Retención de sedimentos:

A partir de las pruebas llevadas a cabo en el laboratorio se observó que el caudal de entrada al sumidero de la cámara de inspección era indirectamente proporcional a la eficiencia de remoción de sedimentos, es decir, a menores caudales se evidenciaron mayores eficiencias de retención de sedimentos. Para la misma distribución de partículas de sedimentos y caudal de descarga se observó que a medida que el diámetro y la altura del dispositivo aumentaban, también lo hacía la eficiencia de retención de sedimentos. En ese orden de ideas, el sumidero de 1.8 metros de altura resulta ser más eficiente que el sumidero de 1.2 metros, en condiciones de bajo caudal. En la siguiente ilustración se muestra la eficiencia de remoción para diferentes configuraciones que se lograron con los dos sumideros analizados. Se realizaron pruebas para sumideros de 1.2 y 1.8 metros de diámetro con profundidades y distribución de partículas.

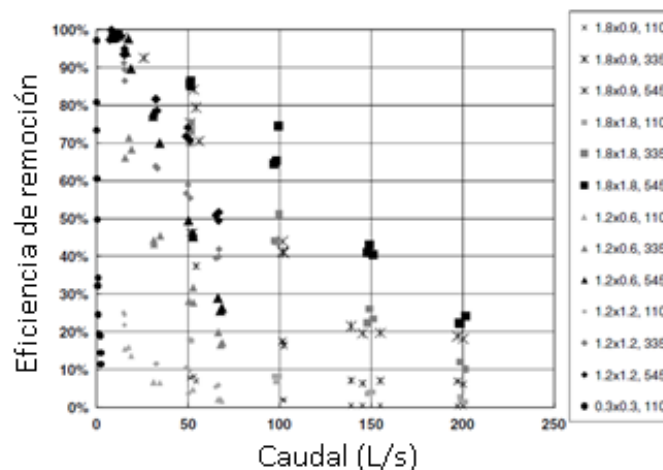


Ilustración 9 Eficiencia de remoción de sedimentos. Adaptado de Adam K. Howard (2012).

Con el fin de generalizar las predicción del porcentaje de remoción de sedimentos de los sumideros, independientemente de su geometría, el caudal de entrada al dispositivo, la granulometría de las partículas, se procedió a crear un modelo que pudiese predecir dichos resultados sin la necesidad de realizar cientos de pruebas en el laboratorio para determinar comportamiento de los dispositivos. Se empleó el



número de Péclét, el cual expresa el cociente entre el transporte de partículas de convección por decantación y el transporte por difusión turbulenta. El número de Péclét es adimensional y sirve de punto de partida para comparar la eficiencia entre varios dispositivos. Cuando dicho número adimensional se gráfica contra la eficiencia de remoción de sedimentos de un tamaño de distribución de partículas es posible llegar a la ecuación de eficiencia descrita por el parámetro η (Adam Howard, 2009). A continuación se muestra su ecuación.

$$P = \frac{U_s h D}{Q}$$

Ecuación 1 Número de Péclét. Tomado de Adam K. Howard (2012).

donde U_s es la velocidad de asentamiento de las partículas, D es el diámetro del sumidero, h es la altura del sumidero y Q es el caudal de descarga en el sumidero. Adicionalmente se utilizó una ecuación, propuesta en el estudio *Assesment of hydrodynamic separators for stormwater treatment* (Wilson, 2009), para describir la eficiencia en términos del número de Péclét.

$$\eta = \left[\frac{1}{R^b} + \frac{1}{(a P)^b} \right]^{-1/b}$$

Donde a , b y R son parámetros ajustados.

Ecuación 2 Eficiencia de Remoción. Adaptado de Wilson (2009).

Con base en una serie de relaciones matemáticas fue posible generar un modelo que prediga la eficiencia de un sumidero para capturar cierto tipo de partículas (distribución de tamaños), dadas las características del sumidero como el diámetro y la altura. El modelo también permite predecir las dimensiones que requiere una cámara de inspección para satisfacer ciertas necesidades de efectividad de remoción de sedimentos, conociendo la distribución de partículas y el caudal que entra al dispositivo. En la siguiente ilustración se observan los datos ajustados del modelo descrito con anterioridad; al graficar el cociente entre el número de Péclét y el cuadrado del número de Froude, contra la eficiencia de remoción η . Se puede apreciar que las diferentes configuraciones de diámetro – altura de los sumideros se ajustan al modelo matemático.

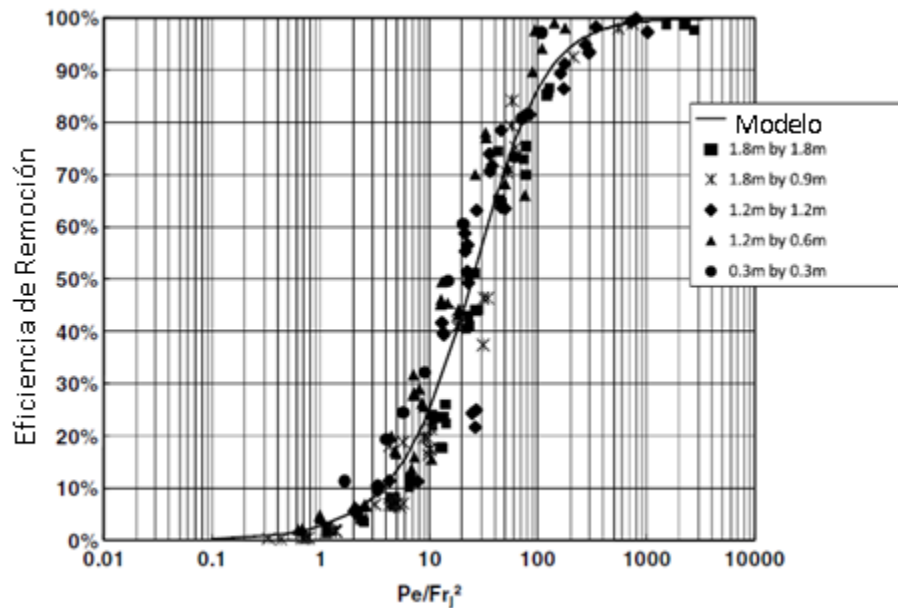


Ilustración 10 Modelo de eficiencia de remoción de sedimentos. Adaptado de Adam K. Howard (2012).

Resuspensión de sedimentos:

Durante las pruebas de medición de sedimentos que salen del sumidero se observó que a medida que el caudal de entrada aumenta, la concentración efluente también lo hace hasta que la descarga de flujo empieza a crear una capa espumosa sobre la capa de agua superficial dentro del sumidero; a partir de este punto la concentración de sedimentos en el caudal de salida del dispositivo disminuía. A partir de las observaciones durante la ejecución de las pruebas de resuspensión en los sumideros de igual diámetro pero mayor altura mostraron tener una mejor retención de sedimentos que aquellos con una menor altura. De igual manera que para las pruebas efectuadas para medir la eficiencia de remoción de sedimentos, los sumideros de mayor diámetro y altura permiten una menor concentración de sedimentos en el caudal efluente por efectos de resuspensión bajo las mismas condiciones. En la siguiente ilustración se muestran las mediciones hechas en laboratorio para diferentes configuraciones diámetro – altura de los sumideros.

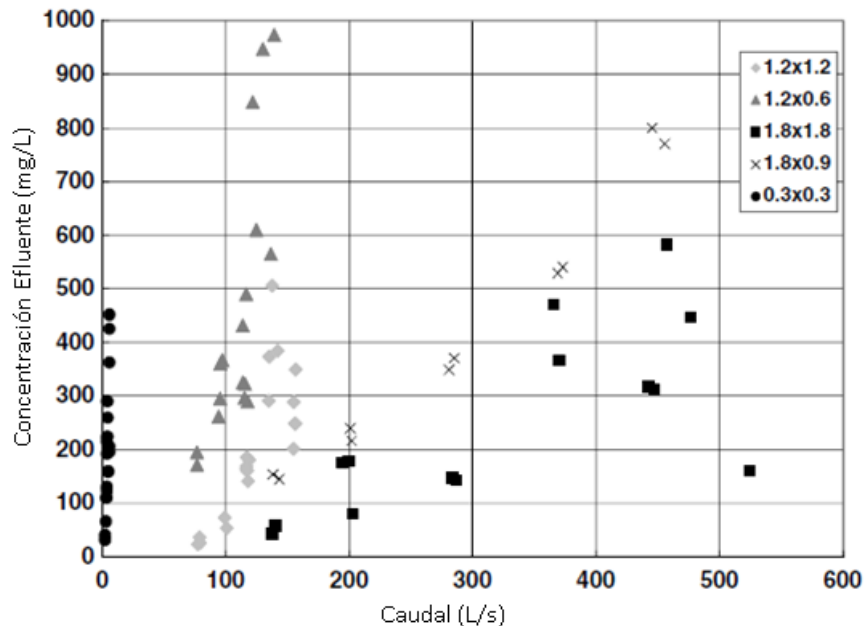


Ilustración 11 Concentración efluente de sedimentos. Adaptado de Adam K. Howard (2012).

Para tratar de estimar un modelo que pudiese predecir el porcentaje de sedimentos que sale del dispositivo en el caudal de efluente, en primer lugar se identificaron los factores que influyen en la generación del mecanismo de resuspensión cuando el dispositivo se encontraba ante un caudal afluente alto. En primer lugar debe haber un movimiento en la superficie de la capa de sedimentos almacenados en el sumidero. En segundo lugar se debe generar una circulación de sedimentos por encima de la capa de sedimentos debido a la acción de flujo sobre la misma. Y por último los sedimentos removidos de la capa de sedimentos deben llegar hasta la tubería de salida del dispositivo (Avila H. P., 2011).

Conociendo los factores que propician el resuspensión de los sedimentos del sumidero, el estudio procedió a calcular la mínima energía necesaria para que se produjeran los tres fenómenos descritos, y dicha energía se comparó con la medida en el caudal de entrada o caudal afluente al sumidero. El modelo desarrollado en este estudio puede ser usado para predecir las concentraciones de los sedimentos que salen del sumidero, conociendo valores de los sedimentos y de la geometría del sumidero como: distribución de partículas, peso específico de las partículas, temperatura del agua, diámetro del sumidero, altura del sumidero y caudal de descarga. Adicionalmente el modelo permite escoger las dimensiones del sumidero cuando se conoce la tasa de concentración de sedimentos objetivo en el caudal de

salida. En la siguiente ilustración se muestra el modelo ajustado para las diferentes configuraciones de sumideros que se analizaron en el laboratorio.

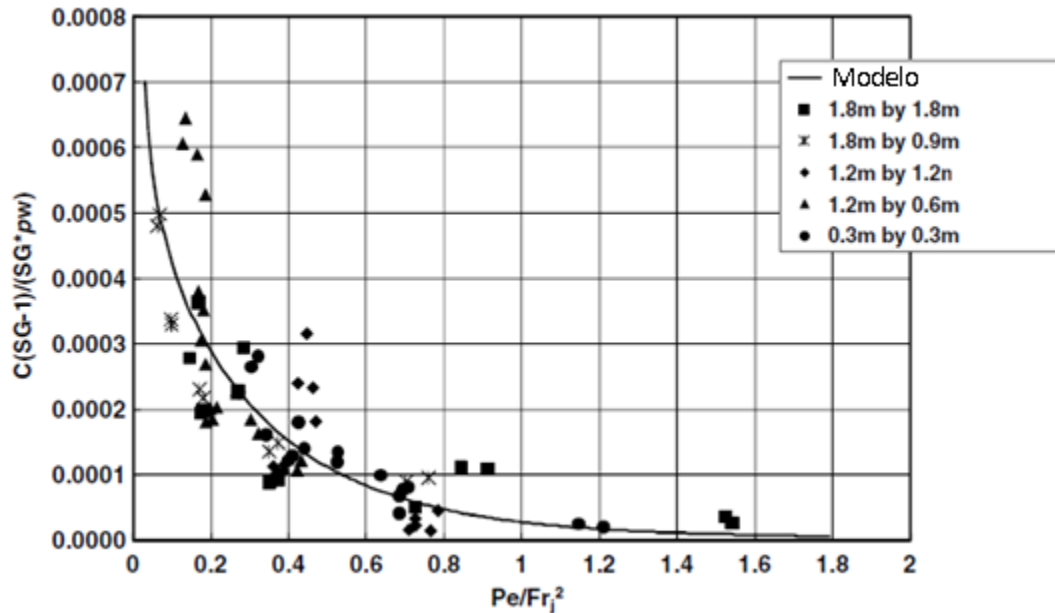


Ilustración 12 Modelo de Resuspensión de sedimentos. Adaptado de Adam K. Howard (2012).

Medidas de velocidad:

Con el fin de realizar un mejor análisis del proceso de resuspensión de sedimentos dentro del sumidero, así como en mecanismo por el cual los sedimentos eran retenidos en el fondo del sumidero, se llevaron a cabo pruebas de velocidad con la ayuda de un velocímetro Doppler. Inicialmente se midió la velocidad en diferentes puntos del sumidero sin la presencia de sedimentos para evaluar el comportamiento normal de las velocidades dentro del dispositivo. En la siguiente ilustración se presentan los vectores de velocidad del sumidero en diferentes puntos. A partir de la ilustración se puede apreciar que luego de que el flujo ingresa al sumidero, se dirige hacia el fondo de este mediante una trayectoria circular, para luego ascender de nuevo.

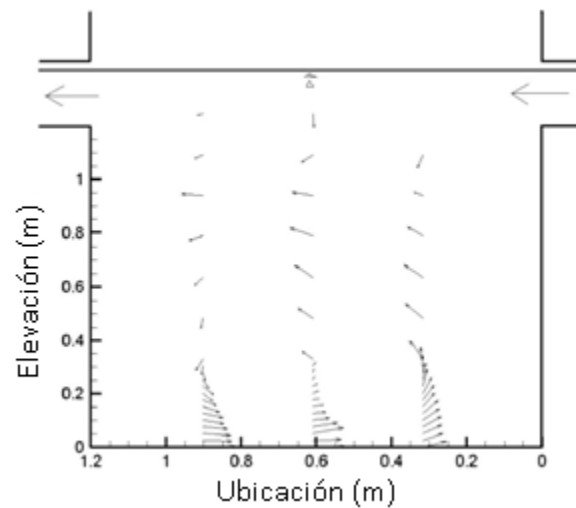


Ilustración 13 Medición de vectores de velocidad. Adaptado de Adam K. Howard (2012).

Al añadir sedimentos a la prueba de velocidad se observa una polarización de los sedimentos en la superficie del agua almacenada por el sumidero. Ya que en la ilustración anterior se evidencian vectores de velocidad en sentido contrario a la dirección de flujo, que producen erosión del material retenido; por consiguiente los sedimentos tienden a acumularse en la zona del sumidero hacia la cual se dirigen los vectores de velocidad del fondo. En la siguiente ilustración se evidencia este fenómeno para el sumidero de 1.2 metros de diámetro. Cabe destacar que en la ilustración la dirección del flujo está en el sentido derecha – izquierda.



Ilustración 14 Fenómeno de erosión en el fondo del sumidero. Tomado de Adam K. Howard (2012).



5.3.1.1.1 Diseño Óptimo de Sumideros

Con base en los estudios analizados a lo largo de esta recopilación bibliográfica, se puede concluir que los sumideros de las cámaras de inspección son efectivos removiendo sedimentos en condiciones de caudal bajo. Cuando se presentan caudales de entrada altos, el porcentaje de remoción de sedimentos disminuye y se presenta el fenómeno de resuspensión de los sedimentos almacenados en el sumidero. Por lo anterior se hace indispensable realizar un análisis muy completo de las características de la escorrentía que se presenta en la zona para hacer una caracterización completa de los caudales de entrada a los sumideros; con dichos valores de entrada, es posible predecir el porcentaje de remoción efectiva con ayuda de los métodos matemáticos descritos considerando bajos y altos caudales de entrada.

En un diseño típico de un sumidero, se establece un porcentaje objetivo de remoción de sedimentos suspendidos para cierto período de diseño. La geometría del sumidero se determina mediante un proceso iterativo con base en los modelos matemáticos desarrollados para la eficiencia de remoción y la resuspensión de sedimentos. El diseño se repite hasta que la geometría satisfaga el objetivo de remoción establecido como parámetro de entrada. En este punto del diseño el itinerario de limpieza pasa a ser un factor decisivo, ya que dependiendo de la frecuencia de limpieza del sumidero, sus dimensiones pueden aumentar o disminuir. Se debe tener en cuenta que a medida que el sumidero almacena más sedimentos, la eficiencia de remoción disminuye y la resuspensión aumenta. Por ello el establecimiento del itinerario y los métodos de limpieza es fundamental durante el proceso de diseño de un sumidero, ya que dada su omisión se compromete la funcionalidad del sumidero y se incumple con las regulaciones de limpieza del agua lluvia según la reglamentación de cada país.

5.3.1.2 Estudio de modelos de predicción del desempeño de las cámaras de inspección estándar

El estudio realizado por Howard (2009) buscaba generar un modelo con base en el número de Péclet para poder comparar la eficiencia de remoción de sedimentos entre el sumidero convencional y otros dispositivos disponibles en el mercado. El estudio consistió en realizar algunas pruebas en el laboratorio con el sumidero convencional, donde se concluyó que los sumideros resultan ser más eficientes cuando se tienen

números de Péclet mayores, que a su vez está relacionado con niveles bajos de caudal afluente en el dispositivo y grandes tamaños de partículas. En este estudio los parámetros también fueron ajustados con un coeficiente de Nash-Sutcliff de 0.97. El coeficiente de Nash-Sutcliff resulta de un modelo probabilístico que mide la capacidad de obtener una relación 1 a 1 entre los datos observados y aquellos simulados con ayuda del modelo¹. En la siguiente ilustración se muestra la relación evidenciada entre el número de Péclet y la eficiencia de remoción de sedimentos.

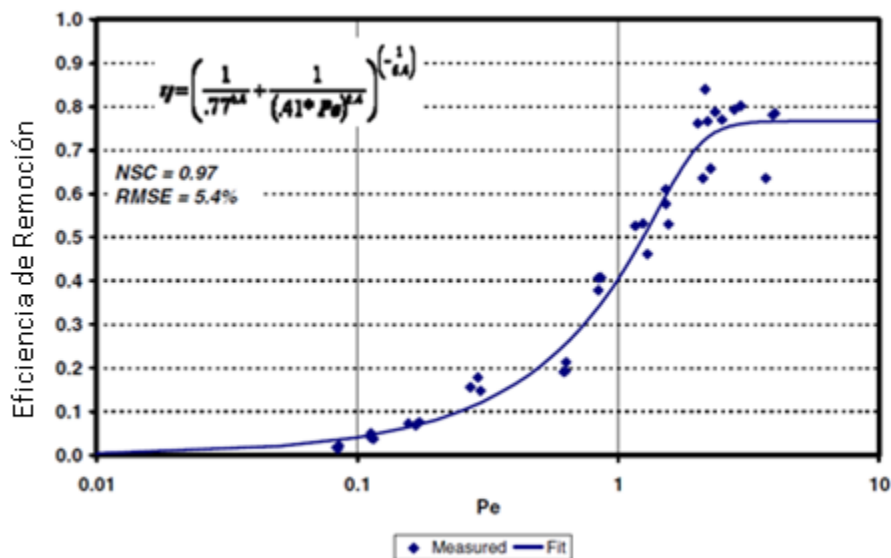


Ilustración 15 Desempeño del sumidero en función del número de Péclet. Adaptado de Adam Howard (2009).

En aras de comparar el desempeño del sumidero convencional con otro dispositivo disponible en el mercado, se hicieron pruebas del laboratorio para un dispositivo denominado Stormceptor, fabricado por la empresa Imbrium. Durante el montaje y las pruebas realizadas en el laboratorio se observó que ambos dispositivos mostraban un comportamiento similar hasta alcanzar un número de Péclet de 2, punto en el cual empezaban a diferir. Las observaciones finales mostraron que el sumidero convencional tenía una eficiencia de remoción de sedimentos del 75%, mientras que la eficiencia de remoción de partículas del Stormceptor estaba alrededor del 97%. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos al medir las eficiencias de ambos dispositivos.

¹ (Burkey, 2007)

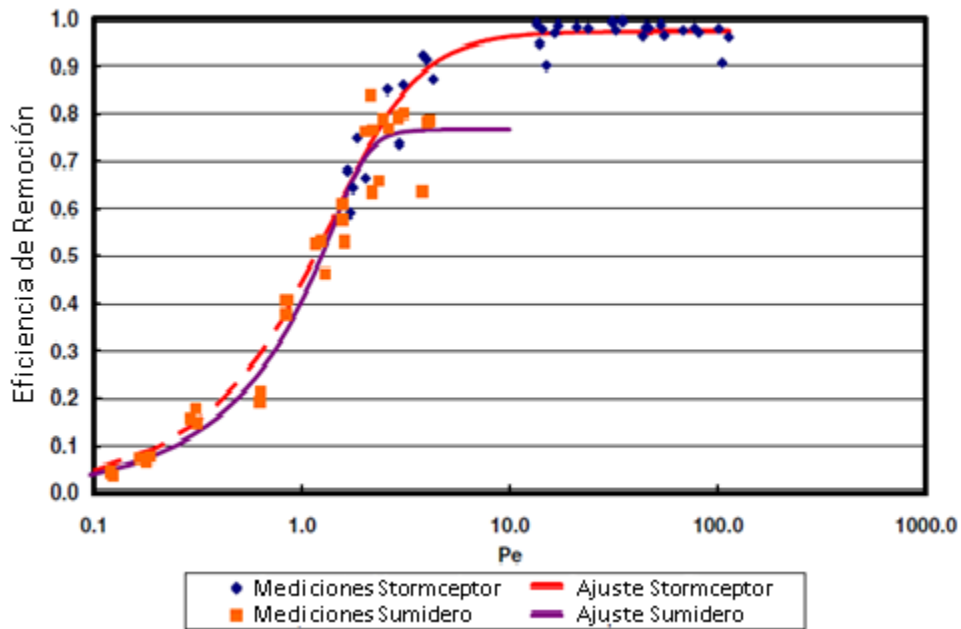


Ilustración 16 Eficiencia de sumidero estándar y Stormceptor. Adaptado de Adam Howard (2009).

La superioridad de eficiencia de remoción de sedimentos del Stormceptor frente al sumidero convencional en estas pruebas de laboratorio, se puede explicar por las dimensiones significativamente mayores del Stormceptor con respecto al sumidero convencional. Por ende se puede concluir que el sumidero convencional es más eficiente que el dispositivo Stormceptor ya que brinda un porcentaje de remoción significativo al tener unas dimensiones mucho menores que el Stormceptor.

