

**DISEÑO DE UNIDAD PILOTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
DOMESTICAS EN EL CAMPUS UMNG-CAJICÁ CON FINES DE REUSÓ**



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ  
JORGE TADEO LOZANO

Oscar Javier Bernal López

UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA  
MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES  
BOGOTÁ D.C.  
2014

**DISEÑO DE UNIDAD PILOTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL VERTICAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DOMESTICAS EN EL CAMPUS UMNG-CAJICÁ CON FINES DE  
REUSÓ**

**Oscar Javier Bernal López**

Tesis de Grado para optar al título de Magister en Ciencias Ambientales de la Facultad de  
Ciencias Naturales e Ingeniería

DIRECTOR:  
ING. ÁLVARO CHÁVEZ PORRAS, Ph. D.

UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA  
MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES  
BOGOTÁ D.C.

2014

*A Dios que siempre me acompaña porque nunca dejo que mi camino se oscureciera y me permite alcanzar las alegrías más grandes e inesperadas.*

*A mi Madre y Hermana por su apoyo y confianza incondicional, porque sin ellos sería imposible haber alcanzado tanto y poder seguir soñando con un futuro lleno de satisfacciones.*

*A mi Esposa porque siempre creyó en mí y estuvo ahí para impulsarme a dar un paso más.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ingeniero Álvaro Chávez Porras, Ph.D. director del proyecto de tesis, por su colaboración, confianza, paciencia y ayuda durante el desarrollo de este proyecto.

Doctor Edilberto León Peña, Director de la Maestría en Ciencias Ambientales de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, por su apoyo incondicional, entusiasmo y consejos apropiados durante todo el desarrollo de la maestría.

A la Ingeniera Ángela Grijalba Castro, por su colaboración, apoyo y guía durante la realización de este proyecto.

A la Universidad Militar Nueva Granada por permitir llevar a cabo nuestra investigación.

Todos los integrantes del Grupo de Investigación Producción, Innovación y Tecnología por su ayuda, paciencia y colaboración durante este largo camino.

A los profesores de la Maestría en Ciencias Ambientales de Universidad Jorge Tadeo Lozano, quienes con una disposición generosa, en aras de transmitir todos los conocimientos y velar por que cada uno de los alumnos aprendiéramos sus enseñanzas, han permitido que muchos profesionales sean ejemplo a seguir en el cuidado y la implementación de ideas para la protección del medio ambiente.

Todos nuestros amigos y a las personas que contribuyeron de una u otra manera en el desarrollo de esta investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
2.1 Objetivo general: .....	11
2.2 Objetivos específicos: .....	11
<b>3 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>4 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
4.1 Humedales artificiales .....	13
4.1.1 Funciones de los humedales artificiales .....	15
4.2 Tipos de fitorremediación. ....	16
4.3 Tipos de humedales artificiales .....	18
4.3.1 Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS) .....	18
4.3.2 Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS).....	19
4.3.3 Tipos de HAFSS.....	19
4.4 Fitorremediación .....	21
4.5 Macrófitas: .....	22
4.5.1 <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de Agua o Violeta de Agua).....	22
4.5.2 <i>Limnobium laevigatum</i> (Buchón Cucharita).....	23
4.5.3 <i>Polygonum punctatum</i> (Barbasco, Hierba de Sapo y Catay).....	24
4.5.4 <i>Typha spp</i> (Totora o junco de la pasión) .....	25
4.6 Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) .....	26
4.6.1 Descripción del Proceso de la PTAR- Cajicá.....	27
4.7 Marco legal.....	29
4.7.1 Contexto legal para el recurso hídrico.....	30
<b>5 MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
5.1.1 Localización.....	33
5.1.2 Área de estudio .....	33
5.1.3 Unidad experimental.....	35
5.1.4 Variables evaluadas .....	41
<b>6 RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	<b>48</b>

6.1	Variables semanales aguas: .....	48
6.1.1	Fisicoquímicas .....	48
	<input type="checkbox"/> Temperatura: .....	48
	<input type="checkbox"/> pH: .....	49
	<input type="checkbox"/> Conductividad: .....	50
	<input type="checkbox"/> Color: .....	51
	<input type="checkbox"/> Oxígeno disuelto: .....	52
	<input type="checkbox"/> Turbidez: .....	53
6.2	Variables quincenales: .....	54
6.2.1	Fisicoquímicas .....	54
	<input type="checkbox"/> DQO: .....	54
	<input type="checkbox"/> Sólidos sedimentables: .....	55
	<input type="checkbox"/> Alcalinidad total: .....	56
	<input type="checkbox"/> Nitratos: .....	57
	<input type="checkbox"/> Sulfatos: .....	58
	<input type="checkbox"/> Dureza total: .....	59
	<input type="checkbox"/> Fosfatos: .....	60
	<input type="checkbox"/> Cloruros: .....	61
	<input type="checkbox"/> DBO <sub>5</sub> : .....	62
6.2.2	Variables biológicas .....	64
	<input type="checkbox"/> Coliformes fecales: .....	64
	<input type="checkbox"/> Coliformes totales: .....	65
6.2.3	Variables materiales pesados .....	65
<b>7</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>9</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>70</b>
<b>11</b>	<b>ANEXO .....</b>	<b>75</b>
11.1	ANEXO 1 .....	75
11.2	ANEXO 2 .....	76
11.3	ANEXO 3 .....	77

11.4 ANEXO 4. ....	78
11.5 ANEXO 5. ....	80
10.6 ANEXOS 6. ....	80

## LISTA DE FIGURAS

FÍGURA 1. PROCESOS DEPURACIÓN DE CONTAMINANTES POR MEDIO DE MACRÓFITAS TOMADO DE (FREÍS, 2008) .....	17
FÍGURA 2. FUNCIONAMIENTO Y PARTES HAFS TOMADO DE (GALLEGO, 2010).....	19
FÍGURA 3. FUNCIONAMIENTO Y PARTES HAFSSH TOMADO DE (GALLEGO, 2010). ....	20
FÍGURA 5. <i>EICHHORNIA CRASSIPES</i> EXTRAÍDA DEL HUMEDAL DEL CAMPUS DE UMNG. ....	22
FÍGURA 6. <i>LIMNOBIUM LAEVIGATUM</i> EXTRAÍDA DEL HUMEDAL DEL CAMPUS DE UMNG. ..	23
FÍGURA 7. <i>POLYGONUM PUNCTATUM</i> EXTRAÍDA DEL HUMEDAL DEL CAMPUS DE UMNG...	24
FÍGURA 8. <i>TYPHA SPP.</i> EXTRAÍDA DEL HUMEDAL DEL CAMPUS DE UMNG. ....	25
FÍGURA 9. PTAR DE LA UMNG (BERNAL, 2013). ....	26
FÍGURA 10. INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA EN LA SEDE DE CAJICÁ- CUNDINAMARCA.GOOGLE EARTH 2014 .....	33
FÍGURA 11. PLANOS DE LAS DIMENSIONES DE CADA NIVEL DEL HAFSSV (BERNAL & GRIJALBA., 2013).....	39
FÍGURA 12. MEDIO GRANULADO EMPLEADO PARA HAFSSV.B. FOTOGRAFÍA DEL MATERIAL VEGETAL ( <i>EICHHORNIA CRASSIPES</i> ) SEMBRADO EN NIVEL 2 Y 3 DEL HAFSSV. .....	39
FÍGURA 13. PLANOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA UNIDAD PILOTO HAFSSV (BERNAL & GRIJALBA., 2013) B. FOTOGRAFÍA DE LA UNIDAD PILOTO HCFSSV DE LA UMNG- CAJICÁ. ....	40
FÍGURA 14. LA TEMPERATURA PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR.....	48
FÍGURA 15. EL pH DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR. ....	49
GRAFÍCA 16 .LA CONDUCTIVIDAD PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR.....	51
FÍGURA 17. EL COLOR PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR. ....	51

FÍGURA 18. EL OXÍGENO DISUELTO PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR.....	53
FÍGURA 19. LA TURBIDEZ PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR .....	54
FÍGURA 20. DQO PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR.....	55
FÍGURA 21 .LOS SÓLIDOS SEDIMENTABLES PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR.....	55
FÍGURA 22 .LA ALCALINIDAD TOTAL PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR.....	56
FIGURA 23. EL NITRATO PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR. ....	57
FÍGURA 24. EL SULFATO PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR. ....	58
FÍGURA 25 .LA DUREZA TOTAL PROMEDIO Y DUREZA NO CÁLCICA DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR.....	60
FÍGURA 26.EL FOSFATO PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR. ....	61
FÍGURA 27 .EL CLORURO PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR. ....	62
FÍGURA 28. EL DBO <sub>5</sub> PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR. ....	63
FÍGURA 29. COLIFORMES FECALES PROMEDIO DEL AGUA ENTRE LOS MESES DE JUNIO A SEPTIEMBRE DEL AÑO DEL 2013 EN EL CAMPUS DE UMNG-CAJICÁ. M1: AFLUENTE PTAR, M2: EFLUENTE HAFSSV Y M3: EFLUENTE PTAR.....	64

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Procesos utilizados por las macrofitas para asimilar contaminantes.....	17
--	----

TABLA 2. Marco Legal Colombiano.....	29
TABLA 3. Objetivos de calidad para el tramo 1 del río Torca. Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total (N Total), Fosforo Total (P Total), Coliformes Fecales y pH. ....	30
TABLA 4. Parámetros de variables permisibles para el vertimiento de aguas según la normatividad colombiana del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible en el Decreto 3930 del 2010 modificado en el Artículo 1 en el Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos subperificiales. ....	32
TABLA 5. Puntos de muestreos en la PTAR de UMNG en Cajicá- Cundinamarca. ....	34
TABLA 6. Macrofitas utilizada para HAFSSV.....	36
TABLA 7. Pruebas fisicoquímicas y microbiologías evaluadas. ....	41
TABLA 8. Conservación y Control de calidad para las muestras.....	46

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el recurso hídrico ha sido afectado por los contaminantes vertidos. Estas descargas de actividades antrópicas que no han sido tratados y controladas adecuadamente por los organismos legales. La depuración de las aguas contaminadas se ha convertido en problema ambiental y económico a nivel mundial, por eso se han planteado diferentes medidas para evaluar, controlar y mitigar los impactos ambientales sobre el recurso, con el fin de determinar la “calidad de agua” que se está vertiendo a los ecosistemas. Presentan vías de mitigación y control de para la depuración y usos del recurso a nivel mundial el Protocolo de Kyoto, la EPA (Environmental Protection Agency) y la OMS (WHO, World Health Organization); a nivel nacional el Decreto 2811 de 1974 (por el cual se dicta el Código de Recursos Naturales), El Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos según la Resolución 1433 de 2004 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial; y a nivel regional la Resolución 5738 de 2008 de la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá D.C. (JECFA, 1982) (EPA U. S., 2000).

La presente propuesta trata de alguna manera ayudar a reducir la contaminación de los cuerpos de agua, por medio del diseño e instalación de una unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV); con el fin de obtener a través de la fitodepuración un posterior reusó de las aguas residuales domésticas; en este caso provenientes de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), Sede Campus Cajicá, Cundinamarca. Las cuáles serán tratadas por el humedal propuesto, de una manera más económica pero no menos eficiente que los sistemas convencionales; sin consumir las grandes cantidades de energía de los sistemas convencionales de tratamiento aeróbicos.

Sin embargo, se considera que el caudal de entrada del HAFSSV debe tener un pretratamiento, para así no afectar el diseño propuesto; lo anterior, con el fin de optimizar la remoción de contaminantes y llegar a la reutilización de estas aguas tratadas, para fines de riego, sanitarios, y limpieza de vías en general.

La UMNG en su responsabilidad de realizar un tratamiento previo a sus vertimientos para cumplir con la normatividad y disminuir los impactos que generará en los ecosistemas receptores del rio Bogotá ha brindado apoyo a esta propuesta, en donde se realizó un diagnóstico ambiental y análisis de la eficiencia de la depuración de los contaminante del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del Campus de Cajicá y el HAFSSV, durante el segundo semestre del 2013. Además este proyecto contribuyó a la base de datos de monitoreo de la PTAR, establecer nuevas propuestas para un manejo sostenible, con el fin de disminuir la afectaciones ambientales a la calidad hídrica del cuerpo de agua para una futura reutilización de dicho recurso.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general:**

Diseñar una unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV) para tratamiento de aguas residuales domésticas en la Universidad Militar Nueva Granada, Sede Campus, Cajicá, Cundinamarca, con fines de reusó.

### **2.2 Objetivos específicos:**

- Caracterizar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas residuales a al afluente y efluente de la Unidad Piloto, para determinar eficiencia del tratamiento.
- Determinar pertinencia de reutilización de las aguas tratadas en la Unidad Piloto como valor agregado, para posterior reutilización de acuerdo con normatividad colombiana vigente.

### 3 JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación busca contribuir la búsqueda de una posible solución sostenible con el ambiente para la depuración de las aguas residuales domésticas de la UMNG en el municipio de Cajicá , Cundinamarca; mediante una propuesta que se pueda integrar a la PTAR con la unidad piloto HAFSSV para establecer las diferentes herramientas y procesos que realizan las macrófitas para fitodepurar los contaminantes fisicoquímicos y materiales pesados contenidos en los vertimientos hacia los ecosistemas acuáticos presentes en el Campus. Que de acuerdo a la tendencia mundial, logren tener los niveles establecidos por los parámetros dados en Colombia por el Decreto 4728 del 2010, como también poder darle otros usos en el Campus, para utilizar este recurso natural de forma más eficiente y responsable con el ambiente.

Por último la investigación permitirá mejorar la situación actual de la PTAR en sus procesos con la evaluación y monitoreo de los parámetros fisicoquímicos y biológicos según el Decreto enunciando para vertimientos en cuerpos de aguas superficiales.

## 4 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describe la teoría en lo referente a humedales artificiales, tipos y funcionamiento.

### 4.1 Humedales artificiales

Los humedales están definidos por el Convenio Internacional de Ramsar de 1971, como extensiones de marismas, pantanos o superficies cubiertas de agua, (sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces o saladas, incluidas las extensiones de agua marina a profundidad en marea baja que no excedan los seis metros (EPA, 2002).

En algunos países industrializados se han considerado como un obstáculo para el desarrollo, por lo que en algunos casos, han sido dragados y colmatados para su posterior explotación; sin embargo, en la actualidad se aprecia su valor ambiental debido a que proporcionan una gran productividad biológica y tienen la función de regular el recurso hídrico.

Los humedales artificiales son sistemas acuáticos diseñados y construidos para suplir las necesidades de tratamiento, con los que se busca aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan al interactuar el agua, medio filtrante, macrófitas, microorganismos y atmósfera; por lo que se imitan las condiciones ecológicas y la capacidad de depuración encontradas en un humedal natural.

Como tienen la capacidad de modificar todos los parámetros, en especial los cualitativos de las aguas que pasan en forma lenta a través de ellos, a partir de esto se ha generado la técnica de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales; cumpliendo las siguientes funciones:

- Fijar físicamente algunos contaminantes a través de la absorción en la superficie del suelo.
- Utilizar y transformar los elementos orgánicos e inorgánicos, por intermedio de los microorganismos que están adheridos en las superficies.
- Lograr niveles de tratamiento con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento.

En el tratamiento del agua residual con humedales artificiales se desarrollan diferentes mecanismos para la depuración de contaminantes, los cuales se basan en reacciones que ocurren naturalmente, las que pueden ser:

- Remoción de sólidos suspendidos (SS) por sedimentación y filtración.

- Biodegradación de la materia orgánica (MO) a partir de microorganismos aeróbicas y anaeróbicos (Alvares, 2004).
- Remoción de metales pesados (MP) atribuida al fenómeno de precipitación y absorción.
- Ajuste de pH.

Estos mecanismos hacen que los sistemas de humedales sean técnica y económicamente factibles para tratar varios tipos de aguas; ventajas entre las que se pueden destacar:

- El costo de construcción y mantenimiento es menor al de otras opciones de tratamiento.
- Las variaciones de caudal no afectan el funcionamiento.
- Facilita el reciclaje y la reutilización del agua.
- El manejo de químicos no es requerido.
- No hay generación de olores cuando son de flujo subsuperficial.

Además proporcionan un hábitat para muchos organismos y generan beneficios adicionales al mejoramiento de la calidad hídrica y condiciones estéticas de los espacios abiertos.

También se presentan algunas limitaciones respecto a su uso, entre las que están:

- Requieren generalmente grandes extensiones de terreno en comparación con tratamientos convencionales.
- El rendimiento del sistema puede ser menos constante al de un proceso convencional.
- Los componentes biológicos son sensibles a sustancias como el amoníaco y los pesticidas que llegan a ser tóxicos.
- Requiere una mínima cantidad de agua para que sobreviva el sistema biótico ya que no soporta estar completamente seco.

#### 4.1.1 Funciones de los humedales artificiales

**Procesos de remoción físicos:** Los humedales artificiales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociado con material particulado, como por ejemplo:

**Procesos de remoción biológicos:** La remoción biológica es quizá el camino más importante para la degradación de contaminantes en estos humedales artificiales. Extensamente reconocido para la remoción de contaminantes en éstos por la captación de las especies vegetales. Los contaminantes forman de nutrientes esenciales para las plantas, tales como nitrato, amonio y fosfato, ya que tomados fácilmente por la flora de estos humedales (Metcalf & Eddy, 1995).

Las comunidades de macrófitas desempeñan un papel preponderante en los ecosistemas lenticos, ya que por un lado, constituyen el mayor a portante de MO a las aguas y por otro lado generan alrededor de ellas un hábitat que alberga una variada y abundante fauna asociada (Ramírez & Viña, 1998).

Por tanto el desarrollo de macrófitas están altamente influenciado por características como flujo, profundidad, turbiedad, nutrientes, caudal de las aguas residuales, dinámica del sistema y poblaciones ya existentes en este; a su vez , las comunidades que estén en el sistema, dependerá de las características la especie utilizada, como las flotantes, las emergentes, las hojas flotantes y sumergidas, que de acuerdo a sus adaptaciones tendrán mejor capacidad de absorber y sintetizar sustancias contaminante; dado por su metabolismo que está basado en la acción de los microorganismos como bacterias y protozoos dentro de zona de las raíces(rizosferas) que oxidan bioquímicamente la MO del agua residual (Duncan & Groffman, 1994).

Las macrófitas activamente transportan oxígeno a las capas anaeróbicas del suelo y así ayudan a la oxidación y precipitación de los MP en la superficie de las raíces. La absorción de nutrientes varía con la especie y está relacionada a su crecimiento bajo diferentes condiciones. Dado a que las raíces proveen condiciones aerobias para los protozoos por su actividad depredadora son importantes en la eliminación de las bacterias incluyendo las patógenas (Ramírez, et al., 2001) (Sanchez & Lugo, 1993).

Por ende, se participa en procesos de biodegradación de residuos orgánicos, hidrocarburos y metales, influenciados por estos microorganismos. Las reacciones químicas y procesos de descomposición biológica descomponen los compuestos complejos en sustancias más sencillas. La filtración natural en el sustrato también ayuda a la eliminación de muchos contaminantes y microorganismos patógenos (Wolverton, Barlow, & McDonald, 1976).

