

## Comportamiento hidráulico, beneficios y limitaciones de la aplicación de un SDGA a una estructura de pavimento flexible

Freddy Reyes Lizcano, [fredy.reyes@javeriana.edu.co](mailto:fredy.reyes@javeriana.edu.co)  
Andrés Torres, [andres.torres@javeriana.edu.co](mailto:andres.torres@javeriana.edu.co)  
Federico León Castaño Martínez, [fico8080@hotmail.com](mailto:fico8080@hotmail.com)  
Jorge Mario Herrera Betín  
Alejandra Ruiz López, [alejandra.ruiz.L@javeriana.edu.co](mailto:alejandra.ruiz.L@javeriana.edu.co)  
Liliana M. Rojas, [rojas.liliana@javeriana.edu.co](mailto:rojas.liliana@javeriana.edu.co)  
Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, Colombia

Fecha de recepción: Diciembre del 2009

Fecha de aprobación: Mayo del 2011

### Resumen

El enfoque primario en el diseño de estructuras de pavimento flexible ha estado basado en la densidad y en la estabilidad. En los últimos años se ha detectado que estas estructuras son sistemas de drenaje demasiado lentos, permitiendo infiltraciones importantes de agua, afectando su durabilidad. Por lo anterior, se considera conveniente implementar un Sistema de Drenaje con Gradaciones Abiertas (SDGA) en la estructura de pavimento flexible para disminuir los efectos dañinos que puede provocar el agua infiltrada.

El presente trabajo se basa en un análisis experimental para evaluar el comportamiento hidráulico, los beneficios y limitaciones de la aplicación de un SDGA en estructuras de pavimento flexible, para periodos de operación prolongados en Bogotá, Colombia.

Para lograr dicho objetivo se construyeron dos montajes experimentales, uno representando una estructura de pavimento flexible convencional y el otro representando un pavimento flexible con un SDGA. Los ensayos preliminares consistieron en verter sobre cada una de las estructuras construidas, agua con azul de metileno que permitió la visualización de su trayectoria a través de las capas. Con este ensayo se evidenció: (i) la carpeta asfáltica presenta una permeabilidad secundaria y la infiltración de agua se desarrolla en pocos minutos; (ii) en el montaje de estructura de pavimento flexible convencional, el agua que se filtra queda atrapada en la interface entre la capa de rodadura y la superficie de base granular; (iii) en el montaje que incluye un SDGA, el agua infiltrada es evacuada rápidamente y no se presentan zonas de acumulación. Debido a la presencia de sólidos en el agua de escorrentía, se concibió un método experimental para estimar el periodo de funcionamiento de este sistema de drenaje, basados en el estudio de las características del agua de escorrentía para Bogotá y de la colmatación de dicho sistema. A partir de este estudio se estimó que la vida útil de un SDGA es aproximadamente 5.43 años sin tener en cuenta el mantenimiento, ni dinámicas hidrológicas reales tiempo seco/tiempos de lluvia. Los resultados muestran que la inclusión de un SDGA en estructuras de pavimento flexible puede ser un método interesante para el drenaje de aguas de infiltración.

**Palabras Claves:** Estructuras de pavimento, Sistema de drenaje con gradaciones abiertas (SDGA), Colmatación de medios porosos.

### Abstract

*The principal design criteria for flexible pavement structures have been based on the density and stability. In last years it has been detected that the behavior of these structures as drainage systems are not*

*convenient, allowing important water infiltrations which affects its durability. Installation of an Open-Graded Drainage System (OGDS) in flexible pavement structures is thus convenient in order to reduce the harmful effects that can produce the infiltrated water.*

*The present study is based on an experimental analysis in order to evaluate the hydraulic behavior, the benefits and limitations of the application of an OGDS in flexible pavement structures for extended operation periods in Bogota.*