Luego de evaluar la efectividad del sumidero convencional como dispositivo de pre-tratamiento de agua lluvia. Aunque se demostró que el dispositivo no puede remover la totalidad de los sedimentos presentes en la escorrentía, logra ser muy efectivo bajo ciertas condiciones como un bajo caudal de entrada. En comparación con otros dispositivos disponibles en el mercado, resulta ser una solución de tratamiento rentable, pues requiere de una menor inversión inicial y su instalación y funcionamiento es más simplista que el de los demás dispositivos. Adicionalmente las pruebas realizadas por Howard (2009) mostraron que la resuspensión de sólidos para el sumidero convencional es mayor para altos caudales, como se puede evidenciar en la tabla, hecho que asegura el almacenamiento de los sumideros capturados en el sumidero, siempre y cuando el volumen almacenado no esté cercano al tope de este. Por último se hace énfasis en la importancia de establecer y cumplir a cabalidad el



itinerario de limpieza y mantenimiento del dispositivo de pre-tratamiento de aguas lluvias, para garantizar su correcto funcionamiento.

Caudal (ft ³ /s)	Masa removida (kg)	Concentración Efluente (mg/L)	Material removido (%)
2.69	6.21	0.38	1.97
2.88	14.93	0.85	4.88
4.17	86.04	3.37	27.38
4.17	79.47	3.12	24.61
5.7	49.28	1.41	14.08
5.41	50.88	1.54	13.93
3.92	36.53	1.52	12.85

Tabla 7 Mediciones de concentración de sedimentos en el caudal efluente. Adaptado de Adam Howard (2009).

5.3.1.3 Estudio de resuspensión de sedimentos y mecanismo de lavado

El proceso de lavado en los sumideros de las cámaras de inspección da lugar a la resuspensión de los sólidos atrapados en este, y por ende un aumento en la concentración de sedimentos presentes en el caudal efluente del dispositivo. En el estudio de Humberto Ávila (2008) se encontró que una de las causas del fenómeno de lavado de los sedimentos en los sumideros se originaba cuando durante un evento de lluvia, se formaba una capa de sedimentos sobre los sedimentos atrapados en eventos de lluvia pasados, y sobre la nueva capa se formaba una capa de agua. Cuando el chorro de agua producido por el caudal afluente impactaba contra la capa de agua, generaba esfuerzo que resuspendían las partículas almacenadas en el sumidero, siendo las partículas finas aquellas que salían del sistema en el caudal efluente y las partículas gruesas formando la nueva capa superficial de los sedimentos, junto con las partículas sedimentadas presentes en el agua lluvia que estaba ingresando al sistema.

Normalmente los fabricantes de dispositivos de tratamiento de agua lluvia representan la eficiencia de sus dispositivos mediante el porcentaje de remoción de sedimento de la escorrentía. Sin embargo los dispositivos también deben garantizar que aquellos sedimentos capturados en condiciones de bajo caudal no sean removidos en un proceso de lavado cuando se intensifica el fenómeno de lluvia y por ende el caudal afluente a los dispositivos. La habilidad de los dispositivos sedimentadores de remover basuras, desechos y partículas contaminantes del agua lluvia, debe complementarse con su habilidad de retener el material capturado hasta que se lleve a cabo el procedimiento de limpieza.

El procedimiento para la medición del fenómeno de lavado en los sumideros llevado a cabo en el estudio de Ávila (2008) se basa en la obtención de la concentración de sedimentos en el caudal efluente del dispositivo. Se identificaron tres variables que afectaban el fenómeno de lavado en el sumidero analizado en el laboratorio.

- **Concentración de sedimentos en el caudal afluente:** Se encontró que una menor concentración, es decir un agua más *limpia* tiene mayor incidencia en el fenómeno de lavado de los sedimentos, ya que está asociada con una mayor capacidad de carga de sedimentos.
- **Altura de la capa de sedimentos:** Los sedimentos almacenados en el sumidero están expuestos a una mayor tasa de lavado cuando se encuentran más cercanos a la tubería de salida del sistema.
- **Tamaño de partículas pre-sedimentadas:** Si las partículas que forman la superficie de la capa de sedimentos almacenados de un evento anterior está compuesta por partículas relativamente grandes, disminuye la probabilidad de presentarse el proceso de lavado en el sumidero, o por lo menos que se presente en un gran porcentaje de los sedimentos almacenados. Sin embargo esta variable es dependiente de la altura de la capa de sedimentos.
- **Altura de la capa de agua sobre la capa de sedimentos:** Se evidenció que un aumento en el espesor de la capa de agua sobre la capa de sedimentos formada durante el evento de lluvia reducía sustancialmente la masa de sedimentos expuesta al fenómeno de lavado. Lo anterior debido a que la energía contenida en el caudal afluente se disipaba en la capa superficial de agua, sin generar grandes esfuerzos en la capa de sedimentos. En la siguiente ilustración se evidencia la reducción significativa de la masa de sedimentos lavada a medida que aumenta el espesor de la capa de agua sobre los sedimentos.

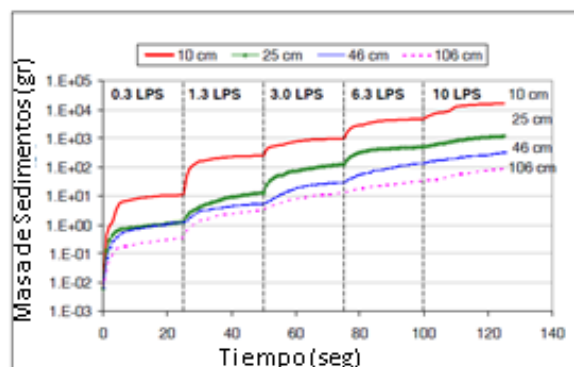


Ilustración 17 Masa de sedimentos removida. Adaptado de Ávila (2011).

5.3.2 Ventajas y Desventajas de las Cámaras de Inspección Estándar.

En la siguiente tabla se resumen las principales ventajas y desventajas de los sumideros convencionales, con base en los estudios citados acerca del análisis del desempeño hidráulico de estos dispositivos. También fueron tenidos en cuenta aspectos de mantenimiento.

Ventajas	Desventajas
Costos iniciales y de mantenimiento bajos.	Cuando incluye dispositivos adicionales como filtros, requiere mayor frecuencia de mantenimiento, y por ende genera un mayor costo de operación.
Requiere poco espacio para ser instalado.	Filtros no son efectivos si se encuentran taponados o si el caudal de entrada excede el caudal de diseño.
Filtros pueden absorber hasta 20 veces su tamaño.	No es eficiente removiendo contaminantes disueltos.
Efectivo en remover líquidos en fase no acuosa (LNAPL) como combustibles de hidrocarburos de petróleo y aceites lubricantes.	Filtros para retener partículas diferentes a los hidrocarburos no son tan fáciles de conseguir.
Efectivo en la remoción de líquidos densos de fase no acuosa (DNAPL) como solventes de hidrocarburo.	Cuando los sumideros son de baja capacidad requieren de un mantenimiento constante.
Efectivo en la remoción de sólidos, siempre y cuando no se exceda la capacidad de almacenamiento del sumidero.	Se requiere personal y equipo especializado para llevar a cabo el mantenimiento.
Se pueden complementar con otros mecanismos de tratamiento de aguas lluvias para realizar una remoción más efectiva de los contaminantes del agua lluvia.	Cuando el sumidero se llena no es posible realizar algún tipo de tratamiento al agua lluvia.
Son el tipo de estructura de pre-tratamiento más utilizada debido a su bajo costo en comparación con otros dispositivos.	Presentan problemas en la retención de los sedimentos capturados, dando origen a los fenómenos de lavado.

Tabla 8 Ventajas y desventajas de las cámaras de inspección estándar.

5.4 Vórtice Hidrodinámico

El vórtice hidrodinámico fue diseñado con el fin de generar un mayor recorrido dentro del dispositivo al flujo de agua entrante. La idea básica detrás de este concepto radica en que habrá un mayor asentamiento en la cámara de almacenamiento si el recorrido del flujo de agua es mayor que el que realiza en un dispositivo convencional como lo es una cámara de inspección. El aumento del tiempo de residencia del flujo en el dispositivo de tratamiento de agua lluvia se logra gracias al mecanismo de vórtice que incluyen estos tipo de dispositivos. Adicionalmente los dispositivos tipo vórtice poseen ciertos componentes que segregan los sedimentos capturados en una cámara de almacenamiento. Las cámaras de almacenamiento o sumideros garantizan baja velocidad de flujo ascendente para prevenir la resuspensión de los sedimentos almacenados, y por ende la disminución de la concentración en el caudal de salida de los vórtices hidrodinámicos (D.A. Phipps, 2008). A continuación se presenta un esquema del vórtice hidrodinámico *Downstream Defender* comercializado por la empresa Hydro International.

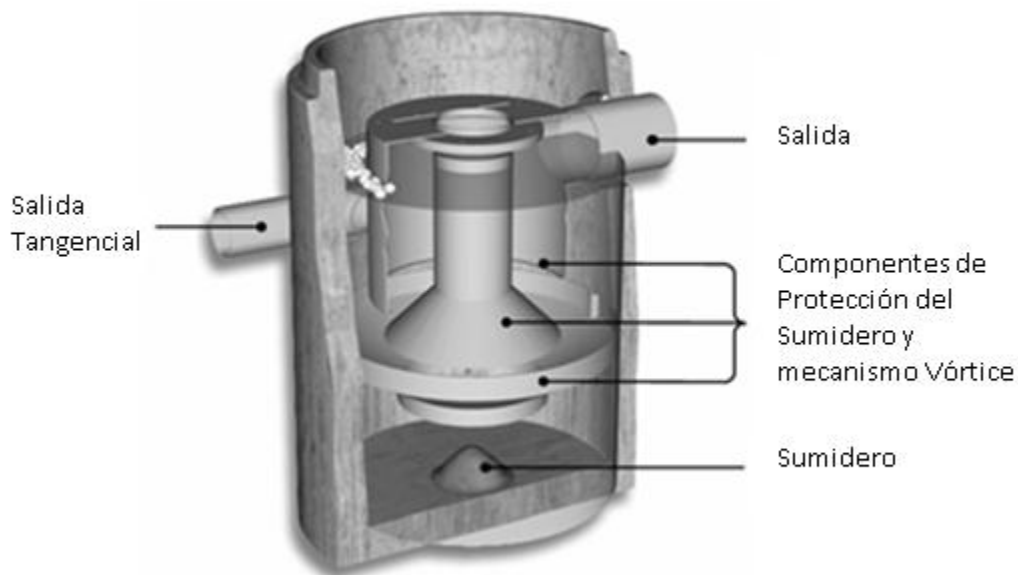


Ilustración 18 Componentes Downstream Defender. Adaptado de Phipps (2008).

Los dispositivos hidrodinámicos, adicionalmente pueden realizar el proceso de sedimentación por acción de la infiltración indirecta. Dentro del rango de sedimentos



que retienen se encuentran todo tipo de partículas sedimentables, partículas flotables como aceites (GeoSyntec Consultants. Low Impact Development Center, 2006). En su diseño inicial no fueron concebidos como dispositivos de remoción de partículas finas y constituyentes disueltos tales como metales y nutrientes. Sin embargo los fabricantes de algunos de estos dispositivos hidrodinámicos han creado algunos accesorios adicionales que se pueden instalar dentro del dispositivo de vórtice para poder remover contaminantes disueltos por medio de filtración.

Los vórtices hidrodinámicos son diseñados para remover los sedimentos asociados con un caudal de diseño. Cuando el caudal es mayor al de diseño, la eficiencia del dispositivo disminuye considerablemente. El caudal de diseño es calculado con base en un análisis hidrográfico de la zona de captación del dispositivo. Otro parámetro influyente en el diseño del dispositivo es el máximo flujo que soporta el dispositivo.

Los vórtices hidrodinámicos son dispositivos de separación eficientes que han demostrado ser eficientes en el tratamiento de agua lluvia, que también se han utilizado en el sistema de drenaje para realizar tratamiento a las aguas residuales, y en sistemas de atenuación de tormentas (Ed Loffill, 2008).

Si el vórtice hidrodinámico es utilizado en un sistema en línea, debe estar proveído de un mecanismo de By-Pass que le permita aliviar el exceso de flujo ante un evento que exceda el caudal de diseño del vórtice. Por el contrario si el dispositivo se encuentra en un sistema fuera de línea, no es necesario el mecanismo de By-Pass, ya que en los sistemas fuera de línea los dispositivos no son diseñados estar expuestos a caudales superiores al de diseño.

5.4.1 Clasificación

Los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia se clasifican según la complejidad de sus componentes internos en dos categorías (David A. Phipps, 2004):

- **Separadores de Vórtice Simple:** Este tipo de dispositivo utiliza la acción de la fuerza gravitacional combinada con la implementación de un sistema rotacional del flujo. El efecto rotacional incrementa el tiempo de residencia de los sedimentos en el dispositivo y garantiza el proceso de asentamiento de los mismos.
- **Separadores de Vórtice Avanzados:** Funcionan bajo el mismo principio que los separadores de vórtice simple. La diferencia radica en que los separadores



avanzados incluyen ciertos componentes que aumentan la eficiencia del dispositivo, al proveer zonas de aisladas de almacenamiento de los contaminantes retenidos. Esta categoría de los separadores de vórtice también se conoce como Separadores de Vórtice Hidrodinámico.

5.4.2 Remoción de Contaminantes

El dispositivo de vórtice hidrodinámico tiene varias etapas de retención de sedimentos y contaminantes presentes en el agua lluvia. En primer lugar retiene y separa partículas sedimentables y flotables por medio de procesos de separación por densidad y tamaño de partículas. La sedimentación de partículas se realiza por efectos de la fuerza gravitacional y las partículas, y sustancias flotables emergen a la superficie por efecto de la diferencia de densidades con el agua que se encuentra dentro del dispositivo de pre-tratamiento.

El efecto remolino producido por el vórtice genera un aumento considerable de la velocidad del flujo que combinado con la trayectoria circular genera que los sedimentos y partículas presentes en la escorrentía se concentren en el centro del vórtice, mientras que el agua *limpia* se dirige hacia las paredes del dispositivo. Posteriormente el agua que se encuentra en las paredes del dispositivo sale del sistema pasando generalmente por unos deflectores que se encargan de retener los sedimentos y sustancias flotables. Finalmente el agua lluvia sale del sistema libre de partículas sedimentables y partículas flotantes.

La diferencia entre los vórtices hidrodinámicos y otros dispositivos de tratamiento de agua lluvia radica en su habilidad de retener sólidos y partículas flotantes en condiciones de alto caudal afluente, puesto que estos dispositivos limitan al máximo la resuspensión de los sedimentos en su cámara de almacenamiento. Al igual que otros dispositivos como los sumideros convencionales, el vórtice hidrodinámico presenta un porcentaje de efectividad de remoción de sedimentos superior al 75 %, al igual que basuras y escombros presentes en el agua lluvia con tamaño de partículas superior a 75 μm . Como se expresó anteriormente, para remover material fino los dispositivos hidrodinámicos deben complementarse con otras estructuras o incorporar dispositivos como filtros para capturar las partículas finas y los constituyentes disueltos.



En la siguiente tabla se presentan los resultados de la concentración de algunos agentes contaminantes, medida en el caudal efluente de dispositivos hidrodinámicos. Dichos valores fueron publicados en conjunto por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Asociación de Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) en el año 2003.

Agente Contaminante	Concentración (mg/L)
Nitrógeno	0.8
Fósforo	0.14
Amoníaco	0.25
Nitrato de Nitrógeno	0.94
Cobre	12
Zinc	70
Plomo	6

Tabla 9 Concentración de agentes contaminantes en el caudal efluente. Adaptado de EPA (2003).

5.4.3 Mantenimiento de los Vórtices Hidrodinámicos

Los fabricantes de los vórtices hidrodinámicos recomiendan inspecciones y sesiones de mantenimiento frecuentes de los dispositivos. El itinerario de mantenimiento de los dispositivos se determina de acuerdo con las condiciones del área de influencia del dispositivo de tratamiento de agua lluvia como el la cantidad de sedimentos generados en la zona. El itinerario de mantenimiento también se determina con base en las inspecciones periódicas que se realizan al dispositivo.

La limpieza más efectiva de los vórtices hidrodinámicos se lleva a cabo con un camión Váctor, el cual succiona los sedimentos almacenados en el dispositivo. Generalmente la absorción de aceites e hidrocarburos se realiza con almohadillas absorbentes. Algunos dispositivos hidrodinámicos poseen partes removibles que se pueden retirar y limpiar dentro de la sesión de mantenimiento.

Normalmente los dispositivos hidrodinámicos solo requieren un área superficial equivalente al área de la tapa de acceso para realizar el mantenimiento. El área subsuperficial requerida es equivalente a las dimensiones del dispositivo especificadas por el fabricante. Dado que se diseñan para ser utilizados en espacios restringidos, normalmente el área ocupada por los vórtices no es significativa.



5.4.4 Costos de los dispositivos hidrodinámicos

Los costos de los dispositivos varían dependiendo del nivel de especialización en cuanto a remoción de contaminantes se requiera, la capacidad de almacenamiento de sedimentos y el caudal de diseño. Típicamente su precio varía entre 10 mil y 60 mil dólares, dependiendo de las especificaciones del cliente, como se mencionó anteriormente (GeoSyntec Consultants. Low Impact Development Center, 2006).

5.4.5 Estudio de la eficiencia del Vórtice Hidrodinámico

Estudios sobre la eficiencia de los vórtices han considerado otras variables incluyendo el tiempo de residencia de los sedimentos capturados dentro de los dispositivos. Estudios como el realizado por Phipps (2008) muestran la importancia de proveer los dispositivos con una zona de almacenamiento de sedimentos o sumideros.

La determinación de la eficiencia de remoción de contaminantes en un dispositivo se obtiene al medir la concentración de las partículas analizadas en el caudal de entrada y el caudal de salida, y posteriormente comparar las mediciones. Típicamente dichas mediciones se realizan bajo condiciones de caudal constante y tasa de carga de sedimentos constante. A continuación se muestra una fórmula utilizada para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes (ERC) del agua lluvia.

$$ERC = \frac{\sum_{t(0)}^{t(n)} (ERC \text{ instantánea}_{t(n)} \times \text{Afluencia de contaminantes}_{t(n)})}{\sum_{t(0)}^{t(n)} \text{Afluencia de contaminantes}}$$

Ecuación 3 Eficiencia de Remoción de Contaminantes. Adaptado de Phipps (2008).

La medida de eficiencia de remoción instantánea de contaminantes se determina como una medida de eficiencia bajo un caudal afluente constante en un tiempo determinado. La efectividad de remoción total del dispositivo es representada por todos los valores de eficiencia instantáneos medidos durante el tiempo del análisis.

Con base en la ecuación de eficiencia se puede aseverar el argumento de que la eficiencia de remoción de contaminantes en un dispositivo de pre-tratamiento de agua lluvia depende de caudal afluente y el tiempo. El diseño óptimo de un dispositivo tipo vórtice, al igual que el de un sumidero convencional, debe considerar los hidrogramas



de la zona de influencia del dispositivo, además del tipo de sedimentos y contaminantes generados por causa de la actividad del hombre. Adicionalmente se deben tener en cuenta fenómenos como el *first flush*, que se conoce como el primer lavado de la superficie hacia el sistema de drenaje. Típicamente durante el evento del primer lavado la concentración de sedimentos y contaminantes es mucho mayor, por lo cual se espera que el desempeño de los dispositivos de tratamiento de agua lluvia ante este evento sea el mejor posible.

El hecho de que los vórtices hidrodinámicos tengan una cámara diseñada para almacenar los sedimentos retenidos, los vuelve unos dispositivos muy efectivos, ya que a pesar de formar parte del conjunto vórtice hidrodinámico su comportamiento hidráulico es independiente al del resto del dispositivo de aguas lluvias. El estudio de Phipps (2008) demostró que el tiempo de residencia del flujo en el sumidero era mucho mayor al del resto del dispositivo; por ende es posible concluir que este dispositivo garantiza la sedimentación de las partículas presentes en el agua lluvia en el sumidero y no da un poco margen al fenómeno de resuspensión de sedimentos. En la cámara de almacenamiento se manejan bajas velocidades, al ser un sistema aislado, hecho que brinda una protección adicional a los sedimentos almacenados cuando el caudal afluente llega a su máximo durante el pico de la tormenta. A diferencia de lo evidenciado en el sumidero convencional, el aislamiento del sumidero garantiza la retención de los sedimentos capturados aun cuando el caudal sobrepase el caudal de diseño del dispositivo.

El diseño de los dispositivos de pre-tratamiento de aguas lluvias se ha centrado en dimensionar los dispositivos con base en el caudal de diseño determinado. Sin embargo en este estudio se ha demostrado que además de tener en cuenta el caudal de diseño, es indispensable evaluar la capacidad del sumidero para retener los sedimentos capturados y evitar la resuspensión de los mismos.

La remoción y retención de contaminantes del agua lluvia no solamente es posible mediante la implementación de dispositivos sedimentadores de pre-tratamiento como sumideros y vórtices hidrodinámicos. Existen otras estructuras que hacen parte de las prácticas de manejo sostenible de agua lluvia que hacen tratamiento y retención de los contaminantes en el agua lluvia. Debido a que el objetivo de este documento es realizar una recopilación sobre los métodos de inspección y mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento, haciendo énfasis en los sumideros convencionales y en los vórtices hidrodinámicos, sólo se analizarán dos mecanismos adicionales de tratamiento de contaminantes en la escorrentía. Se analizarán los filtros de arena y un

geosintético denominado geotextil, teniendo en cuenta el auge que han tenido los últimos debido a sus múltiples aplicaciones para estructuras de drenaje.

5.5 Filtros de arena

Los filtros de arena son estructuras de retención y filtración utilizadas con dos fines principalmente: para realizar filtración hacia el suelo natural, con el fin de recargar acuíferos; el segundo para filtrar el agua hacia el sistema de drenaje urbano. Típicamente están compuestos por una serie de cámaras encargadas de realizar procesos diferentes sobre el agua lluvia a tratar. En la siguiente ilustración se muestra un esquema típico de un filtro de arena. En la primera cámara se realiza un proceso de sedimentación de las partículas gruesas, es decir con un tamaño superior a 75 micrómetros, y se retienen las basuras y desechos que arrastra la escorrentía. La segunda cámara, denominada cámara de filtración, está compuesta por una capa de arena que se encarga de retener las partículas finas asociadas con contaminantes como metales y residuos de hidrocarburos. Finalmente se pone una capa compuesta por un material granular como grava que tiene la función de descargar el agua filtrada, ya sea hacia el suelo circundante o a alguna estructura de drenaje (EPA, 1999).

