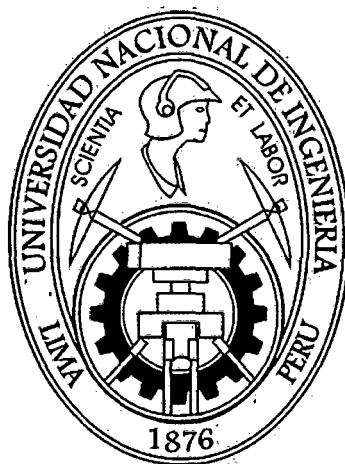


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE  
FILTROS DE ARENA PARA LA REMOCIÓN DE  
COLIFORMES TERMOTOLERANTES”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO SANITARIO**

**PRESENTADO POR:**

**ROSAS BUSTAMANTE, RICARDO MANUEL**

**UGAZ SAAVEDRA, JUAN MANUEL**

**LIMA, PERÚ**

**2014**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermanos, les agradezco el cariño,  
su comprensión, hábitos y valores, lo cual me  
ha ayudado a salir adelante buscando siempre  
el mejor camino.

**ROSAS BUSTAMANTE RICARDO MANUEL**

A mis padres que con su amor incondicional  
me apoyaron en mis momentos de fortaleza y  
de debilidad, siempre estuvieron para  
incentivarme a seguir adelante.

**UGAZ SAAVEDRA JUAN MANUEL**

## AGRADECIMIENTO

A la Msc. Ing. Rosa Yaya Beas, por brindarnos su apoyo incondicional y asesoramiento constante durante la realización de la presente tesis de investigación.

A nuestros amigos Manuel Romero Mananí y Ramses Huaman Camarena, personal de mantenimiento de CITRAR-UNI por su dedicación y apoyo en la implementación y mantenimiento de los reactores.

A nuestra amiga, Alice Zenou estudiante de la Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris por brindarnos su gran dedicación en el monitoreo de los filtros.

A nuestros amigos estudiantes de la carrera de ingeniería sanitarias Jorge Caruajulca Gamboa y Roger Terreros Granados por brindarnos su disposición y apoyo en el monitoreo de los filtros.

Al Sr. Ricardo Andrés Jara Temple y a la Sra. Margarita Andreu Rivera, personal de apoyo del Laboratorio N° 20, por brindarnos su atención constante e incondicional.

## RESUMEN

La presente tesis de investigación se enfocó en realizar el estudio de un sistema de *tratamiento para aguas residuales domésticas de fácil construcción, operación y mantenimiento* para que pueda ser utilizado por poblaciones rurales.

Este estudio consistió en la construcción de 02 filtros de arena a escala piloto, los cuales tuvieron las mismas características, siempre funcionaron de forma paralela y bajo las mismas condiciones con la única diferencia que uno de ellos era de flujo ascendente y el otro de flujo descendente. Además en la investigación se comenzó utilizando una *granulometría de lecho de arena conocido como "lecho convencional"* el cual consistía en la utilización de granos de arena de tamaño relativamente grande, para posteriormente ser cambiado por una granulometría de lecho con granos de menor tamaño conocido como "lecho reducido".

En toda la investigación se realizaron 09 carreras de filtración, una carrera de filtración es el periodo de funcionamiento de un filtro desde que comienza a recibir afluente hasta que es lavado. Las 05 primeras carreras de filtración se realizaron con el *lecho convencional* y las últimas 04 con el *lecho reducido*. Estos filtros funcionaron de forma intermitente, solo pararon cuando se colmataban los filtros y se realizaba el lavado de sus lechos de arena, la colmatación de los filtros era controlado por medio de mediciones constantes mediciones de la turbiedad en su ingreso y en la salida de cada filtro.

Se obtuvo como resultado final de la investigación que los filtros de arena tienen una *baja remoción de coliformes termotolerantes* (entre 01 y 02 unidades logarítmicas) y *huevos de helmintos* (entre 40% y 80%). Además la única diferencia que se encontró entre las diferencias de flujo se dio en su mantenimiento, ya que el lavado a contra flujo del filtro descendente requiere menos cantidad de presión y agua que del filtro de flujo ascendente.

## ÍNDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
I.1. GLOSARIO.....	1
I.2. ANTECEDENTES.....	4
I.3. PROBLEMA A INVESTIGAR.....	5
I.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	5
I.5. JUSTIFICACIÓN.....	6
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
II.1 ASPECTOS GENERALES DEL AGUA RESIDUAL .....	7
II.1.1. DESCRIPCIÓN .....	7
II.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL.....	8
II.1.2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	10
II.1.2.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS .....	13
II.1.2.3. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS.....	15
II.6 FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR.....	16
II.2.1. ANÁLISIS DEL PROCESO DE FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR.....	16
II.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMA DE FILTRACIÓN.....	22
II.2.2.1 SEGÚN TIPO DE FUNCIONAMIENTO .....	22
II.2.2.2 SEGÚN TIPO DE MEDIO FILTRANTE.....	22
II.2.2.3 SEGÚN SENTIDO DE FLUJO EN LA OPERACIÓN .....	24
II.2.2.4 SEGÚN MÉTODO DE CONTROL DE FLUJO .....	25
II.2.2 VARIABLES DEL PROCESO DE FILTRACIÓN .....	26
II.2.2 FILTRO DE ARENA.....	32
II.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DE FILTRACIÓN .....	35
CAPITULO III: MARCO LEGAL .....	39
III.7. ASPECTOS LEGALES DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERU.....	39
III.8. ENTIDADES INVOLUCRADAS.....	41
IV.9. OBJETIVO GENERAL.....	42