*To achieve this objective two experimental models were constructed, one representing a conventional flexible pavement structure and another representing a flexible pavement with a OGDS. The preliminary tests consisted of pouring water with methylene blue on each one of the constructed structures, allowing the visualization of its path across the layers. With this experiment it was concluded: (i) asphalt surface presented a secondary permeability and the water infiltration is developed in few minutes; (ii) on conventional flexible pavement structure model the water infiltrated was caught in the interface between the pavement surface and the granular base; (iii) on the model which includes an OGDS, the infiltrated water was evacuated immediately without accumulation zones. Due to the presence of solids in runoff water, it was conceived an experimental method in order to estimate the operation periods of this drainage system, based on the study of the runoff water characteristics for Bogota and the clogging of this system. With this study, the useful life of an OGDS was assessed as 5.43 years without taking into account the maintenance nor real hydrological behavior dry weather/storm weather periods. The results show the inclusion of an OGDS in flexible pavement structures could be an interesting method for the drainage of infiltrated water.*

**Keywords:** *Pavement structures, Open-Graded Drainage System (OGDS), Porous media clogging.*

### INTRODUCCIÓN

Desde que se inició la construcción de vías, el manejo del agua que llega a ellas ha sido motivo de estudio de los ingenieros y al paso de los años no han dejado de existir problemas e inconvenientes en los pavimentos debido al agua, lo que ha generado múltiples investigaciones las cuales buscan complementar y mejorar los problemas de las estructuras de pavimentos.

Un drenaje ineficiente conduce a daños de importancia en la estructura de la vía así como una reducción de los niveles de servicio dificultando el flujo normal del tránsito

e incluso llegando a ocasionar accidentes. Según Garber (2005) la importancia de un drenaje adecuado se confirma por la cantidad de dinero invertido en la construcción de instalaciones en vías: el 25% de la inversión se gasta aproximadamente en la construcción de estructuras para el control de la erosión y el drenaje.

La capa asfáltica de un pavimento flexible no es completamente impermeable (Garber 2005) y esto, sumado a la presencia de grietas y desniveles, permite que el agua de escorrentía superficial se infiltre originando un flujo de agua interno (Herrera y Castaño 2008). El manejo inadecuado del agua interna conlleva a daños en el desempeño del pavimento debido al desarrollo de presiones de poros muy altas dentro de la base sin tratamiento, así como en las capas de la subbase, lo que conduce a una reducción de resistencia (Garber 2005).

Por otro lado, el agua de lluvia de escorrentía superficial contiene una serie de contaminantes, ya sean aportados por la atmósfera o por el propio recorrido del agua sobre la superficie, que al infiltrarse en la capa asfáltica van creando un efecto colador lo que puede generar una colmatación de las capas drenantes, limitando su capacidad hidráulica a largo plazo. Ortega Suescún, (2004) realizó como trabajo de grado en la Pontificia Universidad Javeriana una investigación en donde se plantea la realización de un modelo de simulación de lluvias, apoyada en una caracterización de las aguas de lluvia de Bogotá, para conocer la capacidad de retención de contaminantes en la capa de base de un pavimento poroso rígido. La conclusión de este trabajo es que los pavimentos porosos rígidos poseen capacidades filtrantes en la retención de contaminantes del agua infiltrada.

Dada la importancia del manejo del flujo de agua infiltrada dentro de la estructura de pavimento, se han desarrollado métodos de control de aguas de infiltración. Uno de éstos métodos es la colocación de un sistema de drenaje con gradaciones abiertas (SDGA). Este método representa una alternativa de diseño de pavimentos flexibles en busca de un aumento de la vida útil de este tipo de estructuras, bajo la hipótesis que el agua infiltrada, aún en muy pequeñas cantidades, juega un papel preponderante en la durabilidad de los pavimentos. En la Pontificia Universidad Javeriana, Herrera y Castaño (2008) comprobaron lo anterior de manera cualitativa a partir de un proyecto de investigación que buscaba presentar un análisis del drenaje de un pavimento flexible.

Sin embargo, para poder adoptar el SDGA como solución para el control de aguas de infiltración en pavimentos flexibles, se requiere de un análisis no sólo cualitativo sino cuantitativo de las características de eficiencia hidráulica en relación con la vida útil de dicho sistema, así como de un análisis desde el punto de vista económico sobre sus beneficios y limitaciones para poder optar o no por su implementación.