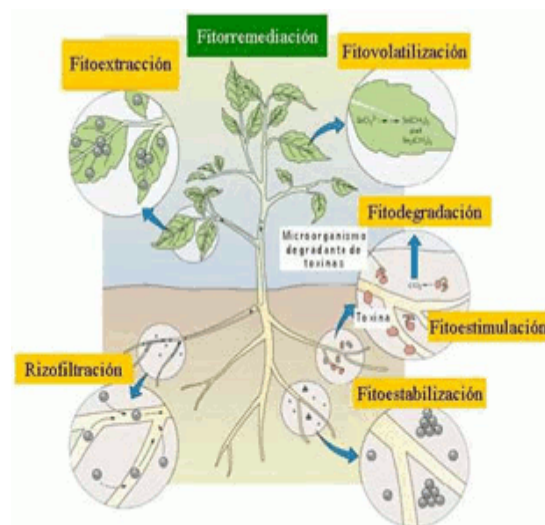
Por esto las macrófitas juegan un papel fundamental en las aguas residuales objeto de estudio, que van al río Bogotá. Puesto que son portadoras de microorganismos y partículas contaminantes para la salud humana (Rojas, 2002). Ya que se puede utilizar la capacidad que tienen las macrófitas de absorber grandes cantidades de nutrientes y sustancias tóxicas dado a que participan en procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan en los humedales superficiales, mejorando la calidad hídrica (Prystay, 1998).

Entre los procesos biológicos, los más importantes son aquellos en los que tienen que ver los microorganismos e incluye la oxidación de C, N y S; dependiendo de la disponibilidad de O<sub>2</sub>. Donde las reacciones de reducción predominan en los sistemas en presencia de gran cantidad de MO y la mayor parte del N se pierde por medio de la desnitrificación. Las interacciones entre estos procesos y la biota son bastantes complejas y algunos elementos como el Fe, Al y Mn juegan un papel importante en la remoción de P. Las condiciones anaerobias, en donde se da la desnitrificación, no son favorables para la absorción y precipitación del P de las aguas residuales (Nichols, 1983) ; (Gale, Reddy, & Graetz, 1993).

Por tanto contribuyen a la determinación de la calidad de aguas continentales. En donde recurren a los parámetros fisicoquímicos y biológicos (Reed R, 2000) para la evaluación y utilización de indicadores de la calidad y diversidad de especies de flora y fauna. Tomando parte de distintas etapas de la descomposición y los diferentes niveles óptimos de nitritos, nitratos, amonio, fosfatos, pH, conductividad, etc. (Romero A. , 2005). Considerando que en 100 ml de agua no se encuentren Coliformes, y por lo tanto no debe estar presente número más probable (NMP) la especie *Escherichia coli* (Gerhard & Romero, 1987).

Procesos de remoción químicos: La absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes.

Las macrófitas pueden incorporar las sustancias contaminantes mediante distintos procesos; se representan en la Figura 1 y se explican en la Tabla 1:



**FÍGURA 1.** Procesos depuración de contaminantes por medio de macrófitas tomado de (Freís, 2008)

#### 4.2 Procesos utilizados por las macrófitas para asimilar contaminantes

A continuación se explican los procesos utilizados por las macrófitas para asimilar contaminantes.

<b>TABLA 1. Procesos utilizados por las macrófitas para asimilar contaminantes.</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Proceso Involucrado</b>	<b>Contaminación Tratada</b>
<b>Fitoextracción</b>	Las macrófitas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces)	Cd, Co, Cr, Ni, Hg, Pb, Se y Zn
<b>Rizofiltración</b>	Las raíces de las macrófitas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cd, Co, Cr, Ni, Hg, Pb, Se, Zn y compuestos fenólicos
<b>Fitoestabilización</b>	Las macrófitas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.	Lagunas de desecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
<b>Fitoestimulación</b>	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.
<b>Fitovolatilización</b>	Las macrófitas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Hg, Se y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
<b>Fitodegradación</b>	Las macrófitas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones ( <a href="#">TNT</a> , <a href="#">DNT</a> , <a href="#">RDX</a> , nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, <a href="#">DDT</a> , pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

FUENTE: (Freís, 2008).

### 4.3 Tipos de humedales artificiales

Actualmente los humedales artificiales se han clasificado según su función de la presencia o no de una superficie libre de agua en contacto con la atmósfera; o varían en función de la circulación o flujo del agua en el sistema (US EPA U. S., 2000).

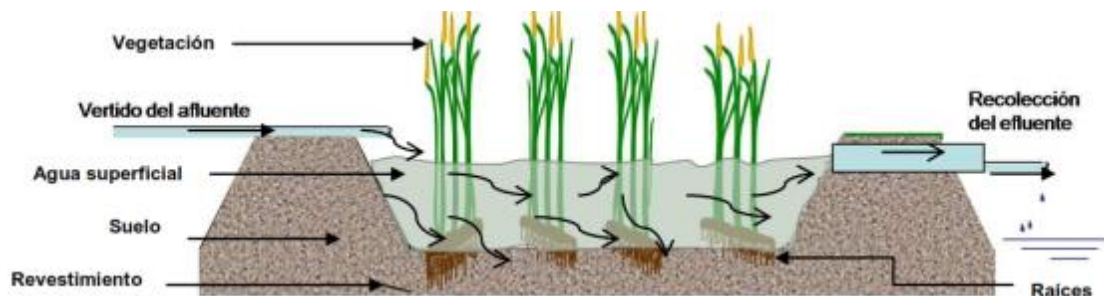
**Humedal de Flujo Superficial- HFS (Free Water Surface- FWS):** Las macrófitas están enraizadas en el fondo del humedal y el flujo de agua se hace a través de las hojas y tallos de las macrófitas (Gallego, 2010).

**Humedal de Flujo Subsuperficial- HFSS (Vegetated Submerged Bed- VSB):** La lámina de agua no es visible, y el flujo atraviesa un lecho relleno con arena, grava o suelo, donde crecen las macrófitas, que sólo tienen las raíces y rizomas en contacto con el agua (US EPA A. E., 1993).

En humedales aerobios, los procesos de tratamiento ocurren principalmente en la capa superficial de poca profundidad. En humedales artificiales anaerobios, el agua primordialmente fluye a través del substrato y el tratamiento ocurre mayores interacciones con éste. Se ha sugerido que sistemas de FSS son más exitosos, particularmente para el tratamiento de aguas residuales ácidas y remoción de MP como el Zn y el Cu en donde los factores como el diseño, el tipo de macrófitas a utilizar juegan un papel importante a tener en cuenta para un óptimo funcionamiento (Stottmeister, y otros, 2003) (O'Sullivan, Murria, & Otte, 2000).

#### 4.3.1 Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)

En la Figura 2 se puede evidenciar el Funcionamiento y partes HAFS



## **FÍGURA 2.** Funcionamiento y partes HAFS tomado de (Gallego, 2010).

Es una superficie de suelo en el que las macrófitas están inundadas de aguas residuales (AR) primordialmente hasta la profundidad de 0,10 a 0,45 m con macrófitas emergentes, flotantes, sumergidas o su combinación. Para estos sistemas diseñados principalmente para tratamiento, es común que sólo se seleccionen una o dos especies para la siembra, dependiendo de las características y requerimientos biológicos (Romero, 2008). En estos humedales el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. En algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación en el humedal. Puede estar con o sin cubierta, en función de la reglamentación y/o requisitos de desempeño (Commission, 2000).

Este sistema por lo general cuenta con una o más cuencas o canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la macrófitas seleccionada. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del AR aplicada y su recolección. Los sistemas FS son usados para tratamiento del drenaje de minas, escorrentía pluvial urbana, desbordes de drenajes combinados, escorrentía agrícola, desechos ganaderos, avícolas y lixiviados de rellenos sanitarios (US EPA U. S., 2000)

### **4.3.2 Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS)**

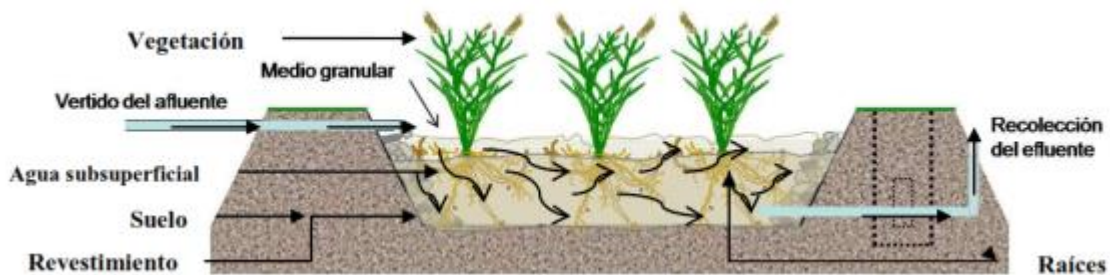
Estos sistemas principalmente son canales o zanjas excavadas y rellenos de material granular poroso, donde el agua fluye por debajo de la superficie del medio soporte, sembrado de plantas emergentes. La profundidad del medio en estos humedales FSS tiene un rango de 0,30 y 0,90 m, siendo el valor más común el de 0,60 m. (Lara, 1999) En el que son de poca profunda y contiene grava suficientemente grande para permitir un flujo subterráneo a largo plazo sin obstrucciones. Las raíces y tubérculos (rizomas) de las plantas crecen en los espacios de poros en la grava, como consecuencia, la ecología de los humedales no es un factor crítico en los sistemas de HAFSS. Pueden considerarse como un reactor biológico tipo “proceso biopelículas sumergida” (Bayona, García, & Morató, 2004). Dado a estas características estos sistemas en combinación con otros procesos de depuración como por medio de macrófitas HAFSS son utilizados para tratar los efluentes de fosas sépticas y de sedimentación primaria y secundarios, los efluentes de laguna (Gil, 1999).

### **4.3.3 Tipos de HAFSS**

Estos humedales clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales; Además, de existir combinaciones entre estos para formar sistemas híbridos. El

comportamiento del humedal depende si el relleno está saturado de agua (HAFSSH) o está insaturado (HAFSSV) (Mena, Rodríguez, Núñez, & Villaseñor, 2000), (Serrano, García, Hernández, & Corzo, 2008).

A continuación en la Figura 3 se presenta al funcionamiento del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH).

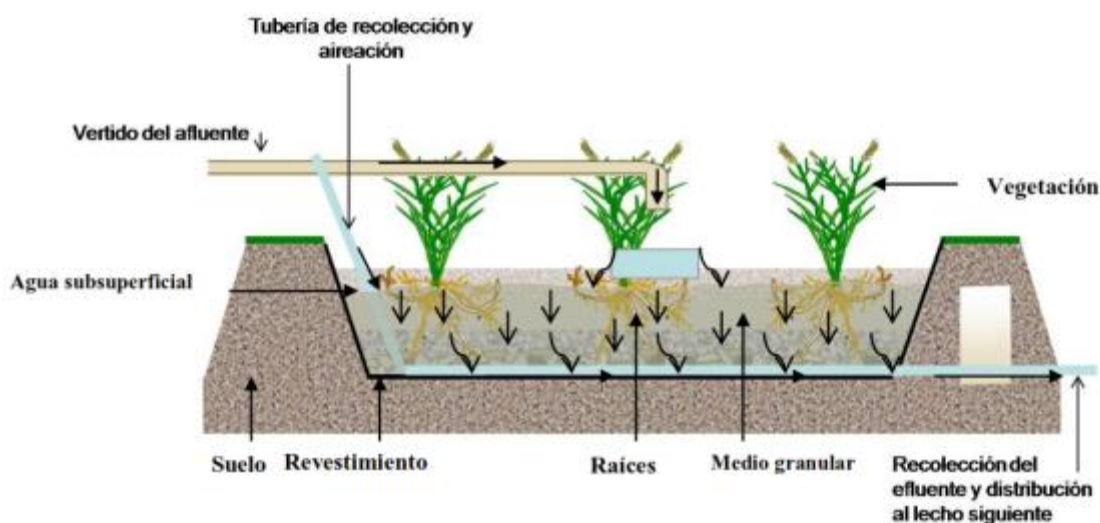


**FÍGURA 3.** Funcionamiento y partes HAFSSH tomado de (Gallego, 2010).

En HAFSSH el agua circula horizontalmente a través del medio granular los rizomas y raíces de las macrófitas. La profundidad del agua es de entre 0,30 y 0,90 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados desde los entre 0,05 y 0,10 m por debajo de la superficie (Serrano, García, Hernández, & Corzo, 2008). Trabajan con una alimentación continua realizada a lo largo de uno de los laterales. La recogida del agua depurada se realiza en la parte inferior del lado opuesto al de la alimentación. El nivel de afluente es regulado con una tubería flexible manteniendo en todo momento el lecho saturado, aunque hay algunas experiencias recientes satisfactorias con sistemas intermitentes (Vymazal & Masa, 2003)

La acción de tener siempre inundado el humedal influye en hechos como la producción de efluentes con ausencia de  $O_2$ , potencial redox muy negativo y posibilidad de malos olores. Además dichos efluentes pueden volverse blanquecinos debido a la precipitación de carbonatos y azufre así como en relación con la sulfato reducción. Usualmente operan con un máximo de  $2-6 \text{ g DBO/m}^2/\text{día}$  (Huang, y otros, 2004). Con este tipo de humedal de FSS se debe tener un seguimiento constante, ya que los malos olores no son aceptados en el proceso final de tratamiento de AR, pues esto indica que algunos procesos bioquímicos se limitaron por la falta de  $O_2$  en el sistema y que hay que hacer modificaciones al respecto (Cooper, 2005).

A continuación en la Figura 4 se presenta al funcionamiento del Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (HAFSSV)



**FIGURA 4.** Funcionamiento y partes HAFSSV tomado de (Gallego, 2010).

En general los sistemas verticales se combinan con horizontales para que se sucedan de forma progresiva los procesos de nitrificación y desnitrificación; se consiga así eliminar N (Cooper, 2005). La circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar a pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. La profundidad del medio granular es de entre 0,50 y 0,80 m. Operan con cargas de alrededor de 20-40 g DBO/m<sup>2</sup>/día, producen efluentes de mayor oxigenación y están libres de malos olores (Serrano, García, Hernández, & Corzo, 2008). Este sistema tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales (requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica). Por otra parte, son más susceptibles a la colmatación (Serrano, García, Hernández, & Corzo, 2008).

La alimentación se realiza distribuida uniformemente y habitualmente por cargas por toda la superficie, y la recogida a lo largo de todo el fondo. La tubería flexible, o no existe, o está en la posición más baja para mantener unas condiciones insaturadas en el medio poroso. Presenta los inconvenientes de que su operación es más compleja, un poco más cara y que no han sido tan estudiados como los horizontales (Mena, Rodríguez, Núñez, & Villaseñor, 2000) (Gallego, 2010).

#### 4.4 Fitorremediación

Este proceso utiliza organismos vivos para descontaminar suelos o agua contaminada con el fin de recuperar los ecosistemas afectados. El uso de macrófitas para eliminar contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad es normalmente conocido como

fitorremediación, fitorrecuperación, fitocorrección, fitorrestauración o fitorrehabilitación (Salt, Smith, & Raskin, 1998).

Estas tecnologías son especialmente útiles para su aplicación en grandes superficies, con contaminantes relativamente inmóviles o con niveles de contaminación bajo, y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo. Este sistema tiene grandes ventajas, especialmente la limpieza y la economía; dado a que no utilizan reactivos químicos peligrosos, ni afectan negativamente a la estructura del suelo del ecosistema en el cual se está utilizando, además en este proceso se usan macrófitas de la región evitando costosos transportes (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### 4.5 Macrófitas:

En este numeral se presenta las características de las macrofitas utilizadas en el proyecto.

##### 4.5.1 *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua o violeta de agua)

En la Figura 5 se presenta a continuación registro fotográfico de macrófitas extraídas para la unidad de tratamiento.



**FÍGURA 5.** Fotografía de *Eichhornia crassipes* extraída del humedal del Campus de UMNG.

Originaria de América de Sur en donde se han distribuido prácticamente por todo el mundo, ya que su aspecto ornamental originó su exportación a estanques y láminas acuáticas de jardines en climas templados y cálidos (Muramoto, Aoyama, & Oki, 1991). Perteneciente a la familia de Pontederiaceae y a la especie de macrófitas flotante de raíces sumergidas. En donde su fisiología carece de tallo aparente, provista de un rizoma, muy particular, emergente, del que se abre un rosetón de hojas que tienen una superficie esponjosa notablemente inflada en forma de globo que forma una vejiga llena de aire, mediante la que el vegetal puede mantenerse sobre la superficie acuática. A su vez sus hojas sumergidas

lineares, y las emergidas, entre obovadas y redondeadas, provistas de pequeñas hinchazones que facilitan la flotación. En verano produce espigas de flores lilas y azuladas que recuerda vagamente a la del Jacinto. Las raíces son muy características, negras con las extremidades bancas cuando son jóvenes, negro violáceas cuando son adultas, en las cuales desarrollan rizomas los cuales utiliza para su reproducción (Muramoto, Aoyama, & Oki, 1991) (Muramoto, Aoyama, & Oki, 1991).

Sus requerimientos son una alta demanda de luz aunque es tolerante a la sombra, el pH requerido es de 4 a 10. Por lado esta es muy utilizada para adornar pequeños lagos, embalses y acuarios; dado que esta ofrece un excelente refugio para los peces protegiéndolos del sol excesivo las heladas (Muramoto, Aoyama, & Oki, 1991). Las raíces constituyen un excelente soporte para el desove de las especies ovíparas, también por medio de sus raíces absorben gran cantidad de partículas toxicas y metales pesado (Muramoto, Aoyama, & Oki, 1991).

#### **4.5.2 *Limnobium laevigatum* (Buchón cucharita)**

En la Figura 6 se presenta a continuación registro fotográfico de macrófitas extraídas para la unidad de tratamiento.



**FÍGURA 6.** Fotografía de *Limnobium laevigatum* extraída del humedal del Campus de UMNG.

Pertenece a la familia Hydrocharitaceas. Es una especie muy frecuente en los humedales Bogotanos y canales de tierra fría (Chaparro, 2003). Sus hojas acorazonadas asemejan a una cuchara de 2,0 a 5,0 cm de diámetro, de ahí su nombre vulgar, están provistas de un tejido esponjoso que funciona como un perfecto flotador (Cook & Köning, 1983).

Se propaga de dos formas, por semillas y por estolones formando rosetones de 3 hojas pecioladas. En condiciones óptimas hay floración; cuenta con flores sin pistilos, pediceladas de color amarilla y se dan de manera individual según el sexo en cada macrofita (Cook & Köning, 1983). En el extremo de cada estolón se desarrolla una nueva macrofita y así en breve tiempo logran la cobertura de extensas áreas de la superficie del agua. Esta macrofita se halla distribuida en el continente desde México hasta el Perú (Bonilla & Santamaría, 2010). Su utilidad como alimento para animales, abono orgánico y como fitodepurador de aguas contaminadas (Bernal, Galeano, Rodríguez, Sarmiento, & Gutiérrez, 2010).

#### **4.5.3 *Polygonum punctatum* (Barbasco, hierba de sapo y catay)**

En la Figura 7 se presenta a continuación registro fotográfico macrófitas extraídas para la unidad de tratamiento.



**FÍGURA 7.** Fotografía de *Polygonum punctatum* extraída del humedal del Campus de UMNG.

Macrofita perteneciente a la familia de las poligonáceas, hierba rizomatosa puede llegar a medir entre 30 y 100 cm de alto. Sus tallos son de color verde a rojizo, con puntos glandulares y nudos ligeramente engrosados. Puede ser o no ramificada o muy ramificada (Wagner, Herbst, & Sohmer, 1999). Sus ócreas son hialinas y rojizas. Las hojas son simples, alternas y pecioladas. La lámina es ampliamente lanceolada con márgenes ciliados, ápice truncado y eventualmente, con puntos glandulares inconspicuos (Rzedowski & Rzedowski, 2001). Sus inflorescencias son panículas erectas o arqueadas, con racimos claramente interrumpidos. Los pedúnculos florales tienen puntos glandulares conspicuos, al igual que sus pétalos, los cuales son blanco verdosos, rosado-verdosos o verdes casi por completo. Su fruto trígono o lenticular, es una nuez punteada con glándulas amarillo marrón oscuro o negro, con superficie brillante (Wagner, Herbst, & Sohmer, 1999).