IV.1.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	42
V.10.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	44
V.11.	DISEÑO DEL FILTRO.....	44
V.12.	UBICACIÓN.....	46
V.13.	MONTAJE DE LOS FILTROS DE ARENA.....	47
V.14.	EQUIPOS EMPLEADOS.....	48
V.15.	COMPONENTES DE LA PLANTA DE FILTROS DE ARENA.....	49
V.7.1.	SISTEMA DE BOMBEO.....	49
V.7.2.	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO.....	50
V.7.3.	SISTEMA DE REGULACIÓN.....	52
V.7.4.	FILTRO DE ARENA.....	55
V.16.	CONDICIONES HIDRÁULICAS.....	64
V.8.1.	TIEMPO DE RETENCIÓN DE LOS FILTRO.....	64
V.8.2.	CAUDAL.....	67
V.17.	MÉTODOS ANALÍTICOS.....	68
V.9.1.	ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS.....	68
V.9.1.1.	TEMPERATURA.....	68
V.9.1.2.	PH.....	68
V.9.1.3.	TURBIEDAD.....	69
V.9.1.4.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).....	69
V.9.1.5.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO <sub>5</sub> ).....	71
V.9.2.	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS.....	71
V.9.2.1	COLIFORMES TERMOTOLERANTES.....	71
(1)	APLICACIÓN.....	71
(2)	RESUMEN DEL MÉTODO.....	71
(3)	PRECAUCIONES DE SEGURIDAD.....	72
(4)	INTERFERENCIAS.....	72
(5)	MUESTREO Y PRESERVACIÓN.....	72
(6)	INSTRUMENTAL.....	72

(7)	INSUMOS .....	73
(8)	PRECAUCIONES PARA LA OPERACIÓN .....	73
(9)	OPERACIONES PREVIAS .....	74
(10)	ANÁLISIS DE LA MUESTRA .....	75
(11)	ANÁLISIS DE DATOS .....	76
(12)	CONTROL DE CALIDAD ANALÍTICO .....	79
V.9.2.2	HUEVOS DE HELMINTOS .....	80
V.18.	LABORES DE MANTENIMIENTO DE LOS FILTROS .....	81
V.19.	LAVADO DE FILTROS DE ARENA .....	82
CAPITULO VI: RESULTADOS .....		86
VI.20	ANÁLISIS FISICOQUÍMICO .....	86
VI.1.1	TEMPERATURA .....	86
VI.1.1.1	Resultados de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	86
VI.1.1.2	Resultados de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente. ..	90
VI.1.1.3	Resultados de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho reducido .....	94
VI.1.1.4	Resultados de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.....	97
VI.1.2	pH.....	101
VI.1.2.1	Resultados de la caracterización del pH del afluente de los filtros de lecho convencional. ....	101
VI.1.2.2	Resultados de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente. ....	105
VI.1.2.3	Resultados de la caracterización del pH del afluente de los filtros de lecho reducido.....	109
VI.1.2.4	Resultados de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente. ....	112
VI.1.3	TURBIEDAD.....	116

VI.1.3.1	Resultados de la caracterización de la Turbiedad del Afluente de los Filtros de Lecho Convencional. ....	116
VI.1.3.2	Resultados de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente. ....	119
VI.1.3.3	Resultados de la caracterización de la turbiedad del afluente de los filtros de lecho reducido. ....	125
VI.1.3.4	Resultados de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente. ....	128
VI.1.4	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES .....	132
VI.1.4.1	Resultados de la caracterización de los sólidos suspendidos volátiles en el afluente de los filtros de arena de lecho convencional. ....	132
VI.1.4.2	Resultados de la caracterización de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente de los filtros de arena de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente. ....	135
VI.1.4.3	Resultados de la caracterización de los sólidos suspendidos volátiles en el afluente de los filtros de arena de lecho reducido. ....	138
VI.1.4.4	Resultados de la caracterización de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente de los filtros de arena de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente. ....	141
VI.21	ANÁLISIS BIOLÓGICO .....	144
VI.21.1	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO <sub>5</sub> ) .....	144
VI.2.1.1	Resultados de la caracterización de la DBO <sub>5</sub> en el afluente de los filtros de arena de lecho convencional. ....	144
VI.2.1.2	Resultados de la caracterización de la DBO <sub>5</sub> en el efluente de los filtros de arena de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente. ....	147
VI.2.1.3	Resultados de la caracterización de la DBO <sub>5</sub> en el afluente de los filtros de arena de lecho reducido. ....	150
VI.2.1.4	Resultados de la caracterización de la DBO <sub>5</sub> en el efluente de los filtros de arena de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.	
	153	
VI.22	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS .....	156
VI.22.1	COLIFORMES TERMOTOLERANTES .....	156



VI.3.1.1	Resultados de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de arena de lecho convencional. ....	156
VI.3.1.2	Resultados de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el efluente de los filtros de arena de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente. ....	158
VI.3.1.3	Resultados de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de arena de lecho reducido. ....	161
VI.3.1.4	Resultados de la caracterización de coliformes termotolerantes en el efluente de los filtros de arena de lecho reducido de flujo ascendente y flujo descendente. ....	163
VI.22.2	HUEVOS DE HELMINTOS .....	166
VI.3.1.1	Resultados de la caracterización de huevos de Helmintos en el afluente de los filtros de arena de Lecho convencional. ....	166
VI.3.1.2	Resultados de la caracterización de huevos de helmintos en el efluente de los filtros de arena de lecho convencional de flujo ascendente y flujo descendente. ....	169
CAPITULO VII: ESTIMACIÓN DE COSTOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO .....		172
En base a los valores de los parámetros de diseño recolectados se estimó un costo unitario por tratamiento con filtros de arena en condiciones normales y con precios referenciales a fecha de Enero del 2014. A continuación se desarrolla el cálculo:		172
CAPITULO VIII: DISCUSIÓN .....		176
CAPITULO IX: CONCLUSIONES .....		180
CAPITULO X: RECOMENDACIONES .....		183
ANEXO N° 1 .....		184
•	Romero Rojas, Jairo Alberto (2005) Tratamiento de aguas residuales : teoría y principios de diseño, Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia. ....	185
Tabla 1: Principales contaminantes del agua residual .....		7
Tabla 2: Composición típica del agua residual doméstica .....		9
Tabla 3: Clasificación de Sólidos .....		12
Tabla 4: Mecanismos actuantes en el seno de un filtro de medio granular que contribuyen a la eliminación de la material en suspensión. ....		17
Tabla 5.- Eficiencia promedio según tipo de tratamiento utilizado. ....		21
Tabla 6: Variables que intervienen en el diseño de filtros de medio granular .....		27