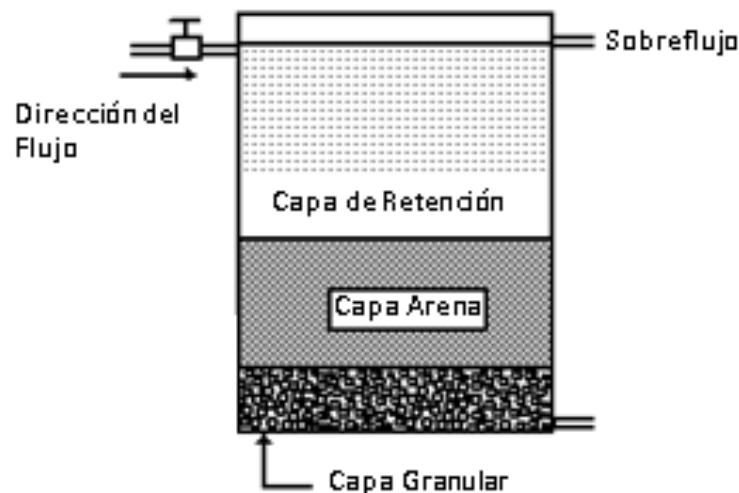


Ilustración 19 Esquema típico de un filtro de Arena. Adaptado de EPA (1999).

Uno de las principales ventajas de los filtros de arena con respecto a los sumideros convencionales, es que garantiza la retención de un gran porcentaje de partículas

contaminantes en el agua lluvia, al brindar tres tipos de filtros que realizan un tratamiento para una amplia gama de tamaños de partículas. Los filtros de arena al igual que los sumideros convencionales y los vórtices hidrodinámicos fueron diseñados con el fin de poder ser instalados en lugares con restricciones espaciales como en las ciudades.

En la recopilación de información acerca de los filtros de arena realizado por el Departamento de Protección Ambiental de Estados Unidos (1999) se identifican tres clases principales de filtros de arena: Filtro de arena de Austin, Filtro de arena de Washington D.C. y Filtro de arena de Delaware. La diferencia entre los tres tipos de filtros radica la profundidad de instalación, la capacidad hidráulica y la capacidad de almacenamiento de sedimentos, entre otros.

Los filtros son utilizados en lugares donde se requiere la remoción de agentes contaminantes que afectan los ecosistemas acuáticos y que de llegarse a infiltrar en el suelo, pueden causar daños irremediables en los acuíferos subterráneos. A continuación se presentan los valores de remoción de algunos de los contaminantes más comunes encontrados en los filtros de arena (Galli, 1990).

Contaminante	Porcentaje de Remoción
Total de Sólidos Suspendidos (TSS)	70%
Demanda de Oxígeno Bioquímico (BOD)	70%
Carbón Orgánico Total (TOC)	48%
Nitrógeno	21%
Fósforo	33%
Plomo	45%
Zinc	45%
Bacteria fecal Coliforme	76%

Tabla 10 Eficiencia de remoción de contaminantes en Filtros de arena. Adaptado de Galli (1990).

5.5.1 Mantenimiento de los Filtros de Arena

El mantenimiento de los filtros de arena consiste en remover y reemplazar las capas obstruidas por la retención y almacenamiento de sedimentos y partículas finas. Principalmente se reemplazan los filtros de arena, ya que cuando se colmata de



partículas finas se disminuye la permeabilidad del filtro. Se debe realizar el mismo procedimiento de remover y reemplazar cuando las capas de sedimentación y de descarga se colmatan. También se deben remover las partículas gruesas y los desechos retenidos en la capa de sedimentación continuamente, ya que pueden obstruir el flujo del agua lluvia hacia el filtro, disminuyendo su eficiencia y dando origen a problemas superficiales como retención de aguas.

En cuanto a las inspecciones en el filtro de arena, al igual que en los sumideros se recomienda realizarlas periódicamente durante el primer año, posterior a la instalación, para determinar la frecuencia de mantenimiento. Se hace indispensable inspeccionar el filtro luego de eventos de lluvia. Otra de las ventajas que presentan los filtros de arena con respecto a los demás dispositivos de pre-tratamiento de aguas lluvias es que no requieren de disposición especial de los desechos almacenados. Según Schueler (1992) las capas removidas de los filtros de arena no requieren algún tipo de tratamiento especial, al no representar una fuente de toxicidad para el ambiente.

5.5.2 Ventajas y Desventajas de los Filtros de Arena

En la siguiente tabla se resumen las principales ventajas y desventajas de este tipo de estructura de pre-tratamiento de filtración de agua lluvia.

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Baja capacidad de remover nutrientes.
Eficientes en la remoción de partículas finas.	Requieren mantenimiento de alta periodicidad.
Requieren poco espacio para ser instalados.	No controlan en flujo de agua que pasa a través de ellos.
Residuos generados no son tóxicos para el medio ambiente	Pueden generar erosión aguas abajo en los cuerpos de agua receptores.

Tabla 11 Ventajas y desventajas de los filtros de arena. Adaptado de EPA (1999).

5.6 Geotextiles

Los geotextiles son un material textil polimérico utilizado en obras de ingeniería civil. Presentan buenas propiedades hidráulicas y son resistentes a la tensión y al



punzonamiento. Se agrupan dependiendo de su origen, natural o sintético; y dependiendo de su modo de fabricación: tejidos y no tejidos (Pavco, 2009).

Los geotextiles son analizados debido a que han demostrado, al igual que los filtros de arena, efectivos para capturar partículas finas presentes en el agua lluvia sin perder sus propiedades hidráulicas como la permeabilidad. Al compararlo con el filtro de arena, el uso de geotextiles resulta ser una solución más efectiva ya que requiere menos espacio para ser instalado y al ser mucho menos pesados (Carmen A. Franks, 2012).

5.6.1 Geotextiles Tejidos

Son aquellos formados en una máquina de tejer que entrecruza cintas. La máquina puede realizar dos tipos de tejidos, tricotados o de calada. Las cintas están hechas de polipropileno. El tejido en forma de calada consiste en situar las cintas en sentido longitudinal y transversal. Ambos tipos de fabricación de los geotextiles tejidos presentan una resistencia a la tensión en ambos sentidos, biaxial, dado su proceso de tejido. Dicha conformación de la estructura del geotextil, acompañada de las propiedades mecánicas del polipropileno, lo hace un material resistente a la tensión y a las deformaciones. Es posible obtener geotextiles de mayor resistencia al variar el material de fabricación de las cintas. Gracias a las características mecánicas que presentan los geotextiles tejidos, son ampliamente utilizados en obras de ingeniería civil tales como cimentaciones y refuerzo estructural en general (Medina, 2010).

5.6.2 Geotextiles No Tejidos

A diferencia de los geotextiles tejidos, los no tejidos se forman por entrecruzamiento aleatorio de las fibras de polipropileno. Aunque también presentan resistencia a la tensión, se destacan por sus propiedades de filtración y drenaje. Las fibras utilizadas para la fabricación de este tipo de geotextil no tejido son cortas, que conforman una estructura laminar. La configuración de la estructura se hace dependiendo del fin último del geotextil. Según el proceso de ligado de las cintas, se pueden encontrar las siguientes tipos de geotextil en el mercado (Medina, 2010).

- Geotextiles No Tejidos ligados por punzonamiento de aguja.
- Geotextiles No Tejidos ligados por calor.



- Geotextiles No Tejidos ligados por procesos químicos.

Los geotextiles no tejidos también sirven de protección a estructuras de drenaje sostenible como las geoceldas, gracias a que tienen una alta capacidad de elongación y de adaptabilidad a superficies no uniformes.

Los geotextiles no tejidos son aptos para ser utilizados para procesos de drenaje ya que gracias a su proceso de fabricación se han reportado altos valores de permeabilidad así como de porosidad (superior al 80%). Los altos valores evidenciados de permeabilidad, hacen de los geotextiles no tejidos aptos para ser utilizados como filtros, ya que retienen partículas de diferentes tamaños, sin perturbar el flujo del agua (Pavco, 2009).

Al ser utilizados como estructuras de complemento y protección a otras estructuras de drenaje brindan ciertos beneficios como incrementar la vida útil al protegerlas de agentes externos como movimientos de tierras.

La capacidad de drenaje de los geotextiles depende de propiedades del mismo como la porosidad y permeabilidad, descritas anteriormente, y de las propiedades de drenaje del suelo circundante. Un drenaje óptimo se logra cuando no se presentan fenómenos de resuspensión de sedimentos que comprométan las características hidráulicas del flujo que pasa a través del geotextil.

La función de filtración que prestan los geotextiles no tejidos depende de una propiedad producto de su proceso de producción denominada tamaño de abertura aparente. El tamaño de la abertura aparente es inversamente proporcional a la capacidad de retención de sedimentos del geotextil, lo que quiere decir que con un menor tamaño de abertura aparente, se retendrá una mayor distribución de partículas y por ende, en términos de tratamiento del agua lluvia, presentará una mayor eficiencia de remoción de contaminantes asociados a partículas finas. Sin embargo un menor tamaño de abertura aparente también está relacionado con una mayor velocidad de colmatación, por lo cual se debe tener especial cuidado en el proceso de diseño al escoger el tipo de geotextil a utilizar en la obra de drenaje o infiltración (Medina, 2010). En las siguientes secciones se comentarán algunos estudios que evaluaron el comportamiento de los geotextiles no tejidos.

La escogencia de un geotextil para un sistema de drenaje o de filtración debe hacerse bajo el supuesto que retenga cierta cantidad y tamaño de partículas, sin perder su capacidad de drenaje en el proceso. Es posible escoger un geotextil no tejido con un



tamaño de abertura aparente pequeño, que garantiza la retención de un gran rango de tamaños de partículas, pero compromete la vida útil del sintético y aumenta su velocidad de colmatación. Por el contrario se puede seleccionar un geotextil que presente un tamaño de abertura aparente un poco más grande, que retenga solo cierto tipo de partículas, asegurando una mayor vida útil, pero aumentando la cantidad de sólidos suspendidos en el caudal efluente (Carmen A. Franks, 2012).

5.6.3 Ventajas y Desventajas de los Geotextiles

En la siguiente tabla se presentan las principales ventajas y desventajas de los geotextiles no tejidos utilizados en las obras de drenaje.

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Al ser instalados bajo tierra su mantenimiento resulta complicado.
Eficientes en la remoción de partículas finas y gruesas.	Una vez instalado no es posible inspeccionarlo.
Requieren poco espacio para ser instalados, al ser una capa de textil.	Pueden presentar colmatación prematura durante su instalación.
No perjudica las características hidráulicas del flujo que pasa a través de su plano.	

Tabla 12 Ventajas y desventajas de los geotextiles no tejidos.

5.6.4 Colmatación en los geotextiles

Existen dos mecanismos de posicionamiento de las partículas sobre la estructura del geotextil (López, 2005): Obstrucción y colmatación.

- **Obstrucción:** Proceso mediante el cual las partículas quedan atrapadas en las aberturas del geotextil, impidiendo el flujo normal del agua. Este fenómeno es más común en los geotextiles tejidos que en los no tejidos. En la siguiente ilustración se muestra un esquema de dicho fenómeno.

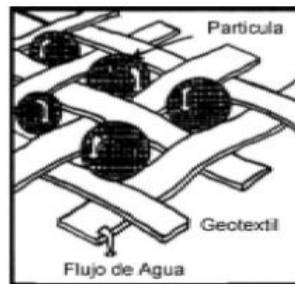


Ilustración 20 Obstrucción de los geotextiles. Tomada de López (2005).

- **Colmatación:** Este fenómeno se presenta cuando las partículas finas ingresan dentro de la estructura del geotextil. Se dice que el geotextil se encuentra más colmatado a medida que un mayor número de partículas finas ingresan al geotextil. En la siguiente ilustración se muestra un esquema de la colmatación de los geotextiles.

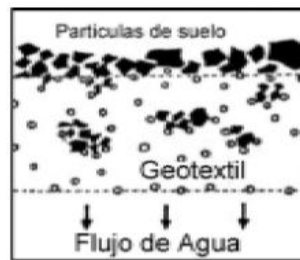


Ilustración 21 Colmatación de los geotextiles. Tomado de López (2005).

El principal problema de los geotextiles radica en el hecho de que su vida útil termina cuando se colmatan, lo que conlleva a generar altos costos para reemplazarlo, teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos se instala subterráneamente. Determinar la vida útil o el tiempo de colmatación de un geotextil no es una tarea fácil ya que depende de varios parámetros que se escapan al alcance de los diseñadores y fabricantes como lo son las propiedades del suelo circundante en el sitio de instalación del geotextil. Adicionalmente los esfuerzos de tensión generados por el suelo sobre el geotextil pueden comprometer sus propiedades hidráulicas (Gardoni, 2000).

El proceso de infiltración y retención del geotextil también presenta ciertos riesgos. La captura de sedimentos por parte de geotextil se da cuando un flujo pasa a través de este, y las partículas de tamaño superior al de la abertura aparente del geotextil quedan atrapadas en las fibras del mismo. Otro problema que presentan los geotextiles se evidencia en el proceso de compactación del suelo luego de la instalación. Para poder llevar a cabo la instalación de un geotextil se requiere hacer

una excavación para situarlo y posteriormente rellenar y compactar el suelo removido. Al volver a situar el suelo sobre el geotextil, la capa de suelo que se encuentra encima del geotextil está sometida a bajos esfuerzos normales. Cuando el suelo es compactado, las partículas suficientemente pequeñas pueden ingresar a la estructura del geotextil, generando una colmatación inicial que compromete su desempeño, afectando el proceso de filtración y de permeabilidad. En la siguiente ilustración se muestra el fenómeno descrito anteriormente.

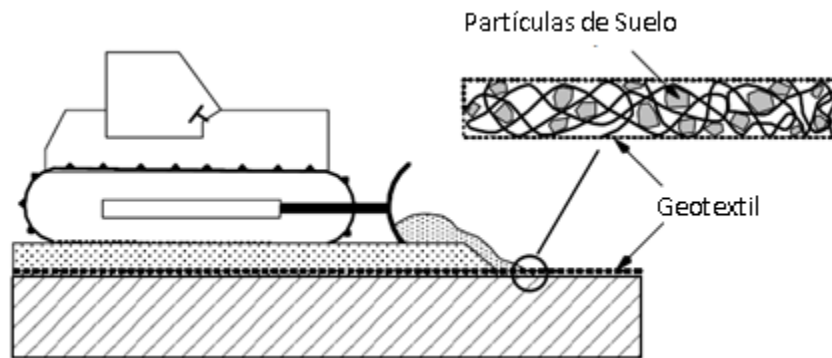


Ilustración 22 colmatación prematura del geotextil. Adaptado de Gardoni (2000).

5.6.4.1 Ensayo de Relación de Gradiente

Ensayo desarrollado con el fin de medir la disminución de permeabilidad de los geotextiles por efecto de la colmatación a raíz del ingreso de partículas finas a su estructura. La metodología del ensayo de relación de gradientes incluye la utilización de un permeámetro que mide la permeabilidad del conjunto suelo-geotextil durante el análisis. La metodología del ensayo consta de hacer pasar flujos con diferentes gradientes a través del sistema suelo-geotextil, muestreando las variaciones de cabeza hidráulica y de la permeabilidad (López, 2005).

5.6.5 Desempeño de los geotextiles

Estudios como el de Chen (2008) han estudiado el comportamiento de los geotextiles bajo condiciones de un flujo cíclico, que simula el efecto que tienen las mareas sobre los geotextiles que recubren y protegen los terraplenes en las estructuras civiles en las costas marítimas. El objetivo del estudio era evaluar el comportamiento del geotextil



ante un flujo cíclico de diferentes intensidades en términos de la filtración y de la capacidad de retener las partículas capturadas. La carga de sedimentos utilizada durante los análisis estaba compuesta principalmente por arenas, limos y arcillas.

Dentro de los resultados de los ensayos llevados en el laboratorio se observó que el comportamiento general del geotextil se mantuvo estable durante los períodos de largos ciclos de flujo. Se observó que la presión intersticial, es decir, la presión generada en los poros del geotextil aumentaba a medida que el número de ciclos de flujo aplicados al sistema suelo-geotextil disminuía. Con respecto a la presión generada en los poros, se evidenció que aumentaba cuando el número de partículas finas retenidas por el geotextil también lo hacía.

Los resultados del estudio mostraron que la permeabilidad del geotextil bajo condiciones de flujo cíclico de baja periodicidad era mayor a la evidenciada por otros investigadores cuando se exponía el geotextil a un flujo unidireccional, dada la mayor presión intersticial generada por el bajo periodo de los ciclos de flujo.

Los experimentos llevados a cabo con arenas mostraron que bajo diferentes presiones de poros, es decir, bajos diferentes ciclos analizados en el laboratorio, el comportamiento del geotextil fue estable sin mostrar cambios abruptos en las medidas de variación de presión en los poros. De igual manera los valores de permeabilidad y retención de material fueron satisfactorios para el geotextil, pues no se evidenció resuspensión de las arenas capturadas ni disminución en la capacidad hidráulica del geosintético.

Las mediciones con arenas limosas bajo condiciones de ciclos bajos mostraron que los limos tendían a colmatar el geotextil lo que indicaba un alto porcentaje de retención de estas partículas.

5.6.5.1 Permeabilidad de los Geotextiles

Desde el surgimiento de los geotextiles, los investigadores han tratado de encontrar modelos que describan su comportamiento hidráulico bajo características de compresión, cuando se encuentran instalados subterráneamente. Uno de los parámetros que se ha buscado predecir es el de la permeabilidad; desde el año de 1982 se han realizado estudios que generan modelos matemáticos que describen el comportamiento de este fenómeno en los geotextiles. Uno de los modelos

matemáticos más acertados fue desarrollado por Giroud (Granular Filters and Geotextile Filters, 1996) mediante la siguiente ecuación.

$$k = \frac{\rho_w g O_F^2}{32 \eta_w}$$

Ecuación 4 Ecuación de permeabilidad de Giroud. Adaptada de Giroud (Granular Filters and Geotextile Filters, 1996).

donde η_w es la viscosidad dinámica del fluido, ρ_w es la gravedad específica del fluido, g es la gravedad y O_f es el tamaño de abertura aparente del geotextil. Esta ecuación es válida para geotextiles sin presencia de partículas en su estructura. Sin embargo, debido a la colmatación temprana a la que se exponen los geotextiles durante el proceso de instalación, fue necesario desarrollar ecuaciones que describieran el comportamiento de la permeabilidad cuando el geotextil se encontraba parcialmente saturado.

El comportamiento de los geotextiles varía cuando se encuentran parcialmente colmatados, por ello Giroud desarrolló una ecuación que describía la permeabilidad de los geotextiles parcialmente colmatados, la cual se muestra a continuación.

$$k^* = \frac{\beta \rho_w g}{\eta_w} \frac{\left[n - \lambda \frac{\rho_f}{\rho_s} (1 - n) \right]^3}{\left(\frac{4}{d_f} + \lambda \frac{\rho_f}{\rho_s} \frac{6}{d_s} \right)^2 (1 - n)^2}$$

Ecuación 5 Permeabilidad de geotextiles parcialmente colmatados. Adaptado de Gardoni (2000).

donde β es un factor de forma, η_w es la viscosidad dinámica del fluido, ρ_w es la gravedad específica del fluido, g es la gravedad, ρ_f es la densidad de las cintas del geotextil, d_s es el diámetro de las partículas, n es la porosidad y λ es un valor adimensional del cociente entre la masa de partículas presentes en el geotextil y la masa de las fibras del mismo.

5.6.5.2 Conductividad Hidráulica en geotextiles

Otro fenómeno ampliamente estudiado es la conductividad hidráulica de los geotextiles cuando el flujo de agua contiene sedimentos. Tal vez una de las ecuaciones más acertadas para describir la conductividad hidráulica fue la desarrollada por Urbanas (1999), basada en el comportamiento de otros sistemas de filtración. La

veracidad de su ecuación para ser aplicada a cualquier sistema de filtración fue realizada por Pitt y Clark (2009).

$$v = r \cdot \left(\frac{m}{A} \right)^{-x}$$

Ecuación 6 Conductividad hidráulica. Adaptada de Urbonas (1999).

donde r es una constante del flujo que pasa a través del filtro, x es otra constante y en cociente entre m y A es la carga acumulada del total de sedimentos suspendidos en la superficie del medio filtrante.

Dada la amplia gama de geotextiles disponibles en el mercado, dependiendo del fin último del proyecto para el cual se necesiten, se desarrolló un criterio de selección basado en el nivel de retención de partículas y el nivel de colmatación esperado por los diseñadores de los proyectos (Carmen A. Franks, 2012). A continuación se muestran las ecuaciones utilizadas para determinar el tipo de geotextil más apropiado.

$$\frac{O_x (\text{Tamaño de los poros} - \mu\text{m})}{D_x (\text{Tamaño medio Total Sólidos Suspendidos} - \mu\text{m})} < A$$

Ecuación 7 Criterio de retención de selección de geotextiles. Adaptado de Carmen A. Franks (2012).

$$\frac{O_y (\text{Tamaño de los poros} - \mu\text{m})}{D_x (\text{Tamaño medio partículas retenidas} - \mu\text{m})} > B$$

Ecuación 8 Criterio de colmatación de selección de geotextiles. Adaptado de Carmen A. Franks (2012).

Los valores de A y B que limitan el proceso de selección, ya que corresponden a valores que aseguran que los geotextiles escogidos no retengan las partículas presentes en el suelo y no se colmaten con las partículas retenidas.

5.6.6 Estudio de desempeño de Geotextiles vírgenes

En el estudio realizado por Franks (2012) se midió la concentración afluente del caudal al pasar por un sistema de filtración conformado por tres tipos de geotextiles. La siguiente ilustración muestra los resultados obtenidos. La línea punteada corresponde a la concentración objetivo, establecida durante el estudio sólidos suspendidos. Los símbolos con coloración corresponden a la concentración afluente y

los que carecen de color, a la concentración efluente. El geotextil NW1 tenía un tamaño de abertura aparente superior al de los otros dos geotextiles.