Esta especie perenne su distribución nativa es amplia, originaria de Norte y Suramérica y las islas del Caribe (Stevens, Ulloa, Pool, & O, 2001). Se encuentra suelos húmedos, arroyos o estanques, a altitudes entre los 20 a 2850 msnm, su grado de adaptación es amplio en diferentes tipos de suelos, resistente a altas condiciones anaerobiosis y baja resistencia a sequias. Se desarrolla en pH en 6 a 8,7 y condiciones de plena luz (Agriculture & Service, 2010).

#### **4.5.4 *Typha spp* (Totora o junco de la pasión)**

En la Figura 8 se presenta a continuación registro fotográfico macrófitas extraídas para la unidad de tratamiento.



**FÍGURA 8.** Fotografía de *Typha spp*. Extraída del humedal del Campus de UMNG.

Macrofitas graminoide de la familia Typhaceae que miden 1.5 a 3.0 m de altura; esta posee unas 8-13 especies de macrófitas herbáceas acuáticas emergentes robustas, perennes, rizomatosas, con hojas muy erectas, dísticas y bifaciales, y una espiga cilíndrica de numerosas flores diminutas polinizadas por viento (las masculinas arriba y las femeninas abajo), con un perianto como escamas o cerdas, y un fruto que es como un aquenio dehiscente con el ginóforo, el estilo, y el perianto persistentes en el fruto (Motivans & Apfelbaum, 1987).

Están distribuidas en pantanos y humedales de buena parte del mundo, formando densas colonias a veces impenetrables en aguas estancadas de 0.12 m de profundidad o más (Rook, 2004). Se encuentra en el Hemisferio Norte en lugares pantanosos. En Norteamérica, es una planta introducida. También se encuentra en algunos humedales de Perú y Chile aunque se han invadido gran número de humedales en la sabana de Bogotá en Colombia (USDA-ARS, 2005) (Wagner, Herbst, & Sohmer, 1999)

#### 4.6 Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) UMNG



**FÍGURA 9.** Fotografía de la PTAR de la UMNG (BERNAL, 2013).

La PTAR RESIBLOC III – 2.5 LPS, es una PTAR diseñada para la depuración biológica de aguas residuales domésticas del nuevo Campus de la UMNG en la sede Campus, Colombia; esta construida en concreto reforzado en sus parte externa y poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en sus partes internas. El procedimiento biológico utilizado para la depuración de las aguas residuales domésticas por medio de lodos activados (BERNAL, 2013). La PTAR tiene una proyección hasta el año 2025 de una demanda de 9330 estudiantes en total. La construcción de la planta se realizará en 3 etapas. Cada etapa para 3110 estudiantes. El caudal medio por planta es de  $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$  y total futuro de  $27\text{m}^3/\text{h}$  (BERNAL, 2013).

En el estudio presente la PTAR está en la primera etapa donde para el año 2013 cuenta con una demanda de 1500 estudiantes con un caudal  $2,7 \text{ l/segundo}$  según datos suministrados por UMNG; de acuerdo con esto el diseño del caudal de la planta proveyó con una dotación unitaria de  $70 \text{ l/Hab/día}$  dado que se proyectaba según el manual de manejo en una segunda etapa para el año 2013 para 6000 estudiantes. A su vez el diseño de la planta se basa en las

características promedio del agua residual, como es el contenido de Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales, Temperatura, pH. Se asume una carga promedio normal de DBO<sub>5</sub> de 250 mg/l; Esta proveniente en su mayoría de la utilización del sanitario en un 40 a 50%, puesto que los estudiantes permanecen de 4 a 8 horas diarias en la universidad (BERNAL, 2013).

#### **4.6.1 Descripción del Proceso de la PTAR- UMNG**

El procedimiento de tratamiento consiste básicamente:

- Captación de afluente y pre tratamiento

El agua procedente de las descargas del Campus (baños, cocinas, sanitarios y duchas) llegan a un colector principal. El agua pasa por un sistema de tratamiento preliminar donde se eliminan materiales sólidos de gran tamaño, como palos, hojas, preservativos, etc., por medio de rejillas de desbaste grueso y rejillas de desbaste fino. Posteriormente el agua pasa por un desarenado donde se eliminan las arenas y tierras. Finalmente pasa a una trampa de grasas para la eliminación de las mismas (BERNAL, 2013).

- Medición de caudal y amortización de caudales

El efluente pasa por una canaleta parshall donde se mide el caudal de entrada al sistema. Las aguas residuales llegan a un tanque de amortización de caudales, por gravedad. El cual permite regular, igualar y amortizar el caudal en los momentos en que se presentan picos máximos y mínimos. El agua pasa al tanque de aireación, por gravedad (aprovechando los niveles) (BERNAL, 2013).

- PTAR - lodos activados

El agua entra a un tanque de aireación, donde se realiza el proceso de tratamiento biológico de tipo aeróbico. Es aireada por medio de la inyección de aire del soplador a los difusores. Los difusores crean una microburbuja. Después de un tiempo de retención en el tanque de aireación (8 horas-cada tanque) pasa al tanque de sedimentación, con el fin de separar el agua de los lodos. El tratamiento aeróbico genera lodos; estos lodos son enviados del tanque de aireación al tanque de sedimentación por medio de un tubo; en este sitio se inyecta aire generado por el soplador empleando una tubería independiente permitiendo que los lodos viajen a través del air-lift. Desde ahí se retiran los lodos, los cuales son enviados al concentrador de lodos o a la cabeza de proceso con el fin de crear la masa microbiana (Lodos Activados) empleando air-lift (sistema que evita el empleo de bombas utilizando el aire del soplador) (BERNAL, 2013).

- Desinfección y descarga

Luego el agua tratada pasa a un tanque de contacto donde se le suministra una solución de cloro gaseoso, con lo cual se busca la desinfección, eliminando las bacterias que puedan encontrarse en el agua. Después de este tratamiento se le realiza una nueva medición de caudal y está en condiciones aptas para ser arrojada al río Bogotá, sin que cauce ningún perjuicio a la naturaleza y de acuerdo a la regulación vigente del Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos. Sin embargo, las descargas de aguas serán vertidas directamente al humedal artificial, de ahí el agua se utilizara para riego. Únicamente se realizara vertimiento en caso que el dársena o reservorio no tenga la capacidad de soporte (BERNAL, 2013).

#### 4.7 Marco Legal

Según lo establecido en los objetivos de este estudio se tuvo en cuenta con la siguiente normatividad, organizada cronológicamente en la Tabla 2, la cual sirvió de base para la elaboración del proyecto:

**TABLA 2. Marco Legal Colombiano.**

A continuación se presenta la normatividad de vertimientos vigente:

Acto Legislativo	Incidencia en el proyecto
Decreto 1594 de 1984	Reglamenta los usos del agua y residuos líquidos, definió las normas de vertimiento y los estándares de calidad de agua con los que las autoridades ambientales deben administrar el recurso para preservar su calidad.
Resolución 1433 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial	Establece que las empresas prestadoras del servicio de alcantarillado deben presentar ante la autoridad ambiental competente un Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos - PSMV, acorde con los objetivos de calidad que la autoridad ambiental haya determinado para los cuerpos de agua.
Decreto 3930 de 2010	En el Artículo I, se encuentran algunas definiciones que tienen directa implicación en el proyecto a desarrollar, tales como: autoridades ambientales competentes, vertimiento, vertimiento puntual, vertimiento no puntual, entre otros. En el Capítulo VI, Artículo 24 se mencionan las prohibiciones acerca de los vertimientos, en el Artículo 25 con un tema relacionado se mencionan las actividades no permitidas. Dentro del Capítulo VI, Artículo 34, se especifica el protocolo para el monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales, en el cual se establecerán, entre otros aspectos: el punto de control, la infraestructura técnica mínima requerida, la metodología para la toma de muestras y los métodos de análisis

	<p>para los parámetros a determinar en vertimientos y en los cuerpos de agua o sistemas receptores.</p> <p>EL Capítulo VII, hace referencia a permisos de vertimientos y planes de cumplimiento, en sus Artículos 41 y 42 se habla sobre los requerimientos y requisitos necesarios para la obtención del mismo, para luego en su Artículo 59 especificar las sanciones correspondientes al no cumplimiento de lo establecido en esta norma y siguiendo el procedimiento previsto en la Ley 1333 de 2009.</p>
--	---

Fuente: (BERNAL, 2013).

#### 4.7.1 Contexto legal para el recurso hídrico

El análisis de la normativa para comprender el marco legal aplicable a la UMNG en Cajicá-Cundinamarca. En este sentido el Decreto 3930 de 2010 deroga el Decreto 1594 de 1984 que en su momento reglamentó la prevención y control de la contaminación salvo los Artículos 20 y 21 referentes a análisis fisicoquímicos. En cuanto a ordenamiento del recurso hídrico le otorga responsabilidad a las corporaciones autónomas regionales dentro de su territorialidad, de modo que estas deben establecer metas alcanzables de calidad del recurso hídrico tomando como unidades territorial integral las cuencas hidrográficas.

En cumplimiento de anterior la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, anticipándose temporalmente al desarrollo normativo nacional, mediante el acuerdo 46 de 2006 estableció objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020, hay que tener en cuenta que la cuenca abarca Bogotá D.C y otros municipios aledaños como Cajicá- Cundinamarca.

El meandro del río Bogotá que es el afluente que pasa por la UMNG en el Campus Cajicá-Cundinamarca afecta al tramo uno del río Torca, para el cual se establecen en el Artículo 3 de la Resolución 5731 de 2008 los siguientes objetivos de calidad de agua superficial:

**TABLA 3. Objetivos de calidad de agua superficial para el tramo 1 del río Torca. Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total (N Total), Fosforo Total (P Total), Coliformes Fecales y pH.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Objetivos de Calidad A 4 años (2009-2013)</b>
<b>OD</b>	mg/l	3
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg/l	15
<b>DQO</b>	mg/l	50
<b>N total</b>	mg/l	5
<b>P total</b>	mg/l	1
<b>Coliformes Fecales</b>	NMP/1000ml	1,E + 06
<b>pH</b>	Unidades	6.0-9.0

**Fuente:** Resolución 5731 de 2008 de la Secretaria Distrital de Ambiente, Artículo Tercero.

En cuanto a las condiciones de muestreo, la Secretaria Distrital de Ambiente a través de la Resolución 3956 de 2009 establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos al recurso hídrico en el Distrito Capital, como una medida de control ambiental enfocada también a la obtención de permiso de vertimientos. Específicamente en el Capítulo VI titulado “muestreo y análisis”, para el caso de análisis es necesario al norma exige un muestreo; En el caso PTAR UMNG- Cajicá en que el vertimiento no se realice de manera continua sino de manera intermitente, ò que el tratamiento del agua residual sea realizado por lotes, el Usuario deberá presentar por lo menos dos (2) monitoreos simples consecutivos de cada una de las actividades que generan vertimientos. Adicionalmente adjuntara al informe de caracterización una descripción de los procesos que generaron cada uno de los vertimientos, así como la descripción del proceso , el régimen de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales y el programa general del monitoreo previsto que en el presente proyecto se ve reflejado.

EL Artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, modificado con el Artículo 1 del Decreto 4728 de 2010, corresponde al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, fija los parámetros y los límites máximos permisibles que deben cumplir los vertimientos a las aguas superficiales, marinas, a los sistemas de alcantarillados público y al suelo asociado a un acuífero. En su Capítulo 4 da parámetros generales para monitorear en los vertimientos puntuales y valores límite máximos permisibles de acuerdo con la actividad económica desarrollada en el momento del vertimiento; En donde tomo en cuenta desde el Artículo 20 que es para los vertimientos puntuales de aguas residuales de los prestadores del servicio público de alcantarillado para descargas a cuerpos de agua superficiales y el Artículo 21 es para vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas en cuerpos de aguas superficiales, para algunos valores que no se contemplaban en estos Artículos se tuvieron en cuenta como referencia las actividades que fueran propias de la región que están en los Artículos 22 hasta el 29 donde se colocaron los valores más bajos para dichos variables evaluadas; Estos fueron los valores

tomados para la evaluación de los monitores del vertimiento de PTAR de UMNG- CAJICÁ y HAFSSV dentro del margen legal para este proyecto.

**TABLA 4. Valores permisibles en variables fisicoquímicas para el vertimiento de aguas según la normatividad colombiana del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el Decreto 3930 del 2010 modificado en el Artículo 1 en el Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales.**

<b>PARAMETROS</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>VALORES MAXIMOS PERMISIBLES</b>
<b>Temperatura</b>	°C	< 40,0 °C
<b>pH</b>	Unidades de pH	5,0 a 9,0
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	mg/l O <sub>2</sub>	400,00
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	mg/l O <sub>2</sub>	200,00
<b>Sólidos Sedimentables (SSED)</b>	ml/l	5,00
<b>Fósforo Total (P)</b>	mg/l	5,00
<b>Nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	mg/l	10,00
<b>Zinc (Zn)</b>	mg/l	0,20
<b>Plomo (Pb)</b>	mg/l	0,03
<b>Selenio(Se)</b>	mg/l	0,20
<b>Plata(Ag)</b>	mg/l	0,50
<b>Color Unidades Pt</b>	Unidades Pt-Co	75,00
<b>Cloruros (Cl<sup>-</sup>)</b>	mg/l	250,00
<b>Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	mg/l	250,00
<b>Dureza TOTAL</b>	mg/l CaCO <sub>3</sub>	250,00
<b>Alcalinidad Total</b>	mgCaCO <sub>3</sub> /l	500,00
<b>Conductividad</b>	µs/cm	400,00
<b>Turbidez</b>	Unidades	10,00
<b>Oxígeno Disuelto</b>	mgO <sub>2</sub> /l	2,00
<b>Coliformes Fecales</b>	(NMP/100ml)	2000,00
<b>Coliformes Totales</b>	(NMP/100ml) <sup>2</sup>	20000,00

Fuente: Decreto 3930 del 2010

## 5 METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología utilizada en el desarrollo del proyecto.

### 5.1. Localización

Este trabajo se realizó en la instalación de la Universidad Militar Nueva Granada en la sede de Cajicá (Cundinamarca). El Campus se encuentra a una longitud de  $74^{\circ}00.552' O$ , una latitud de  $4^{\circ}56.543' N$  y una altura de 2580 msnm; una temperatura media de  $13^{\circ}C$ , humedad relativa promedio de 82 % para el año 2013.



**FÍGURA 10.** Instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada en la sede de Cajicá-Cundinamarca. Google Earth 2014.




#### 5.1.1 Área de estudio

El Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (HAFSSV) se ubicó en el área destinada para la (PTAR) de UMG del Campus de Cajicá- Cundinamarca en donde ocupó una superficie de  $5 m^2$  en el área aledaña a la caseta de control de la PTAR; También de esta área se extrajeron las macrófitas provenientes del humedal natural que se encuentra en el meandro que hace parte de la UMNG. El agua residual doméstica que pasó por el proceso de fitodepuración en el humedal que se utilizó fue afluente de la PTAR, por lo que está formada por una mezcla de aguas de sanitarios, jabonosas y laboratorios, donde probablemente exista un aporte de sustancias químicas (orgánicas e inorgánicas) a su vez de materiales tóxicos provenientes de laboratorios, invernaderos y construcción de nuevos edificios. El agua residual es canalizada hacia la PTAR para ser procesada y luego vertida

sobre el reservorio y/o el río según los requerimientos legales establecidos. Para la comparación se tomaron muestras del agua del afluente y efluente de la PTAR como también del efluente del HAFSSV como se muestra en la Tabla 5.

**TABLA 5. Puntos de muestreos en la PTAR de UMNG en Cajicá- Cundinamarca.**

A continuación se relacionan los puntos de muestreos para el proyecto de investigación.

<b>PUNTO DE MUESTREO</b>	<b>REGISTRO FOTOGRÁFICO</b>	<b>LUGAR DE MUESTRA</b>
<p>M1 (Afluente de la PTAR)</p>		<p>Ingreso de las aguas residuales domésticas del Campus UMNG- CAJICÁ que es tratada por el HAFSSV y PTAR.</p>
<p>M2 (Efluente de HCFSSV).</p>		<p>Salida del agua residual domestica del Campus UMNG- CAJICÁ después del proceso de fitodepuración por los 5 niveles se recolecta en el último nivel del HAFSSV.</p>
<p>M3 (Efluente de PTAR).</p>		<p>Salida del agua residual domestica del Campus UMNG- CAJICÁ después del tratamiento de la PTAR hacia el humedal artificial.</p>

Fuente: (BERNAL, 2013).

### 5.1.2 Unidad experimental

#### Calculo de Unidad Piloto Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical




A continuación se presenta el cálculo completo, tendiente a determinar las características de un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (Kadlec & Knight, 1996).


Datos de partida:

- DBO<sub>5</sub> entrada: 84.2 mgO<sub>2</sub>/l
- DBO<sub>5</sub> salida: 146.5 mgO<sub>2</sub>/l
- SST entrada: 54 mg/l
- Caudal Q: 0.1 m<sup>3</sup>/d
- Medio: Grava media de 25mm, n=0.38, k<sub>s</sub>=25000m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d,

Se seleccionaron cuatro especies diferentes de macrófitas que presenten gran capacidad de absorción y depuración de aguas residuales para ser posteriormente sembrada en el HAFSSV, dependiendo de sus requerimientos y tamaño se dispuso el número de individuos por nivel y la ubicación en la unidad piloto HAFSSV como se muestra en la Tabla 6.

**TABLA 6. Macrófitas utilizada para HAFSSV.**

NIVEL	ILUSTRACIÓN	NOMBRE CIENTIFICO Y COMUN	FAMILIA	NUMERO DE INDIVIDUOS POR NIVEL
1		<b><i>Polygonum punctatum</i></b> (Barbasco)	Poligonacea	6 a 8
2 y 3		<b><i>Eichhornia crassipes</i></b> (Jacinto de agua)	Pontederiaceae	3 a 4
4		<b><i>Limnobium laevigatum</i></b> (Buchón cucharita)	Hidrocaritacea	8 a 10

5		<p><i>Typha spp.</i> (Totora)</p>	<p>Typhaceae</p>	<p>3 a 2</p>
---	---	---------------------------------------	------------------	--------------

Fuente: (BERNAL, 2013).

- Profundidad del HAFSSV: 0.6m
- Temperatura del agua a la entrada: 17.18° C

Asumimos una temperatura del agua de diseño en el HAFSSV de 16.7 °C.

$$K_{20} = 1.104(d)^{-1}$$

$$K_{20} = 1.104(1.06)^{(9-20)} = 0.581 d^{-1}$$

Determinación del área superficial requerida para el humedal HAFSSV

$$A_s = \frac{Q \times (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T (y) \times (n)}$$

Dónde:

Q = Caudal de entrada

Ln Co = DBO<sub>5</sub> entrada

Ln Ce = DBO<sub>5</sub> salida

K<sub>T</sub>: Constante de temperatura proveniente de las ecuaciones.

y: Profundidad de diseño del sistema, m

n: Porosidad del humedal

$$A_s = \frac{(0.1 \frac{m^3}{d}) \times (\ln 47.5 \frac{mg}{l} - \ln 7.30 \frac{mg}{l})}{0.581 d^{-1} \times 0.6 m \times 0.40} = 1.3417 m^2$$

- Tiempo de retención hidráulica

$$THR = \frac{A_s \times y \times n}{Q}$$

$$THR = \frac{(1.3417 m^2) \times (0.6 m) \times (0.40)}{(0.1 \frac{m^3}{d})} = 3.2 d$$

- Ancho de la celda del humedal

$$W = \frac{1}{y} \left[ \frac{(Q) \times (A_s)}{(m) \times (K_s)} \right]^{0.5}$$

$$W = \frac{1}{0.6} \left[ \frac{(0.1) \times (1.3417)}{(0.05) \times (1000)} \right]^{0.5} = 0.20 m$$

- Largo de la celda del humedal

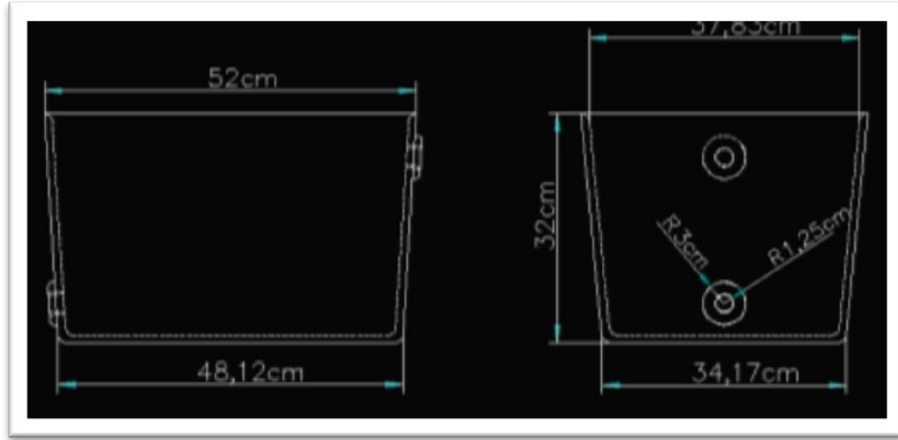
$$L = \frac{A_s}{W}$$

$$L = \frac{1.3417 m^2}{0.2 m} = 6.7 m$$

- Construcción de Unidad Piloto del HAFSSV

Para la construcción se empleó los siguientes elementos:

Recipientes rectangulares plásticos para los cinco niveles con las siguientes dimensiones como se muestra en la Figura 11.