Tabla 7: Características Físicas de los Filtros de medio granular comúnmente utilizados.....	31
Tabla 8: Configuración recomendada para filtros seleccionados .....	34
Tabla 9: Características operacionales de filtros granulares comúnmente utilizados.....	36
Tabla 10: Configuración recomendada para filtros seleccionados .....	57
Tabla 11: Material retenido en mallas de tamizado – Filtro convencional .....	60
Tabla 12: Material retenido en mallas de tamizado – Filtro reducido .....	62
Tabla 13: Material retenido en mallas de tamizado – Grava .....	64
Tabla 14: Límites de confianza para conteo de colonias.....	78
Tabla 15: Caudales Típicos de lavado a contracorriente para fluidificar diversos tipos de lechos filtrantes .....	83
Tabla 16: Valores de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho convencional .....	88
Tabla 17: Valores de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente .....	91
Tabla 18: Valores de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho reducido .....	95
Tabla 19: Valores de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.....	98
Tabla 20: Valores de la caracterización del pH en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	103
Tabla 21: Valores de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho convencional.....	106
Tabla 22: Valores de la caracterización del pH en el afluente de los filtros de lecho reducido .....	110
Tabla 23: Valores de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.....	113
Tabla 24: Valores de la caracterización de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	117
Tabla 25: Valores de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente .....	121
Tabla 26: Valores de la caracterización de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho reducido .....	126
Tabla 27: Valores de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho reducido .....	129
Tabla 28: Valores de la caracterización de los SSV en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	133
Tabla 29: Valores de la caracterización de los SSV en el efluente de los filtros de lecho convencional.....	136

Tabla 30: Valores de la caracterización de los SSV en el afluente de los filtros de lecho reducido .....	139
Tabla 31: Valores de la caracterización de los SSV en el efluente de los filtros de lecho reducido .....	142
Tabla 32: Valores de la caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 05 días en el afluente de los filtros de lecho convencional .....	145
Tabla 33: Valores de la caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 05 días en el afluente de los filtros de lecho convencional .....	148
Tabla 34: Valores de la caracterización de la demanda bioquímica de oxígeno a 05 días en el afluente de los filtros de lecho reducido.....	151
Tabla 35: Valores de la caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 05 días en el efluente de los filtros de lecho reducido.....	154
Tabla 36: Valores de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	157
Tabla 37: Valores de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el efluente de los filtros de lecho convencional.....	159
Tabla 38: Valores de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de lecho reducido .....	162
Tabla 39: Valores de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el efluente de los filtros de lecho reducido .....	164
Tabla 40: Valores de la caracterización de los huevos de helmintos en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	167
Tabla 41: Valores de la caracterización de los huevos de helmintos en el efluente de los filtros de lecho convencional.....	170
Figura 1: Curva de eliminación de concentración normalizada a lo largo del filtro, Metcalf y Eddy (1995).....	19
Figura 2: Diagrama esquemático de la estratificación del lecho después del lavado de filtros de medio único, doble y triple, Metcalf y Eddy (1995). .....	23
Figura 3: Filtros convencionales flujo descendente monomedio (a) y bimedio (b), Metcalf y Eddy (1995).....	24
Figura 4: Filtros profundos de flujo descendente (c) y ascendente (d), Metcalf y Eddy (1995) .....	25
Figura 5: Distribución de los tamaños de partículas de un efluente tratado, Metcalf y Eddy (1995) .....	29
Figura 6: Representación esquemática de un filtro convencional de Flujo descendente por gravedad en medio granular, Metcalf y Eddy (1995).....	37
Figura 7: Representación esquemática del ciclo de filtración, Metcalf y Eddy (1995) .....	38

Figura 8: Esquema de Planta de Filtros de Arena .....	45
Figura 9: Dimensiones de Filtro de arena de lecho convencional .....	46
Figura 10: Dimensiones de Filtro de arena de lecho reducido .....	46
Figura 11: Ubicación de la Planta Piloto de Filtros de Arena.....	47
Figura 12: Bomba Periférica de 1/2 HP .....	49
Figura 13: Montaje del Equipo de Bombeo.....	50
Figura 14: Sistema de válvulas y piezómetro .....	51
Figura 15: Sistema de Almacenamiento.....	51
Figura 16: Esquema de Funcionamiento del Tanque de Regulación .....	52
Figura 17: Sistema de válvulas para la distribución de caudales .....	53
Figura 18: Sistema de mangueras para lavado de filtros .....	54
Figura 19: Módulos de Filtros ascendente y descendente.....	56
Figura 21: Curva Granulométrica de la arena para el filtro convencional.....	59
Figura 22: Curva Granulométrica de la arena para el filtro reducido .....	61
Figura 23: Curva de la grava para el filtro de lecho reducido.....	63
Figura 24: Medidor de PH/Temperatura eléctrica de electrodo .....	68
Figura 25: Colorímetro, marca HACH DR/890 .....	69
Figura 26: Recubrimiento de los filtro para evitar la formación de algas por ingreso de luz solar.....	81
Figura 27: Variación de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho convencional .	89
Figura 28: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de la segunda carrera de filtración.....	92
Figura 29: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de la tercera carrera de filtración .....	92
Figura 30: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de la cuarta carrera de filtración.....	93
Figura 31: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de la quinta carrera de filtración.....	93
Figura 32: Valores de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho reducido.....	96
Figura 33: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la primera carrera de filtración. ....	99
Figura 34: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la segunda carrera de filtración.....	99
Figura 35: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la tercera carrera de filtración.....	100
Figura 36: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la cuarta carrera de filtración.....	100
Figura 37: Variación del pH en el afluente de los filtros de lecho convencional .....	104

Figura 38: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la segunda carrera de filtración.....	107
Figura 39: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la tercera carrera de filtración.....	107
Figura 40: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la cuarta carrera de filtración.....	108
Figura 41: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la quinta carrera de filtración.....	108
Figura 42: Valores del pH en el afluente de los filtros de lecho reducido.....	111
Figura 43: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la primera carrera de filtración.....	114
Figura 44: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la segunda carrera de filtración.....	114
Figura 45: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la tercera carrera de filtración.....	115
Figura 46: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la cuarta carrera de filtración.....	115
Figura 47: Variación de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho convencional ...	118
Figura 48: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la primera carrera de filtración. ....	122
Figura 49: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la segunda carrera de filtración.....	122
Figura 50: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la tercera carrera de filtración.....	123
Figura 51: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la cuarta carrera de filtración.....	123
Figura 52: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la quinta carrera de filtración.....	124
Figura 53: Variación de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho reducido .....	127
Figura 54: Eficiencia de remoción de turbiedad en los filtros de Lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente de la primera carrera de filtración. ....	130
Figura 55: Eficiencia de remoción de turbiedad en los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente de la segunda carrera de filtración. ....	130
Figura 56: Eficiencia de remoción de turbiedad en los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente de la tercera carrera de filtración. ....	131
Figura 57: Eficiencia de remoción de turbiedad en los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente de la cuarta carrera de filtración.....	131