Este trabajo analiza las ventajas y limitaciones que tiene el SDGA en la estructura de pavimento diseñada en la Pontificia Universidad Javeriana (Herrera y Castaño 2008) desde un punto de vista hidráulico, y su evolución para series de eventos lluviosos representativos de la ciudad de Bogotá. Los eventos simulados no sólo se evaluaron desde el punto de vista de la cantidad de lluvia de escorrentía superficial sino que también se buscó su representatividad en cuanto a transporte de sólidos suspendidos y contenido de materia orgánica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Como primera parte de la metodología, se obtuvieron carpetas asfálticas deterioradas, aparentemente, por problemas de deficiencias de drenaje, de la Carrera 13A con Calle 79, de la ciudad de Bogotá D.C. Simultáneamente se preparó el modelo experimental, el cual consistió en dos recipientes de 0.7m\*0.5m\*1m, donde se colocó subbase, base granular, y capa de rodadura con un espesor de 0.20 m, 0.20 m y 0.10 m respectivamente, en el caso del modelo que contiene el SDGA, éste se colocó con un espesor de 5 cm para que fuera útil como material de soporte de la carpeta asfáltica, con material con tamaño predominante de 1/2" el cual fue lavado con el fin de remover material fino, además se instaló tubería perforada de 1/2" de diámetro en los costados para evacuar el agua (Ilustración 1).

Los modelos fueron empleados para visualizar y validar la situación desde el punto de vista del drenaje de un pavimento flexible sin la inclusión de SDGA y con la inclusión de ésta. La preparación de los modelos incluyó la realización de ensayos con el fin de caracterizar los materiales (base y subbase) y definir los parámetros de compactación, permeabilidad, densidad y gradación del material, obteniendo valores recomendados para carreteras con tráfico medio (tipo T4: entre  $1.5 \times 10^6$  y  $3.0 \times 10^6$  ejes equivalentes de 8.2 ton, (Montejo Fonseca 1997)). Luego de establecidos estos parámetros y el montaje del modelo mostrado en la Fotografía 1, se realizó el vertido del agua con azul de metileno en los

recipientes, con el fin de generar una carga hidráulica que permitió la infiltración a través de la carpeta asfáltica.

Con el fin de complementar los resultados de esta investigación, se evaluó el comportamiento de los modelos bajo condiciones reales de funcionamiento en cuanto al drenaje. Para esto se utilizó la sectorización de la ciudad de Bogotá determinada por la Secretaría de Ambiente de Bogotá según los niveles de contaminación atmosférica (Bogotá, Observatorio Ambiental de 2008). Para la caracterización del agua en la Ciudad de Bogotá se precisan tres zonas según sus niveles de contaminación: (1) Puente Aranda (Sur-Occidente – Estación 13) Zona industrial con alto tráfico vehicular y uso residencial. (2) Tunal (Sur – Estación 4) zona de alto tráfico vehicular, uso residencial y comercial. Estas dos zonas están definidas como las zonas de mayor contaminación atmosférica en la ciudad (DAMA 2006) y por tanto son representativas de la condición más crítica del caso en estudio. Y (3) Calle 200 (Norte – Estación 8) zona residencial de baja densidad poblacional y alto tráfico vehicular. Esta última zona está definida como la zona con menor grado de contaminación atmosférica (DAMA 2006).

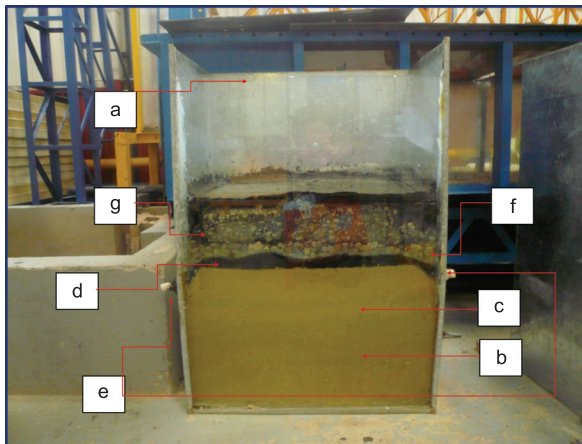
Se determinó inicialmente la cantidad de agua a recolectar en cada una de las zonas especificadas para simular el volumen de agua lluvia que la estructura de pavimento flexible con SDGA tendría que soportar durante cinco años (vida útil de diseño promedio de una estructura de pavimento flexible), para ello es necesario conocer los datos de la precipitación de la ciudad de Bogotá de los últimos años.

La empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá diseñó un software llamado “Tormenta” que se compone de una base de datos con información diaria completa hasta el año de 1994 (fecha, hora, duración y precipitación) de eventos lluviosos en cada

una de las estaciones pluviométricas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Bogotá (IDEAM) ubicadas en la ciudad. Las estaciones utilizadas por ese software más cercanas a las zonas

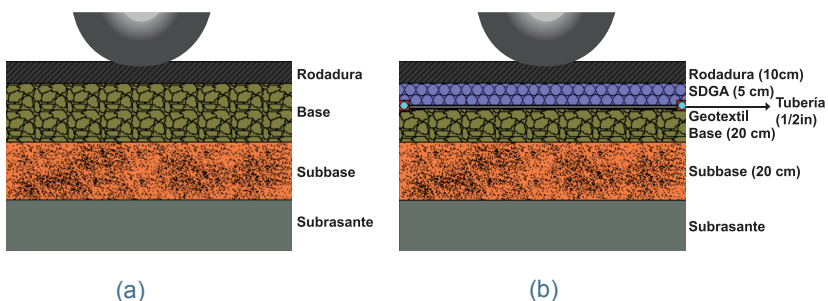
Ilustración del montaje: a) Vidrio, b) Subbase granular, c) Base granular, d) Geotextil no tejido, e) Tuberías perforadas, f) Capa de gradación abierta, g) Capa asfáltica

Fotografía 1



Esquema de modelos experimentales de pavimento flexible convencional (a) y con SDGA (b)

Ilustración 1



Resultados de ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras recolectadas en el Tunal y Puente Aranda. Concentraciones de Sólidos Suspendedos Totales (SST) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) en mg/L; entre paréntesis: incertidumbres experimentales en % sobre el valor de la concentración

Tabla 1

Nº de muestra	Fecha (D/M/A)	Vol (L)	SST <sub>entrada</sub>	SST <sub>salida</sub>	DQO <sub>entrada</sub>	DQO <sub>salida</sub>	Repeticiones
1-Puente Aranda	09/03/2009	45.5	1453 (9%)	1162 (3%)	1586 (19%)	562 (1%)	3 c/u
2-Tunal	16/03/2009	33.3	387 (2%)	98 (4%)	143 22(%)	49 (30%)	3 c/u
3-Puente Aranda	16/03/2009	42.0	503 (4%)	28 (13%)	272 (14%)	56 (11%)	3 c/u
4-Puente Aranda	24/03/2009	50.8	563 (6%)	313 (2%)	566 (28%)	530 (23%)	3 c/u
5-Tunal	24/03/2009	35.0	540 (16%)	27 (27%)	219 (9%)	49 (35%)	3 c/u
6-Tunal	25/03/2009	45.5	880 (15%)	8 (43%)	188 (7%)	0 (78%)	3 c/u
7-Tunal	31/03/2009	36.8	1040 (42%)	30 (143%)	347 (7%)	0 (124%)	3 c/u
8-Tunal	02/04/2009	49.0	2750 (30%)	8 (43%)	24 (144%)	64 (16%)	3 c/u
9-Puente Aranda	05/05/2009	54.3	277 (89%)	50 (152%)	87 (63%)	16 (428%)	3 c/u
10-Puente Aranda	19/05/2009	56.0	42 (9%)	9 (27%)	9 (27%)	0 (15%)	3 c/u

**Tabla 2** Resultados de retención de contaminantes en una estructura de pavimento flexible con SDGA

Evento	Número de años simulados	Eficiencia SST (%)	Incertidumbre Eficiencia SST (% sobre Eficiencia)	Eficiencia DQO (%)	Incertidumbre Eficiencia DQO (% sobre Eficiencia)
1	0.5	80	4	65	10
2	0.9	75	1	66	9
3	1.3	94	1	80	2
4	1.9	44	7	6	227
5	2.3	95	2	78	8
6	2.8	99	0.4	107	5
7	3.2	97	4	101	1
8	3.7	99.7	0.2	-164	211
9	4.3	82	39	82	82
10	5.0	79	8	275	26

de estudio son: (1) Camavieja (información desde 1975 hasta 1994 para Puente Aranda). (2) Santa Lucía (información desde 1975 hasta 1994 para Tunal) y (3) Serrezuela (información desde 1990 hasta 1994 para Escuela).