**FÍGURA 11.** Planos de las dimensiones de cada nivel del HAFSSV (Bernal & Grijalba., 2013).

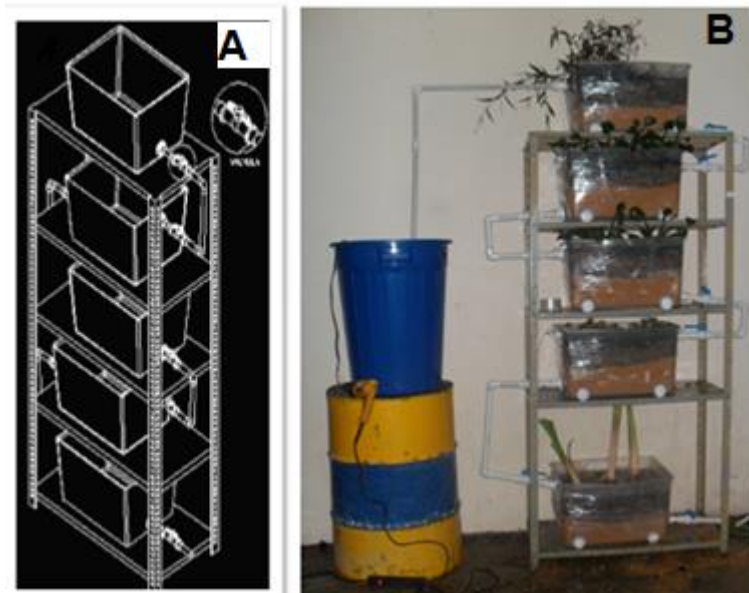
Los cuales permitieron alcanzar los requerimientos de área superficial, largo y ancho especificados en el diseño.

- TUBERÍA PVC de 1", para las instalaciones hidráulicas.
- Medio granular, se emplearon los medios seleccionados fueron: grava altamente porosa con un tamaño entre 10 a 12 mm, arena con tamaño promedio de 0.2 a 2 mm y gravilla con un tamaño entre 3 a 6 mm como se muestra en la Figura 10 A para dar soporte y ayudar a la depuración.
- Material vegetal, se sembraron para la fitodepuración del agua residual en la unidad piloto HAFSSV que contaba con 5 niveles y tenía una especie diferente de macrófita por cada nivel como lo muestra la Figura 12 B y específicamente la Tabla 7.



**FÍGURA 12.** A. Fotografía de medio granulado empleado para HAFSSV. B. Fotografía del material vegetal (*Eichhornia crassipes*) sembrado en nivel 2 y 3 del HAFSSV.

- Codos pvc 90° de 1".
  - Válvula de globo pvc 1".
  - Unión macho pvc 1".
  - Soldadura pvc.
- 
- Resultados de la Unidad Piloto Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical



**FÍGURA 13.** Los planos de la construcción de la unidad piloto HAFSSV (Bernal & Grijalba., 2013) B. Fotografía de la Unidad piloto HCFSSV de la UMNG-Cajicá.

Como se muestra en la Figura 13 la construcción, estabilización y arranque para el correcto funcionamiento de la Unidad piloto HAFSSV se realizó aproximadamente en 90 días, veinte de los cuales fueron dedicados a la instalación, veinte días para la estabilización del sistema con agua potable; los días restantes para maduración del sistema y el análisis de la Unidad en la remoción de contaminantes, el tiempo de retención hidráulica empleado fue de 3.2 días y con caudal de 0.325 m<sup>3</sup>/día.

El agua residual debe ingresar al tanque de igualación de la unidad con un tratamiento preliminar de sedimentación, con el fin de prevenir la colmatación de los medios granulares.


### 5.1.3 Variables evaluadas




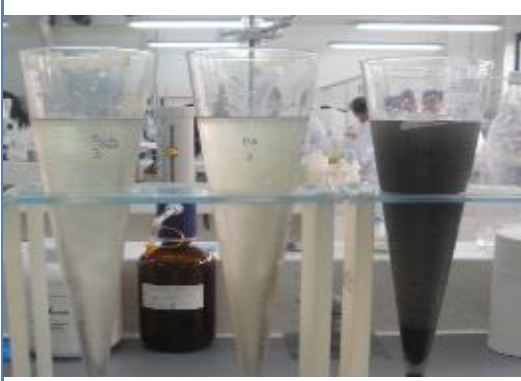
La evaluación del correcto funcionamiento de la unidad piloto HAFSSV y de la PTAR se desarrolló con base en el monitoreo y procesamiento de las muestras de aguas obteniendo de los datos del efluente y afluente de los puntos ya descritos, durante junio a septiembre en los cuales se podían diferenciar dos periodos de cargas de sedimentos: el periodo sin estudiantes que fue desde junio hasta mediados de julio en donde solo la contribución de contaminantes pertenecía del personal administrativo, restaurantes y la construcción de las edificaciones, por otro lado el segundo periodo fue el aumento de personas ya mencionado más el ingreso del personal de maestros y estudiantes que fue desde la segunda mitad de julio hasta la terminación del proyecto en septiembre.

Dichas evaluación son monitoreos que se realizaron en el Laboratorio de Calidad de aguas de la UMNG y equipos de monitoreo in situ; para los resultados del análisis muestras aguas se tuvieron en cuenta 15 pruebas fisicoquímicas y 2 biológicas ver la Tabla 7. También se realizó una evaluación a la Unidad piloto HAFSSV en donde se midió la concentración en mg/l de Zn, Pb, Se y Ag, Por tanto fueron llevadas las muestras en cadena de custodia para ser procesadas una sola vez durante el proyecto por parte de un laboratorio Analquim Ltda. Como se muestra en el Anexo 5; para su posterior evaluación la eficiencia del proceso de depuración y remoción de contaminantes bajo los parámetros establecidos de la normativa Colombiana establecida para vertimientos superficiales.



**TABLA 7.** Pruebas fisicoquímicas y microbiológicas evaluadas.


Se presentan las pruebas fisicoquímicas y microbiológicas evaluadas durante la investigación.

Parámetro	Método	Unidades	Ilustración
Temperatura	pH metro	°C	-
pH	pH metro	Unidades	-
Conductividad	Conductímetro	µS/cm	

<p><b>Color</b></p>	<p>Comparación visual</p>	<p>UC</p>	
<p><b>Oxígeno Disuelto</b></p>	<p>Oxímetro</p>	<p>mgO<sub>2</sub>/l</p>	<p>-</p>
<p><b>Turbidez (Nefelométrico)</b></p>	<p>Turbidímetro</p>	<p>Unidades</p>	
<p><b>DQO</b></p>	<p>Espectrofotométrico</p>	<p>(mg O<sub>2</sub>/l)620nm</p>	
<p><b>Sólidos Sedimentables</b></p>	<p>Volumétrico(Cono de Imhoff)</p>	<p>ml/l</p>	

<p><b>Alcalinidad Total</b></p>	<p>Titulimetrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</p>	<p>mgCaCO<sub>3</sub>/l</p>	
<p><b>DBO<sub>5</sub></b></p>	<p>Incubación 5 días(Titulación Tiosulfato de Sodio)</p>	<p>mgO<sub>2</sub>/l</p>	
<p><b>Coliformes Fecales</b></p>	<p>Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)</p>	<p>(NMP/100ml)</p>	
<p><b>Coliformes Totales</b></p>	<p>Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)</p>	<p>(NMP/100ml) 2</p>	

<p><b>Nitratos</b></p>	<p>Espectrofotométrico</p>	<p>mg/l NO<sub>3</sub></p>	
<p><b>Sulfatos</b></p>	<p>Turbidímetro</p>	<p>mgSO<sub>4</sub>/l</p>	
<p><b>Dureza Total</b></p>	<p>Titulimétrico (EDTA)</p>	<p>mg/l CaCO<sub>3</sub></p>	

<p><b>Fosfatos</b></p>	<p>Colorimétrico(Cloruro Estañoso)</p>	<p>mg PO<sub>4</sub>/l</p>	
<p><b>Cloruros</b></p>	<p>Argenimetrico</p>	<p>mg Cl<sup>-</sup>/l</p>	

1. Una vez en los puntos de muestreo, se rotularon con (fecha, punto de muestreo) y asignaron los recipientes de muestreo.
2. Se diligenció la cadena de custodia o el cuaderno de campo, (fecha y punto de muestreo), tipo de análisis a realizar, observaciones del entorno.
3. Se calibraron los equipos (multiparámetro) en el primer punto de muestreo del día. Para la medición de parámetros en el agua del punto de muestra se trasladaron los equipos al UMNG-Cajicá cada ocho días con respecto a (temperatura, pH y oxígeno disuelto). La medición de estos parámetros se realizó aproximadamente a un tercio de profundidad debido a que la profundidad del HAFSSV era inferior a 0,50 m y el efluente y afluente de la PTAR superaban esta profundidad por ende se tomó esta medida como referencia para todos los puntos de muestreos.
4. Antes de tomar la muestra se realizó purga con el agua residual objeto de estudio para todos los recipientes, con tres repeticiones.
5. Se realizó un muestreo puntual, teniendo en cuenta que el aporte de aguas residuales domésticas y el vertimiento no es constante durante el día se

seleccionaron previamente horas de las mañana durante la 9 am a 1 pm de muestreo donde ocurren los mayores picos de vertimiento y por ende aumento de caudal.

6. Se realizó la conservación y almacenamiento de muestras, debidamente refrigeradas a una temperatura no mayor a los cuatro grados centígrados (4°C) a excepción de las muestras de carácter biológico (DBO<sub>5</sub> y Coliformes fecales) las cuales se mantuvieron a temperatura ambiente como se muestra en la Tabla 8.

**TABLA 8.** Conservación y Control de calidad para las muestras.

Parámetros	Tipo de recipiente	Volumen (ml)	Conservación	Tiempo de muestreo	Máximo tiempo de almacenamiento
<b>Temperatura</b>	Beaker	500	<i>invivo</i>	Semanales	-
<b>pH</b>	Beaker	500	<i>invivo</i>	Semanales	-
<b>Conductividad</b>	Beaker	500	<i>invivo</i>	Semanales	-
<b>Color</b>	frasco de vidrio (Winkler)	250	-	Semanales	-
<b>Oxígeno Disuelto</b>	Beaker	500	<i>invivo</i>	Semanales	-
<b>Turbidez (Nefelometrico)</b>	frasco de vidrio (Winkler)	250	-	Semanales	-
<b>DQO</b>	frasco de vidrio (Winkler)	250	1ml de Ácido Sulfúrico H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a pH<2, sitio oscuro Refrigeración a 4°C.	Quincenal	48horas
<b>Sólidos Sedimentables</b>	Botellas vidrio	1000	-	Quincenal	-
<b>Alcalinidad Total</b>	frasco de vidrio (Winkler)	250	Refrigeración a 4°C, medio oscuro	Quincenal	48 horas

<b>Coliformes Fecales</b>	frasco de 200 vidrio (Winkler)	-	Quincenal	6 horas
<b>Coliformes Totales</b>	frasco de 200 vidrio (Winkler)	-	Quincenal	6 horas
<b>Nitratos</b>	frasco de 250 vidrio (Winkler)	Refrigeración a 4°C, medio oscuro	Quincenal	48 horas
<b>Sulfatos</b>	frasco de 250 vidrio (Winkler)	Refrigeración a 4°C, medio oscuro	Quincenal	48 horas
<b>Dureza Total</b>	frasco de 250 vidrio (Winkler)	Refrigeración a 4°C, medio oscuro	Quincenal	48 horas
<b>Fosfatos</b>	frasco de 250 vidrio (Winkler)	Refrigeración a 4°C, medio oscuro	Quincenal	48 horas
<b>Cloruros</b>	frasco de 250 vidrio (Winkler)	Refrigeración a 4°C, medio oscuro	Quincenal	48 horas
<b>DBO<sub>5</sub></b>	frasco de 250 vidrio (Winkler)	Medio oscuro y otro claro.	Quincenal	2horas

7. Se realizó la sistematización de los datos semanales y quincenales de las variables fisicoquímicas y biológicas en un informe de cada mes del estudio; en donde fue utilizada la estadística descriptiva mediante la hoja de cálculo. Posteriormente se hizo el análisis normativo de cada uno de los puntos de muestreo estudiados en el proyecto.

## 6 RESULTADOS

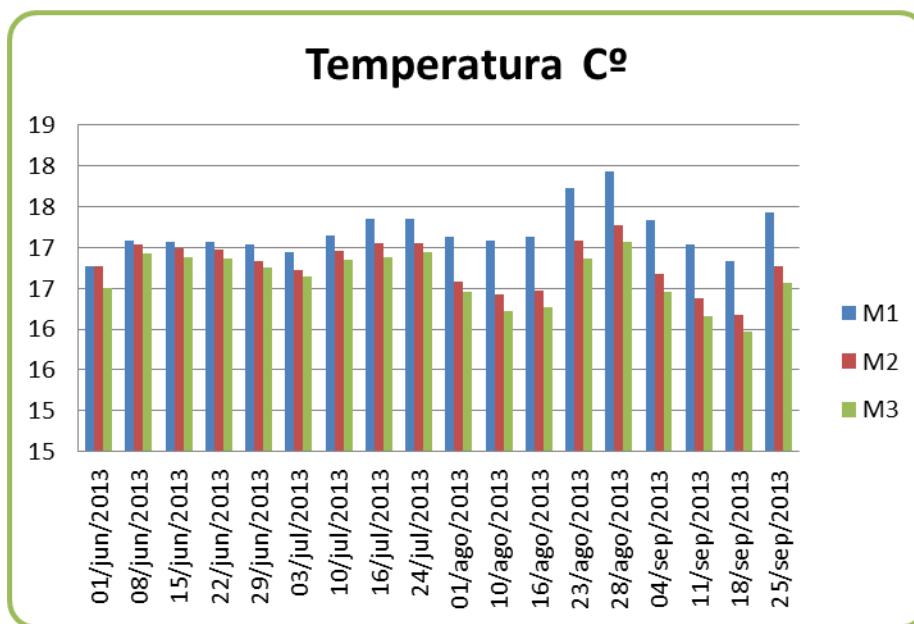
A continuación se presentan los resultados y análisis de datos obtenidos en el proyecto.

### 6.1 Variables semanales:

#### 6.1.1 Físicoquímicas

- Temperatura:

De acuerdo con los resultados de los análisis efectuados a las muestras puntuales, se puede observar para la variable de temperatura los meses junio y principio del mes julio, se mantuvieron similares entre los tres puntos con un promedio de 17°C en el cual fue el periodo sin estudiantes; En cuanto al segundo periodo con estudiantes el punto M1 fue mayor con un promedio 18°C frente a los otros puntos M2 y M3, que se mantuvieron similares con un promedio inferior 16°C. Para los meses de mediados del mes de julio al mes de septiembre solo con excepción de mitad de agosto que aumento a 17°C como se puede observar en la Gráfica 1.



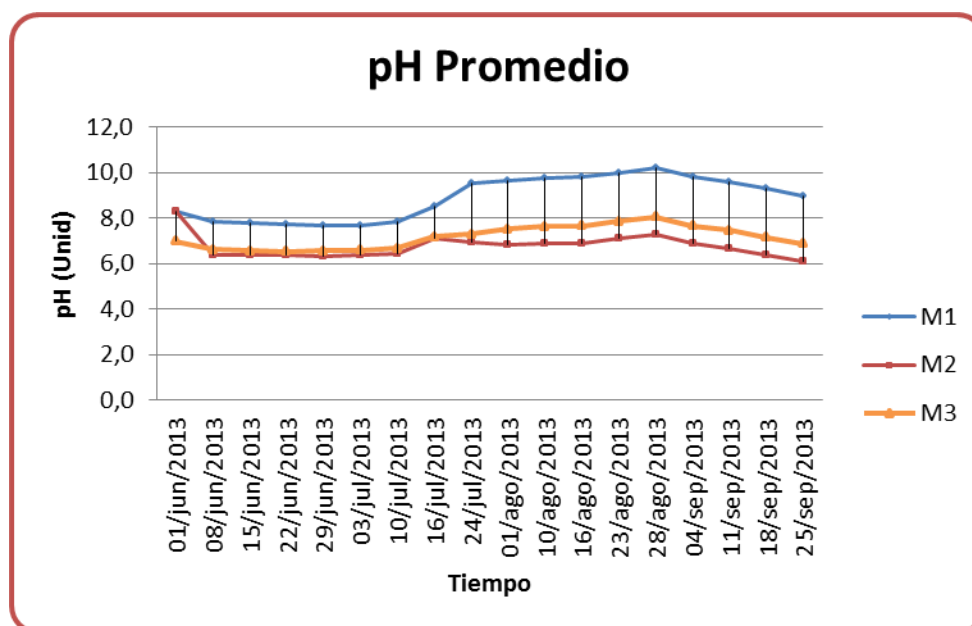
**FÍGURA 14.** La temperatura promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Evaluación Legal: Según los parámetros establecidos por el Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales en la Tabla 4 del presente trabajo muestra el valor máximo para

la variable de temperatura debe ser  $< 40^{\circ}\text{C}$  por tanto los puntos tres cumplen con lo establecido por la Ley con un promedio de  $17^{\circ}\text{C}$  entre los meses de junio a septiembre del 2013.

- pH:

La variable pH en los meses junio y principio del mes julio fue el periodo sin estudiantes entre los tres puntos fue diferencial en la primera semana del estudio entre M1 que fue el mayor lo que corresponde al afluente de la PTAR con un promedio de 8 Unidades lo cual se puede verse reflejado en la primera evaluación compartía este mismo valor con el punto de M2 que es la Unidad piloto HAFSSV dado que este es el valor inicial con que comenzó el proceso de fitodepuración, para la segunda semana de valoración evidencia disminución en su promedio pH que fue de 6 Unidades dicho valor fue igual para el punto de M3 que es el final del proceso industrial de la PTAR en su efluente de vertimiento al reservorio; En cuanto al segundo periodo con estudiantes el punto M1 aumento considerablemente en dos Unidades llegando con un promedio pH 10 Unidades frente a los otros puntos M2 y M3 que se mantuvieron similares con un promedio inferior pH 7 Unidades para los meses de mediados del mes de julio al mes de septiembre, puesto que para el punto M2 fue el menor entre estos dos puntos con un promedio de 6,5 Unidades mostrando un proceso de maduración de la Unidades HAFSSV como se puede observar en la Gráfica 2.