Figura 58: Valores de los Sólidos Suspendidos Volátiles en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	134
Figura 59: Valores de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente de los filtros de lecho convencional.....	137
Figura 60: Eficiencias de remoción de los sólidos suspendidos volátiles en el afluente de los filtros de lecho reducido.....	140
Figura 61: Porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente de los filtros de lecho reducido.....	143
Figura 62: Valores de la DBO <sub>5</sub> en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	146
Figura 63: Porcentaje de remoción de la DBO <sub>5</sub> en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	149
Figura 64: Valores de la demanda bioquímica de oxígeno a 05 días en el afluente de los filtros de lecho reducido.....	152
Figura 65: Eficiencia en remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a 05 días en el efluente de los filtros de lecho reducido.....	155
Figura 66: Comparación de valores de los coliformes termotolerantes en el afluente y los efluentes de los filtros de lecho convencional .....	160
Figura 67: Valores de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de lecho convencional.....	162
Figura 68: Comparación de valores de los coliformes termotolerantes en el afluente y los efluentes de los filtros de lecho reducido .....	165
Figura 69: Valores de huevos de helmintos en el afluente de los filtros de lecho convencional .....	168
Figura 70: Eficiencia en remoción de huevos de helmintos en el efluente de los filtros de lecho convencional .....	171
Figura 71.- Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes en el filtro de lecho convencional y de flujo ascendente versus días de operación del filtro.....	177
Figura 72.- Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes en el filtro de lecho convencional y de flujo descendente versus días de operación del filtro.....	177

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

---

### I.1. GLOSARIO

- **Agua Residual:** Agua que ha sido usada por una comunidad o industria que contiene material orgánico o inorgánico disuelto o en suspensión.
- **Anaerobio:** Condición en la cual no hay presencia de oxígeno o aire.
- **Aerobio:** Condición en la cual hay presencia de oxígeno o aire.
- **Afluente:** Agua no tratada proveniente de desagües de tipo doméstico o industrial.
- **Coliformes Termotolerantes:** Los coliformes son bacterias Gram negativas no esporuladas de forma alargada capaces de fermentar lactosa con producción de gas a  $35 \pm 0.5$  ° C (coliformes totales). Aquellas que tienen las mismas propiedades a  $44,5 \pm 0,2$ ° C, en 24 horas, se denominan coliformes fecales (ahora también denominados coliformes Termotolerantes). Tradicionalmente se los ha considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano en razón de que, en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales y porque su origen es principalmente fecal. Por tanto, su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura.
- **DBO<sub>5</sub>:** Demanda Bioquímica de Oxígeno, definida por la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos, mientras se estabiliza la materia orgánica putrescible, bajo condiciones aerobias, de tiempo y temperatura específicos (5 días y a 20°C).
- **Digestión Anaerobia:** Descomposición biológica de la materia orgánica del lodo en ausencia de oxígeno.
- **Efluente tratado:** agua tratada que sale de una unidad de tratamiento.

- **Infiltración:** corresponde a la disposición de un efluente sobre o bajo el suelo, por ejemplo de una PTAR, para que penetre en las capas inferiores del mismo.
- **Parámetro:** Valor numérico o dato fijo que se considera en el estudio o análisis de una característica, se refiere a una característica física, química y/o biológica de un efluente.
- **pH:** Logaritmo de signo negativo, de la concentración de iones hidrógeno expresado en moles por litro.
- **Planta de Tratamiento (PTAR):** Infraestructura y procesos que permiten el tratamiento de las aguas residuales.
- **Reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos:** Reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente, cuyas siglas en inglés son Reactor U.A.S.B (que significan Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Proceso continuo de tratamiento anaerobio de aguas residuales, en el cual el desecho circula en forma ascendente a través de un manto de lodos o filtro, para la estabilización parcial de la materia orgánica. El agua tratada en el proceso fluye por la parte superior y normalmente se obtiene gas como producto.
- **Reutilización:** recuperación de residuos o de materiales presentes en ellos para ser utilizados en su forma original o previa transformación como materia prima sustitutiva en el proceso productivo que le dio origen.
- **Residuo o desecho:** sustancia, elemento u objeto que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar.
- **ST:** Sólidos totales; se define el contenido de sólidos totales a la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación de 103 - 105 °C. Estas se encuentran en suspensión, coloidales y disueltos.
- **SV:** Sólidos volátiles; representan la fracción orgánica de los sólidos, los cuales se volatilizan a temperaturas de 550 ± 50 °C.



- **SF:** Sólidos fijos; Los residuos de calcinación se conocen como sólidos fijos y constituyen la porción inorgánica o mineral de los sólidos.
- **SDis:** Sólidos disueltos; representan el material soluble y coloidal, el cual requiere para su remoción oxidación biológica, o coagulación y sedimentación. Los sólidos suspendidos no disueltos constituyen la diferencia entre los sólidos totales de la muestra no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada
- **SST:** Sólidos suspendidos totales;
- **SSV:** Sólidos suspendidos volátiles;
- **SSF:** Sólidos suspendidos fijos
- **STV:** Sólidos totales volátiles.
- **STF:** Sólidos totales fijos.
- **SSed:** Sólidos sedimentables; son una medida de sólidos asentados al fondo de un cono Imhoff, en un periodo de una hora y representan la cantidad de lodo removible en la sedimentación primaria; se expresan en ml/l/hora.

## 1.2. ANTECEDENTES

La filtración es uno de los procesos de tratamiento de agua más efectivos, simples y económicos. Su diseño sencillo facilita el uso de materiales y mano de obra locales por ello es apropiado en áreas rurales. Requiere poco o ningún equipo especial. Al filtrarse un efluente secundario por este sistema se mejora considerablemente su calidad, disminuye su turbiedad y se reduce considerablemente el número de microorganismos (bacterias, virus, quistes).