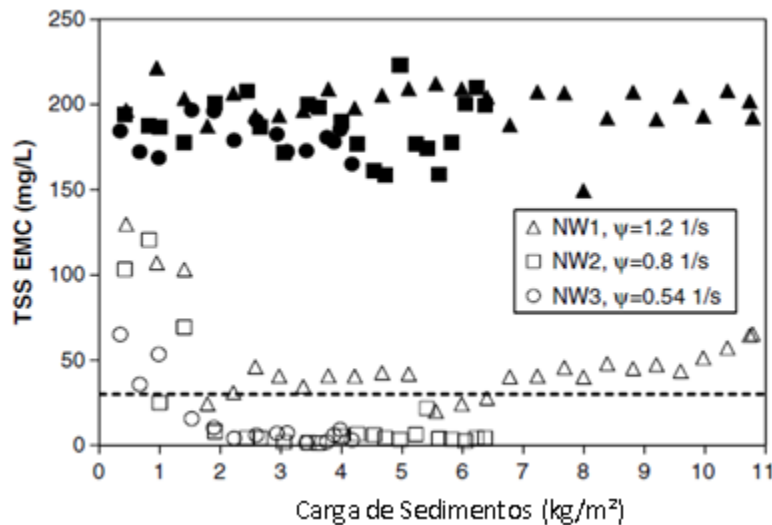


Ilustración 23 Concentración afluente y efluente. Adaptado de Carmen A. Franks (2012).

Durante los montajes en el laboratorio se observó que cuando una capa de sedimentos se deposita en la superficie del filtro impidiendo el paso de otros sedimentos, e inclusive en algunos casos del flujo. Según Aydilek (2011), las partículas grandes son las que típicamente generan este efecto, impidiendo el paso de las más pequeñas. En la siguiente ilustración se muestra la formación del efecto pastel. Las partículas depositadas encima del geotextil forman una barrera porosa; dicha porosidad depende del tamaño de las partículas depositadas. Si el efecto pastel está conformado por partículas grandes, que generen un primer filtro, con un alto grado de porosidad, se alargará la vida útil al geotextil debido a que dicho filtro retiene ciertos sedimentos o partículas de suelo presentes en el agua que no llegaran a obstruir la matriz del geotextil. Si las partículas que forman la capa de pastes son muy pequeñas, tendrán una menor porosidad, y atrapan partículas finas, que tienden a colmatar a una mayor velocidad la estructura de fibras del geotextil. Si el espesor de la capa de pastel tiene el suficiente espesor, se pueden remover partículas, inclusive, de tamaño menor al de la abertura aparente del geotextil.

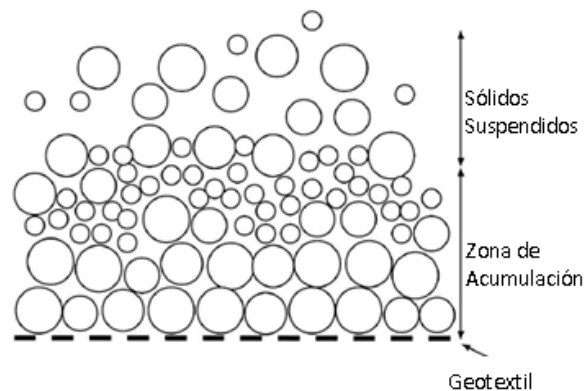


Ilustración 24 Efecto pastel en los geotextiles. Adaptado de Aydilek (2011).

Típicamente la capacidad de los geotextiles para remover sólidos suspendidos se determina con base en el tamaño de abertura aparente. Sin embargo en el estudio de Franks (2012) se encontró con que para hacer una predicción más exacta del porcentaje de sólidos suspendidos removidos, se requiere conocer la distribución de partículas de los sedimentos o el tipo de suelo que pasa a través del geotextil. Una distribución de partículas de tamaño relativamente grande forma la capa de pastel ideal descrita anteriormente.

5.6.7 Estudio de desempeño de Geotextiles parcialmente colmatados

Con el fin de analizar el comportamiento de los geotextiles parcialmente colmatados en obras civiles, se hace alusión al estudio de Gardoni (2000) que evaluó el desempeño de ocho tipos diferentes de geotextiles no tejidos ampliamente utilizados en proyectos de drenaje e infiltración. La diferencia entre los geotextiles evaluados en el laboratorio radicaba en el material de sus cintas, al ser algunos de poliéster y otros de polipropileno. La preparación de los geotextiles para el posterior análisis de permeabilidad y transmisibilidad del flujo se hizo saturándolos primero y luego impregnarlos con material granular y fino.

Las pruebas llevadas a cabo en el laboratorio buscaban evaluar el comportamiento de la permeabilidad del geotextil parcialmente colmatado bajo los esfuerzos generados por el suelo inmediatamente encima de él. Se observó que una de los primeros efectos de la colmatación prematura de los geotextiles era la pérdida de compresibilidad, que se reflejaba en la menor disminución del espesor del geotextil luego de ser compactado durante la instalación. Los resultados revelaron que la permeabilidad de los geotextiles parcialmente colmatados se ve afectada por el incremento en el esfuerzo normal que ejerce el suelo. En la siguiente ilustración se muestra el

fenómeno evidenciado en el laboratorio. El nivel de colmatación esta denotado por el valor de λ , siendo un valor 0 equivalente a un geotextil virgen.

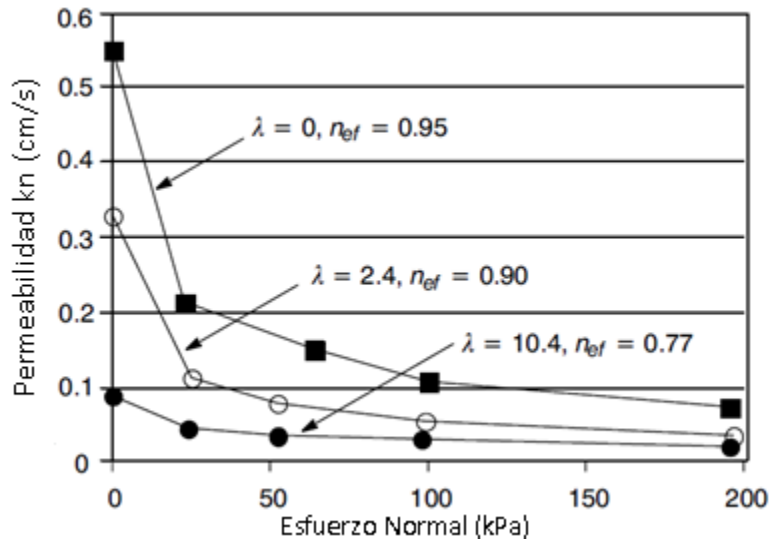


Ilustración 25 Permeabilidad vs. Esfuerzo Normal. Adaptado de Gardoni (2000).

En la ilustración se aprecia que la permeabilidad decrece para los tres niveles de colmatación. Sin embargo se nota una gran diferencia entre el geotextil no tejido virgen y los geotextiles parcialmente colmatadas a bajos niveles de esfuerzo normal generados por el suelo. Lo anterior quiere decir que si el geotextil utilizado en obras de drenaje presenta una colmatación prematura durante el proceso de compactación del suelo, su permeabilidad se verá afectada significativamente. La porosidad geotextil también se ve afectada por el nivel de colmatación que se presente.

Los resultados de las pruebas de transmisibilidad mostraron que su valor disminuía tanto para geotextiles parcialmente colmatados como para los que no, en función del aumento del esfuerzo normal. Sin embargo, con base en los resultados obtenidos de compresibilidad durante los análisis se observó que la capacidad de descarga de los geotextiles parcialmente colmatados y el espesor disminuían en menor medida que en aquellos sin colmatar. Este hecho abre un debate acerca de las consecuencias que trae la colmatación prematura del geotextil, pues como se mostró trae algunas ventajas que no brindan los geotextiles sin colmatar. A continuación se presentan los datos obtenidos en el estudio acerca de la disminución del espesor del geotextil en función del esfuerzo normal.

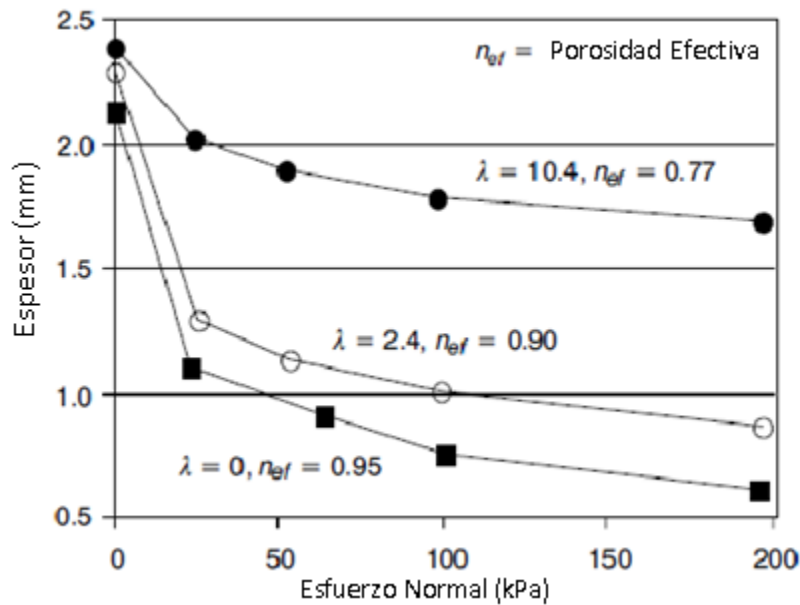


Ilustración 26 Disminución del espesor del geotextil. Adaptado de Gardoni (2000).

La impregnación de las partículas del suelo a la estructura del geotextil depende del tipo del suelo circundante al geotextil y del proceso de fabricación. Durante la instalación del geotextil las partículas de algunos suelos analizados no obstruyen en gran medida la matriz del geotextil; la colmatación se da con la presencia de un flujo de agua que transporta las partículas cohesivas presentes en el suelo hacia el material sintético, donde quedan retenidas en su gran mayoría (Gardoni, 2000).



6 Comparación entre los dispositivos de pre-tratamiento de Agua Lluvia

Luego de describir el funcionamiento y la eficiencia de algunos de los dispositivos y filtros de tratamiento de aguas lluvias más utilizados en las obras de drenaje pluvial, se procede a compararlos en aras de determinar cuál es el dispositivo más apropiado para remover sedimentos y contaminantes presentes en el agua lluvia. Este análisis no tiene en cuenta la viabilidad de la implementación de estos dispositivos desde el punto de vista económico; sólo busca discernir entre los niveles de eficiencia de remoción de contaminantes en el agua lluvia. Más adelante se comentarán algunos factores económicos que influyen en la decisión de implementar uno u otro sistema de pre-tratamiento.

Dado que los dispositivos analizados tenían características diferentes, la comparación entre ellos se hará por grupos. En primer lugar se compararán los dispositivos de pre-tratamiento basado en el almacenamiento de sedimentos y contaminantes en sumidero. En segunda instancia se cotejarán los dispositivos de filtración descritos.

6.1 Comparación de los dispositivos de pre-tratamiento sedimentadores

Un estudio llevado a cabo por Michael G. Faram y Robert Harwood (2002) pretendió evaluar la capacidad de remoción de sólidos de los cuatro dispositivos tratamiento de agua lluvia más comunes en el mercado. El análisis del comportamiento de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia se llevó a cabo con la ayuda de la mecánica de fluidos computacional.

La mecánica de fluidos computacional, CFD por sus siglas en inglés, es una herramienta desarrollada para simular el comportamiento del flujo dentro de cualquier sistema de drenaje. Esta herramienta computacional permite evaluar el comportamiento hidráulico del flujo de una manera más fácil y eficiente que los métodos tradicionales de experimentación en el laboratorio. En cuanto al diseño de los dispositivos de tratamiento de agua lluvia, resulta ser útil para evaluar la injerencia de cambios en la estructura de los dispositivos sobre el comportamiento hidráulico del flujo.

En la siguiente ilustración se muestran las configuraciones de los cuatro tipos de dispositivos analizados en el laboratorio: Sumidero (SCB), Dispositivo de

sedimentación por gravedad (GSD), vórtice (SVS) y vórtice avanzado (AVS). Con el fin de hacer un análisis comparativo bajo las mismas condiciones, las dimensiones de los cuatro sedimentadores analizadas como el diámetro del sumidero y la altura de la tubería de salida se tomaron de la misma magnitud.

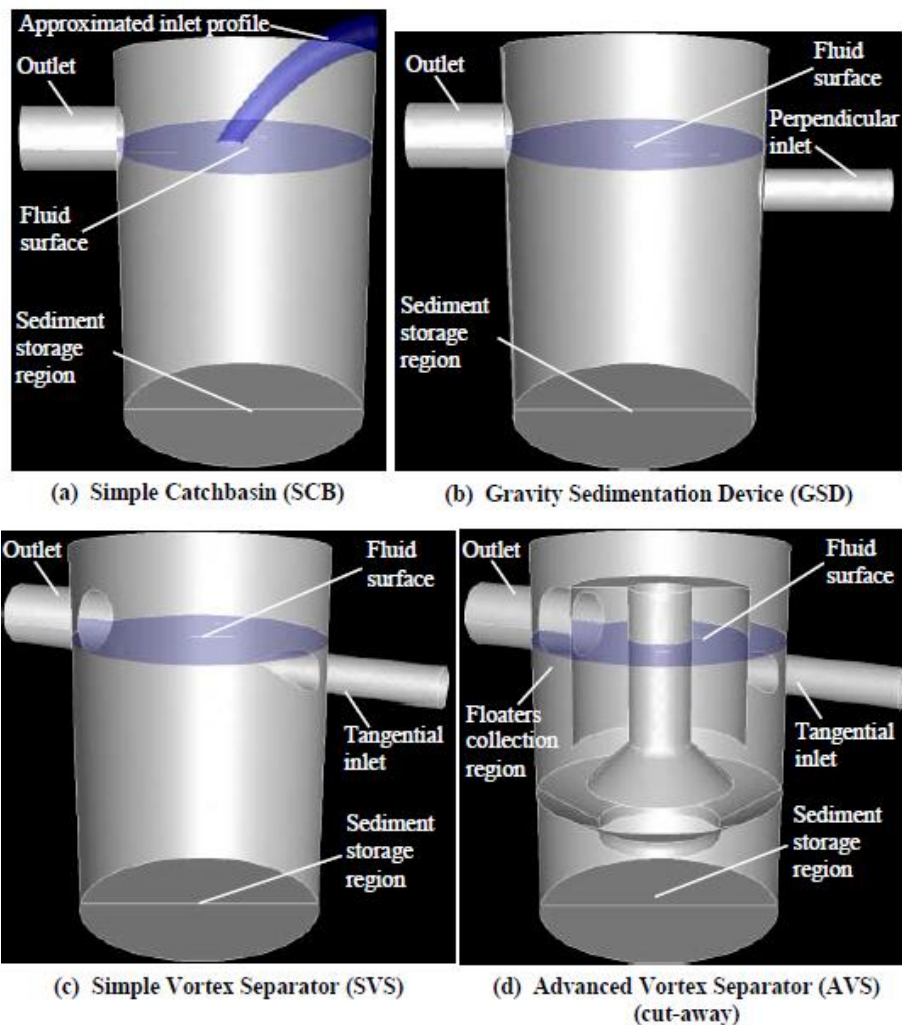


Ilustración 27 Configuración de los dispositivos de sedimentación. Tomado de Harwood (2002).

Las pruebas realizadas en los dispositivos se hicieron bajo las siguientes condiciones:

- Caudales de entrada de 20, 40, 60 y 80 litros por segundo.
- Descarga libre a la salida de los dispositivos.
- Predicciones de la trayectoria de las partículas hechas mediante el método de rastreo de partículas lagrangiano.

- Tamaño de partículas entre 10 y 1000 micrones.
- Para calcular la eficiencia de los dispositivos se utilizó la siguiente ecuación.

$$\text{Eficiencia (\%)} \text{ en } t(t) = \frac{(NI \ t(0)) - (NE \ t(t))}{(NI \ t(0))} \times 100$$

Donde $NI = \text{No. de partículas inyectadas}$ $NE = \text{No. de partículas existentes}$
 $t(t) = \text{Tiempo de tránsito de partículas}$ $t(0) = \text{Tiempo de inyección de partículas}$

Ecuación 9 Eficiencia de remoción de partículas. Tomado de Harwood (2002).

Luego de interponer las condiciones de los experimentos a realizar se procedió a llevar a cabo la modelación del comportamiento de los dispositivos con ayuda de la mecánica de fluidos computacional. La siguiente ilustración muestra las predicciones de velocidad modelada con el software para los cuatro dispositivos, para un caudal de 40 L/s. La magnitud de la velocidad está organizada por una escala de colores donde el color azul represente una mínima velocidad y el color rojo una velocidad pico en el sistema.

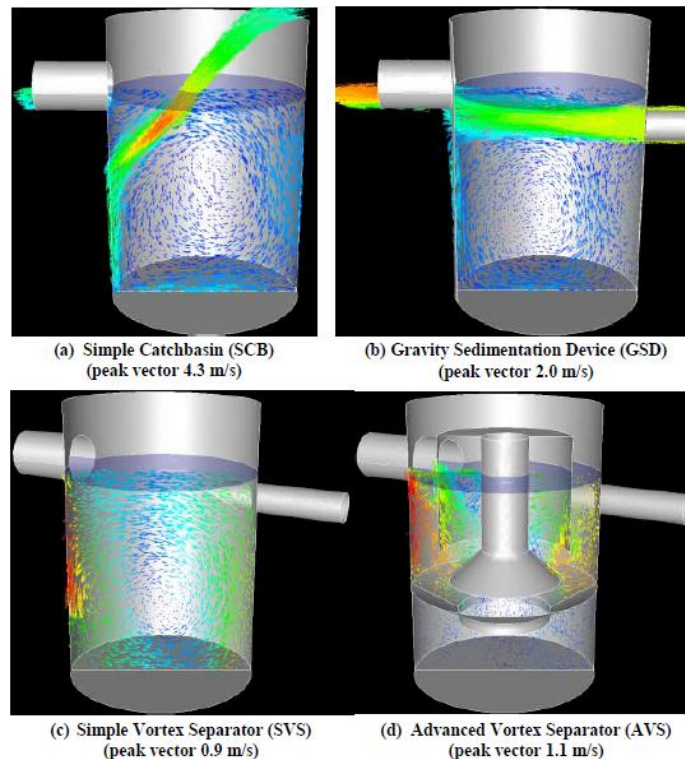


Ilustración 28 Predicciones de velocidad. Tomado de Harwood (2002).

Al igual que con la velocidad, el software fue utilizado para describir la trayectoria del flujo en función del tiempo de residencia en cada sección del dispositivo de sedimentación. A continuación se presenta la trayectoria de flujo para los cuatro dispositivos analizados, con un caudal de entrada de 40 L/s. al igual que en la Ilustración 29, el color azul denota un mínimo tiempo de residencia y el color rojo el máximo tiempo de residencia en el dispositivo, tomado como 20 segundos.

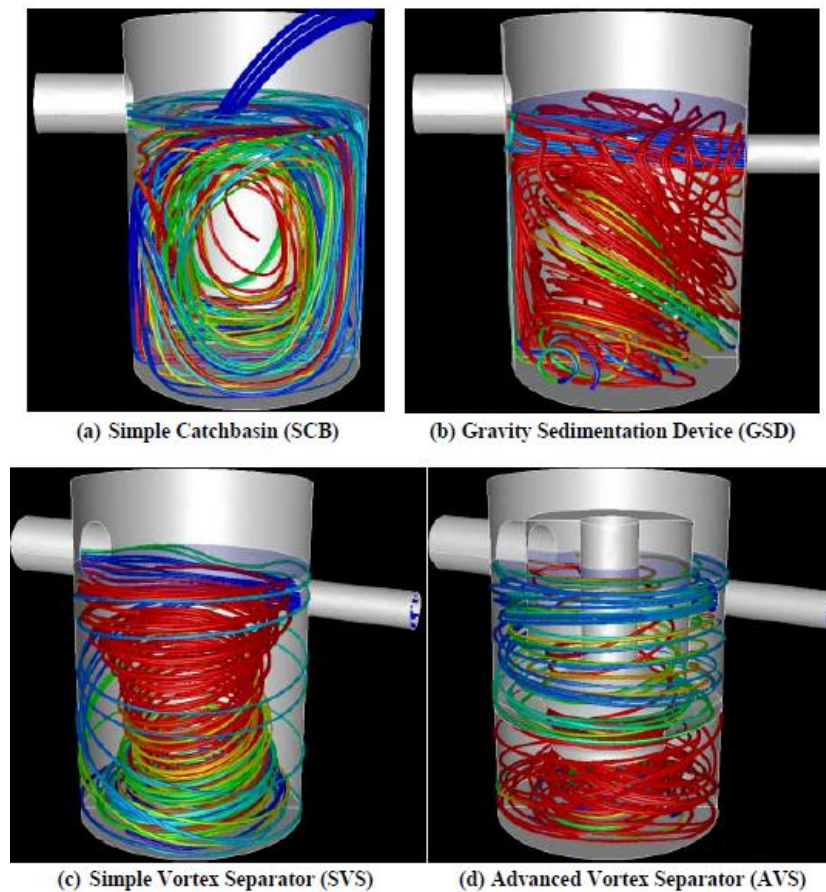


Ilustración 29 Predicción de la trayectoria del flujo. Tomado de Harwood (2002).

A partir de las Ilustraciones 29 y 30 es posible hacer un análisis en cuanto al tipo de remoción de sedimentos que se lleva a cabo en cada dispositivo. Con respecto al sumidero convencional se evidenció que presenta las mayores velocidades de entrada ya que su flujo no proviene de una tubería de entrada, sino de la caída libre de agua (supuesta desde un punto de captación de escorrentía superficial). Las altas velocidades registradas acompañadas de la trayectoria circular que sigue el flujo



(Ilustración 24), dan lugar al proceso de resuspensión de los sedimentos almacenados en el dispositivo. Este fenómeno se intensifica cuando la capa de sedimentos ocupa un mayor volumen dentro del dispositivo, pues la superficie de la capa de partículas almacenadas estará expuesta a una mayor velocidad del flujo (Pitt H. A., 2009).