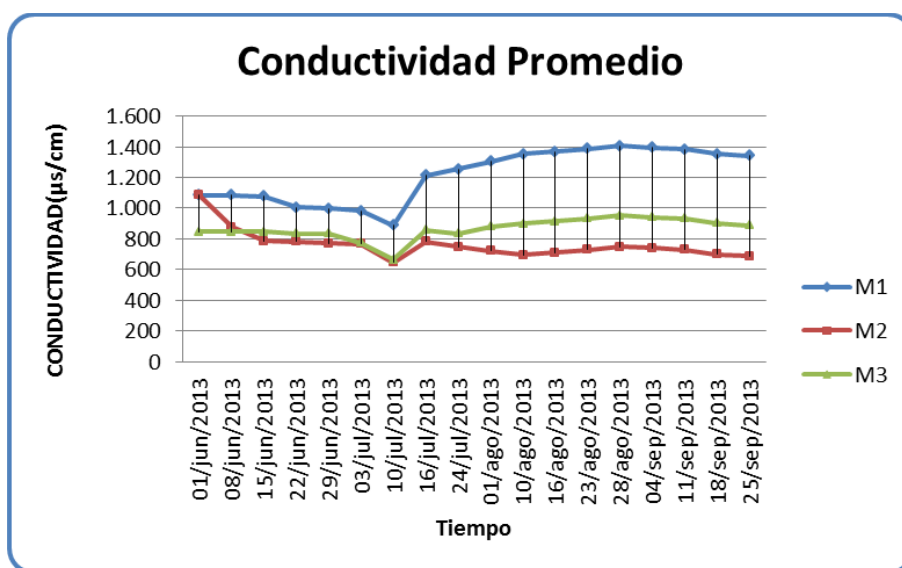
**FÍGURA 15.** El pH del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3:

### Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales muestra en la Tabla 4 del presente trabajo el valor del pH debe estar de 5 a 9 Unidades por tanto los puntos M2 y M3 cumplió en los cuatro meses del estudio con promedios de 6 a 7 Unidades respectivamente para cada punto, pero M1 con un promedio de 10 Unidades en el segundo periodo se hizo necesario de los tratamientos de M3 para que cumpliera con lo estipulado por la Ley.

- Conductividad eléctrica:

La variable conductividad durante el primer periodo entre los tres puntos fue diferencial en la primera semana del estudio entre M1, que fue el mayor con un promedio de 1100  $\mu\text{s/cm}$ ; lo cual se puede verse reflejado en la primera evaluación compartía este mismo valor con el punto de M2. Para la segunda semana de valoración evidencia una disminución en su promedio la conductividad que fue de 800  $\mu\text{s/cm}$  dicho valor fue igual para el punto de M3; En cuanto al segundo periodo con estudiantes el punto M1 aumento considerablemente llegando con un promedio la conductividad 1400  $\mu\text{s/cm}$  frente a los otros puntos; M2 y M3 que se mantuvieron similares con un promedio inferior 700  $\mu\text{s/cm}$  para los meses de mediados del mes de julio al mes de septiembre, puesto que para el punto M2 fue el menor entre estos dos puntos con un promedio de 600  $\mu\text{s/cm}$ , como se pudo evidencio M3 fue igual con un promedio 800  $\mu\text{s/cm}$  durante los cuatro meses como se puede observar en la Gráfica 3.

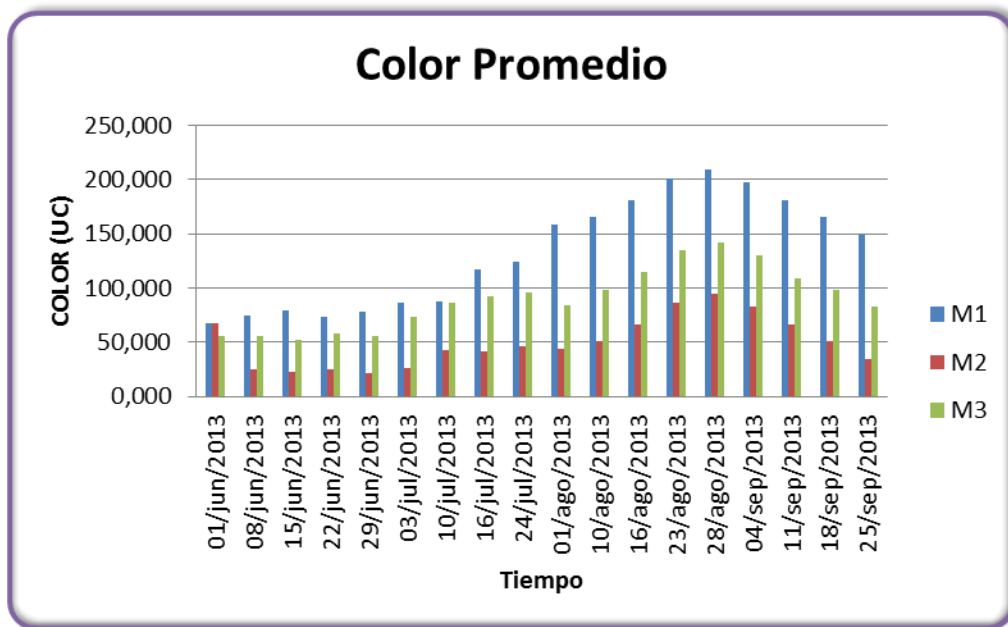


**GRAFICA 16** .La conductividad promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales muestra en la Tabla 4 del presente trabajo el valor debe estar de 400  $\mu\text{s/cm}$  por tanto los tres puntos no cumplieron en los cuatro meses del estudio con promedio de 700  $\mu\text{s/cm}$  con lo establecido por la normativa; por ende la UMNG- Cajicá enterados de dicha situación tomaron otras medidas de mitigación después del tratamiento PTAR para dar cumplimiento total por lo establecido por la Ley.

- Color:

La variable de color en la primera semana del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 68 UC, ya para la segunda semana de evaluación M2 evidencia una disminución hasta de un 50% en su promedio con un valor de 25 UC, diferente situación ocurrió para el punto de M3 que se mantuvo igual durante el primer periodo del estudio con un promedio de 55 UC; En cuanto al segundo periodo con estudiantes el punto M1 aumento considerablemente llegando con un promedio 180 UC frente a los otros puntos; M2 fue el mejor con un promedio inferior 80 UC durante el estudio, puesto que para el punto M3 fue el menor entre estos dos puntos con un promedio de 135 UC como se puede observar en la Gráfica 4.



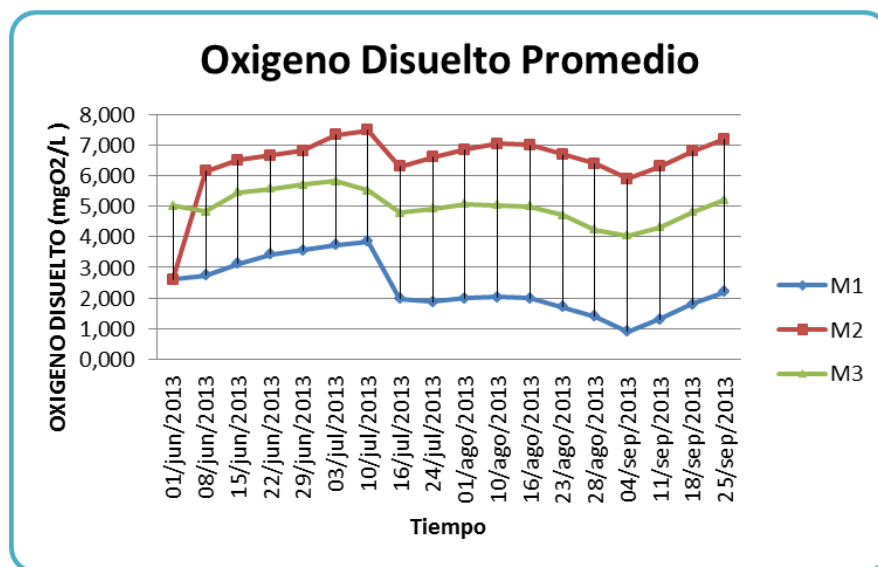
**FÍGURA 17.** El color promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del

2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el Establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable color el valor debe estar en 75 Unidades Pt-Co, por tanto se demuestra el cumplimiento de M2 en los cuatro meses del estudio con promedio inferior a 80 UC ; caso diferente ocurre con M1 y M3 que durante el primer periodo de estudio cumplió pero ya en el segundo periodo M1 como un promedio de 183 UPC, se hace necesario del tratamiento de la PTAR que logra un promedio para M3 de 114 UPC por ende se tomaron otras medidas de mitigación para el cumplimiento de la normativa.

- Oxígeno disuelto:

La variable de oxígeno disuelto en la primera semana del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 2,6 mgO<sub>2</sub>/l, ya para la segunda semana de evaluación M2 evidencia una aumento entre los tres puntos como lo muestra su promedio con un valor de 6 mgO<sub>2</sub>/l, diferente situación ocurrió para el punto de M1 y M3 que se mantuvo igual durante el primer periodo del estudio con un promedio de 2,6 y 5,5 mgO<sub>2</sub>/l respectivamente; En cuanto al segundo periodo con estudiantes el punto M1 disminución considerablemente llegando a ser inferior en su promedio 1,5 mgO<sub>2</sub>/l frente a los otros puntos; M2 fue el mejor con un promedio 6,8 mgO<sub>2</sub>/l durante el estudio, puesto que para el punto M3 de un promedio de 4,9 mgO<sub>2</sub>/l como se puede observar en la Gráfica 5.

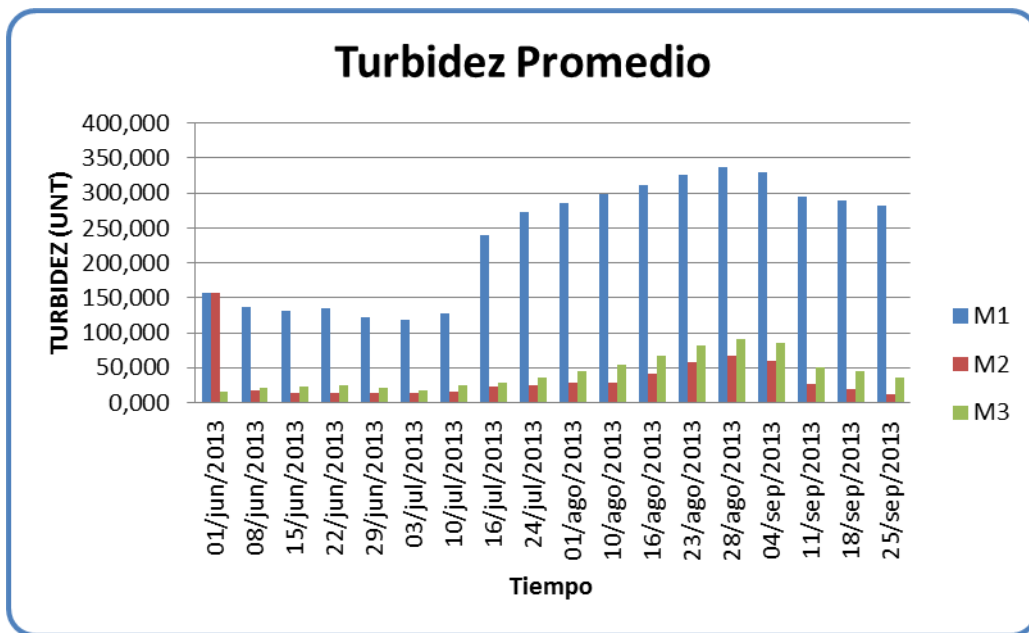


**FÍGURA 18.** El oxígeno disuelto promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en su Tabla 4 que para la variable Oxígeno Disuelto el valor debe estar en 2 mgO<sub>2</sub>/l por tanto se demuestra el cumplimiento de los tres puntos en el primer periodo del estudio con promedios superiores de Oxígeno Disuelto en sus muestra ; ya para el segundo periodo los tratamientos de depuración M2 Y M3 Cumplieron con promedios de 5 y 7 mgO<sub>2</sub>/l respectivamente para cada punto.

- Turbidez:

La variable de Turbidez en la primera semana del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 157 UNT, ya para la segunda semana de evaluación M2 evidencio una disminución con respecto al anterior resultado con un valor 18 UNT siendo similar con el valor encontrado para M3 que fue de 22 UNT, dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso M1 con 157 UNT; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 350 UNT frente a los otros puntos; M2 y M3 similares con un promedio inferiores 90 UNT mostrando M2 ser el mejor con promedios inferiores a 30 UNT durante el estudio, puesto que para el punto M3 de un promedio de 60 UNT como se puede observar en la Gráfica 6.



**FÍGURA 19.** La turbidez promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

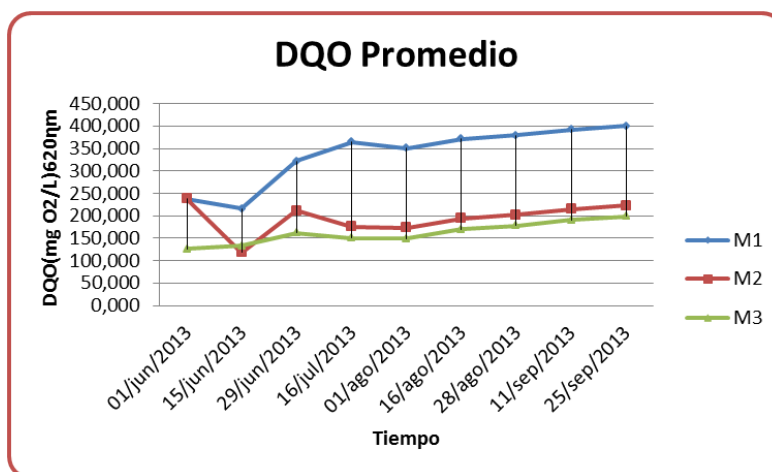
Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 que para la variable Turbidez el valor debe estar en 10 UNT por tanto se demuestra que los tres puntos no dan cumplimiento a la normativa con promedios superiores a lo establecido con resultados para M1 de 233 UNT, M2 35 UNT y para M3 con 42 UNT lo cual lo podemos corroborar con los resultados por el proyecto y por los resultados de los Anexos 1,2,3,4 ; por ende se hace necesario someter dichas aguas a tratamientos suplementarios para el cumplimiento de la Ley .

## 6.2 Variables quincenales:

### 6.2.1 Físicoquímicas

- DQO:

La variable de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 238 mg O<sub>2</sub>/l , ya para la segunda evaluación M2 evidencio una disminución con un valor 117 mg O<sub>2</sub>/l siendo similar con el valor encontrado para M3 que fue de 132 mg O<sub>2</sub>/l dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso M1 con 321 mg O<sub>2</sub>/l. En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 375 mg O<sub>2</sub>/l frente a los otros puntos; M2 y M3 similares con un promedio inferiores 180 mg O<sub>2</sub>/l mostrando M3 ser el mejor con promedios inferiores a 163 mg O<sub>2</sub>/l durante el estudio, puesto que para el punto M2 de un promedio de 175 mg O<sub>2</sub>/l como se puede observar en la Gráfica 7.

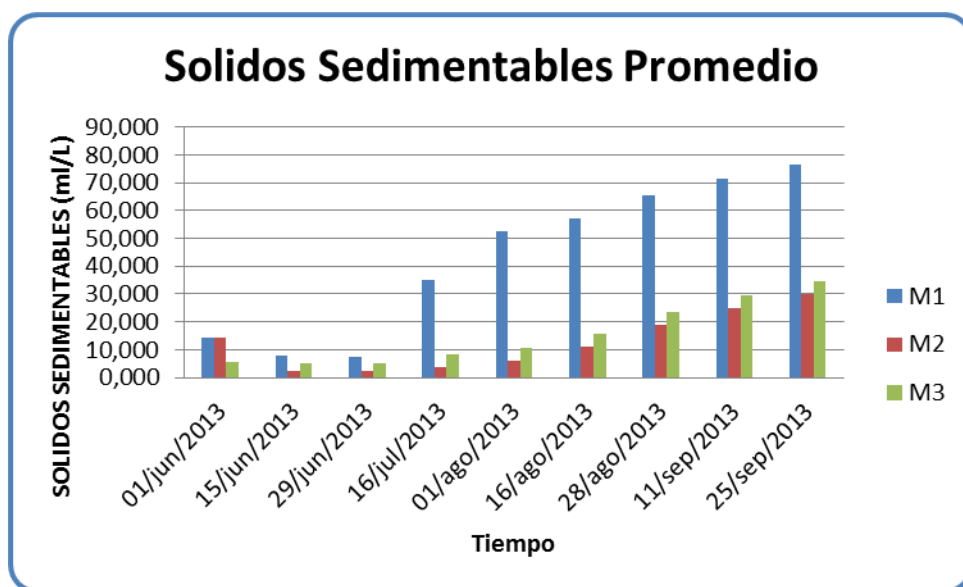


**FÍGURA 20.** DQO promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable DQO el valor debe estar en 400 mg O<sub>2</sub>/l por tanto se demuestra que los tres puntos dan cumplimiento a la normativa con promedios inferiores durante los dos periodos en los cuatro meses de estudio con resultados para el punto M1 con promedios entre 238 a 375 mg O<sub>2</sub>/l y los puntos de tratamientos M2 con 117 a 175 mg O<sub>2</sub>/l y M3 con un valor 132 a 163 mg O<sub>2</sub>/l.

- Sólidos sedimentables:

La variable de Sólidos Sedimentables en la primer periodo los tres puntos fueron similares con promedios <15 ml/l dichos valores expuestos se mantuvieron incluso M1 que tuvo un valor promedio con 14 ml/l; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo para los puntos M2 y M3 hasta la evaluación realizada el primero de agosto del presente año; ya después de esta fecha aumentaron gradualmente los valores para todos los puntos; caso diferente para el punto M1 que aumentó considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 75 ml/l frente a los otros puntos; M2 y M3 fueron similares con un promedio inferiores 30 ml/l como se puede observar en la Gráfica 8.

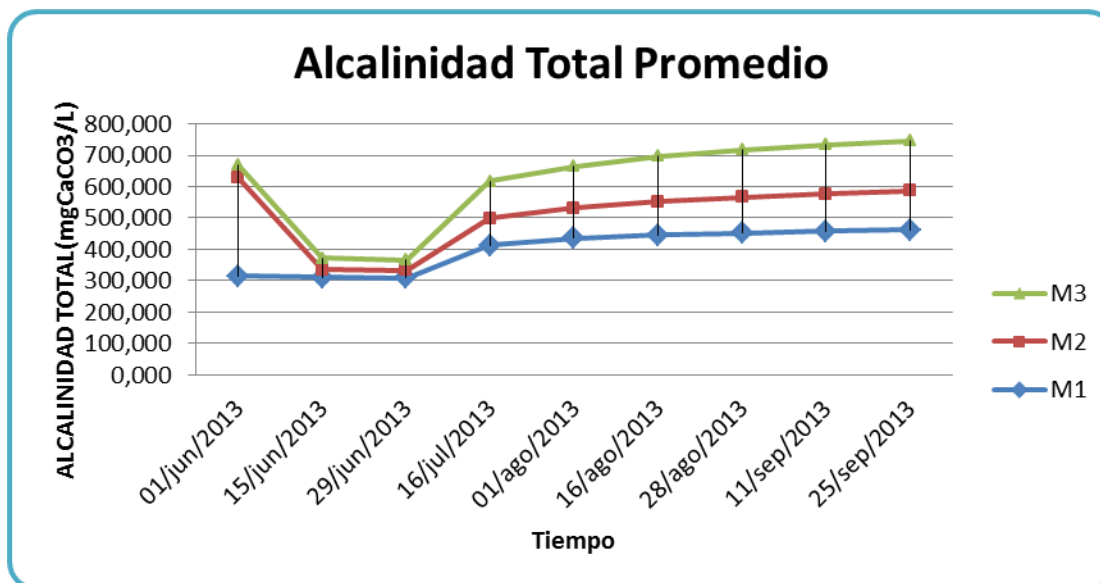


**FÍGURA 21** .Los sólidos sedimentables promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Sólidos Sedimentables el valor debe estar en 5 ml/l por tanto se demuestra que los puntos M2 y M3 dan cumplimiento en el primer periodo a la normativa con promedios inferiores como de 2,53 ml/l para M2 y 4,8 ml/l en M3; pero en el segundo periodo del estudio muestra que ninguno de los tres puntos cumple con promedios entre 75 ml/l para M1 y para los puntos de tratamientos M2 con 25 ml/l y M3 con un valor 34 ml/l se hace necesario adoptar tratamientos adicionales para cumplir con el parámetro de la Ley .