En la superficie del lecho se forma una película biológica que consiste en material orgánico e inorgánico retenido y una amplia variedad de microorganismos activos biológicos, los cuales tienen la capacidad de descomponer la materia orgánica.

Cuando se emplean de forma adecuada consiguen llegar a niveles de remoción muy elevados. Consisten en lechos de material granular, de tamaño de grano relativamente uniforme, adecuadamente drenados en el fondo. Se emplean generalmente como un sistema de afino de aguas tratadas previamente mediante otros sistemas como puede ser una fosa séptica. (L. Moreno, 2002)

La disposición de los filtros puede ser muy variada, incluyendo tanto filtros enterrados como sobre la superficie del terreno, estos últimos facilitan las labores de mantenimiento. El mantenimiento de estos dispositivos, que se colmatan con cierta facilidad, depende mucho de la eficacia del sistema de tratamiento previo.

Se considera que la granulometría de la arena y la temperatura ambiente son los dos factores externos al diseño del mismo que más influyen en su rendimiento. Hay que tener presente no obstante que los lechos de arena presentan una capacidad de eliminación de la  $DBO_5$ , carbono orgánico disuelto y sólidos en suspensión, insuficiente para ser considerados como sistema único de tratamiento de las aguas residuales, pudiendo ser empleados no obstante como tratamiento complementario. Una ventaja de los filtros de arena frente a los de turba es su mayor resistencia a la colmatación, su menor volumen y menor costo.

### **I.3. PROBLEMA A INVESTIGAR**

El efluente de los reactores UASB carece de la calidad óptima que se requiere para su *vertimiento y/o reutilización*. Por ello es necesario *complementar el tratamiento* con unidades que apliquen la tecnología adecuada a la zona, que permitan la sostenibilidad del sistema.

Por lo tanto, se propone para su tratamiento la utilización de filtros de arena, que logran la eliminación de turbiedad, sólidos suspendidos, huevos de helmintos y coliformes que un reactor UASB no logra remover, obteniendo así una calidad del desagüe tratado adecuado para su disposición final.

### **I.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

- El filtro de arena es un sistema de post-tratamiento con una alta eficiencia de remoción de microorganismos patógenos como coliformes termotolerantes, sólidos suspendidos volátiles y huevos de helmintos.
- Los filtros de arena son unidades de post-tratamiento económicos y de fácil operación y mantenimiento, que pueden ser utilizados en poblaciones rurales.
- El filtro de flujo descendente lograra una mayor remoción que el filtro ascendente debido a que; en el primero se forma la película biológica en la superficie fina del lecho; en cambio en el segundo, la formación de esta capa es *mínima*.
- En el filtro de arena de lecho reducido, en comparación con el de lecho convencional, se obtendrá mayor remoción de microorganismos patógenos; debido a que la porosidad es menor y logra mayor eficiencia en el tratamiento.

## **I.5. JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación tiene como propósito contribuir en la investigación y su consecuente aplicación de filtros de arena como un post-tratamiento a fin de lograr una calidad de efluente adecuada para su posterior vertido en un cuerpo receptor y poder profundizar en post-tratamiento de aguas residuales tanto en el ámbito rural como urbano; por medio de alternativas de tratamiento económicas y sostenibles adaptándose a la realidad de cada zona.

Asimismo, por medio de la presente tesis, se busca contribuir a la protección de recursos hídricos en su condición de cuerpos receptores; y por lo tanto, a la reducción de enfermedades originadas por el consumo de agua contaminada.

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### II.1 ASPECTOS GENERALES DEL AGUA RESIDUAL

#### II.1.1. DESCRIPCIÓN

Las aguas residuales son aquellas aguas provenientes de los servicios de los centros urbanos, y se origina principalmente en la vivienda. Las variaciones existentes en la composición de las aguas residuales, están en función de las condiciones socioeconómicas de la población, el clima y otros factores típicos de cada localidad. Generalmente las aguas residuales presentan altas concentraciones de cloruros, sulfatos, nitrógeno, fósforo, sólidos y materia orgánica.

En la Tabla 1 se muestran los principales contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual.

**Tabla 1: Principales contaminantes del agua residual**

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión dan lugar al desarrollo de depósitos de lodo y de condición anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar en entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO <sub>5</sub> y de la DQO. Si se descargan el entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Cuando se vierten al entorno acuático, los nutrientes como el

Nutrientes	Cuando se vierten al entorno acuático, los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Asimismo, si se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos Disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

**Fuente: Metcalf & Eddy (1995)**

### **II.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL**

Se disgregan en características físicas, químicas y biológicas, para establecer las cargas orgánicas y de sólidos que transportan, determinar efectos del vertimiento a cuerpos de agua, seleccionar las operaciones y procesos del tratamiento que resultarán más eficaces y económicos.

Las aguas residuales consisten básicamente en agua, sólidos disueltos y sólidos en suspensión. Los sólidos son la fracción más pequeña (menos del 0.1% en peso), pero representan el mayor problema a nivel de tratamiento. El agua provee únicamente el volumen y el transporte de los sólidos (Sterling, 1987).

Tabla 2: Composición típica del agua residual doméstica

CONTAMINANTES	UNIDADES	CONCENTRACIÓN		
		DÉBIL	MEDIA	FUERTE
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
DBO <sub>5</sub> , 20° C	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
DQO	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros <sup>a</sup>	mg/l	30	50	100
Sulfato <sup>a</sup>	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	NMP/100ml	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>
Compuestos orgánicos volátiles	mg/l	<100	100 - 400	>400

Fuente: Metcalf &amp; Eddy (1995).

**Leyenda:** <sup>a</sup> Los valores se deben aumentar en la cantidad que estos compuestos se hallen presentes en las aguas de suministro.

### II.1.2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

#### pH

El pH es un parámetro físico-químico, en las aguas residuales domésticas el rango de pH varía entre 6.5-8.0. En las plantas de tratamiento es un parámetro de operación importante, ya que su variación puede modificar la composición biológica de las aguas residuales (tratamiento biológico) y así también puede alterar el efecto de los compuestos químicos adicionados para el tratamiento (tratamiento químico).