El dispositivo de sedimentación por gravedad presenta velocidades menores a las del sumidero convencional al tener su entrada provista de una tubería, en vez de la caída libre de flujo. Observando la Ilustración 30 se evidencia que la trayectoria del flujo dentro del dispositivo es desordenada; inclusive se evidencia que una porción del flujo que ingresa al dispositivo de sedimentación por gravedad pasa directamente hacia el punto de salida del dispositivo. Este hecho genera que los sedimentos presentes en dicha porción del flujo no reciban ningún tipo de tratamiento y por ello salgan del dispositivo con la misma concentración de entrada. Lo anterior repercute en una disminución de la eficiencia de remoción de sedimentos por parte del dispositivo.

El dispositivo de mecanismo de vórtice simple se diferencia del sedimentador de gravedad en el hecho que el primero tiene la tubería de entrada ubicada de manera excéntrica. La posición tangencial de la tubería de entrada provoca un efecto remolino al interior del dispositivo, lo que le da un mayor tiempo de residencia al flujo para generar la sedimentación de los sedimentos. En el esquema de trayectoria del flujo se puede observar que la tendencia natural de este es bajar hasta el fondo del dispositivo, para luego ascender hacia la salida del mismo. El mayor tiempo de concentración se da en el centro del dispositivo, donde se genera el efecto de deposición explicado anteriormente en la descripción del funcionamiento de los dispositivos tipo vórtice sencillo.

El dispositivo de vórtice avanzado también cuenta con una disposición tangencial de la tubería de entrada y adicionalmente cuenta con unas pantallas deflectoras. En el esquema de la trayectoria seguida por el flujo dentro del dispositivo comprueba lo descrito anteriormente por Phipps (2008), acerca de la independencia entre la zona de almacenamiento y la zona de tránsito de flujo. Se puede evidenciar que el mayor tiempo de residencia se presenta en el sumidero del vórtice avanzado, garantizando la sedimentación de las partículas transportadas por el flujo de agua.

Al realizar los análisis de remoción y retención de sedimentos en los dispositivos se observó una tendencia generalizada de la disminución de los porcentajes con el tiempo. En la siguiente ilustración se muestra los resultados obtenidos en el estudio de Harwood (2002) con respecto a la remoción y retención de sedimentos de cada uno de los cuatro dispositivos analizados para un caudal de entrada de 40 L/s.

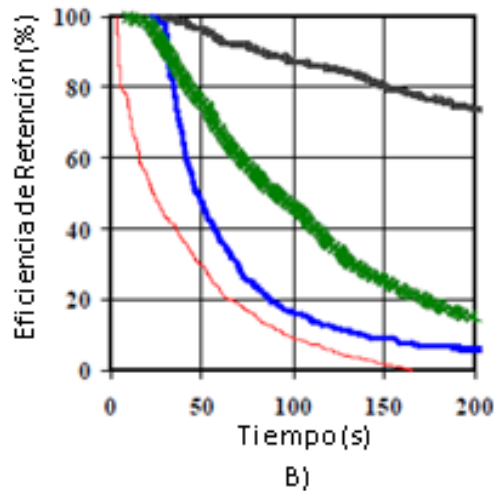
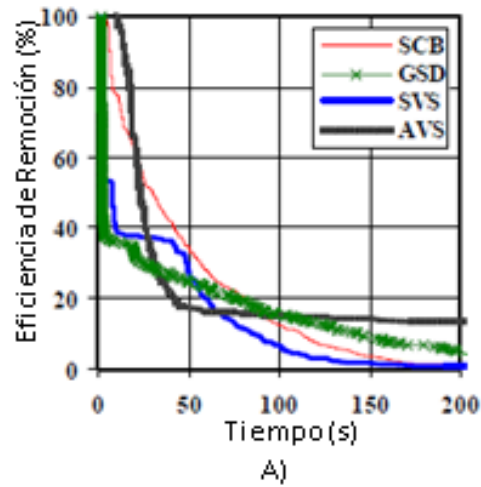


Ilustración 30 Eficiencias de Remoción (A) y Retención (B) de sedimentos. Adaptado de Harwood (2002).

Con respecto a la remoción de sedimentos, se puede evidenciar que a través del tiempo el porcentaje de efectividad para todos los dispositivos exceptuando en separador de vórtice avanzado, tiende a 0. El separador de vórtice avanzado tiene la ventaja de brindar más protección a la zona de almacenamiento que los otros dispositivos.

La gráfica de retención de los sedimentos capturados, al igual que la de remoción, muestra un comportamiento decreciente. Sin embargo los porcentajes de eficiencia no son tan bajos. De la gráfica de eficiencia de retención se puede apreciar que el dispositivo de vórtice hidrodinámico tiene un desempeño muy superior comparado



con los otros dispositivos, al presentar un porcentaje de retención de alrededor del 75% al final del tiempo de retención, mientras los demás dispositivos se encontraban por debajo del 20 %. Estos resultados remarcan la importancia de proteger la cámara de almacenamiento de los sedimentos de los fenómenos de resuspensión. Por otro lado en el sumidero convencional se evidenció que la totalidad de los sedimentos retenidos eran removidos de la zona de almacenamiento, dado en contacto directo que existe entre el flujo que entra al dispositivo y la cámara de almacenamiento de los sedimentos capturados.

Sin embargo Harwood (2002) advierte que las medidas instantáneas de la remoción y retención de partículas son aquellas medidas tenidas en cuenta para evaluar el desempeño de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia.

Las mediciones de remoción y retención instantáneas para los cuatro dispositivos se hicieron con los cuatro caudales tenidos en cuenta desde el inicio desde el comienzo del análisis. En general se observó una disminución de los porcentajes de eficiencia tanto para remoción como retención cuando se incrementa el caudal afluente a los dispositivos. En la siguiente ilustración se observan las mediciones de eficiencia para los diferentes dispositivos utilizando los cuatro caudales. En las pruebas de remoción instantánea se confirma que el sumidero convencional (SVS) es el dispositivo menos eficiente de los cuatro analizados ya que captura el menor rango de tamaño de partículas finas. Para el análisis de remoción de sedimentos instantáneo el dispositivo más eficiente, es decir, el que captura una mayor cantidad de partículas de diferentes tamaños es el vórtice avanzado, independientemente del caudal afluente al dispositivo.

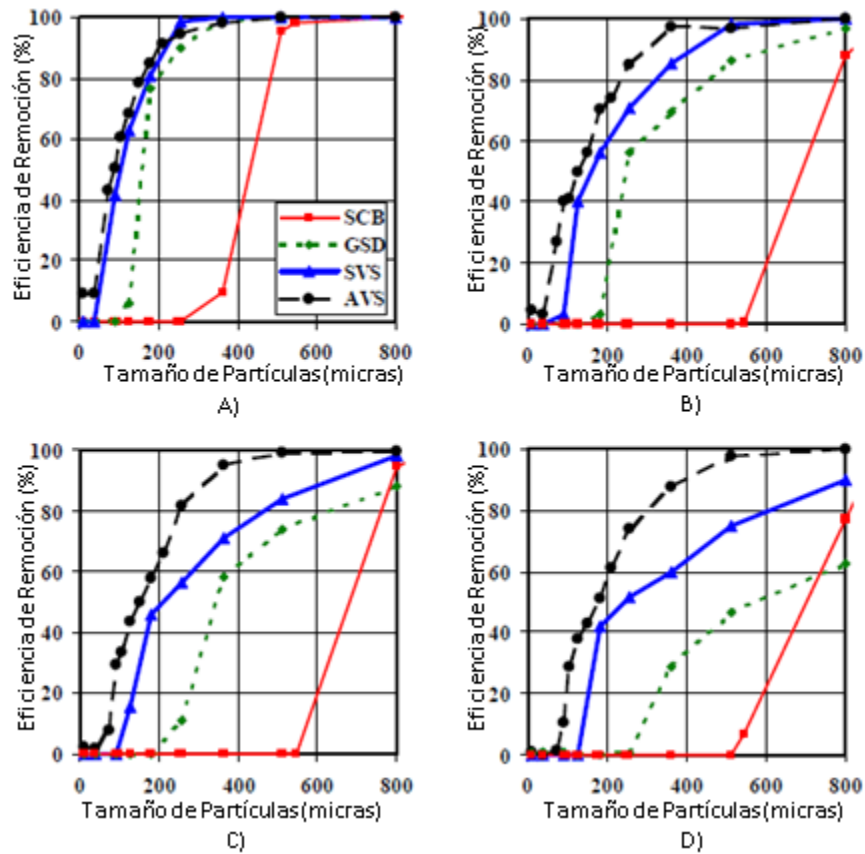


Ilustración 31 Eficiencia de remoción instantánea para caudales afluentes de A – 20 L/s, B – 40 L/s, C – 60 L/s y D – 80 L/s. Adaptado de Harwood (2002).

En la Ilustración 33 se presentan los resultados de retención de sedimentos bajo las mismas condiciones aplicadas al análisis de remoción.

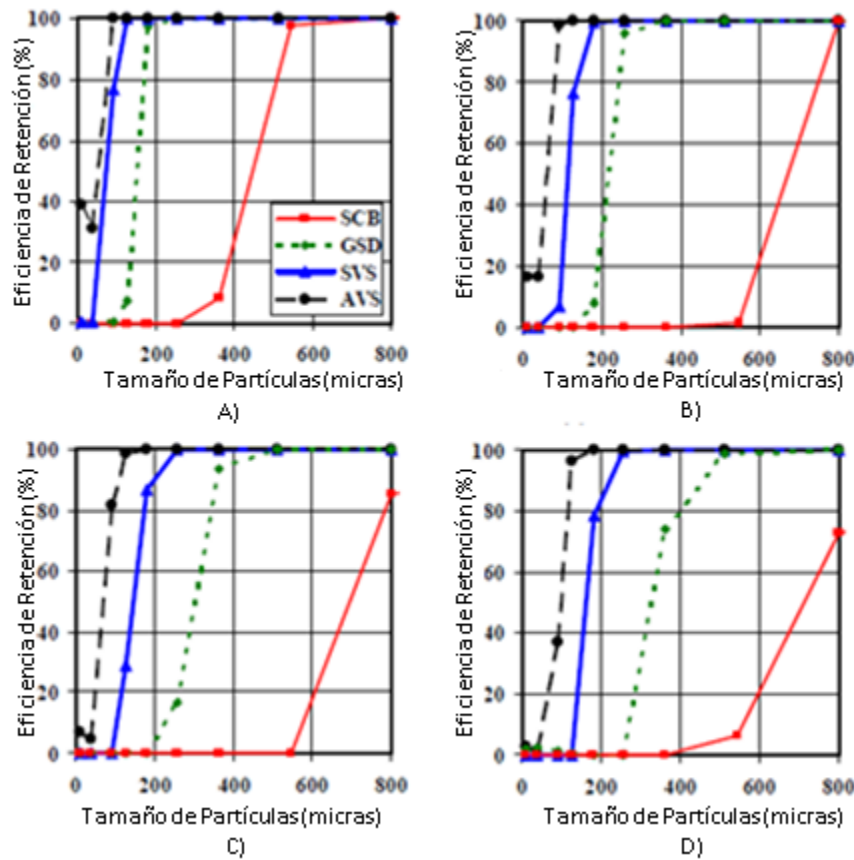


Ilustración 32 Eficiencia de retención instantánea para caudales afluentes de A – 20 L/s, B – 40 L/s, C – 60 L/s y D – 80 L/s. Adaptado de Harwood (2002).

Los valores de eficiencia retención de sedimentos son coherentes con los observados de remoción, ya que a medida que el caudal de entrada a los dispositivos aumenta, la eficiencia de retención de las partículas, en especial las de menor tamaño, disminúa. El dispositivos de vórtice avanzado demuestra ser el más efectivo en la retención de sedimentos, al reportar eficiencias de retención positivas para todos los tamaños de partículas evaluadas para los caudales de 20, 40 y 60 litros por segundo. Adicionalmente el dispositivo hidrodinámico es el único que total retención de los sedimentos removidos

La eficiencia de remoción y retención de sedimentos del agua lluvia por parte de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia depende de tres factores principalmente: la geometría de los dispositivos, la habilidad de los dispositivos de brindar el tiempo de residencia adecuado para que ocurra el proceso de



sedimentación, y el grado de protección de las cámaras de almacenamiento de los sedimentos retenidos.

6.2 Comparación de dispositivos de pre-tratamiento de Filtración

A lo largo de esta sección se hará una comparación entre los dispositivos de filtración discutidos anteriormente, filtros de arena y filtros utilizando geotextiles. En un estudio realizado recientemente por Franks (2014) se pretendió comparar en el laboratorio la eficiencia de un filtro de arena contra el de un geotextil para remover sedimentos presentes en el agua lluvia. El estudio también trataba de corroborar la hipótesis otras tesis como la planteada por Franks (2012), en la que asegura que los geotextiles alargan la vida útil de los filtros y requieren menor mantenimiento.

Durante el montaje de los ensayos en el laboratorio se utilizaron tres tipos de geotextiles no tejidos, típicamente utilizados para obras de drenaje e infiltración, diferenciados por el tamaño de abertura aparente y la permisibilidad. Los geotextiles denominados NW1, NW2 y NW3 tenían tamaños de abertura aparente de 180, 150 y 150 micrómetros (μm), y unas permeabilidades de 1.2, 0.8 y 0.54 s^{-1} respectivamente. El filtro de arena estaba compuesto por una capa de grava de 15 centímetros y una capa de arena de 45 centímetros. Las pruebas de laboratorio se basaron en medir las concentraciones del Total de Sólidos suspendidos (TSS) para cada uno de los medios filtrantes. Se utilizaron dos concentraciones de sólidos, las cuales fueron dispuestas en los caudales afluentes del montaje de laboratorio a diferentes tasas. Adicionalmente fueron tenidos en cuenta tres tipos de distribuciones de partículas identificados como P1, P2 y P3.

Uno de los primeros ensayos llevados a cabo consistió en medir la concentración de sedimentos en el caudal afluente y efluente a dos tipos de geotextiles, utilizando cierta distribución de partículas (0–106 μm). En la siguiente ilustración se observan los datos obtenidos en el laboratorio. Los símbolos con color representan el caudal afluente, y los que carecen de color el efluente. La línea punteada es la concentración objetivo de sedimentos en el caudal efluente. Se puede observar que ambos geotextiles se encuentran por debajo de la concentración de sedimentos objetivos a partir de una carga de 2 Kg/m^2 . También es posible apreciar la capacidad de carga antes de que se colmaten. La del geotextil NW2 es un poco mayor a la del NW3 debido a su mayor permeabilidad.

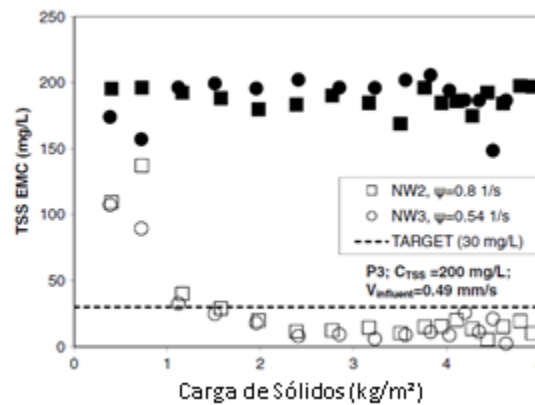


Ilustración 33 Concentraciones afluentes y efluentes. Adaptado de Carmen A. Franks (2014).

Los análisis llevados a cabo con el filtro de arena mostraron que las arenas reportaron una eficiencia de retención de Sólidos Suspendedos superior al 99 % para todos los ensayos llevados a cabo. En la siguiente tabla se pueden apreciar los valores reportados de eficiencia de remoción de sólidos tanto para el filtro como para los tres tipos de geotextiles dispuestos para el estudio. A pesar de que el desempeño del filtro de arena es muy superior al de los geotextiles, vale la pena aclarar la diferencia que existe entre los espesores. Mientras que el espesor del filtro compuesto de arena tenía un espesor de 61 centímetros, el espesor de los geotextiles estaba alrededor de los 0.26 centímetros.

Distribución de partículas	Velocidad (mm/s)	Filtro	Carga de Sólidos (kg/m ²)	Sólidos retenidos (kg/m ²)	Porcentaje Sólidos retenidos (%)
P1	0.49	NW1	10.8	8.10	75.1
			7.79	4.97	63.8
		NW2	6.37	5.57	87.4
		NW3	4.17	3.76	90.2
		Arena	4.08	4.07	99.7
P2	0.49	NW1	3.75	0.25	6.64
			5.02	0.60	12.0
		NW2	4.33	3.57	82.5
		NW3	3.41	2.57	75.3
		Arena	3.45	3.43	99.6

Tabla 13 Porcentajes de retención de Sólidos. Adaptado de Carmen A. Franks (2014).

Aunque la eficiencia de remoción del filtro de arena es superior a la presentada por los filtros de geotextiles, la cantidad de carga de sedimentos que retiene antes de su colmatación es inferior. En la siguiente ilustración se muestra los sólidos capturados en función de la carga de sedimentos; la línea punteada de 45 grados indica una tasa de remoción de sedimentos del 100 por ciento. Se puede apreciar que a pesar de que los filtros de arena tienen un mayor porcentaje de remoción de sólidos, soportan una menor carga de sedimentos, lo cual repercute en su vida útil, y por ende en los gastos de mantenimiento.

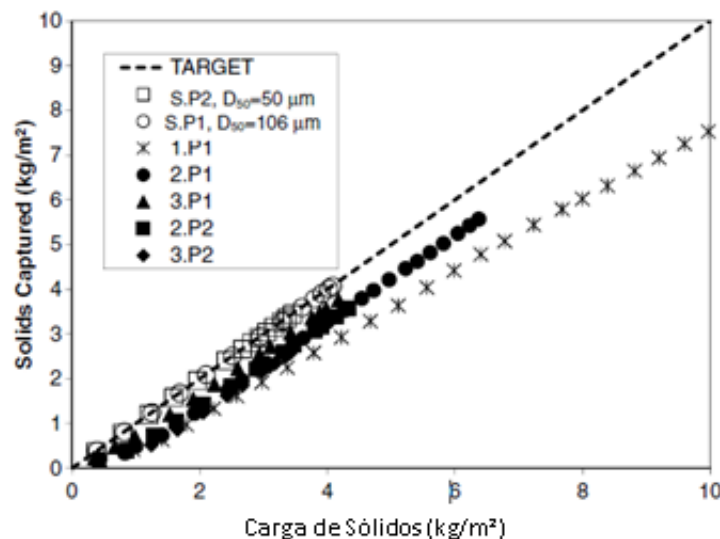


Ilustración 34 Comparación entre los filtros. Adaptado de Carmen A. Franks (2014).

El uso de geotextiles para la remoción de sedimentos del agua lluvia es más eficiente que el uso de filtros de arena, pues los primeros tienen en promedio el doble de vida útil que los segundos, dada su mayor capacidad de carga de sedimentos. Además de los menores costos en mantenimiento, los geotextiles son más fáciles de instalar en campo y su espesor es significativamente menor al requerido por un filtro de arena.

7 “Street Cleaning” – Método de limpieza de Barrido de Calles

La práctica de barrido de calles típicamente se ha implementado para remover los desechos de las calles generados por el hombre. Colillas de cigarrillo, paquetes plásticos, botellas y otros desechos productos de la cotidianidad de la vida humana son objeto de limpieza por parte de la técnica de barrido. Dada la capacidad de este



mecanismo de limpieza de remover desechos que podrían ser transportados por el agua lluvia, se consideró una práctica de tratamiento del agua lluvia. Sin embargo surgió una gran controversia a raíz de estudios como los de Smith (Smith, 2002) que mostraron que las técnicas de barrido removían muy poco las partículas finas, las cuales estaban asociadas con la mayor cantidad de contaminantes presentes en el agua lluvia.

El mecanismo limpieza de calles por barrido se ha implementado desde los años 80 como un método de disminución el volumen de sedimentos y contaminantes que llega al sistema de alcantarillado. Los estudios realizados para evaluar la eficiencia del barrido de calles han mostrado que este mecanismo resulta ser eficiente para partículas grandes y basuras presentes en la superficie. La eficiencia de remoción de partículas finas es muy baja. Las partículas finas son removidas de la superficie por la escorrentía producida por la lluvia.

El barrido de las calles se puede considerar como un método de pre-tratamiento de agua lluvia, puesto que remueve cierta cantidad de sedimentos de diferentes tamaños que se pueden ser transportados por el agua lluvia hacia los puntos de captación. Aunque parece una actividad muy sencilla de realizar y de amplia aplicabilidad, su efectividad está limitada por varios factores como el método de barrido utilizado, la humedad del suelo, la textura del suelo, la frecuencia de barrido, entre otros (Pitt R. , 1979).

La efectividad del mecanismo de barrido de calles en cuanto a la remoción de partículas finas puede aumentar si se utilizan equipos más sofisticados que una barredora convencional como la barredora modificada de aire regenerativo. Se puede lograr una mayor captura de los sedimentos y desechos presentes en la superficie si se trabaja en conjunto con una barredora tradicional, que remueve las partículas grandes de la superficie, y una barredora especializada que tenga la capacidad de remover las partículas finas (Robert Pitt, 2004). En la siguiente sección se hará una breve descripción de los tipos de barredoras presentes en el mercado, capaces de remover las partículas de tamaño pequeño.

7.1 Tipos de barredoras

7.1.1 Barredora de escoba mecánica

Es el tipo de barredora más antigua y más ampliamente utilizada debido a que sus costos operacionales y de mantenimiento son inferiores a los de las barredoras con un mayor grado tecnológico. Están compuestas por un tanque de almacenamiento, al cual llegan los desechos y sedimentos de la calle recolectados por un rodillo barredor y movidos por una banda transportadora. Algunas de sus ventajas es que pueden ser operadas a velocidades medios sin producir altos niveles de ruido. Desafortunadamente no remueve partículas finas de la superficie. A continuación se muestra un esquema de este tipo de barredora.



Ilustración 35 Barredora de Escoba Mecánica. Tomada de Jones (2012).

7.1.2 Barredora de Aire Regenerativo

Surgieron como una solución a la incapacidad de las barredoras mecánicas para remover las partículas finas de la superficie. Funcionan mediante la inyección de aire a presión al suelo para suspender las partículas, que luego serán succionadas por el camión. Este tipo de barredoras adicionalmente remueve material particulado PM10 (Keating, 2002), el cual se ha demostrado está ligado con la generación de

enfermedades respiratorias en el ser humano. En la siguiente ilustración se muestra una barredora de aire regenerativo.



Ilustración 36 Barredora de Aire Regenerativo. Tomada de TYMCO Inc (2014).