- Alcalinidad total:

La variable de alcalinidad total en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 315 mgCaCO<sub>3</sub>/l, ya para la segunda evaluación M2 evidencio una disminución hasta de un 80% con un valor 25 mgCaCO<sub>3</sub>/l siendo similar con el valor encontrado para M3 que fue de 30 mgCaCO<sub>3</sub>/l, dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso M1 con 308 mgCaCO<sub>3</sub>/l; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 450 mgCaCO<sub>3</sub>/l frente a los otros puntos; M2 y M3 similares con un promedio inferiores 135 mgCaCO<sub>3</sub>/l mostrando M2 ser el mejor con promedios inferiores a 117 mgCaCO<sub>3</sub>/l durante el estudio, puesto que para el punto M3 de un promedio de 148 mgCaCO<sub>3</sub>/l como se puede observar en la Gráfica 9.

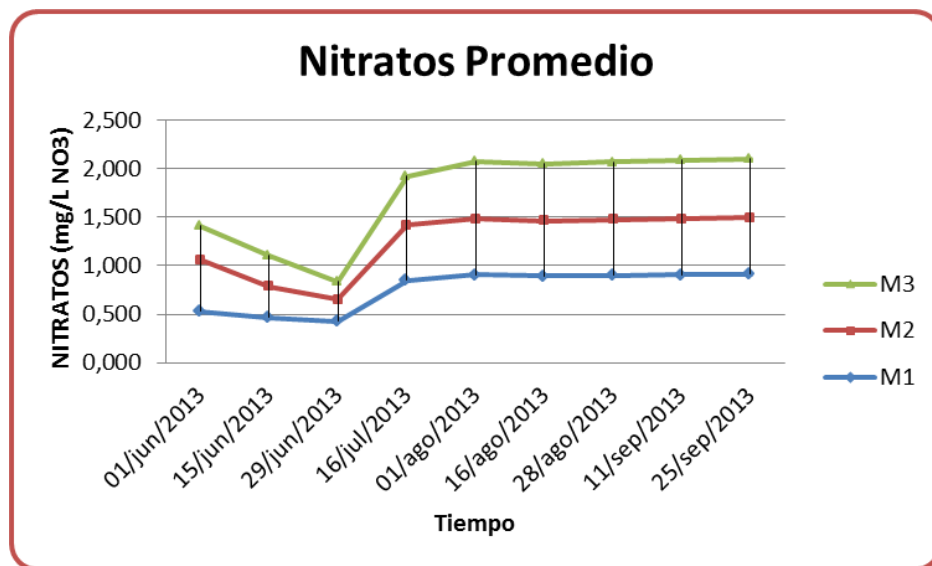


**FÍGURA 22** .La alcalinidad total promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Alcalinidad Total el valor debe estar en 500 mgCaCO<sub>3</sub>/l por tanto se demuestra que los tres puntos a lo largo del estudio dan cumplimiento total con promedios que van desde 450 mgCaCO<sub>3</sub>/l con el punto de muestreo M1 hasta con los puntos de muestreos M2 con 117 mgCaCO<sub>3</sub>/l y M3 con valor promedio de 148 mgCaCO<sub>3</sub>/l.

- Nitratos:

La variable de Nitratos en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 0,531 mg/l NO<sub>3</sub>, ya para la segunda evaluación y durante el tiempo del estudio M2 evidencio una disminución en un 20% de un valor 0,319 mg/L NO<sub>3</sub> ; un comportamiento similar presento el valor encontrado para M3 que fue de 0,324 mg/l NO<sub>3</sub>, dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso M1 con 0,464 mg/l NO<sub>3</sub>; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 0,90 mg/l NO<sub>3</sub> frente a los otros puntos; M2 y M3 similares con un promedios de 0,485 mg/l NO<sub>3</sub> para M3 siendo el mejor con promedios durante el estudio, puesto que para el punto M2 de un promedio de 0,502 mg/l NO<sub>3</sub> como se puede observar en la Gráfica 10.

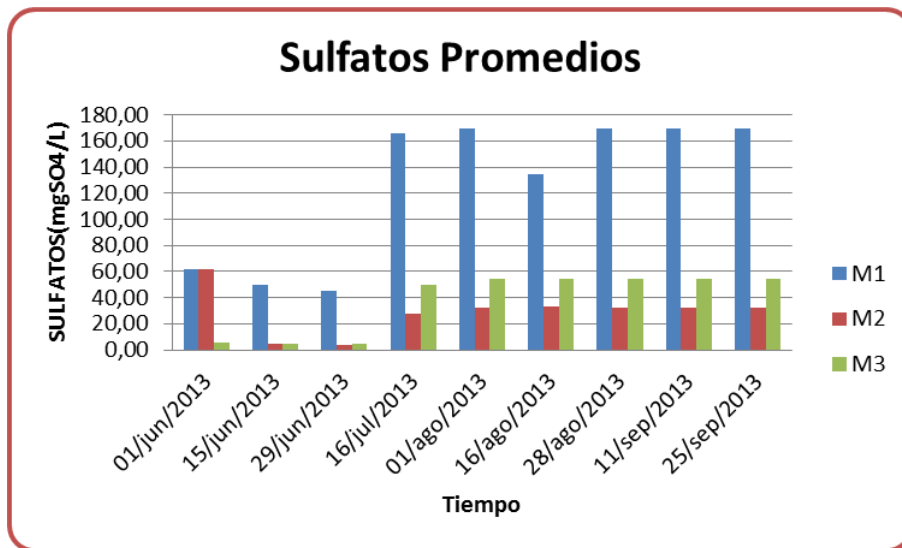


**FIGURA 23.** El nitrato promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Nitratos el valor debe estar en 10,00 mg/l NO<sub>3</sub> por tanto se demuestra que los tres puntos a lo largo del estudio dan cumplimiento total con promedios que van desde 0,90 mg/l NO<sub>3</sub> con el punto de muestreo M1 hasta con los puntos de muestreos M2 con 0,502 mg/l NO<sub>3</sub> y M3 con valor promedio de 0,485 mg/l NO<sub>3</sub>.

- Sulfatos:

La variable de Sulfatos en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 61,43 mgSO<sub>4</sub>/l ya para la segunda evaluación y durante el tiempo del estudio M2 evidencio una disminución en un 90% de un valor 4,57 mgSO<sub>4</sub>/l; un comportamiento similar presento el valor encontrado para M3 que fue de 4,87 mgSO<sub>4</sub>/l, dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso M1 con 52,42 mgSO<sub>4</sub>/l; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 169 mgSO<sub>4</sub>/l frente a los otros puntos; M2 y M3 similares con un promedios de 32 mgSO<sub>4</sub>/l para M2 siendo el mejor con promedios durante el estudio, puesto que para el punto M3 de un promedio de 54 mgSO<sub>4</sub>/l como se puede observar en la Gráfica 11.

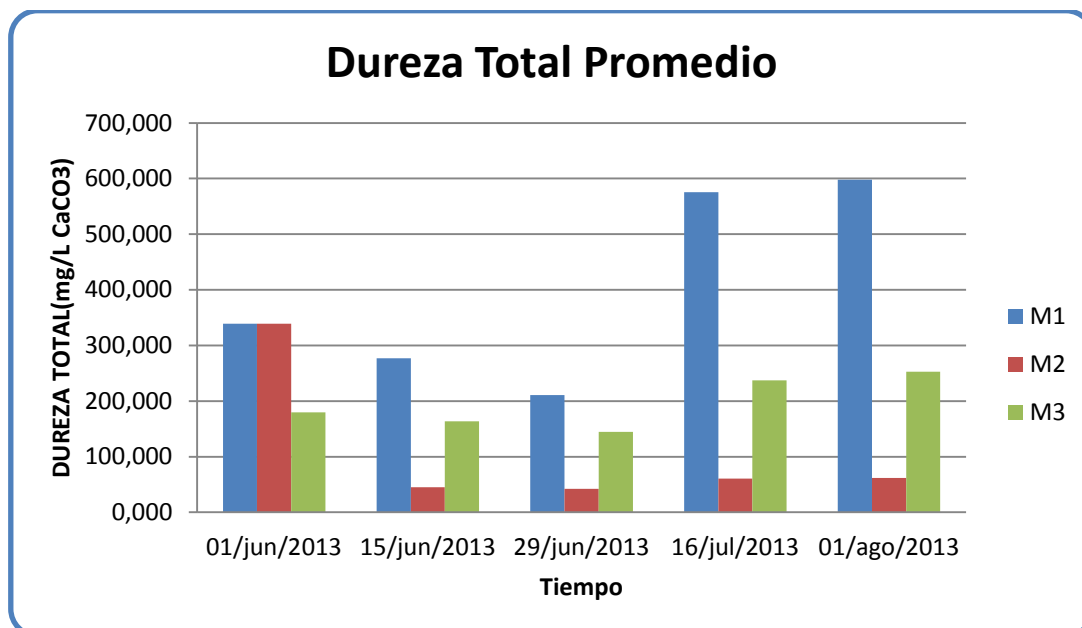


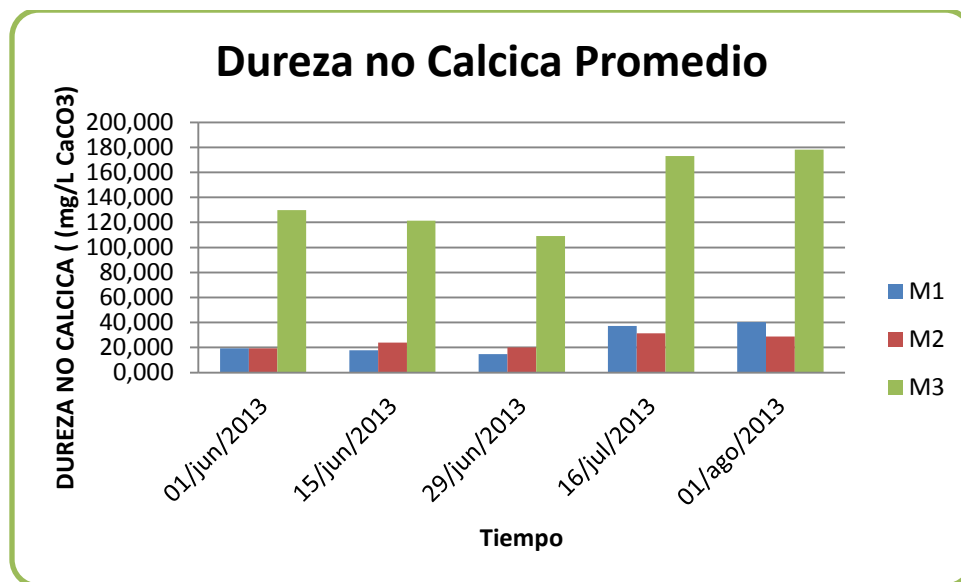
**FÍGURA 24.** El sulfato promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Sulfatos el valor debe estar en 250 mgSO<sub>4</sub>/l por tanto se demuestra que los tres puntos a lo largo del estudio dan cumplimiento total con promedios que van desde 169 mgSO<sub>4</sub>/l con el punto de muestreo M1 hasta con los puntos de muestreos M2 con 32 mgSO<sub>4</sub>/l y M3 con valor promedio de 54 mgSO<sub>4</sub>/l.

- Dureza total:

La variable de dureza total en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 339,15 mg/l CaCO<sub>3</sub>, ya para la segunda evaluación y durante el tiempo del estudio M2 evidencio una disminución en un 95% de un valor 45,41 mg/l CaCO<sub>3</sub>; A su vez el valor encontrado para M3 que fue de 162,65 mg/l CaCO<sub>3</sub>, dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso M1 con 275,72 mg/l CaCO<sub>3</sub>; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 659,41 mg/l CaCO<sub>3</sub> frente a los otros puntos; M2 y M3 similares con un promedios de 123,2 mg/l CaCO<sub>3</sub> para M2 siendo el mejor con promedios durante el estudio, puesto que para el punto M3 de un promedio de 314,41 mg/l CaCO<sub>3</sub> como se puede observar en la Gráfica 12.





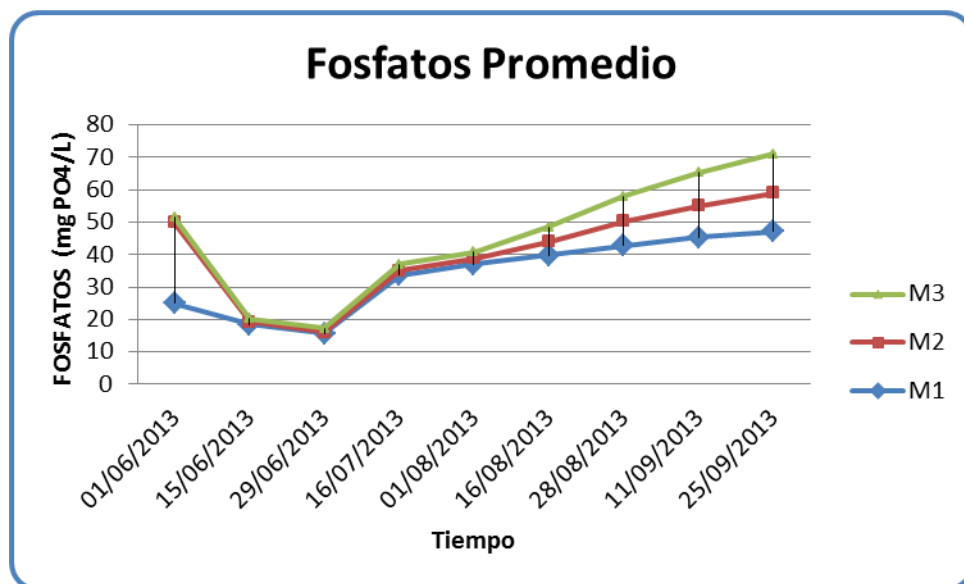
**FÍGURA 25** .La dureza total promedio y dureza no cálcica del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Dureza Total el valor debe estar en 250 mg/l CaCO<sub>3</sub> por tanto se demuestra que los puntos M2 y M3 dan cumplimiento en el primer periodo a la normativa con promedios inferiores como de 45,41 mg/l CaCO<sub>3</sub> para M2 y 162,65 mg/l CaCO<sub>3</sub> en M3; pero en el segundo periodo del estudio muestra que los puntos M1 y M3 no cumple con promedios entre 659, 41 mg/l CaCO<sub>3</sub> y 314,41 mg/l CaCO<sub>3</sub> respectivamente y evidenciando que la PTAR adopta tratamientos adicionales para cumplir con el parámetro de la Ley; En cuanto al tratamiento M2 fue el que cumplió con la normativa con un promedio de 123,2 mg/l CaCO<sub>3</sub>.

- Fosfatos:

La variable de fosfatos en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 24,98 mg PO<sub>4</sub>/l, ya para la segunda evaluación y durante el tiempo del estudio M2 se evidencio una disminución en un 90% de un valor 1,49 mg PO<sub>4</sub>/l; un comportamiento similar presento el valor encontrado para M3 que fue de 1,93 mg PO<sub>4</sub>/l, dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso M1 con 19,74 mg PO<sub>4</sub>/l; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 46,27 mg PO<sub>4</sub>/l frente a los otros puntos; M2 y M3 similares con un promedios de 10,77 mg PO<sub>4</sub>/l para M2 siendo el mejor con promedios durante el estudio,

puesto que para el punto M3 de un promedio de 11,15 mg PO<sub>4</sub>/l como se puede observar en la Gráfica 13.



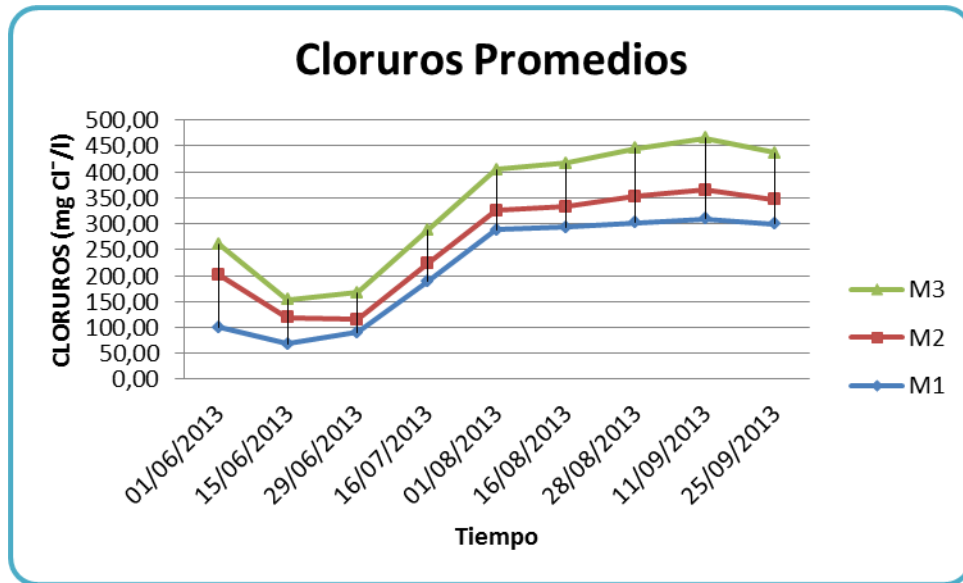
**FÍGURA 26.** El fosfato promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Fosfatos el valor debe estar en 5 mg PO<sub>4</sub>/l por tanto se demuestra que los puntos M2 y M3 dan cumplimiento en el primer periodo a la normativa con promedios inferiores como de 1,49 mg PO<sub>4</sub>/l M2 y 1,93 mg PO<sub>4</sub>/l en M3; pero en el segundo periodo del estudio muestra que ninguno de los tres puntos muestreados no cumple con la normatividad dando en sus resultados niveles superiores a lo establecido para este tipo de vertimiento y de actividad. Con promedios entre 46,27 mg PO<sub>4</sub>/l para M1, 10,77 mg PO<sub>4</sub>/l para M2 y 11,15 mg PO<sub>4</sub>/l para M3 manifestando que se debe adoptar tratamientos adicionales para cumplir con el parámetro de la Ley.

- Cloruros:

La variable de cloruros en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 100,80 mg Cl<sup>-</sup>/l, ya para la segunda evaluación y durante el tiempo del estudio M2 evidencio una disminución en un 47% de un valor 50,48 mg Cl<sup>-</sup>/l; A su vez el valor encontrado para M3 que fue de 48,54 mg Cl<sup>-</sup>/l, dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso M1 con

188,77 mg Cl<sup>-</sup>/l; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 304,16 mg Cl<sup>-</sup>/l frente a los otros puntos; M2 y M3 similares con un promedios de 51,57 mg Cl<sup>-</sup>/l para M2 siendo el mejor con promedios durante el estudio, puesto que para el punto M3 de un promedio de 95,22 mg Cl<sup>-</sup>/l como se puede observar en la Gráfica 14.