El intervalo adecuado de pH para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es relativamente estrecho, en general entre pH 5 y 9. Las aguas residuales con valores de pH fuera de este rango (aguas residuales industriales) son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos.

#### Temperatura

La temperatura es un parámetro muy importante en las plantas de tratamiento de aguas residuales por su efecto sobre las operaciones y procesos de tratamiento ya que modifica la concentración del oxígeno disuelto y las velocidades de las reacciones químicas y de la actividad bacteriológica. Así también la temperatura del agua residual puede alterar la vida acuática de un cuerpo de agua receptor.

La temperatura óptima para la actividad bacteriana es de 25 °C a 35 °C. La digestión aeróbica y la nitrificación se suspenden cuando la temperatura alcanza los 50 °C. Cuando la temperatura es menor de 15°C la digestión metanogénica es muy lenta, y a temperatura de 5 °C la bacteria autotrófica nitrificante deja de operar. (Jairo Romero, Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño).

La densidad, viscosidad y tensión superficial disminuyen al aumentar la temperatura, o al contrario cuando esta disminuye, estos cambios modifican la



velocidad de sedimentación de partículas en suspensión y la transparencia de oxígeno en procesos biológicos de tratamiento.

La temperatura afecta a los filtros de arenas en los cuales mecanismos biológicos son significativos durante el tratamiento.

### **Turbiedad**

Es una medida óptica del material suspendido en el agua. Las aguas residuales crudas son en general turbias; en aguas residuales tratadas puede ser un factor importante de control de operación ya que la turbiedad refleja la calidad del efluente en relación al material residual en suspensión coloidal. Es importante para el proceso de filtración porque te permite evaluar de manera rápida la eficiencia del sistema de filtración así como determinar los periodos entre lavado de las carreras de filtración.

### **Olores**

Los olores de las aguas residuales constituyen una de las principales objeciones ambientales, y su control en plantas de tratamiento es muy importante. Entre los problemas atribuibles a los olores ofensivos se señalan pérdida de apetito, menor consumo de agua, dificultades respiratorias, nauseas, vómitos, etc.

### **Sólidos**

Es aquel material que permanece como residuo después de evaporación y secado de 103 a 105 °C. Todos los materiales que ejercen significativa presión de vapor a estas temperaturas, se pierden por supuesto durante los procesos de evaporación y secado. (Jimeno Blasco 1998).

Según la anterior definición los sólidos pueden clasificarse de diversas maneras como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3: Clasificación de Sólidos

SOLIDOS TOTALES												
Definición	Toda materia sólida que permanece como residuo de evaporación y secado bajo una temperatura entre 103-105 grados centígrados.											
Clasificación	Sólidos en Solución Sólidos Disueltos				Sólidos en Suspensión - Sólidos Suspensos							
					Sólidos No sedimentables (Coloides)			Sólidos Sedimentables				
Definición	Aquellos que pasan a través del medio filtrante cuando se determinan los sólidos suspendidos.				Se determina como la cantidad de material retenido después de realizada la filtración de una muestra.			Se determinan como el volumen de sólidos en un litro de desecho, que sedimenta después de una hora en un cono Imhoff. Se expresa en mililitros por litro por hora.				
Clasificación	Fijos / Volátiles				Fijos / Volátiles							
Tamaño												
micras (µm)	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	0.5µm	1	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>
milimetro (mm)	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>		10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	1	10 <sup>1</sup>
Organismos								Bacterias				
										Huevos de helmintos		
								Parásitos y Algas				
Observar con:	Microscopio Electrónico					Ultra microscopía		Microscopio				
Met. Tratamiento	PRECIPITACIÓN QUÍMICA				COAGULACIÓN				SEDIMENTACIÓN			

Elaboración propia a partir de diferentes fuentes de información

### II.1.2.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Los constituyentes químicos de las aguas residuales son con frecuencia clasificados como en inorgánicos y orgánicos.

- **Compuestos Inorgánicos**

Los compuestos inorgánicos agregados a las aguas durante su uso son:

**Sales**, generalmente se encuentran en solución y contribuyen a aumentar la salinidad del agua. El aumento de sales disueltas durante cada uso del agua puede alcanzar los 300-350 mg/l. (Cubillos A., 1980)

**Nutrientes**, el nitrógeno agregado en las proteínas principalmente y el fósforo en compuestos orgánicos y los detergentes son nutrientes que promueven el crecimiento de organismos productores autótrofos en aguas receptoras de desechos. Las aguas residuales domésticas e industriales son ricas en nutrientes. El nitrógeno y el fósforo, reciben el nombre de nutrientes o bioestimulantes. Debido que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas, se necesita conocer datos sobre la presencia de este nutriente a la hora de evaluar la tratabilidad del agua residual mediante procesos biológicos.

**Alcalinidad** es una medida de su capacidad de neutralizar ácidos. Las aguas residuales domésticas son generalmente alcalinas, concentraciones de 50-200 mg/l- $\text{CaCO}_3$  son comunes. En las aguas residuales la alcalinidad se debe a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como calcio, magnesio, sodio, potasio o de ion amonio. Su capacidad para neutralizar ácidos y prevenir cambios bruscos de pH la hace importante en el tratamiento de aguas residuales.

#### **Gases**

En aguas residuales los gases son producto de la descomposición biológica de la materia orgánica, los gases en aguas residuales son:

**Oxígeno Disuelto**, se disuelve desde la atmósfera y de la actividad fotosintética de algas. Existe muy poco oxígeno disuelto en el desagüe fresco y ninguno en aguas residuales sépticas.

**Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**, la concentración es función del pH y el equilibrio químico del agua, también se encuentran monóxido de carbono (CO). El CO<sub>2</sub> en aguas es producido durante la respiración de microorganismos en aguas residuales y como producto de la descomposición biológica.

**Metano (CH<sub>4</sub>)**, de la descomposición anaerobia de materia orgánica. Se encuentra en condiciones anaerobias donde hay descomposición en condiciones anóxicas.

**Amoniaco (NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>)**, las distribuciones dependen del pH de las aguas. Valores altos del pH favorecen la presencia del gas NH<sub>3</sub>, especialmente por encima del 9. Es resultado de la descomposición biológica de compuestos nitrogenados.

**Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S)**, alteran el pH de las aguas y producen corrosión de los alcantarillados. El H<sub>2</sub>S se produce en condiciones anaeróbicas cuando predomina la formación de ácidos y no hay producción de metano.

- ***Compuestos Orgánicos***

Los constituyentes orgánicos comprenden un número de compuestos que no pueden ser distinguidos en forma separada.

La materia orgánica de las aguas residuales es una combinación de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (CHON), principalmente; con las proteínas (40-60%), los carbohidratos (25-50%) y las grasas y aceites (10%) como grupos más importantes.

La demanda bioquímica de oxígeno, (DBO) es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, y se utiliza para determinar su grado de contaminación. Normalmente se mide transcurridos 5 días (DBO<sub>5</sub>) y se expresa en mg O<sub>2</sub>/litro.

Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos, acuíferos, etc.), aguas residuales o cualquier agua que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica. No es aplicable para las aguas potables debido al valor tan bajo que se obtendría, utilizándose en este caso el método de oxidabilidad con permanganato potásico. El método mide la concentración de los contaminantes orgánicos.

Sin embargo, puede haber interferencias debido a que haya sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas también por las bacterias en disolución. Para evitar este hecho se añade N-alitiourea como inhibidor.

### **II.1.2.3. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS**

En general las características biológicas de aguas residuales se miden en pruebas para organismos indicadores como el NMP y conteo total de bacterias como unidad formadora de colonia (UFC).

El grupo coliformes incluye todas las bacterias aerobias y facultativas anaerobias, Gram negativas, que no forman esporas, en forma de cilindro que fermentan la lactosa con formación de gas dentro de 48 y 35 °C. La definición anterior incluye *Escherichia coli* y otras *Escherichia*, *Enterobacter Aerógenes* y otros.

## II.6 FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR

### II.2.1. ANÁLISIS DEL PROCESO DE FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR

Los principales mecanismos que contribuyen a la eliminación de las partículas sólidas en un filtro de medio granular se identifican y describen en la Tabla 4. Los mecanismos de eliminación físicos son los de mayor efectividad (los cinco primeros de dicha tabla), se ha comprobado que la acción de retención es el principal responsable de la eliminación de los sólidos en suspensión en la filtración del efluente de procesos de sedimentación secundaria en tratamientos biológicos.

Existen otros mecanismos que también tienen influencia, aunque sus efectos sean de menor importancia y pueden quedar ocultos por el de retención. La interceptación, el impacto y la adhesión son ejemplos de estos mecanismos. Es razonable suponer que la eliminación de algunas de las partículas más pequeñas se dan en dos fases: transporte de las partículas hasta la superficie y posterior eliminación por los mecanismos que actúen en ellas.

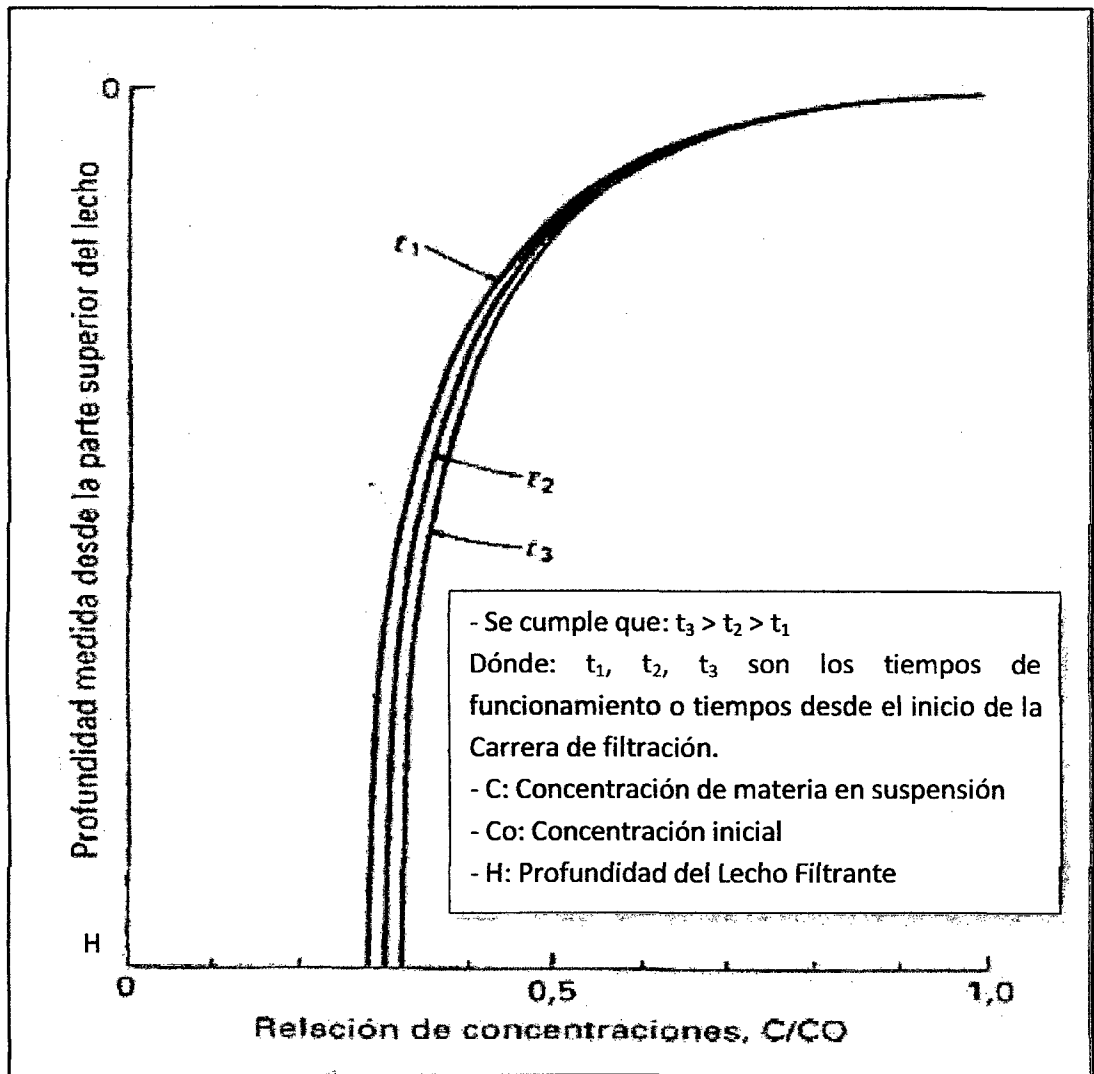
**Tabla 4: Mecanismos actuantes en el seno de un filtro de medio granular que contribuyen a la eliminación de la materia en suspensión**