7.1.3 Barredoras de Vacío

Este tipo de barredoras también sobresale por su capacidad de remover partículas finas y gruesas de la superficie. Su funcionamiento se base en la succión de material por un mecanismo de generación de vacío. Al igual que las barredoras de aire regenerativo remueven material particulado PM10. Este tipo de barredoras resulta ser la más efectiva de las tres en la remoción de partículas finas. Una de sus desventajas es que debe operar a bajas velocidades y no es muy efectiva removiendo partículas de gran tamaño.

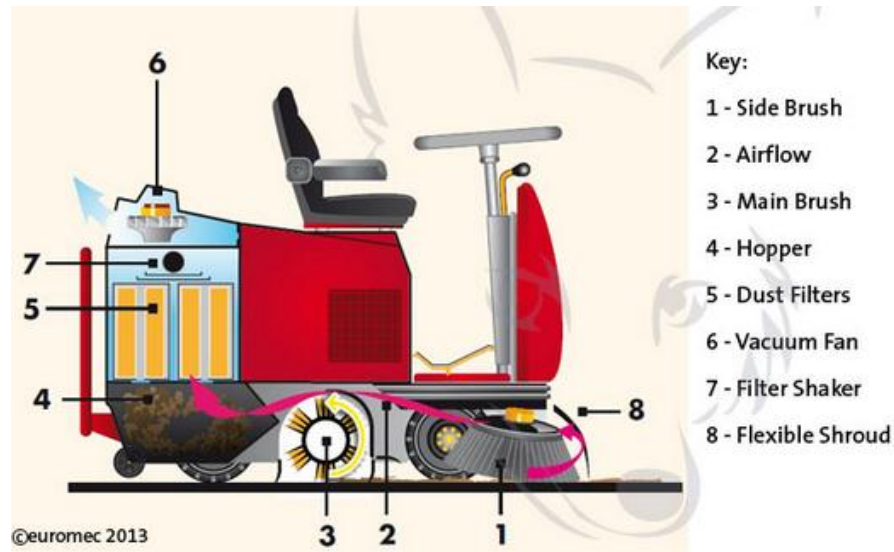


Ilustración 37 Barredora de Vacío. Tomado de Euromec.

7.2 Estudios del desempeño del método de barrido de calles

El estudio de Joo Hyon (2009) pretendió evaluar la influencia del barrido de calles en la disminución de los contaminantes en el agua lluvia, al medir la concentración de agentes contaminantes en el agua lluvia, aguas abajo del punto de captación, en condiciones de barrido y sin barrer. La eficiencia del barrido está influenciada por varios factores como la frecuencia de su ejecución y el tiempo seco previo al evento de lluvia. El estudio encontró que la acumulación de partículas en la superficie crece hasta alcanzar un punto de estabilidad a partir del cual las partículas son sometidas a fenómenos de dispersión por acción de fuerzas como la del viento. Las partículas transportadas se convierten en agentes contaminantes presentes en el aire, conocidos como material particulado. En la siguiente ilustración se puede apreciar el poco efecto del barrido de las calles cuando el evento de lluvia no se produce al poco tiempo de haber realizado la limpieza; pues el material acumulado vuelve a alcanzar los niveles que tenía antes de ser barrido. Por lo tanto si el evento de lluvia no se presenta luego de haber llevado a cabo el barrido de la calles, no se verán resultados con respecto a la situación en la cual no se barre. Sin embargo la cantidad de material contaminante que se convierte en material particulado transportado por el aire si se reduce cuando se llevan a cabo los barridos.

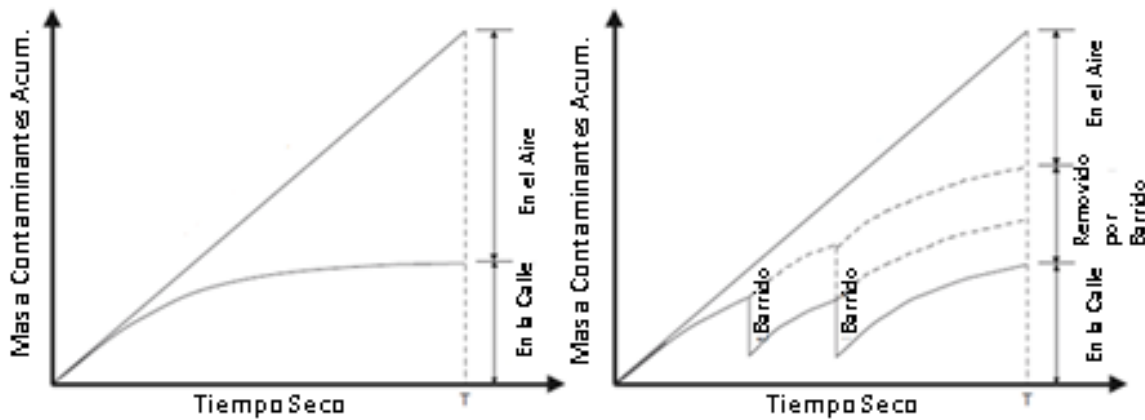


Ilustración 38 Comparación situación de barrido y no barrido. Adaptado de Kang et al (2009).

El estudio de Joo Hyon (Kang, Debats, & Stenstrom, 2009) concluyó que hay una reducción en la totalidad de Sólido Suspendidos del agua lluvia cuando se llevaba a cabo el barrido de las calles, siempre y cuando el evento de agua lluvia no pasase mucho tiempo después de haber realizado la limpieza superficial. Adicionalmente comenta al respecto del debate existente sobre la contribución del barrido de las calles a la disminución de los agentes contaminantes en el agua lluvia, que los estudios anteriores no contaban con la tecnología de las barredoras modernas, como la generadora de vacío, ni con los diseños actuales de los modelos estadísticos para respaldar las mediciones realizadas.

7.3 Caso de estudio Livonia, Michigan

Un estudio desarrollado en la ciudad de Livonia, en Michigan (Wayne County Rouge River, 2004), buscaba encontrar el complemento ideal entre el método de barrido de calles y la retención de sedimentos de un sumidero convencional, para disminuir al máximo la cantidad de desecho y contaminantes que llegaban al río *Rouge River*.

Utilizando un modelo de transporte de partículas simplificado se determinó que la mayor eficiencia que se podía obtener con el barrido de calles, se lograba al realizar el procedimiento 17 veces al año con un equipo de alta eficiencia como una barredora de aire regenerativo o una barredora de vacío. El aumento de la frecuencia de los barridos de las calles disminuye la carga de sedimentos que deben ser removidos y por ende disminuyen sus sesiones de mantenimiento a una vez por año. La combinación óptima el barrido de las calles y el trabajo de remoción del sumidero convencional aumento la reducción de contaminantes del agua lluvia de un valor de aproximadamente 25% a 78%.



8 Dispositivo de pre-tratamiento de Agua lluvia Mixto

Los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia funcionan bajo el principio de sedimentación, el cual captura en su mayoría partículas gruesas. En las secciones anteriores se demostró que estos dispositivos presentan bajas eficiencias en la remoción de partículas finas, las cuales están relacionadas con los mayores contaminantes presentes en el agua lluvia. Por otro lado, al analizar el comportamiento de los medios filtrantes como los geotextiles, se encontró que son eficientes removiendo partículas finas.

Varios estudios e investigaciones se han centrado en buscar un dispositivo de tratamiento de aguas lluvias que sea eficiente removiendo tanto partículas finas como gruesas, para ser un tratamiento completo a los contaminantes y desechos del agua lluvia. En esta sección se estudiará uno de dichos dispositivos denominado filtro Up-Flow. Se describirá su funcionamiento y también se hará alusión a algunos estudios realizados por sus diseñadores para medir su eficiencia de remoción y retención de sedimentos.

El filtro Up-Flow es un dispositivo diseñado en la Universidad de Alabama, en un proyecto auspiciado por la EPA. Surgió de la idea de crear un dispositivo de filtración que no se colmatase tan rápido como los filtros de arena, y por ende se disminuyesen los costos asociados al mantenimiento, y se aumentase el volumen de agua lluvia tratado. Adicionalmente cuenta con un sistema de sedimentación por gravedad que le permite remover partículas más gruesas de la esorrentía.

El filtro Up-Flow fue diseñado para atrapar una gran variedad de desechos del agua lluvia, desde basuras hasta hidrocarburos, por lo cual es uno de los dispositivos más versátiles disponibles en el mercado para hacer pre-tratamiento del agua lluvia. También es adecuado para ser incluidos en proyectos de control en la fuente, pues al ser combinado con otros dispositivos realizan un tratamiento significativo al agua proveniente de la esorrentía superficial. Este dispositivo de pre-tratamiento es fabricado y comercializado por la empresa Hydro International. El dispositivo Up-Flow es demandado en lugares donde el agua lluvia presenta altas concentraciones de contaminantes, como zonas industriales.

Una de las ventajas del filtro Up-Flow es que se puede adaptar a los sumideros convencionales, para mejorar su desempeño, en vez de requerir una reconstrucción. Por ejemplo puede ser instalado en un sumidero de 120 centímetros de diámetro e

incluir hasta 7 medios filtrantes. Cada uno de los filtros está diseñado para soportar una carga máxima hidráulica de 25 galones por minuto (Yezhao Cai, 2013). A continuación se muestra un esquema con todos los componentes internos de este dispositivo de pre-tratamiento.

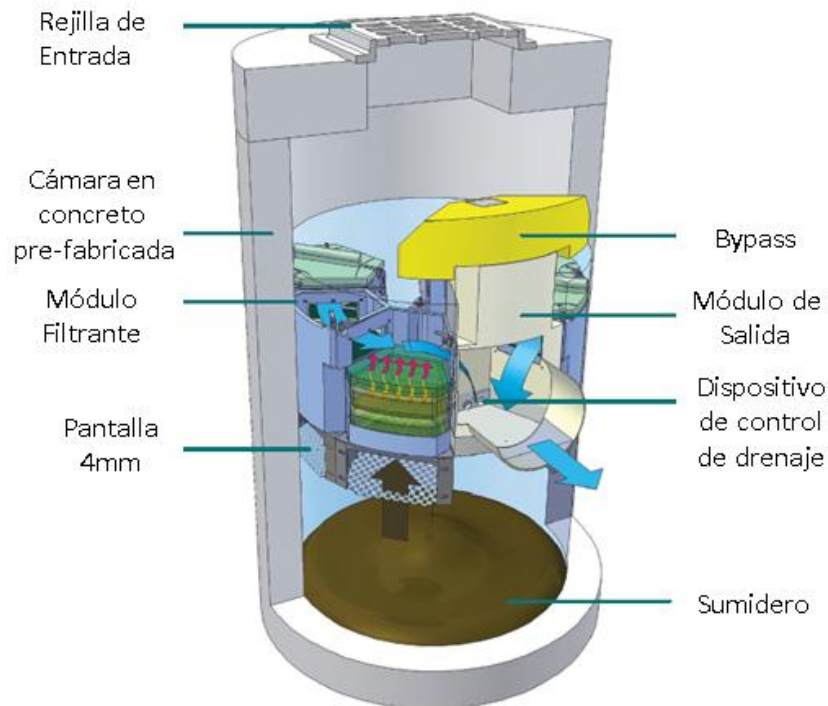


Ilustración 39 Componentes del Filtro Up-Flow (Hydro International, 2008).

Ante un evento de lluvia el agua de la escorrentía ingresa al dispositivo mediante una rejilla o una tubería de entrega, directamente hacia el sumidero. Los sedimentos de gran tamaño se depositan por efecto de la gravedad en el sumidero y los desechos y sustancias con propiedades de flotación permanecen en la superficie. El flujo de agua asciende pasando por la pantalla donde son atrapadas las partículas con tamaño superior. Las partículas más finas son retenidas en unas bolsas en los medios filtrantes. Posteriormente el flujo evacúa el sistema. Durante eventos de lluvia de gran intensidad, donde el caudal sobrepasa el caudal de diseño, el mecanismo de By Pass interviene permitir el flujo del exceso de agua directamente hacia la tubería de salida del dispositivo (Yezhao Cai, 2013).

8.1 Desempeño del Filto Up-Flow

Se han realizado varios estudios en el laboratorio para evaluar el desempeño de este filtro desarrollado en la Universidad de Alabama. Uno de los estudios realizados por Pitt (2006) midió la concentración de partículas finas en el caudal afluente y efluente para varias concentraciones iniciales y diferentes niveles de caudal afluente. En la siguiente ilustración se muestra la concentración y distribución de partículas del caudal afluente, y la distribución de partículas en el caudal efluente. Se puede ver que el Up-Flow tiene un desempeño similar bajo diferentes concentraciones de sedimentos en el caudal afluente y niveles de caudal, lo cual indica que es eficiente ante distintas intensidades y características de eventos de lluvia.

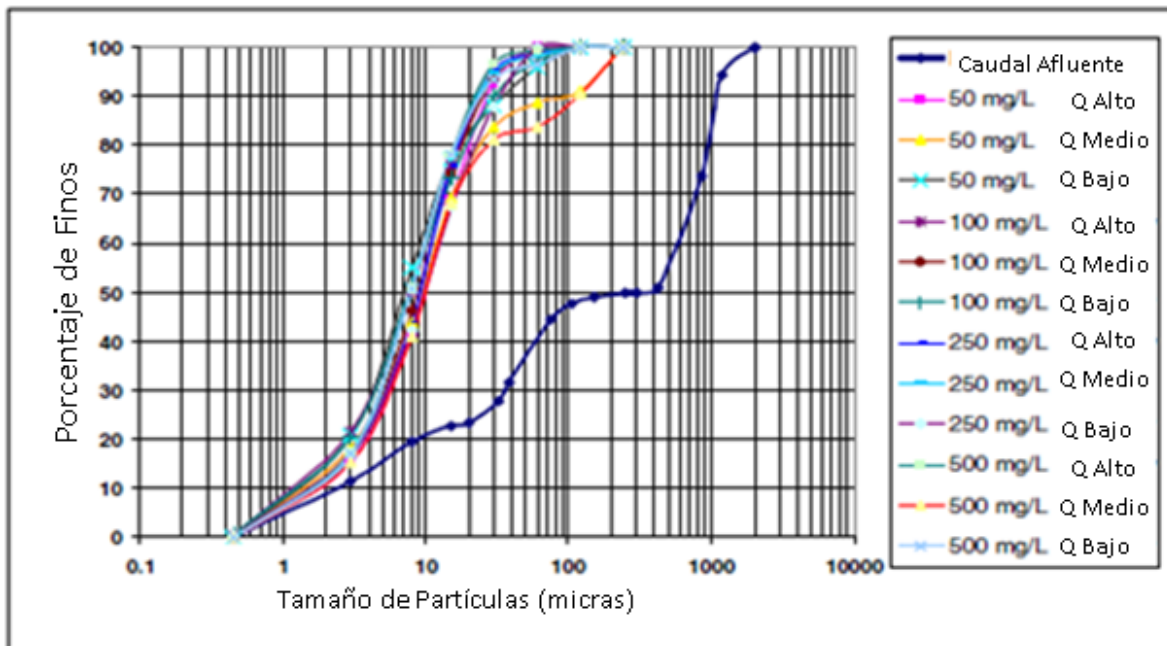


Ilustración 40 Distribución de partículas en caudal Afluente y Efluente. Adaptado de Uday Khambhammettu (2006).

Al medir la influencia del nivel de caudal afluente en la cantidad de sólidos suspendidos removidos por el dispositivo para la misma concentración de sedimentos, se observó que independientemente del nivel de caudal y concentración del caudal afluente, la concentración de sólidos suspendidos en todos los casos tendía a un valor entre 0 y 100 miligramos por litro. Las menores concentraciones en el caudal efluente se observaron para los caudales afluentes más bajos con menor concentración. La reducción de la concentración resultó ser mayor al 70 % cuando la

concentración en el caudal afluente era mayor a 90 miligramos por litro. En la siguiente ilustración se evidencia el fenómeno descrito.

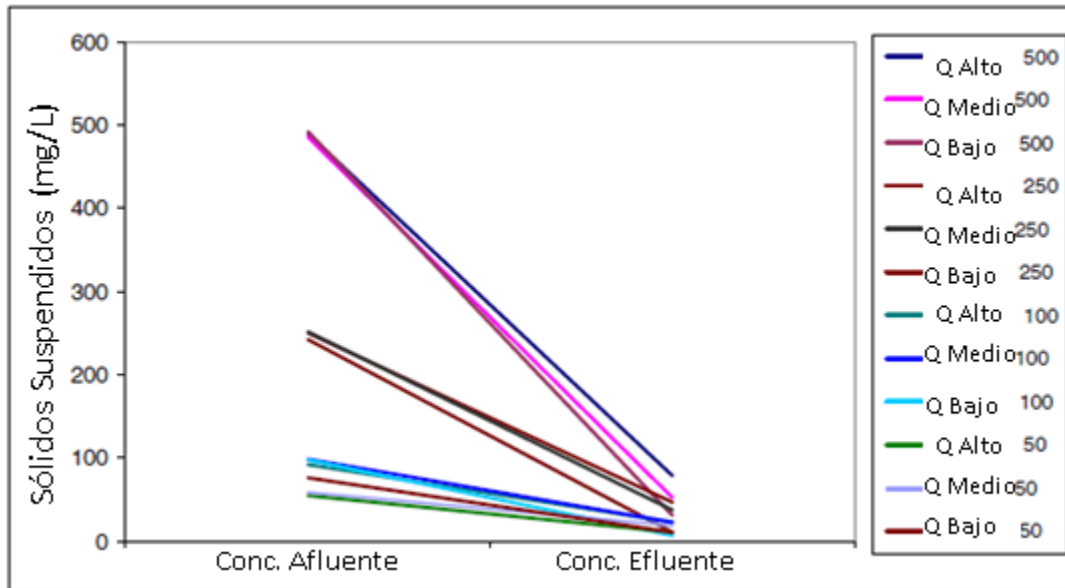


Ilustración 41 Concentración en caudal Afluente y Efluente. Adaptado de Uday Khambhammettu (2006).

Los demás mediciones de eficiencia de remoción de partículas del Up-Flow se muestran en la siguiente tabla. La remoción de partículas gruesas fue superior al 95% para todos los casos evaluados por este estudio en el laboratorio.

Tamaño de Partículas (μm)	Eficiencia de Remoción (%)
TSS	85 – 90
0.45 - 30	50
>30	95 – 100%

Tabla 14 Eficiencias de Remoción Filtro Up-Flow. Adaptado de Uday Khambhammettu (2006).

8.2 Mantenimiento del Filtro Up-Flow

Se podría llegar a pensar que el mantenimiento del dispositivo de pre-tratamiento Up-Flow es complicado debido al hecho de ser un sistema que cumple funciones de sedimentador y filtro a la vez. Sus diseñadores procuraron crear un dispositivo que generara tiempos de operación suficientemente extensos y costos de mantenimiento bajos. Al igual que los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia, analizados anteriormente, el Up-Flow requiere mantenimiento periódico para que su



funcionamiento sea el correcto. Para determinar el itinerario de limpieza del dispositivo se deben realizar inspecciones continuas a lo largo del primer año, posterior a su instalación. La frecuencia del mantenimiento depende de la cantidad de sedimentos a la carga de sedimentos a la cual esté expuesto el dispositivo, producto de la actividad humana desarrollada en la zona.

El mantenimiento del filtro Up-Flow consiste en la realización de los siguientes pasos (Hydro International, 2008):

- Remoción de sedimentos con camión váctor.
- Remoción de aceites (si es necesario) con camión váctor.
- Remoción de desechos flotantes. No requiere camión váctor.
- Reemplazar las bolsas filtrantes.
- Reemplazar el dispositivo de control de drenaje.

El reemplazo de las bolsas filtrantes se determina midiendo el peso de las mismas. Una bolsa filtrante que ha absorbido una suficiente cantidad de partículas finas pesa alrededor de 20 kilogramos en estado saturado. Los filtros deben ser inspeccionados después de un evento de lluvia intenso para determinar si requieren ser reemplazados. En el siguiente esquema se muestra el proceso de remoción de sedimentos con ayuda de la sonda del camión váctor, y el reemplazo de las bolsas filtrantes y el dispositivo de control de drenaje, que se hace manualmente.



Ilustración 42 Mantenimiento Filtro Up-Flow. Tomado de Hydro International (2008).

La empresa Hydro International con base en su experiencia en campo de la instalación de filtros Up-Flow, propone una tabla de frecuencias de realización de actividades de inspección y mantenimiento como la que se muestra a continuación.

Actividad	Frecuencia
Inspección	Cada 6 meses luego del primer año de funcionamiento.
Remoción de aceites y desechos flotantes	Mínimo 2 veces por año, o más según lo determine el itinerario de mantenimiento.
Remoción de sedimentos	Mínimo 2 veces por año, o más según lo determine el itinerario de mantenimiento.
Reemplazo de las bolsas filtrantes	Mínimo 1 vez por año, o más según lo determine el itinerario de mantenimiento.
Reemplazo del dispositivo de control de drenaje	Mínimo 1 vez al año

Tabla 15 Recomendaciones de frecuencia de mantenimiento. Tomado de Hydro International (2008).

8.3 Casos de Estudio

8.3.1 Tuscaloosa, Estado de Alabama

Un ejemplo de un caso de aplicación del dispositivo de pre-tratamiento Up-Flow es el de la instalación de un dispositivo en un parqueadero de la ciudad de Tuscaloosa en el Estado de Alabama en Estados Unidos, realizado por Pitt (2013). El filtro Up-Flow hacía tratamiento al agua lluvia captada en un área de 3600 m² aproximadamente. Los sedimentos transportados por el agua lluvia eran provenientes principalmente de la superficie de capa asfáltica del parqueadero, andenes y construcciones aledañas. El agua lluvia removida de sedimentos y material contaminante era descargada posteriormente al río *Black Warrior*.

Durante la toma de datos se tuvieron en cuenta los hidrogramas unitarios, la calidad del agua y los sedimentos acumulados en el sumidero del Up-Flow. Al comparar la concentración de los caudales afluentes y efluentes se encontró que el dispositivo era efectivo removiendo partículas de todos los tamaños, como se muestra en la siguiente ilustración. Se puede apreciar una disminución significativa de la masa de los sedimentos que ingresan al dispositivo, siendo las partículas gruesas la que representan la mayor disminución de masa.