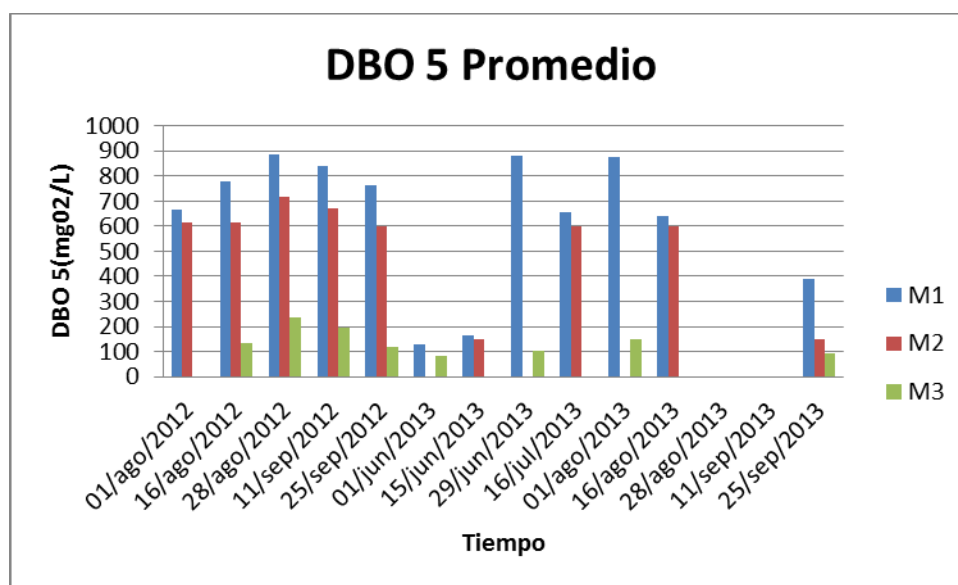
**FÍGURA 27** .El cloruro promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Cloruro el valor debe estar en 250 mg Cl<sup>-</sup>/l por tanto se demuestra que los tres puntos a lo largo del estudio dan cumplimiento total con promedios que van desde 304,16 mg Cl<sup>-</sup>/l con el punto de muestreo M1, con los puntos M2 con 51,57 mg Cl<sup>-</sup>/l y con valor promedio de 95,22 mg Cl<sup>-</sup>/l M3.

- DBO<sub>5</sub>:

La variable de demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de 147 mg O<sub>2</sub>/l y M3 84,2 mg O<sub>2</sub>/l, ya para la segunda evaluación M2 evidencio una disminución con un valor 598 mg O<sub>2</sub>/l frente al valor de M1 767,7 mg O<sub>2</sub>/l; un comportamiento similar de M2 tuvo M3 en el cual fue el menor de los tratamientos con el valor encontrado de 140 mg O<sub>2</sub>/l, dichos valores expuestos se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos incluso; En

cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores para los puntos; por ejemplo el punto M1 aumento considerablemente llegando a ser el más alto en su promedio con 815 mg O<sub>2</sub>/l frente a los otros puntos; mostrando M3 ser el mejor con promedios inferiores a 169 mg O<sub>2</sub>/l durante el estudio, puesto que para el punto M2 de un promedio de 649 mg O<sub>2</sub>/l como se puede observar en la Gráfica 15.



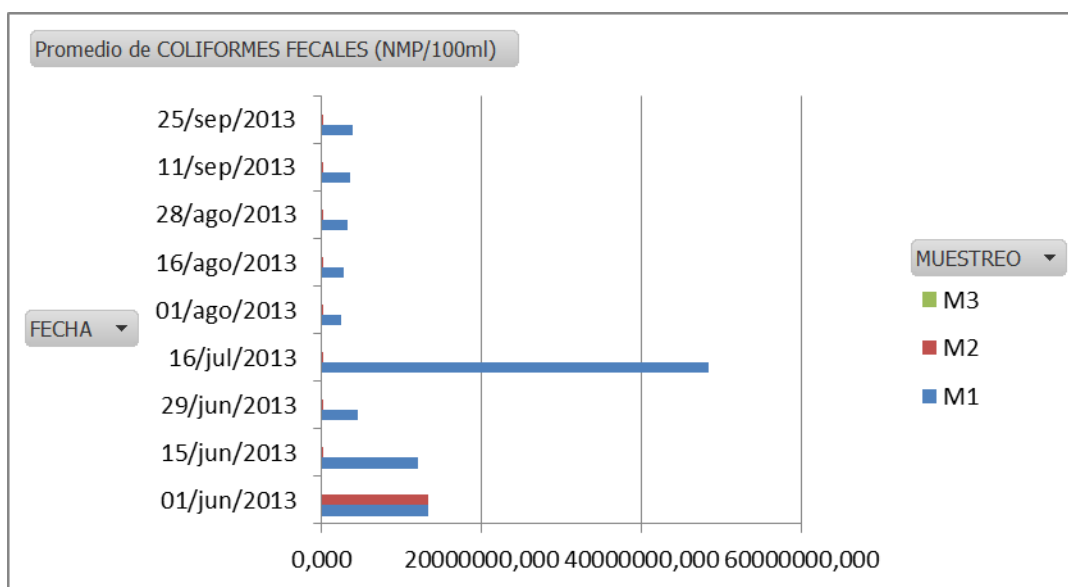
**FÍGURA 28.** El DBO<sub>5</sub> promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable DBO<sub>5</sub> el valor debe estar en 200 mg O<sub>2</sub>/l por tanto se demuestra que los tres puntos dan cumplimiento a la normativa con promedios inferiores a lo establecido solo durante la primera evaluación M1 y M2 con 146 mg O<sub>2</sub>/l y M3 con 84 mg O<sub>2</sub>/l. ya que durante los dos periodos en los cuatro meses restantes del estudio los puntos M1 y M2 no dan cumplimiento a lo reglamentado con valores superiores en sus promedios de 767,7 mg O<sub>2</sub>/l y 598 mg O<sub>2</sub>/l respectivamente para cada punto durante el primer periodo y al segundo periodo con promedios para M1 de 815 mg O<sub>2</sub>/l y para M2 de 649 mg O<sub>2</sub>/l; Mostrando con esto que los resultados para el punto M3 fueron los únicos que cumplieron con la normatividad con promedios inferiores a lo establecido en la Ley, durante los dos periodos del estudio con promedios para el primer periodo de 140 mg O<sub>2</sub>/l y para el segundo periodo de 169 mg O<sub>2</sub>/l.

## 6.2.2 Variables Biológicas

- Coliformes fecales:

La variable de Coliformes Fecales en la primera evaluación del estudio M1 y M2 fueron iguales con un promedio de  $483 \times 10^5$  NMP/100ml, ya para la segunda evaluación M2 evidencio una disminución de un 40% un valor 453,3 NMP/100ml pero no llegando a la eficiencia de M3 con un promedio de 1,3 NMP/100ml mostrando una disminución de 95% del valor a depurar para la muestra de M1; Estos resultados se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores hasta de un 80% para los puntos M1 y M2 que tuvieron promedios  $286 \times 10^6$  y  $563,3$  NMP/100ml respectivamente para cada el punto aumento considerablemente; mostrando M3 es el mejor con promedios inferiores a 3 NMP/100ml durante el estudio puesto que logro disminuir el impacto de las actividades del Campus como se puede observar en los Anexos 1,2,3,4 que son los resultados de los informes mensuales del proyecto.



**FÍGURA 29.** Coliformes fecales promedio del agua entre los meses de junio a septiembre del año del 2013 en el Campus de UMNG-Cajicá. M1: Afluente PTAR, M2: Efluente HAFSSV y M3: Efluente PTAR.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Coliformes Fecales el valor debe estar en 2000 NMP/100ml por tanto se demuestra que durante el tiempo del estudio los dos tratamientos depuración M2 y M3 cumplen con la normativa con promedios 563,3 y

3 NMP/100ml. Por tanto el punto M1 se hace necesario de procesos puesto que supero de valor permitido por la Ley con un promedio de  $286 \text{ E}10^6$  NMP/100ml.

- Coliformes totales:

La variable de coliformes totales mostro similar comportamiento que la variable de Coliformes Fecales dado que en la primera evaluación del estudio pero demostrando que duplicaron su valores en cada punto M1 y M2 con un promedio de  $1467 \text{ E}10^6$  NMP/100ml , ya para la segunda evaluación M2 evidencio una disminución de un 40% un valor  $25 \text{ E}10^3$  NMP/100ml pero no llegando a la eficiencia de M3 con un promedio de 1,8 NMP/100ml mostrando una disminución de 95% del valor a depurar para la muestra de M1 ; Estos resultados se mantuvieron durante el primer periodo sin estudiantes para los tres puntos; En cuanto al segundo periodo con estudiantes se mantuvo la tendencia del primer periodo pero aumentando los valores hasta de un 40% para los puntos M1 y M2 que tuvieron promedios  $620 \text{ E}10^7$  y 4230 NMP/100ml respectivamente para cada el punto aumento considerablemente; mostrando M3 es el mejor con promedios inferiores a 3,43 NMP/100ml durante el estudio puesto que logro disminuir el impacto de las actividades del Campus como se puede observar en el Anexo 1,2,3,4 que son los resultados de los informes mensuales del proyecto.

Análisis Legal: El Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales el establece en la Tabla 4 del presente trabajo que para la variable Coliformes Totales el valor debe estar en 20000 NMP/100ml por tanto se demuestra que durante el tiempo del estudio los dos tratamientos depuración M2 y M3 cumplen con la normativa con promedios 4230 y 3,43 NMP/100ml. Por tanto el punto M1 se hace necesario de procesos puesto que supero de valor permitido por la Ley con un promedio de  $62 \text{ E} 10^7$  NMP/100ml.

### **6.2.3 Variables metales pesados**

Las variables de metales pesados tales como (Ag), (Se), (Pb) y (Zn) expuestas en el agua evaluada del HAFSSV durante el segundo periodo académico. Según los resultados del Anexo 5 evidenciaron que para las variable de Ag con un valor  $<0,05 \text{ mg/l}$ , Zn con un valor  $0,13 \text{ mg/l}$  y Se con un valor de  $0,2 \text{ mg/l}$  cumplen con la normatividad en el Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos superficiales dado que mostraron valores inferiores a los establecidos en la Tabla 4 del presente trabajo, situación diferente ocurrió para la variable de Pb dado que el resultado obtenido en la evaluación del laboratorio fue superior a lo permitido por la normatividad con un valor de  $0,04 \text{ mg/l}$  Pb; comprobando con ello que el HAFSSV puede llegar a ser una opción para depurar las aguas residuales domésticas del Campus UMNG-Cajicá para las variables de materiales pesados de Ag, Zn y Se.

## 7 DISCUSIÓN

La depuración la contaminación de las aguas residuales domésticas juegan un papel importante dentro de la conservación de los ecosistemas acuáticos, pues de ello dependerá el poder contar con este recurso natural fundamental para la vida (Lomelí & Tamayo, 2001). Por tal motivo los humedales artificiales han sido utilizados desde los años cincuenta inicialmente en Europa y Estados Unidos para tratamiento de aguas residuales, por ser sistemas pasivos, de uso económico, adaptable al ecosistema y eficiente en remoción de algunos contaminantes (Reed, Crites, & Middlebrooks, 1995)

En Colombia se usan los humedales artificiales en combinación con tratamientos primarios o secundarios, para aguas residuales domésticas e industriales, como se puede demostrar en este proyecto que se estudió dos diferentes tipos de tratamientos para la descontaminación de las aguas domésticas residuales del Campus UMNG-Cajicá como lo son: el industrial que es la PTAR y la unidad piloto del HAFSSV que retoma los componentes dados por la naturaleza al utilizar las gravillas y arenas de diferentes tamaño y también los organismos vivos como macrófitas, microfauna, hongos y microorganismos asociadas a ellas, para la descontaminación de los cuerpos de agua a través de la unidad piloto del HAFSSV por ende se compararon 15 variables fisicoquímicas y 2 variables biológicas, en donde se evidencio que el HAFSSV es una opción para en tratamiento de las variables de Temperatura, pH, Conductividad, Color, OD, Turbidez, DQO, DBO<sub>5</sub>, Sólidos Sedimentables, Alcalinidad Total, Sulfatos, Dureza Total, Fosfatos, Cloruros, Coliformes Totales y fecales tuvo un 90% en eficiencia en la descontaminación del agua al igual que el tratamiento industrial convencional dado por la PTAR de la UMNG que llevo a tener en su evaluación de calidad de aguas los valores establecidos por la normatividad Colombiana en el Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos de aguas superficiales en la Tabla 4 del presente trabajo; como se muestran en los resultados en las gráficas 1 a la 14 basados en los valores de los Anexos 1 al 4 durante los dos periodos del estudio. Ya que según lo reportado en el estudio realizado, se evalúan los parámetros de contaminantes anteriores y adicionalmente Cromo total, utilizando los modelos de diseño de Reeds adaptables a países de climas tropicales, como ejemplo este caso. Las remociones dieron una calidad de agua para uso agrícola (Villaruel, 2005).

A su vez al igual los sistemas del anterior estudio realizado en este proyecto se deben acoplar con otros diseños que mejoren su eficiencia y ubicarlos en las últimas etapas de depuración, dado que los resultados obtenidos por HAFSSV de este proyecto en la variable de DBO<sub>5</sub> no lograron llegar a la misma eficiencia de la PTAR de la UMNG-Cajicá que llevo a tener niveles aceptables según los parámetros establecidos por la Ley. Esto se puede deber a que en climas fríos las bajas temperaturas durante el día y el sombreo de la edificación que reducen la tasa de remoción de DBO<sub>5</sub>; Un aumento en el tiempo de

retención puede compensar por la reducción en esas tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico (Fernández & Curt, 2001).Mostrando resultados similares y el realizado en España, hace énfasis en el arranque de la planta para evitar mayor aporte de materia orgánica al agua residual tratada, lo cual es recomendable en aguas residuales diluidas.

También se pudo demostrar que el HAFSSV al tener la intervención de cuatro diferentes especies de macrófitas (*Polygonum punctatum*, *Typha spp*, *Limnobium laevigatum*, *Eichhornia crassipes*) típicas de la región y los organismos asociados a ellas, en su diseño logran la disminución de los niveles de metales pesados como (Ag, Se y Zn), con lo muestran los resultados obtenidos en el Anexo 5 al estar en los valores establecidos por la normatividad Colombiana en el Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos de aguas superficiales. En estudios realizados en Bogotá por la Universidad de los Andes y en Pereira por la Universidad Tecnológica de Pereira soportan dicho resultados obtenidos en el estudio al ver la disminución de la concentración de metales pesados y adicionalmente otras variables fisicoquímicas en las aguas residuales en los HAFSSV con la utilización de la macrófita *Typha* y acompañada de otras especies de macrófitas de la región de estudio (Duran, Osorio, & Garcia, 2003) (Vargas, Rodríguez, & Salvador, 2008) (Arroyave, 1997). A su vez el HAFSSV del presente proyecto disminuyo la cantidad de metales pesados (Pb) como se ve en el Anexo 5, pero no logro llegar a los niveles establecidos por la normatividad, según lo reportado por el estudio realizado en Estados Unidos muestra que el tipo de macrófitas puede ser otro factor que influye en la remoción de contaminantes en estos sistemas; ya que pueden llegar a ser competitivos para esta labor (Reed, Crites, & Middlebrooks, 1995).

## 8 CONCLUSIONES

- El diseño del HAFSSV del presente proyecto puede llegar a ser una opción a largo plazo para la descontaminación de aguas domésticas residuales de la UMNG-Cajicá al ser eficiente en la disminución de un 90% de los valores obtenidos en el afluente de la PTAR en las variables Temperatura, pH, Conductividad, Color, OD, Turbidez, DQO, Sólidos Sedimentables, Alcalinidad Total, Sulfatos, Dureza Total, Fosfatos, Nitratos, Cloruros, DBO<sub>5</sub>, Materiales Pesados como (Ag, Se, Zn y Pb), Coliformes Totales y Fecales.
- Dado que los resultados obtenidos en el primero y segundo periodo del estudio del efluente de la PTAR cumplió con los valores establecidos por la normatividad en el Decreto 4728 del 2010 para el vertimiento de aguas superficiales para las variables Temperatura, pH, DQO, Alcalinidad Total, Sulfatos, Dureza Total, Nitratos, Cloruros, DBO<sub>5</sub>, Coliformes Totales y Fecales como muestra en los Anexos 1 al 4; en cuanto a las variables Conductividad, Turbidez, Sólidos Sedimentables, Fosfatos y Color en el segundo periodo del estudio no alcanzaron los niveles establecidos por la normatividad; Por tal motivo la UMNG- Cajicá realizó tratamientos alternos y medidas de mitigación para llegar a cumplir con la Ley.
- Los valores obtenidos en el efluente del HAFSSV durante los dos periodos del proyecto en las variables de Temperatura, pH, Conductividad, Color, OD, Turbidez, DQO, Sólidos Sedimentables, Alcalinidad Total, Sulfatos, Dureza Total, Fosfatos, Cloruros, metales pesados (Ag, Zn y Se) y Coliformes Totales y fecales lograron cumplir con los parámetros del Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos de aguas superficiales.
- A su vez se deben tener tratamientos secundarios para el efluente del HCFSSV para que llegue a cumplir los niveles establecidos por la Ley en el Decreto 4728 del 2010 para el vertimientos de aguas superficiales en las variables Conductividad, Turbidez, Sólidos Sedimentables, Fosfatos, Metales pesados (Pb) y DBO<sub>5</sub>.

## 9 RECOMENDACIONES

- Es necesario considerar la infraestructura en donde está acoplado HAFSSV del presente proyecto para eliminar el fototropismo presentado a lo largo del estudio por el auto sombreado generado por las tejas y del mueble el cual soporta los módulos.
- En el diseño del HAFSSV de este estudio se debe integrar llave de salida para cada módulo para evaluar la efectividad de cada una de las especies de las macrófitas que participaron en la depuración de contaminantes presentes en las aguas domésticas residuales UMNG-Cajicá.
- En futuros estudios se debería evaluar a lo largo del día, las variables humedad relativa y temperatura, en los módulos del diseño HAFSSV para poder cumplir en totalidad con los requerimientos de las macrófitas; para que logren la eficiencia en el proceso de descontaminación de las aguas domésticas residuales de la UMNG-Cajicá.
- Las aguas depuradas por el HAFSSV del presente trabajo se deberá recibir procesos de desinfección para disminuir y llegar a cumplir con los niveles de Coliformes Totales y fecales tolerables establecidas por la Ley para ser reutilizables en otras actividades.

## 10 BIBLIOGRAFIA

- Agriculture, U.-U. S., & Service, N. R. (2010). *Polygonum punctatum Elliot Characteristics*. Recuperado el 2012, de <http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=POPU5>
- Alvares, M. (2004). *Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales*. PERU: Sociedad Peruana de Gestión Ambiental.
- Ancibor, E. (1979). *Systematic anatomy of vegetative organs of the hydrocharitaceae*. USA: Botanical Journal of the Linnean Society .
- Arroyave, F. (1997). Remoción de contaminantes de aguas residuales con. *Universidad de los Andes*.
- Barrett, S. (1980). Sexual reproduction in *E. crassipes* (Water Hyacinth). I. Fertility of Clones from Diverse Regions. *Journal of Applied Ecology*, 101-112.
- Bayona, J. M., García, J., & Morató, J. (2004). *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*. . Barcelona: Delegación en Cataluña.
- BERNAL. (2013). *MANUAL DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS PARA LA UMNG SEDE CAJICA--MODULO*. Bogota: Aguas de Colombia Ltda.
- Bernal, O., & Grijalba., A. (2013). *Determinación de la concentración letal media ( ) de Cadmio y Aluminio mediante bioensayos con Trucha arco iris "alevinos de Oncorhynchus Mykiss"*. BOGOTA: UNIVERSIDAD DE LA SALLE.
- Bernal, R., Galeano, G., Rodríguez, A., Sarmiento, H., & Gutiérrez, M. (10 de 11 de 2010). *Nombres Comunes de las Plantas de Colombia*. Recuperado el 02 de 2012, de [http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes/buscador/bnc\\_plants/](http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes/buscador/bnc_plants/)
- Bonilla, J., & Santamaría, B. (2010). *Hydrocharitaceae*. Mexico: Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Instituto de Ecología A.C.
- Brix, H. (1997). *Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands* *Wat.Sci.Tech*. USA: IWA publishing.
- Chaparro, B. (2003). Reseña de la vegetación en los humedales. En A. Guarnizo, & B. Calvachi, *Los humedales de Bogotá y la Sabana* (págs. 161 -166). Bogota: Acueducto de Bogotá y Conservación Internacional Colombia Bogotá.
- Commission, W. R. (2000). *Constructed wetlands: The answer to small scale wastewater treatment in South Africa*. South Africa.