Se obtuvieron también, gracias a la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, los reportes correspondientes a la precipitación total diaria de estas estaciones desde el año 2000 hasta el año 2009.

Con la información obtenida se determinó que el volumen total a tomar para simular cinco años de operación es de 448 litros. Este volumen se logró recolectar en diez muestras obtenidas únicamente de la zona de Puente Aranda (Textilera) y el Tunal (Institución Educativa INEM). A estas muestras se le realizaron ensayos en laboratorio para determinar las concentraciones en Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) al momento de ser recolectadas

y luego de ser vertidas en la estructura de pavimento flexible con SDGA construida en laboratorio cumpliendo con las especificaciones del (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998). Ver Tabla 1.

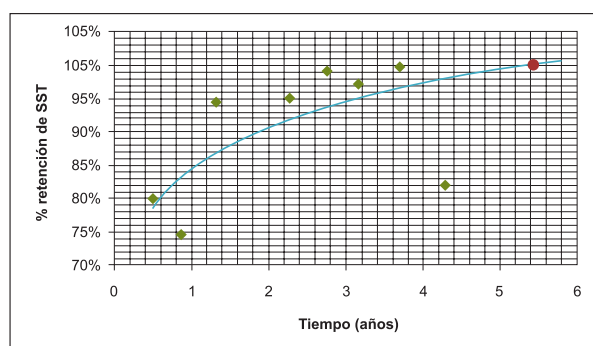
## RESULTADOS Y DISCUSIONES

Con el ensayo preliminar realizado con azul de metileno se evidenció lo siguiente: (i) la carpeta asfáltica usada presenta una permeabilidad secundaria y la infiltración de agua se desarrolla en pocos minutos; (ii) en el montaje de estructura de pavimento flexible convencional, el agua que se filtra queda atrapada en la interface entre la capa de rodadura y la superficie de base granular; (iii) en el montaje que incluye un SDGA, el agua infiltrada es evacuada rápidamente y no se presentan zonas de acumulación. Estos resultados preliminares mostraron que la inclusión de un SDGA en estructuras de pavimento flexible puede ser un método eficiente para el drenaje de aguas de infiltración.

En cuanto a la retención de sólidos y materia orgánica en la estructura de pavimento flexible con SDGA, se obtiene su eficiencia comparando las características del agua muestreada en campo y las características del agua luego de ser vertida en la estructura de pavimento flexible con SDGA obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 2.

De las simulaciones en laboratorio se observa que el sistema de pavimento flexible con SDGA presenta una buena capacidad de retención de contaminantes que aumenta con el tiempo. En los primeros ensayos en el laboratorio se observó una eficiencia en retención de contaminantes de 79 % aproximadamente y en las pruebas finales se llegó a una eficiencia de retención del 99 %; sin embargo el aumento de dicha retención se traduce en una disminución en la porosidad y por lo tanto en la capacidad de infiltración al sistema. Lo anterior lleva a definir el tiempo de colmatación como el instante en que el 100 % de las partículas será retenido, y el sistema ya no sea apto para infiltrar aguas de escorrentía. Basados en los resultados de las 10 pruebas realizadas en laboratorio (ver Tabla 2) se graficó el comportamiento de la retención contra el tiempo (años) simulado obteniendo una relación entre el porcentaje de retención de SST y el tiempo de operación simulado (ver Ecuación 1) y representada por la Gráfica 1. A partir de esta gráfica se estimó el tiempo de colmatación como aquel en que la retención sea de aproximadamente 100 %; esto ocurre a los 5.43 años.

**Gráfica 1** Representación de la relación entre el porcentaje de retención de SST y el tiempo de operación simulado del SDGA



$$\%ret = (0.1905 \log_{10} t_{\text{años}} + 0.86)^{1.1}$$

Ecuación 1

Sin embargo, la medida anterior se considera estimada ya que durante las simulaciones se pudo observar que a medida que el periodo de tiempo seco anterior al evento sea mayor la eficiencia mejora, es decir que tras un periodo de sequía, la velocidad de infiltración es mayor y la capacidad de retención de contaminantes menor. Esto se pudo observar con más claridad a partir de cierto tiempo de operación del pavimento: 2.8 años. Para ilustrar lo anterior, se graficó el tiempo de infiltración en función del periodo de tiempo seco anterior a cada evento, para los ensayos 6 (2.8 años de operación simulados) al 10 (5.0 años de operación simulados) (ver Gráfica 2). A partir del análisis de la Gráfica 2 y de observaciones durante los ensayos, se estima que este comportamiento se debe a la saturación del pavimento, y en particular de la capa de rodadura.