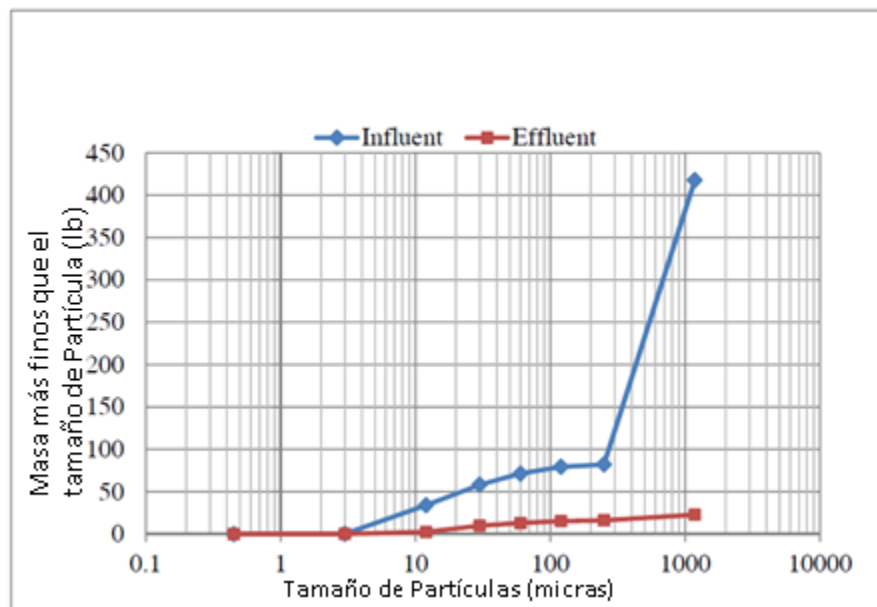


Ilustración 43 Masa acumulada según tamaño de partículas. Adaptado de Yezhao Cai (2013).

Durante la toma de muestras ante un evento en el cual se presentaba un caudal pico, se evidenció que los desechos flotantes aún eran retenidos, gracias al sistema de sifón incluido en el mecanismo de By-Pass; y los sedimentos también seguían



depositándose en el sumidero. Sin embargo se detectó el fenómeno de resuspensión de sedimentos en el sumidero ante la influencia del caudal pico. El efecto de lavado provocaba que algunos sedimentos retenidos salieran del dispositivo, pero su acción disminuía cuando de lámina capa de agua encima de la capa superficial de los sedimentos aumentaba, tal como lo demostraron Pitt y Ávila (2011). El hecho de que las bolsas filtrantes estuviesen llegando al final de su vida útil influenciaba en la cantidad de sedimentos que podían estar sometidos al fenómeno de lavado.



9 Componentes de Limpieza y Mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento de Agua lluvia.

El mantenimiento es un factor decisivo en el desempeño de los dispositivos de tratamiento de agua lluvia, ya sean sedimentadores o filtros. Como se discutió anteriormente, la no realización de mantenimiento a los dispositivos analizados causa taponamiento de los dispositivos sedimentadores y colmatación de los filtros. Los dispositivos analizados anteriormente como el sumidero convencional y el vórtice hidrodinámico son diseñados para almacenar una cantidad determinada de sedimentos en sus cámaras de almacenamiento; si la cámara de almacenamiento no es limpiada, el funcionamiento del desempeño se verá altamente comprometido, al no poder con su objetivo de remover sedimentos presentes en el agua lluvia. Si un dispositivo de pre-tratamiento de agua lluvia alcanza su máxima capacidad de almacenamiento, se expone a fenómenos de resuspensión de sólidos, o simplemente no ejerce ningún tipo de tratamiento, sirviendo simplemente como un punto de inspección en el que la concentración de sedimentos es la misma en el caudal afluente y efluente.

Los diseños de los dispositivos de pre-tratamiento de aguas lluvias deben acomodarse a las condiciones de aquellos lugares donde serán instalados y a los métodos de limpieza y mantenimiento existentes. Por ejemplo la remoción de sedimentos de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia típicamente se realiza con la ayuda de un camión váctor, el cual succiona los sedimentos de la cámara de alimento con una sonda, utilizando un mecanismo de succión. A continuación se listan algunos de los factores que deben ser tenidos en cuenta por los fabricantes de los dispositivos de pre-tratamiento de aguas lluvias a la hora de diseñar la geometría y la estructura de sus productos (Hunt, 2008).

- Los dispositivos deben estar provistos de un mecanismo de acceso superficial como una tapa de alcantarilla para poder llevar a cabo las inspecciones y el mantenimiento rutinario.
- Las sondas de los camiones váctor tienen una longitud máxima de 5 metros, por lo cual deben los dispositivos de pre-tratamiento deben ser diseñados teniendo en cuenta esta restricción.
- Los componentes internos de los dispositivos deben ser diseñados de tal manera que no entorpezcan los procesos de inspección y mantenimientos, es



decir, que estén debidamente dispuestos dentro del dispositivo para que los operarios encargados de la limpieza no encuentren inconvenientes y pueden realizar una limpieza adecuada del dispositivo.

- Se recomienda que el tamaño del punto de acceso superficial a los dispositivos tenga como mínimo un diámetro de 75 centímetros, espacio adecuado para que una persona pueda ingresar al sistema en caso de que algún tipo de reparación estructural sea requerida, y también para que la sonda del camión váctor así como los demás instrumentos empleados durante la limpieza no tengan restricciones de movimiento. Los dispositivos de pre-tratamiento que contienen medios filtrantes al igual que los dispositivos hidrodinámicos pueden requerir puntos de acceso de mayor diámetro, ya que tienen accesorios adicionales dentro de su sistema.

Una vez el dispositivo de pre-tratamiento de agua lluvia es instalado en el punto de captación de agua lluvia o conectado al sistema de drenaje pluvial, es responsabilidad del propietario del predio, si se instala en una propiedad privada, o de la empresa de alcantarillado, si hace parte del sistema de drenaje pluvial urbano, realizar el mantenimiento del dispositivo. La limpieza de los dispositivos se debe realizar cuando se cumpla alguno o varios de los siguientes requerimientos:

- Cuando lo indique el itinerario de limpieza establecido por el fabricante del dispositivo.
- Cuando el volumen de sedimentos acumulados en el sumidero de los dispositivos alcance en nivel establecido por el fabricante, para el cual se debe realizar el trabajo de limpieza del sumidero.
- Los medios filtrantes deben ser reemplazados cuando así lo especifique el fabricante, según los cálculos realizados de su expectativa de vida útil.

9.1 Métodos de Limpieza

El mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento de aguas lluvias, dependiendo del nivel de complejidad de sus componentes, debe ser realizado por personal capacitado para realizar dicha labor. A continuación se listan los principales métodos de limpieza de los dispositivos de pre-tratamiento.

- **Manual:** Realizado por personal entrenado de una de una empresa de mantenimiento que cuenta con la indumentaria de seguridad adecuada y elementos como: herramienta de elevación de la tapa superior de sumidero, sonda de sedimentos, linterna y formato de toma de datos.
- **Con equipo:** Típicamente son utilizados los camiones váctor equipados con mecanismos de succión para llevar a cabo esta labor.

Debido a que la mayor acumulación de sedimentos, basuras y elementos como hojas ocurre durante la temporada de invierno, es altamente recomendable realizar el mantenimiento en aquellos meses en los que prevalece el tiempo seco, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de los sumideros durante los meses de lluvia.

9.1.1 Camión Váctor

Los camiones váctor son los equipos más ampliamente utilizados para llevar a cabo los procesos de mantenimiento de los dispositivos de tratamiento de agua lluvia. Su funcionamiento se basa en el principio del vacío, generado por una bomba, que le permite crear una gran fuerza de succión para remover los sedimentos de los sumideros. El aire de succión recircula continuamente en el sistema, siendo limpiado de sedimentos para no alterar el funcionamiento de la bomba. Los camiones váctor se diferencian por el volumen de sedimentos que pueden almacenar y la potencia de la bomba de succión.

En la siguiente ilustración se muestra el perfil de un camión váctor típico donde se evidencian sus componentes principales.

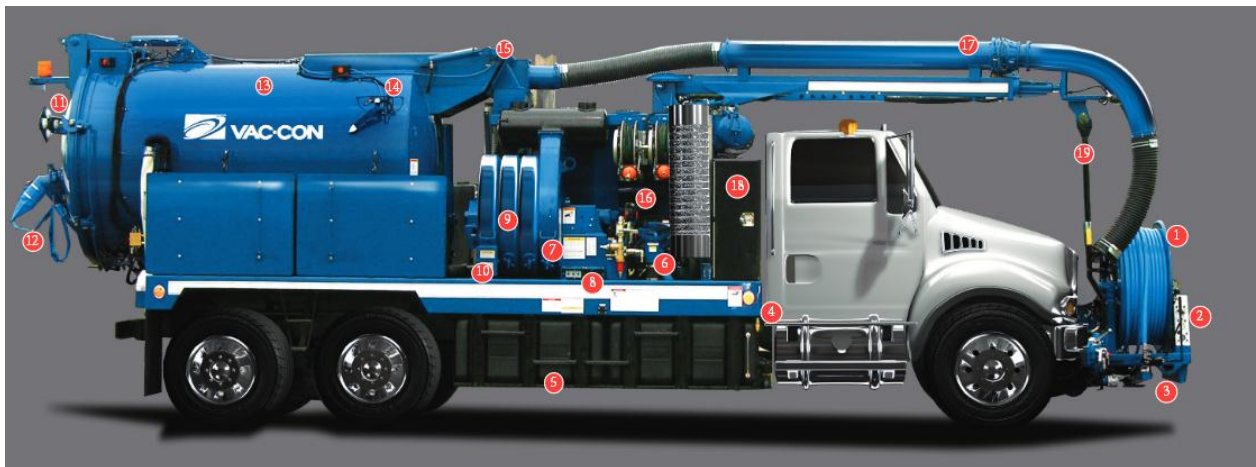


Ilustración 44 Perfil de Camión Váctor. Tomado de Vac-Con®.



Con base en la ilustración se nombran algunos de sus principales componentes:

Componentes del Camión Váctor	
1	Montaje de manguera flexible
2	Punto de control del funcionamiento del camión
5	Tanque de almacenamiento de agua
9	Bomba generadora de vacío por centrifugado
10	Limpiador de sedimentos y partículas
13	Tanque de almacenamiento de sedimentos

Tabla 16 Componentes principales del camión váctor.

9.2 Itinerario de Limpieza

Con el fin de llevar un control sobre los mantenimientos que se deben realizar en los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia, las empresas de mantenimiento, así como las empresas distribuidoras de dispositivos de tratamiento de aguas pluviales, recomiendan generar un itinerario de limpieza. Dicho itinerario se establece con base en las inspecciones realizadas durante el primer año de funcionamiento de los dispositivos, luego de haber sido instalados. Este itinerario varía de dispositivo a dispositivo, y de lugar a lugar, puesto que el mantenimiento que requiere un dispositivo depende de las condiciones del área de influencia del mismo. Por ejemplo, un dispositivo localizado en una zona industrial requerirá una mayor frecuencia de mantenimiento que uno situado en una zona residencial.

El desarrollo de un programa de mantenimiento efectivo toma tiempo, y no depende sólo de las características del dispositivo de aguas lluvias sino de muchas otras variables como el diseño del mismo, el tamaño, la localización geográfica, el uso de la tierra, entre otras. El mejor plan de mantenimiento se logra cuando este se familiariza con el comportamiento de los dispositivos a lo largo del tiempo (Houle, Roseen, Ballester, Puls, & Jr., 2013).



9.3 Importancia de realizar el mantenimiento

El adecuado mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento y demás dispositivos de tratamiento de aguas lluvias es importante desde el punto de vista funcional ya que evita que se obstaculicen las entradas o las salidas de las estructuras, al igual que evitar que algunos desechos contaminados lleguen a los cuerpos de aguas receptores. Desde el punto de vista sanitario y de salud pública la limpieza oportuna de los dispositivos previene la descomposición de materia orgánica residente en los sumideros, y por ende la reducción en la cantidad de oxígeno disuelto, y el posterior incremento en la cantidad de bacterias en los flujos de aguas de alcantarillado. Según la empresa de mantenimiento *SEMCOG* los altos índices de oxígeno disuelto y bajos niveles de población de bacterias son cruciales para no perjudicar el equilibrio en los ecosistemas acuáticos. Adicionalmente el mantenimiento periódico de los dispositivos garantiza su máxima eficiencia de operación, mantiene un precio estable del mantenimiento del mismo y asegura su durabilidad durante su vida útil.

La no realización del mantenimiento oportuno a los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia trae problemas de desempeño del dispositivo, deterioro y problemas de saneamiento como la generación de mosquitos, de poblaciones de bacterias y de descomposición de desechos orgánicos (NJDEP, 2004).

9.4 Disposición de sedimentos

Dependiendo del mecanismo utilizado para llevar a cabo el mantenimiento de los dispositivos, la disposición de los mismos se clasifica en dos grupos (SEMCOG).

- **Remoción de agua en el sumidero:** Típica de bombas que pueden extraer el agua sin remover los desechos que se encuentran en el fondo del sumidero. La disposición final del agua depende de las regulaciones concernientes a las zonas de realización de los mantenimientos. Usualmente el agua puede ser descargada al sistema de alcantarillado o aplicada al suelo circundante al sumidero.
- **Remoción de agua mezclada con sólidos:** Cuando en el proceso de mantenimiento el agua se mezcla con los sedimentos que se encuentran en el sumidero, se debe hacer un tratamiento cual si se tratase de un desecho



industrial, llevando dicha mezcla obtenida con el camión váctor a una planta de tratamiento, puesto que los sedimentos pueden llegar a contener metales como el plomo, que representan una amenaza para los ecosistemas acuáticos y los cuerpos de agua receptores.

9.5 Reglamentación del Mantenimiento para los dispositivos de pre-tratamiento

En países donde el empleo de prácticas de manejo sostenible de aguas lluvias se ha generalizado como en Estados Unidos y Australia, existen entidades creadas con el fin de evaluar la efectividad y el funcionamiento de los dispositivos de tratamiento de agua lluvia. Entidades como el Departamento de Protección Ambiental de New Jersey emiten certificados de aprobación de los dispositivos con base en pruebas realizadas en laboratorio. En dichos documentos se especifica la efectividad del dispositivo en cuanto a remoción de sedimentos, y se compara con lo establecido por el fabricante para establecer su veracidad. Adicionalmente se presenta un plan de mantenimiento con base en las inspecciones realizadas, así como procedimientos indispensables en cualquier tipo de dispositivo. Los procedimientos generales para cualquier tipo de dispositivo de pre-tratamiento de agua lluvia se describen en la siguiente tabla.

¿Cuándo se requiere inspeccionar?	Luego de la instalación y antes de iniciar el funcionamiento del dispositivo.
	Inmediatamente después de un derrame de aceite, combustible u otro tipo de químico.
	Siempre que el itinerario de limpieza lo indique.
¿Cuándo se requiere mantenimiento?	Cuando la altura de los sedimentos alcance el 75% del el almacenamiento total del dispositivo.
	Inmediatamente después de producirse derrames de combustibles, aceites o químicos.
Si no se realiza mantenimiento	Eficiencia de reducción de sedimentos y basuras se reduce.
	Basura puede obstruir la entrada al dispositivo.
	Agua de la zona de captación del dispositivo se estancará en la superficie, generando posibles inundaciones.

Tabla 17 Requerimientos generales de mantenimiento. Adaptado de Imbrium Systems Corporation (2011).



9.6 Problemas de la implementación de la inspección y el mantenimiento

Los procesos de operación y mantenimiento de los dispositivos de tratamiento pueden acarrear problemas cuando no se establecen la responsabilidad de las partes. En países o ciudades donde no existe jurisdicción acerca de los procesos de operación y limpieza de los dispositivos de tratamiento se pueden generar problemas como los siguientes (Hampshire):

- ¿El responsable del mantenimiento es un agente público o uno privado?
- ¿Quién se hace cargo de la financiación de los costos de limpieza y mantenimiento?
- ¿Los equipos disponibles son aptos para realizar el mantenimiento?

Para dar respuesta a estos y otros interrogantes que surgen entre las partes cuando se va a realizar el proceso de mantenimiento, los países en donde el uso de dispositivos de pre-tratamiento, y en general la aplicación de prácticas de drenaje sostenible se ha extendido, se han creado entidades encargadas de sacar normativa en la materia. Dichas entidades son encargadas de preparar guías metodológicas acerca de los procesos de inspección, operación y mantenimiento de los dispositivos y técnicas de drenaje sostenible. Un ejemplo de dichas entidades es el Departamento de Protección Ambiental del Estado de New Jersey, en Estados Unidos; este ente regulador además de crear guías metodológicas de los dispositivos de pre-tratamiento, genera certificados de laboratorio en los cuales avala o rechaza la utilización de los dispositivos más comunes en el mercado. Los certificados además incluyen toda una guía acerca de los procesos de instalación operación y mantenimiento del dispositivo de pre-tratamiento de agua lluvia, objeto de análisis por parte del ente regulador.

9.7 Mantenimiento de dispositivos de pre-tratamiento

Los sumideros convencionales de los sedimentadores permiten que el agua proveniente de la escorrentía superficial entre al sistema de conducción de aguas subterráneas, o a un sistema predial de tratamiento de agua lluvia para realizar control en la fuente. Muchos de los sumideros disponen de poco volumen para



retener sedimentos. Al ser una trampa de sólidos, previenen el taponamiento del alcantarillado, así como la llegada de este tipo de sólidos, que usualmente representan una fuente de contaminación, a los cuerpos de agua receptores. Por ello se hace necesario realizar un mantenimiento periódico para garantizar el correcto funcionamiento de estos dispositivos. La remoción de los sedimentos de los sumideros contribuye a mejorar la calidad del agua que llega a los alcantarillados, ya que se reducen los sólidos suspendidos al igual que la carga de partículas contaminantes que llegan a los cuerpos de agua receptores.

A continuación se muestran algunas de las ventajas y desventajas de realizar mantenimiento a los sumideros de almacenamiento de sedimentos del agua lluvia.

Ventajas	Desventajas
Es una manera rentable de prevenir el transporte de sedimentos y material contaminado hacia los cuerpos de agua receptores.	Pueden contener material que requiere un tratamiento especial para su disposición final.
Garantiza el correcto funcionamiento del dispositivo.	Difíciles de limpiar en zonas de alto flujo vehicular.
Mejora la calidad del agua transportada hacia aguas abajo.	En países con estaciones, su mantenimiento se dificulta durante el invierno.
Garantiza la remoción y retención de agentes contaminantes en el agua lluvia.	
Reduce el riesgo de resuspensión de los sedimentos atrapados.	
Disminuye el riesgo de falla del dispositivo	

Tabla 18 Ventajas y Desventajas de realizar mantenimiento. Adaptado de NJDEP (2004) y EPA (1999).

Dentro de las recomendaciones de la Agencia de Protección del Ambiente (EPA), por sus siglas en inglés, se debe realizar una inspección a los sumideros por lo menos una vez al año para determinar si es necesario llevar a cabo el mantenimiento. El mantenimiento se debe hacer cuando la altura de los sedimentos sea superior a una tercera parte de la altura dispuesta para el almacenamiento (EPA, 1999).

9.8 Caso de Estudio

En el Estado de New Jersey Junghoon y Qizhong (2011) realizaron un estudio sobre 12 dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia para determinar su intervalo de limpieza. Los 12 dispositivos eran vórtices hidrodinámicos, instalados en 8 puntos diferentes a lo largo de las autopistas del Estado, donde se consideraba estaban sometidos a diferentes cargas de sedimentos.

Durante las inspecciones rutinarias se inspeccionaba la altura de los sedimentos en el sumidero, como factor de determinación de la necesidad de realizar mantenimiento al dispositivo. Con el fin de trabajar bajo las mismas condiciones, todos los dispositivos fueron limpiados, previamente al inicio de las inspecciones. La toma de datos se realizó en intervalos de dos meses durante los primeros 18 meses, y luego en intervalos de 3 meses.

Durante los tres años del estudio no se realizó mantenimiento a ninguno de los dispositivos, a menos de que fuese necesario. A continuación se muestra los resultados de las mediciones. El dispositivo que estaba sometido a una mayor carga de sedimentos, reportó una altura de sedimentos de 3.5 pies, 107 centímetros. El sumidero con menor volumen de sedimentos capturados en su sumidero reportó una altura de tan sólo 3 centímetros, luego de los 3 años de haberse realizado la limpieza inicial.

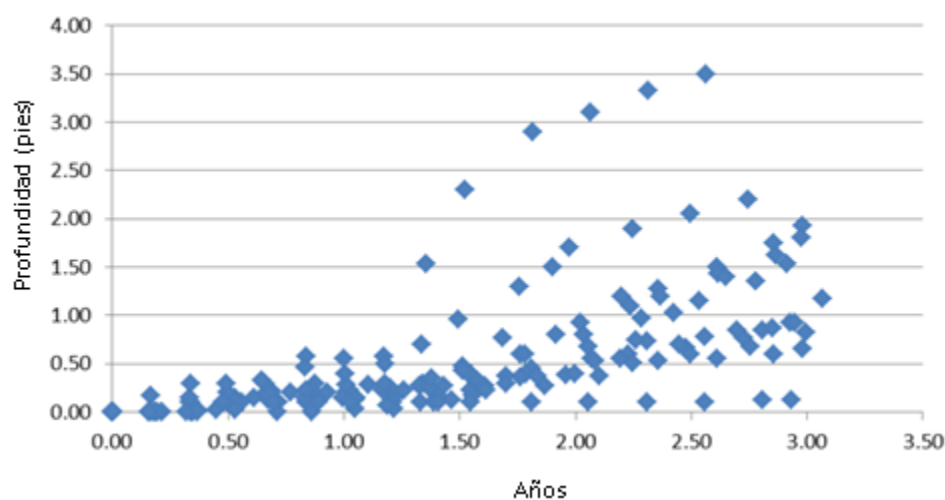


Ilustración 45 Acumulación de sedimentos. Adaptado de Guo (2011).



Las diferencias en la altura de los sedimentos medidas para los doce dispositivos se podían explicar por la influencia de variables como el nivel de tráfico en la autopista, los desechos producto de las actividades humanas desarrolladas en la zona, las estaciones, el deshielo en los meses de invierno, y el control en la fuente. Con base en la identificación de las variables más influyentes en la acumulación de sedimentos en el sumidero, se establecieron algunos criterios bajo los cuales era posible determinar el intervalo de mantenimiento para un dispositivo de pre-tratamiento de agua lluvia.