- Cook, C., & Köning, K. U. (1983). *A revision of the genus Limnobium including Hydromystria (Hydrocharitaceae)*. USA: Aquatic Botany.
- Cooper, P. (2005). *The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates*. USA: Wat. Sci. Tech.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados*. . Santafé de Bogotá: Mc Graw Hill Interamericana. .
- Duncan, C., & Groffman, P. (1994). *Comparing microbial parameters in natural and constructed wetlands*. USA: J Environ Qual.
- Duran, N., Osorio, P., & Garcia, L. (2003). Evaluacion de la remocion de cromo hexavalente y zinc en agua residual sintetica utilizando humedales de flujosubsuperficial plantados con typha, junco y heliconia usando como medio soportearena y grava. *Universidad Tecnologica de Pereira*.
- EPA. (11 de 2002). *ORGANISMO PARA LA PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. NORMATIVIDAD APLICADA EN HUMEDALES*. Recuperado el Marzo de 2012, de <http://200.14.206.180/ecosi/6.pdf>.
- EPA, U. S. (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Office of Research p. 12- 97*. Cincinnati: US EPA.
- Fernández, J., & Curt, M. (2001). *Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación*. Madrid: Fundación Global Nature.
- Freís, C. (2008 йил 1-4). Retrieved 2012 йил 3 from [http://www.theecologist.net/files/articulos/33\\_art1.asp](http://www.theecologist.net/files/articulos/33_art1.asp)
- Freís, C. (2008 йил 1-4). Retrieved 2012 йил 3 from [http://www.theecologist.net/files/articulos/33\\_art1.asp](http://www.theecologist.net/files/articulos/33_art1.asp)
- Gale, P., Reddy, & Graetz, D. (1993). *Nitrogen removal from reclaimed water applied to constructed and natural wetland microcosms*. USA: WaterEnviron Res 65.
- Gallego, I. (2010). *Monografía Sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para remocion de metales pesados en aguas residuales*. PEREIRA: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.
- Gerhard, R., & Romero, J. (1987). *Microbiología de las aguas traducción* . Alemania: Acribia edición 4ª.
- Gil, E. (1999). *Remoción y recuperación de metales pesados de aguas residuales industriales*. Medellin: Universidad de Antioquia.

- Gopal, B. (1987). *Water Hyacinth*. Amsterdam: Elsevier.
- Gopal, B. (1998). Brasil: Proceedings 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control.
- Gossett, D. R., & Norris, W. (1971). Relationship between nutrient availability and content of nitrogen and phosphorous in tissues of the aquatic macrophyte, *E. crassipes*. *Solms. Hydrobiologia*, 15-28.
- Huang, Y., Ortiz, L., García, J., Aguirre, A., Mujeriego, R., & Bayona, J. (2004). *Use of headspace solid-phase microextraction to characterize odour compounds in subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment*. USA: Wat. Sci. Tech.
- JECFA, J. F. (1982). *Evaluation of certain food additives and contaminants*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kadlec, R., & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. USA: CRC Press.
- Lara, J. (1999). *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Lomelí, M. G., & Tamayo, R. (2001). *Contaminación del agua. Universidad Nacional*. Recuperado el 05 de 2012, de <http://www.sagan-gea.org/>
- Mena, J., Rodriguez, L., Núñez, J., & Villaseñor, J. (8 de 2000). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*. Recuperado el 10 de 2011, de Alquimia Soluciones Ambientales. : [http://www.conama9.org/conama9/download/files/CTs/2643\\_JMena.pdf](http://www.conama9.org/conama9/download/files/CTs/2643_JMena.pdf)
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. Mexico: 3ª Ed, McGraw-Hill.
- Motivans, K., & Apfelbaum, S. (1987). Element stewardship abstract for *Typha* spp. North American Cattails. *Applied Ecological Services, Inc*.
- Muramoto, S., Aoyama, I., & Oki, Y. (1991). Effect of salinity on the concentration of some elements in water hyacinth (*E. crassipes*) at critical levels. *Journal of Environmental Sciences and Health*, 205-215.
- Nichols, D. (1983). *Capacity of natural wetlands to remove nutrients from wastewater*. USA: J. Water Pollut. Control Fed. 55.
- O'Sullivan, A., Murria, D., & Otte, M. (2000). *Constructed wetlands for treatment of mine tailings at Tara Mines*. Ireland: Internat. Verein. Limnol.
- Penfound, T., & Earle, T. (1948). The Biology of the Water. *Ecological Monographs*, Vol. 18 (4): 447-472.

- Prystay, W. (1998). *Assessment of constructed wetlands for the reduction of nitrogen and phosphorus*. Brasil: Proceedings 6th International Conference on Wetland Systems for Water pollution Control.
- Ramírez, A., & Viña, G. (1998). *LIMOLOGIA COLOMBIANA*. Colombia: Panamericana.
- Ramírez, E., Robles, E., Cerda, J., López, M., Sainz, G., & Bonilla. (2001). Caracterización Físico-Química y Biológica de un lecho de Macrófitas. *Facultad de Estudios Superiores Iztacala UNAM*, 1, 3,6.
- Reed, S., Crites, R., & Middlebrooks, J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. New York: McGraw-Hill.
- Rojas, J. R. (2002). *Teoría y principio de diseño del tratamiento de aguas residuales*. Bogotá: segunda , Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, A. (2005). *Propuesta para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) mediante humedales artificiales de flujo horizontal. Tesis de Licenciatura*. México: Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Rook, E. (02 de 2004). *Typha Latifolia: Common Cattail. Valley*. Recuperado el 03 de 2012, de <http://www.rook.org/earl/bwca/nature/>
- Rzedowski, G., & Rzedowski, J. (2001). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Michoacán, México.: Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- S. Reed, R. C. (2000). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. New York: McGraw-Hill.
- Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). *Phytoremediation. En: Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. USA.
- Sanchez, R., & Lugo, A. (1993). Protozoos en lechos de raíces. *Cienc y tecnol* 15, 18.
- Serrano, P., García, J., Hernández, & Corzo, A. (2008 йил 6). *Guía Práctica de Diseño Depuración con Humedales Construidos*. Retrieved 2012 йил 1 from Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficia: [https://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/2474/1/JGarcia\\_and\\_Acorzo.pdf](https://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/2474/1/JGarcia_and_Acorzo.pdf)
- Stevens, W., Ulloa, U., Pool, A., & O. M. (2001). *Flora de Nicaragua*. St. Louis; Missouri: Missouri Botanical Garden Press.

- Stottmeister, U., Wiessner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kastner, M., Bederski, O., . . . Moormann, H. (2003). *Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment*. USA: Biotechnol.
- US EPA, A. E. (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Technology Assessment*. Washington: US EPA Office of Water.
- US EPA, U. S. (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial*. Washington: Office of Water.
- US EPA, U. S. (2000). *Manual:Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater*. Cincinnati: Office of Research and Development.
- USDA-ARS. (06 de 2005). *National Genetic Resources Program. Typha latifolia L.* Recuperado el 04 de 2012, de Germplasm Resources Information Network: <http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/taxon.pl?101629>
- Vargas, A., Rodríguez, S., & Salvador, M. (2008). Hipótesis de optimización en humedales de flujo subsuperficial en el tratamiento de agua residual urbanaénfasis en la retención de metales . *Universidad de Los Andes*.
- Vargas, O., Diaz, A. M., Diaz, J. E., Pinzon, Y., Camelo, L., Caro, A. L., & Ramirez, P. (2012). *CATALOGO DE PLANTAS INVASORAS DE LOS HUMEDALES DE BOGOTA*. Bogota, D.C: GREUNAL.
- Villarroel, C. (2005). Tratamiento Terciario Del Efluente De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales El Cortijo Para Uso Agrícola Con Humedales Construidos De Flujo Superficial. *Universidad Nacional De Trujillo-Peru.*, 8.
- Vymazal, J., & Masa, M. (2003). *Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level*. USA: Wat. Sci. Tech.
- Wagner, W., Herbst, D., & Sohmer, S. (1999). Honolulu: Bernice P. Bishop Museum special publication. University of Hawaii Press/Bishop Museum Press.
- Wagner, W., Herbst, D., & Sohmer, S. (1999). Honolulu: Bernice P. Bishop Museum special publication.
- WHO, W. H. (1988). *Environmental Health Criteria No. 61*. Geneva: Chromium.
- Wolverton, B., Barlow, R., & McDonald, R. (1976). *Application of vascular aquatic plants for pollution removal, energy, and food production in a biological system.In Biological Control of water pollution*. Pennsylvania: University of Pennsylvania Press.

## 11 ANEXO

### 11.1 ANEXO 1.

Promedios de variables fisicoquímicas y biológicas del mes de junio del 2013 del agua residual domestica del Campus UMNG – Cajicá (M1), agua tratada por el HAFSSV (M2) y agua tratada por la PTAR (M3).

Resultados Promedios del Mes de Junio						
Tiempo de Muestreo	Ensayo	Método	Unidad	M1	M2	M3
Semanales	Temperatura	pH metro	°C	17,0	16,9	16,8
Semanales	pH	pH metro	Unidad	7,9	6,7	6,6
Semanales	Conductividad	Conductímetro	µs/cm	1049,9	860,0	841,5
Semanales	Color	Comparación visual	UC	74,9	32,5	55,7
Semanales	Oxigeno Disuelto	Oxímetro	mgO <sub>2</sub> /l	3,1	5,8	5,3
Semanales	Turbidez(Nefelometrico)	Turbidímetro	Unidad	136,5	43,6	21,4
Quincenal	DQO	Espectrofotométrico	(mg O <sub>2</sub> /l)620nm	259,0	189,1	140,2
Quincenal	Sólidos Sedimentables	Volumétrico(Cono de Imhoff)	ml/l	10,0	6,5	5,2
Quincenal	Alcalinidad Total	Titulimétrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	mgCaCO <sub>3</sub> /l	311,2	122,0	36,4
Quincenal	Coliformes Fecales	Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)	(NMP/100ml)	994*10 <sup>5</sup>	4444,0	0,8
Quincenal	Coliformes Totales	Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)	(NMP/100ml) <sup>2</sup>	1467*10 <sup>6</sup>	6672,6	1,0
Quincenal	Nitratos	Espectrofotométrico	mg/l NO <sub>3</sub>	0,5	0,4	0,3
Quincenal	Sulfatos	Turbidímetro	mgSO <sub>4</sub> /l	52,4	21,5	4,9
Quincenal	Dureza Total	Titulimétrico (EDTA)	mg/l CaCO <sub>3</sub>	275,7	142,2	162,7
Quincenal	Fosfatos	Colorimétrico(Cloruro Estañoso)	mg PO <sub>4</sub> /l	4,2	12,2	0,2
Quincenal	Cloruros	Argenimétrico	mg Cl <sup>-</sup> /l	86,9	58,6	48,5
Quincenal	DBO <sub>5</sub>	Incubación 5 días(Titulación Tiosulfato de Sodio)	mgO <sub>2</sub> /l	557,1	448,3	113,2

## 11.2 ANEXO 2

Promedios de variables fisicoquímicas y biológicas del mes de julio del 2013 del agua residual domestica del Campus UMNG – Cajicá (M1), agua tratada por el HAFSSV (M2) y agua tratada por la PTAR (M3).

Tiempo de Muestreo	Ensayo	Resultados Promedios del Mes de Julio				
		Método	Unidad	M1	M2	M3
Semanales	Temperatura	pH metro	°C	17,2	16,9	16,8
Semanales	pH	pH metro	Unidad	8,4	6,7	6,9
Semanales	Conductividad	Conductimetro	µs/cm	1084,4	735,8	782,1
Semanales	Color	Comparación visual	UC	104,0	39,3	87,0
Semanales	Oxigeno Disuelto	Oximetro	mgO <sub>2</sub> /l	2,9	6,9	5,3
Semanales	Turbidez(Nefelometrico)	Turbidimetro	Unidad	189,8	19,3	26,7
Quincenal	DQO	Espectrofotométrico	(mg O <sub>2</sub> /l)620nm	364,4	175,4	150,7
Quincenal	Sólidos Sedimentables	Volumétrico(Cono de Imhoff)	ml/l	35,1	3,8	8,4
Quincenal	Alcalinidad Total	Titulimetrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	mgCaCO <sub>3</sub> /l	412,3	86,0	119,5
Quincenal	Coliformes Fecales	Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)	(NMP/100ml)	483*10 <sup>5</sup>	453,3	1,3
Quincenal	Coliformes Totales	Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)	(NMP/100ml) <sup>2</sup>	4866*10 <sup>6</sup>	25*10 <sup>3</sup>	1,8
Quincenal	Nitratos	Espectrofotométrico	mg/l NO <sub>3</sub>	0,8	0,6	0,5
Quincenal	Sulfatos	Turbidimetro	mgSO <sub>4</sub> /l	165,5	27,9	49,7
Quincenal	Dureza Total	Titulimetrico (EDTA)	mg/l CaCO <sub>3</sub>	575,6	60,7	237,5
Quincenal	Fosfatos	Colorimetrico(Cloruro Estañoso)	mg PO <sub>4</sub> /l	1,5	0,1	0,0
Quincenal	Cloruros	Argenimetrico	mg Cl /l	188,8	33,7	64,3
Quincenal	DBO <sub>5</sub>	Incubación 5 dias(Titulación Tiosulfato de Sodio)	mgO <sub>2</sub> /l	786,5	620,5	140,5

### 11.3 ANEXO 3.

Promedios de variables fisicoquímicas y biológicas del mes de Agosto del 2013 del agua residual domestica del Campus UMNG – Cajicá (M1), agua tratada por el HAFSSV (M2) y agua descontaminada por la PTAR (M3).

Tiempo de Muestreo	Ensayo	Resultados Promedios del Mes de Agosto			M1	M2	M3
		Método	Unidad				
Semanales	Temperatura	pH metro	°C	17,4	16,8	16,6	
Semanales	pH	pH metro	Unidad	9,9	7,0	7,7	
Semanales	Conductividad	Conductimetro	µs/cm	1363,5	721,5	916,1	
Semanales	Color	Comparación visual	UC	183,2	68,5	114,9	
Semanales	Oxigeno Disuelto	Oximetro	mgO <sub>2</sub> /l	1,8	6,8	4,8	
Semanales	Turbidez(Nefelometrico)	Turbidimetro	Unidad	311,5	44,7	67,8	
Quincenal	DQO	Espectrofotométrico	(mg O <sub>2</sub> /l)620nm	367,2	190,4	165,8	
Quincenal	Sólidos Sedimentables	Volumétrico(Cono de Imhoff)	ml/l	58,4	12,1	16,7	
Quincenal	Alcalinidad Total	Titulimetrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	mgCaCO <sub>3</sub> /l	443,8	105,8	143,2	
Quincenal	Coliformes Fecales	Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)	(NMP/100ml)	286*10 <sup>6</sup>	480,0	2,3	
Quincenal	Coliformes Totales	Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)	(NMP/100ml) <sup>2</sup>	536*10 <sup>7</sup>	340,0	2,6	
Quincenal	Nitratos	Espectrofotométrico	mg/l NO <sub>3</sub>	0,9	0,6	0,6	
Quincenal	Sulfatos	Turbidimetro	mgSO <sub>4</sub> /l	155,5	32,3	54,4	
Quincenal	Dureza Total	Titulimetrico (EDTA)	mg/l CaCO <sub>3</sub>	619,6	83,4	274,6	
Quincenal	Fosfatos	Colorimetrico(Cloruro Estañoso)	mg PO <sub>4</sub> /l	3,1	2,5	2,5	
Quincenal	Cloruros	Argenimetrico	mg Cl <sup>-</sup> /l	294,7	42,2	85,8	
Quincenal	DBO <sub>5</sub>	Incubación 5 días(Titulación Tiosulfato de Sodio)	mgO <sub>2</sub> /l	815,0	649,0	169,0	

## 11.4 ANEXO 4.

Promedios de variables fisicoquímicas y biológicas del mes de septiembre del 2013 del agua residual domestica del Campus UMNG – Cajicá (M1), agua tratada por el HAFSSV (M2) y agua tratada por la PTAR (M3).

		Resultados Promedios del Mes de Septiembre				
Tiempo de Muestreo	Ensayo	Método	Unidad	M1	M2	M3
Semanales	Temperatura	pH metro	°C	17,2	16,5	16,3
Semanales	pH	pH metro	Unidad	9,4	6,5	7,3
Semanales	Conductividad	Conductimetro	µs/cm	1369,8	712,4	916,4
Semanales	Color	Comparación visual	UC	173,3	58,7	105,3
Semanales	Oxigeno Disuelto	Oximetro	mgO <sub>2</sub> /l	1,6	6,6	4,6
Semanales	Turbidez(Nefelometrico)	Turbidimetro	Unidad	298,8	29,5	54,2
Quincenal	DQO	Espectrofotométrico	(mg O <sub>2</sub> /l)620nm	396,0	219,2	194,6
Quincenal	Sólidos Sedimentables	Volumétrico(Cono de Imhoff)	m/l	73,9	27,6	32,2
Quincenal	Alcalinidad Total	Titulimetrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	mgCaCO <sub>3</sub> /l	459,8	121,8	159,1
Quincenal	Coliformes Fecales	Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)	(NMP/100ml)	370 *10 <sup>5</sup>	563,3	3,1
Quincenal	Coliformes Totales	Filtración Membrana e incubación 24h(Cuantificación UFC)	(NMP/100ml) <sup>2</sup>	620*10 <sup>7</sup>	4230,0	3,4
Quincenal	Nitratos	Espectrofotométrico	mg/l NO <sub>3</sub>	0,9	0,6	0,6
Quincenal	Sulfatos	Turbidimetro	mgSO <sub>4</sub> /l	169,6	32,0	54,5
Quincenal	Dureza Total	Titulimetrico (EDTA)	mg/l CaCO <sub>3</sub>	659,4	123,2	314,4
Quincenal	Fosfatos	Colorimetrico(Cloruro Estañoso)	mg PO <sub>4</sub> /l	2,1	1,1	1,0
Quincenal	Cloruros	Argenimetrico	mg Cl <sup>-</sup> /l	304,2	51,6	95,2
Quincenal	DBO <sub>5</sub>	Incubación 5 días(Titulación Tiosulfato de Sodio)	mgO <sub>2</sub> /l	801,5	635,5	155,5

## 11.5 ANEXO 5.

Resultados de las variables de materiales pesados del agua del efluente del HAFSSV tales como Zinc (Zn), Plomo (Pb), Selenio (Se) y Plata (Ag) procesadas por parte de un laboratorio comercial Analquim Ltda.

Resultados de las muestras de agua del efluente HASSV del 2 del agosto del 2013				
Ensayo	Método	Unidad	Referencia	Efluente de HASSV
SELENIO	A.A generador de hidruros	mg/l Se	SM3114C	<0,005
ZINC	A.A de llama	mg/l Zn	SM3111B	0,13
PLATA	A.A de llama	mg/l Ag	SM3111B	<0,05
PLOMO	A.A de llama	mg/l Pb	SM3111B	0,04

## 11.6 ANEXOS 6.

Planos unidad piloto de HAFSSV