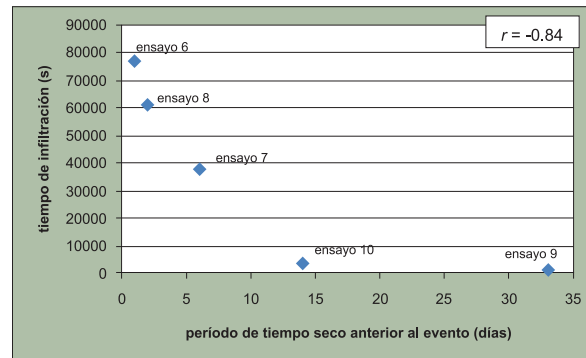
## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Al analizar cualitativamente el comportamiento del flujo del agua de infiltración a través del modelo convencional de pavimento flexible y comparar los resultados con aquellos obtenidos mediante el análisis cualitativo a partir del modelo con SDGA, se evidencia la necesidad de drenar la estructura de pavimento, a causa de las filtraciones de aguas de escorrentía que pueden ocurrir a través de las capas de rodadura o asfálticas; esto con el fin de poder evitar que con el tiempo estas capas de rodadura se deterioren.

La determinación de la vida útil o tiempo de colmatación del sistema se realizó con base en la eficiencia de retención de sólidos: para el sistema ensayado, el tiempo de colmatación fue de 5.43 años aproximadamente, esto bajo un periodo de lluvias relativamente constante y sin ningún tipo de mantenimiento. Si se consideran variables externas como barrido de calles, los periodos de sequía tras los cuales la capacidad de conducción de agua del drenaje aumenta, el movimiento de los carros que indudablemente crea un barrido involuntario, la vida útil real proyectada se prevé mucho mayor. Se piensa que dado que la mayoría de sólidos que saturan el sistema quedan retenidos en la parte superior de la capa de rodadura, el hecho de retirar la mayoría de éstos podría llegar a aumentar considerablemente la vida útil. Para la verificación del efecto real de estas variables en el sistema de drenaje se continuarán realizando estudios sobre éste con el propósito de evaluar: (i) el efecto del mantenimiento sobre la vida útil del SDGA; (ii) el efecto del agua infiltrada sobre la resistencia del

Tempo de infiltración en función del periodo de tiempo seco anterior a cada evento, para los ensayos 6 (2.8 años de operación simulados) al 10 (5.0 años de operación simulados)

Gráfica 2



pavimento; (iii) los beneficios económicos que tiene la inclusión de un SDGA en una estructura de pavimento flexible.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Bogotá, Observatorio Ambiental de.** En Bogotá se vive un mejor ambiente. [http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/php/frame\\_detalle.php?h\\_id=639](http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/php/frame_detalle.php?h_id=639) (último acceso: 22 de Abril de 2009). 1 de julio de 2008.
2. **DAMA.** Informe mensual de calidad del aire de Bogotá. Bogotá: Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente, 2006.
3. **Garber, Nicholas J.** Ingeniería de tránsito y de carreteras. International Thomson Editores. 1170 p, México. 2005.
4. **Herrera, Jorge Mario, y Federico Castaño.** Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá D.C. Bogotá D.C.: Trabajo de grado, Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. 99 p., Colombia. 2005.
5. **Montejo Fonseca, Alfonso.** Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá D.C.: Editorial Universidad Católica de Colombia, Sistema de Investigaciones y Publicaciones. 480 p., Colombia. 1997.
6. **Ortega Suescún, Diana Helena María.** Propiedades filtrantes de los pavimentos porosos rígidos. Bogotá: Trabajo de grado, Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. 172 p., Colombia. 2004.
7. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** Washington DC, USA: 20th edn, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 1998.