- El estado de la infraestructura de drenaje existente puede afectar el desempeño de los dispositivos de pre-tratamiento. Si existen fugas en las tuberías u obstrucciones, no llegará la cantidad necesaria de agua lluvia al dispositivo de remoción.
- La cantidad de sedimentos transportados por la lluvia y posteriormente capturados por el dispositivo de tratamiento, se aumenta notoriamente cuando no se realiza control en la fuente de los desechos generados por la construcción de obras civiles y erosión del suelo. Por ende la frecuencia de mantenimiento del dispositivo debe aumentar.
- Si el nivel de tráfico en la zona donde se encuentra el dispositivo es constante, se puede determinar un intervalo de limpieza en función del tráfico que circula.



10 Viabilidad de la implementación de dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia

El análisis de la viabilidad desde el punto de vista económico de instalar y mantener el funcionamiento de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia se hará a través del análisis de un caso de estudio, en el que se centraron en los costos del mantenimiento de unos sumideros convencionales, y en el costo de barrer parqueaderos, para disminuir el porcentaje de contaminantes que eran transportados por la escorrentía.

En el año 2012 se instauró un plan de restauración de la cuenca cercana a la ciudad de Nashua, en New Hampshire (Estados Unidos), debido a los notables aumentos de la concentración de fósforo. Los análisis de los focos de la contaminación mostraron que los desechos de fósforo se originaban principalmente en parqueaderos y áreas impermeables de la ciudad aledañas a sitios comerciales e industriales. Con el fin de disminuir los niveles de fósforo que eran transportados por el agua lluvia hacia la cuenca que proveía de agua potable a la ciudad, se propuso intensificar el mantenimiento de los sumideros así como la frecuencia de limpieza de calles y parqueaderos.

En el informe preparado por Comprehensive Environmental (2013) se evalúa la viabilidad del aumento de la frecuencia de barrido en las calles y la limpieza de los sumideros utilizando los equipos tecnológicos más eficientes, desde un enfoque económico.

Durante las investigaciones previas a la elaboración del informe se determinó que muy pocos propietarios de parqueaderos o de sumideros de tratamiento de agua lluvia realizaban el mantenimiento adecuado. En cuanto al barrido, se encontró que aunque muchos propietarios contrataban los servicios de empresas de mantenimiento, las limpiezas no se hacían con los equipos adecuados. Algunos otros utilizaban método manuales, y otros cuantos se abstendían de hacerlo.

El mantenimiento de los sumideros se hacía habitualmente cuando se necesitaba, es decir, cuando los sedimentos requeridos alcanzaban la máxima capacidad del sumidero, desconociendo las recomendaciones de los fabricantes de cuándo realizar el mantenimiento.



El análisis de viabilidad económica contempló dos posibilidades. La primera consistía en contratar una empresa externa que realizara las labores de limpieza de los sumideros y barrido. La segunda posibilidad consistía en que la empresa de servicios públicos de la ciudad pudiera adquirir un camión váctor y una barredora de aire regenerativo para llevar a cabo la limpieza. A continuación se muestra una comparación entre los precios asociados a la implementación de cada una de las dos alternativas. El área de los parqueaderos con limpiar corresponde a un valor de 5200 m² aproximadamente. Se estiman 4 sumideros en cada uno de los 232 parqueaderos en la ciudad, que corresponden a un total de 928 sumideros que deben ser limpiados. En la tabla se muestra en rango del costo total del mantenimiento y el costo discriminado por libra de total de partículas (TP) y Total de Sólidos Suspendidos (TSS) removidos.

	Barrido				Limpieza Sumideros			
	Empresa de Mantenimiento		Comprando Equipos		Empresa de Mantenimiento		Comprando Equipos	
Costo (usd)	\$ 83.000	-	\$ 103.000	\$ 130.000	\$ 83.000	-	\$ 175.000	\$ 143.000
\$/lb TP	\$ 1.400	-	\$ 1.700	\$ 2.100	\$ 1.000	-	\$ 2.000	\$ 1.700
\$/lb TSS	\$ 5	-	\$ 6	\$ 8	\$ 3	-	\$ 6	\$ 5

Tabla 19 Comparación de precios alternativas de mantenimiento. Adaptado de Comprehensive Environmental, Inc. (2013).

Los valores de la tabla corresponden a un mantenimiento realizado dos veces por año. Como se puede apreciar en la tabla resulta más rentable para la comunidad contratar los servicios de una empresa externa que realice los procedimientos de mantenimiento tanto de barrido de las calles como limpieza de los sumideros. Los costos asociados con esta alternativa se encuentran en un rango de precios, dado los descuentos que ofrecen las empresas por una mayor cantidad de propietarios que contratasen el servicio de mantenimiento.

La solución consistente en comprar los equipos para realizar el mantenimiento resultaría más rentable siempre y cuando la frecuencia del mantenimiento se aumentara. Sin embargo aumentar la frecuencia de limpieza y de barrido significa aumentar los costos de los propietarios de los parqueaderos y sumideros que deben pagar por los servicios. Dado el nivel de carga de sedimentos generada en promedio en la ciudad, realizar las labores de mantenimiento y barrido dos veces al año es



rentable para los propietarios y reduce las concentraciones de fósforo que llegan a la cuenca, de donde se abastece la ciudad de agua potable.

Debido a que la realización del mantenimiento de los sumideros y el barrido de los parqueaderos no es una actividad regulada por alguna entidad ambiental estatal, la viabilidad del proyecto depende en gran medida de la disposición de los propietarios de los almacenes ubicados en las zonas industriales y comerciales, donde se demostró se produce la mayor concentración de fósforo que contamina la cuenca. Paralelamente a la proposición del proyecto de contratación de una empresa de mantenimiento que realice las labores de barrido y limpieza de los sumideros, se deben iniciar campañas de concientización de las personas del impacto ambiental de la no realización del mantenimiento de la superficies impermeables y de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia en los cuerpos de agua receptores.



11 Unificación de métodos de realización y presentación de estudios de desempeño de dispositivos de pre-tratamiento

Dada la amplia oferta en el mercado de dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia, varias agencias ambientales han incorporado pruebas de laboratorio en sus procedimientos para poder aprobar el uso de los dispositivos de agua lluvia (Pitt S. E., 2008). Sin embargo, una década atrás aún no existía claridad acerca de los procedimientos adecuados para poder medir la eficiencia de los dispositivos de pre-tratamiento durante las pruebas de laboratorio. El hecho de que no existían protocolos acerca de la manera de evaluar el desempeño de los dispositivos, se prestaba para que los fabricantes de los dispositivos manipulasen los ensayos para cumplir con los objetivos de remoción y retención de sedimentos. La implementación de una metodología estándar de evaluación del desempeño de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia en el laboratorio de los entes reguladores del manejo del agua lluvia se hacía imperativa.

No fue sino hasta el año 2009 que se creó una guía metodológica de los procedimientos que se debían llevar a cabo en el laboratorio para poder certificar un dispositivo de pre-tratamiento de agua lluvia. Dada la amplia variedad de dispositivos disponibles en el mercado, esta metodología permitiría a los clientes realizar una verdadera comparación entre los dispositivos y discernir acerca de cuál se acomodaba más a sus necesidades. Esta metodología de evaluación fue desarrollada en conjunto por la *American Society of Civil Engineers (ASCE)*; *Water, Wastewater and Stormwater Council (WWSC)*; y por *Wet Weather Flow Technology Committee of Urban Water Resources Research Council (UWRRC)*.

La guía metodológica establece unos criterios para llevar a cabo los ensayos de eficiencias de los dispositivos en el laboratorio, así como condiciones bajo las cuales deben hacerse los ensayos. Los resultados obtenidos por este procedimiento son respaldados por un modelo estadístico. El objetivo de este protocolo de evaluación de dispositivos de pre-tratamiento además de generar una metodología que permitiese comparar los dispositivos entre sí, era el de que los laboratorios mostraran los resultados de una manera más comprensible para el público en general.

El protocolo de evaluación de dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia contempló todas las variables que pudiesen afectar los resultados de la medición del desempeño general de los dispositivos. Como medida de estandarización de la presentación de los resultados, el comité integrado por las diferentes autoridades en



la materia resolvió establecer un formato de presentación de resultados bajo el cual se registrarían todos los estudios de la evaluación del desempeño de dispositivos de pre-tratamiento a partir de la fecha. Dicho formato de presentación se muestra en la siguiente tabla.

Ítem	Descripción
Resumen	Una breve descripción del contenido del documento y de los resultados obtenidos.
Definiciones	Cuando se ameriten dado el caso de estudio de alguna propiedad o fenómeno no convencional.
Condiciones del sitio	Tales como tipo de suelo, características del lugar del estudio, tipos de desechos.
Descripción de la tecnología	Incluye parámetros como dimensiones, operación, componentes, mantenimiento y costo.
Metodologías y Procedimientos	Granulometría de las partículas, instrumentos de medición, caudales afluentes, tiempos de medición, montajes.
Descripción y medición del evento de lluvia	De ser requerido parámetros como Intensidad, duración, fecha del fenómeno, análisis de los hidrogramas.
Resultados y Discusión	Medición de concentración de sedimentos en el caudal afluente y efluente, acompañado de análisis estadístico. Determinación de límites de desempeño y porcentajes de eficiencia de remoción y retención. Análisis de eventos individuales. Recomendaciones de mantenimiento.
Conclusiones	Consolidación de los resultados y recomendaciones.

Tabla 20 Formato de presentación de estudios de dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia. Adaptado de Robert M. Roseen (2009).



12 Conclusiones

Con base en la extensa revisión bibliográfica realizada durante la realización de este proyecto, se pueden generar las siguientes conclusiones acerca del desempeño y mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia.

- La contaminación en el agua lluvia es un problema real que afecta a todas las urbes donde se haya impermeabilizado la superficie para darle paso a desarrollo urbano. En algunos lugares se evidencia mayor concentración de contaminantes que en otros, dependiendo de las actividades humanas desarrolladas y del período seco previo al evento de lluvia.
- Los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia se han perfilado como una solución viable y efectiva para evitar la contaminación de los cuerpos naturales de agua receptores.
- La correcta caracterización del fenómeno del primer lavado, es fundamental para poder establecer la cantidad de sedimentos y contaminantes que los dispositivos de pre-tratamiento deben remover y retener del agua lluvia.
- Los dispositivos de pre-tratamiento sedimentadores son eficientes removiendo partículas gruesas, pero no tanto removiendo partículas finas, que típicamente están asociadas con los contaminantes presentes en el agua lluvia.
- Las estructuras de filtración tienen el problema de que se colmatan rápidamente, por ende su vida útil es corta y su mantenimiento es complicado.
- El dispositivo de sedimentación más eficiente es el vórtice hidrodinámico, ya que garantiza el mayor tiempo de residencia del flujo en su interior y es el único que tiene el sumidero aislado hidráulicamente de sus demás componentes. Al tener el sumidero separado y protegido, no expone los sedimentos almacenados al fenómeno de resuspensión y lavado, caso contrario de la cámara de inspección estándar.
- El geotextil no tejido es más eficiente que el filtro de arena desde el punto hidráulico, puesto que su estructura no altera el flujo del agua, al ser muy delgada en comparación con los espesores típicos de un filtro de arena.
- La técnica de barrido de calles resulta ser muy eficiente si se utilizan los equipos adecuados, que resultan ser eficientes en capturar partículas finas de la superficie. Sin embargo su eficiencia está ligada a la ocurrencia de los eventos de lluvia, pues como se mostró, su efecto en la disminución de contaminantes no es significativo si el evento de precipitación ocurre mucho después de haber barrido la superficie.



- El dispositivo mixto de filtración y sedimentación Up-Flow resulta ser la mejor opción en cuanto a dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia a nivel predial, pues muestra eficiencias de remoción superiores al 90% y posee un medio de filtración efectivo que le brinda una mayor vida útil. Adicionalmente una de sus mayores ventajas es que puede ser puesto en funcionamiento en estructura de drenaje existente.
- Aunque el propósito de este proyecto no era evaluar la viabilidad económica de la implementación y mantenimiento de los dispositivos de pre-tratamiento de agua lluvia, el factor económico resulta ser decisivo a la hora de escoger uno u otro dispositivo. El caso de estudio de presentado por Comprehensive Environmental (2013) acerca de la ciudad de Nashua es un ejemplo claro de que realizar un drenaje sostenible del agua lluvia resulta ser costoso, sobre todo porque los particulares son quienes deben acarrear dichos costos.
- A lo largo de este proyecto se ha demostrado la eficiencia en cuanto a remoción de sedimentos y contaminantes por partes de los dispositivos de pre-tratamiento. Sin embargo la implementación y ejecución de proyectos de drenaje de aguas lluvias sostenibles debe ir de la mano con un plan de sensibilización y concientización de la población acerca de la importancia de preservar los cuerpos de agua naturales que se ven afectados por los agentes contaminantes transportados por el agua lluvia.



13 Bibliografía

- Adam Howard, O. M. (2009). Assessment of Standard Sumps for Stormwater Treatment. World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers © 2009 ASCE.
- Adam K. Howard, O. M. (2012). Hydraulic Analysis of Suspended Sediment Removal from Storm Water in a Standard Sump. *Journal of Hydraulic Engineering* .
- ADEQ, A. D. (2009). Implementation Guidelines for Drywells That Use Flow Control and / or Pretreatment Technologies Under the Aquifer Protection Program General Permit Types 2.01 and 2.04.
- Anil Acharyaa, T. C. (2010). Characterization of First Flush Phenomenon in an Urban Stormwater Runoff: a Case study of Flamingo Tropicana Watershed in Las Vegas Valley. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change.
- Avila, H. P. (2011). Development of Effluent Concentration Models for Sediment Scoured from Catchbasin Sumps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Avila, H. R. (2008). Factors affecting scour of previously captured sediment from stormwater catchbasin sumps. *Stormwater and Urban*.
- Aydilek, A. (2011). "Filters and drains. Chapter 3, Handbook of geosynthetic. ICE Publishing.
- Bannerman, R. J.-M. (1979). The IJC Menomonee River Watershed Study—Surface Water Monitoring Data. Chicago.
- Burkey, J. (2007). *Matlab central. Nash-Sutcliffe Model Accuracy Metric*. Retrieved Mayo 8, 2014, from , <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14178-nash-sutcliffe-model-accuracy-metric>
- Carmen A. Franks, A. P. (2012). Geosynthetic Filters for Water Quality Improvement of Urban Storm Water Runoff. *Journal of Environmental Engineering* 138.
- Carmen A. Franks, A. P. (2014). Effects of Runoff Characteristics and Filter Type on Geotextile Storm Water Treatment. *Journal of Environmental Engineering* 2014.140.
- Clark, S. E. (2009). Solids removal in storm-water filters modeled using a power equation. *Journal of Environmental Engineering* 135 (9).
- Comprehensive Environmental, Inc. (2013). Pennichuck Brook Watershed Commercial/Industrial Sweeping/Catch Basin Cleaning Feasibility.



- D. S. Jarman, G. T. (2011). The use of CFD coupled with physical testing to develop a new range of vortex flow controls with attributes approaching the ideal flow control device. World Environmental and Water Resources Congress 2011.
- D.A. Phipps, R. E. (2008). Efficiency testing of a hydrodynamic vortex separator. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- David A. Phipps, R. M. (2004). Evaluation of Different Configurations of Stormwater Treatment Chamber .
- Ed Loffill, D. P. (2008). Storm Water Best Management Practices into the Existing Urban Landscape – Systems for Controlling Sediments. World Environmental and Water Resources Congress 2008.
- Eddy Akinyemi, P. (2008). International Experiences with Low Impact Development (LID). Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- EPA, E. P. (1999). Storm Water Technology Fact Sheet. Sand Filters. EPA 832-F-99-007.
- Euromec. (n.d.). *Industrial Floor Sweepers*. Retrieved Abril 6, 2014, from www.euromec.co.uk
- Field, R. P. (2004). Catchbasins and Inserts for the Control of Gross Solids and Conventional Stormwater Pollutants. Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management.
- Galli, F. J. (1990). Peat Sand Filters: A Proposed Stormwater Management Practice For Urbanized Areas. . Department of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments. .
- Gardoni, E. P. (2000). The Influence of Partial Clogging And Pressure on the Behavior of Geotextiles in Drainage Systems. Industrial Fabrics Association International.
- GeoSyntec Consultants. Low Impact Development Center, I. (2006). Evaluation of Best Management Practices and Low Impact Development for Highway Runoff Control. Chapter 5 Selection of Distributed BMPs and BMP Treatment Systems.
- Guo, J. K. (2011). Maintenance Interval for Stormwater Hydrodynamic Separators. World Environmental and Water Resources Congress 2011.
- Hampshire, N. (n.d.). New Hampshire Manual: Volume 2. Chapter 5 Operation, Maintenance, Inspection & Source Control.



- Harwood, M. G. (2002). Assessment of the Effectiveness of Stormwater Treatment Chambers using Computational Fluid Dynamics. *Global Solutions for Urban Drainage*.
- Houle, J. J., Roseen, R. M., Ballesteros, T. P., Puls, T. A., & Jr., a. J. (2013). Comparison of Maintenance Cost, Labor Demands, and System Performance for LID and Conventional Stormwater Management. *Journal of Environmental Engineering* 2013.139:932-938.
- Hunt, W. F. (2008). Inspection and Maintenance Guidance for Manufactured BMPs. *World Environmental and Water Resources Congress 2008 Ahupua'a*.
- Hydro International. (2008). *The Up-Flo Filter Stormwater Treatment System. Operation and Maintenance Manual*.
- Hydro International. (2008). Up-Flo® Filter. High-rate stormwater filtration with higher loading rates and longer media life.
- Imbrium Systems Corporation. (2011). MTD Laboratory Test Certification for the Stormceptor STC . Department Of Environmental Protection, State Of New Jersey.
- Jones, R. (2012). *Mechanised street sweepers*. Retrieved April 5, 2014, from <http://www.howitworksdaily.com/whats-inside/mechanised-street-sweepers-explained/>
- JP, G. (1996). Granular Filters and Geotextile Filters. École Polytechnique, Proceedings of the conference Geofilters'96 held in Montréal.
- Kang, J.-H., Debats, S. R., & Stenstrom, a. M. (2009). Storm-Water Management Using Street Sweeping. *Journal of Environmental Engineering* 2009.135.
- Keating, J. (2002). Street sweepers: Picking up speed and quieting down. *Stormwater*, 3_5. Retrieved from 2002
- Lager, J. W. (1977). *Urban Stormwater Management and Technology: Update and Users' Guide*. Cincinnati: EPA-600/8-77-014.
- López, E. A. (2005). Ensayo experimental de la relación de gradiente para determinar el potencial de colmatación de un sistema suelo-geotextil. *Hallazgos - Revista de Investigaciones* 103.
- M. Scholz, R. M. (2005). Stormwater resources development and management in Glasgow: two case studies. *International Journal of Environmental Studies*.
- Medina, V. L. (2010). *Colmatación de Geotextiles con Suelos Tropicales*. Bogotá.
- Michael A. Ports, P. P. (2009). *Source Control: The Solution to Stormwater Pollution*. *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*.



- National Research Council. (2008). Urban Stormwater Management in the United States Chapter 5: Stormwater Management Approaches.
- NJDEP. (2004). New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual. Chapter 8.
- P.B. Spillett, S. E. (2005). International Perspective on BMPs/SUDS: UK - Sustainable Stormwater Management in The UK. Impacts of Global Climate Change.
- Pavco, G. (2009). Funciones y aplicaciones geotextiles tejidos y no tejidos.
- Pitt, H. A. (2009). Physical Experimentation and CFD Modeling to Evaluate Sediment Scour in Catchbasin Sumps. World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers © 2009 ASCE.
- Pitt, R. (1979). . Demonstration of Nonpoint Pollution Abatement Through Improved Street Cleaning Practices. USA EPA.
- Pitt, S. E. (2008). Comparison of Stormwater Solids Analytical Methods for Performance Evaluation of Manufactured Treatment Devices. Journal of Environmental Engineering 2008.134.
- R, U. B. (1999). Design of a sand filter for stormwater quality enhancement. Water Environ. Res, 71.
- R.-H. Chen, C.-C. H.-Y. (2008). The effect of fine soil content on the filtration characteristics of geotextile under cyclic flows. Geosynthetics International.
- Robert M. Roseen, E. C. (2009). Data Reporting Guidelines for Certification of Manufactured Stormwater BMPs: Part II. World Environmental and Water Resources Congress 2009.
- Robert Pitt, R. B. (2004). The Role of Street Cleaning in Stormwater Management. Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management.
- S. Wilson, R. B. (2004). Sustainable drainage systems. Hydraulic, structural and water quality advice. London: CIRIA C609.
- Sansalone, J. a. (1997). Partitioning and first flush of metals in urban roadway stormwater. Journal of Environmental Engineering,123.
- Schueler, T. (1992). A Current Assessment of Urban Best Management Practices. Metropolitan Washington Council of Governments.
- SEMCOG. (n.d.). Streets and parking lots. Catch-Basin Maintenance.



Smith, K. P. (2002). Effectiveness of three best management practices for highway-runoff quality along the Southwest Expressway, Boston, Massachusetts. ." Water-Resources Investigations Rep. No. 02-4059.

South Carolina Department of Transportation, S. (2008). Stormwater Manufactured Treatment Devices (MTDs).

Stovin, V. a. (2007). Retrofit suds - cost estimates and decision support tools. . Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management.

TYMCO, Inc. (2014). *How The Regenerative Air System Works*. Retrieved April 6, 2014, from <http://www.tymco.com/sweepers/regenerative-air-system/how-it-works.htm>

Uday Khambhammettu, R. P. (2006). Performance of Upflow Filtration for Treating Stormwater. World Environmental and Water Resources Congress 2006.

Vac-Con®. (n.d.). *Combination Machine Series*. Retrieved Marzo 25, 2014, from <http://www.vac-con.com/PDF/new/Combination%20Machine%20-%20Full%20Brochure.pdf>

Water Security Agency. (2014). Stormwater Guidelines EPB 322.

Wavin. (2005). Stormwater Management Systems. AquaCell®, AquaCell Lite® & Garastor®.

Wayne County Rouge River . (2004). STORM SEWER MAINTENANCE STUDY Livonia, Michigan . Wayne County Rouge River National Wet Weather Demonstration Project .

Wilson, M. M. (2009). Assessment of hydrodynamic separators for stormwater treatment. J. Hydraul. Eng.

Yezhao Cai, R. P. (2013). Full-Scale Up-Flo® Stormwater Filter Field Verification Tests. World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future © ASCE 2013.

Yezhao Cai, R. P. (2013). Full-Scale Up-Flo® Stormwater Filter Field Verification Tests. World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future © ASCE 2013.