<b>Mecanismos actuantes en el seno de un filtro de medio granular que contribuyen a la eliminación de la materia en suspensión</b>	
<b>Mecanismo</b>	<b>Descripción</b>
1. Retención a) Mecánica b) Contacto aleatorio	Las partículas de mayor tamaño que los poros del medio filtrante son retenidos mecánicamente. Las partículas de menor tamaño que los poros el medio filtrante quedan atrapadas dentro del filtro por contacto aleatorio.
2. Sedimentación	Las partículas sedimentan sobre el medio filtrante.
3. Impacto	Las partículas pesadas no seguirán las líneas de corriente de flujo.
4. Intercepción	Muchas de las partículas que se mueven según las líneas de corriente se eliminan cuando entran en contacto con la superficie del medio filtrante.
5. Adhesión	Las partículas floculentas llegan a adherirse a la superficie del medio filtrante al pasar por él. Dada la fuerza creada por el agua que fluye, parte de la materia es arrastrada antes de quedar firmemente adherida y es transportada a zonas más profundas dentro del lecho. Al obturarse el lecho, la fuerza de arrastre superficial aumenta hasta un punto en el que no se puede eliminar más materia. Es posible que una cierta cantidad de material atraviese el fondo del filtro, causando la súbita aparición de turbidez en el efluente.
6. Adsorción química a) Enlace b) Interacción química 7. Adsorción física a) Fuerzas electrostáticas b) Fuerzas electrocinéticas c) Fuerzas de Van der Waals	Una vez que una partícula ha entrado en contacto con la superficie del medio filtrante o con otras partículas, cualquiera de estos mecanismos, o ambos a la vez, pueden ser responsables de su retención.
8. Floculación	Las partículas mayores alcanzan a las menores, se juntan con ellas y forman partículas de tamaños aún mayores. Estas partículas son subsiguientemente eliminadas por alguno de los mecanismos de eliminación arriba indicados (1 a 5)
9. Crecimiento Biológico	El crecimiento biológico dentro del filtro reducirá el volumen del poro y puede mejorar la eliminación de partículas mediante alguno de los mecanismos de eliminación descritos (del 1 al 5).

**Fuente: Metcalf y Eddy (1995)**

La eliminación de la materia en suspensión por el mecanismo de retención puede identificarse debido a: (1) la variación temporal de las curvas de eliminación de concentración normalizadas a lo largo del filtro, y (2) la forma de la curva de pérdidas de carga en el filtro, en la totalidad del mismo, o en una capa determinada. Si la retención es el principal mecanismo de eliminación, la forma de la curva de eliminación normalizada no presentara grandes variaciones en el tiempo, y las curvas de pérdidas de carga serán curvilíneas ver Figura 1.





**Figura 1: Curva de eliminación de concentración normalizada a lo largo del filtro, Metcalf y Eddy (1995)**

Se aprecia en la figura anterior que la mayor de remoción de la materia en suspensión ocurre en el estrato superior de los filtros de flujo descendente a lo largo del tiempo, y esta va disminuyendo a medida que profundiza en el lecho o medio filtrante. Asimismo a medida que la carrera de filtración avanza, esta capacidad de remoción también va disminuyendo por lo que es necesario realizar un lavado del lecho.

El proceso de filtración se realiza por mecanismo de: transporte, adherencia y/o biológicos. Sin embargo esto no significa que se realicen todos

- Los mecanismos de transporte son:
  - Cernido
  - Sedimentación
  - Interceptación
  - Difusión
  - Impacto inercial
  
- Los mecanismos de adherencia son debidos a:
  - Fuerzas de Van der Waals
  - Fuerzas electroquímicas
  - Puente químico
  
- Los mecanismos biológicos con acción preponderante a bajas velocidades de filtración son debidos a la capa activa biológica y al crecimiento de algas, no estando claramente definida la importancia de cada uno de estos mecanismos

No obstante todos los estudios realizados hasta el momento, no se ha podido encontrar un modelo matemático que describa exactamente el proceso de filtración. No existiendo un conjunto de fórmulas que permite mediante la selección e algunos parámetros calcular el resto de incógnitas y definir por anticipado el comportamiento de un filtro, los modelos existentes nos ayudan únicamente a comprender mejor el *proceso de filtración* y a cuantificar en forma aproximada el comportamiento de un filtro de características predeterminadas.

En condiciones generales podemos encontrar parámetros de referencia provenientes de estudios independientes donde a grandes rasgos podemos predecir la eficiencia de los filtros para ciertos parámetros como en la Tabla 5

**Tabla 5.- Eficiencia promedio según tipo de tratamiento utilizado**

TRATAMIENTO	REMOCIÓN EN UNIDADES Log			
	Virus	Bacterias	Protozoos	Helmintos
Sedimentación primaria	0-1	0-1	0-1	0-1
Tanque séptico	0-1	1-2	1-2	1-2
Filtro biológico	0-1	0-2	0-1	0-1
Lodos actividades	1-2	2-3	1-2	1-2
Laguna de oxidación (20 días, 4 celdas en serie)	2-4	4-6	4-6	4-6

Fuente: Shuval, 1986.

Es imprescindible realizar ensayos con filtros piloto para determinar con exactitud el comportamiento de un determinado filtro, operando con una determinada agua y en condiciones seleccionadas.

La remoción de sólidos por el filtro puede ser hecha en la superficie del lecho por formación de una película de sólidos removidos y es probablemente realizada por el simple mecanismo de cernido. La eficiencia de este mecanismo puede mejorar con el tiempo durante la carrera de filtración. Sin embargo, la película es usualmente comprensible, lo que se traduce en un desarrollo exponencial de la pérdida de carga; esto es, cada vez desarrollará con más rapidez la pérdida de carga en la unidad de tiempo.

## **II.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMA DE FILTRACIÓN**

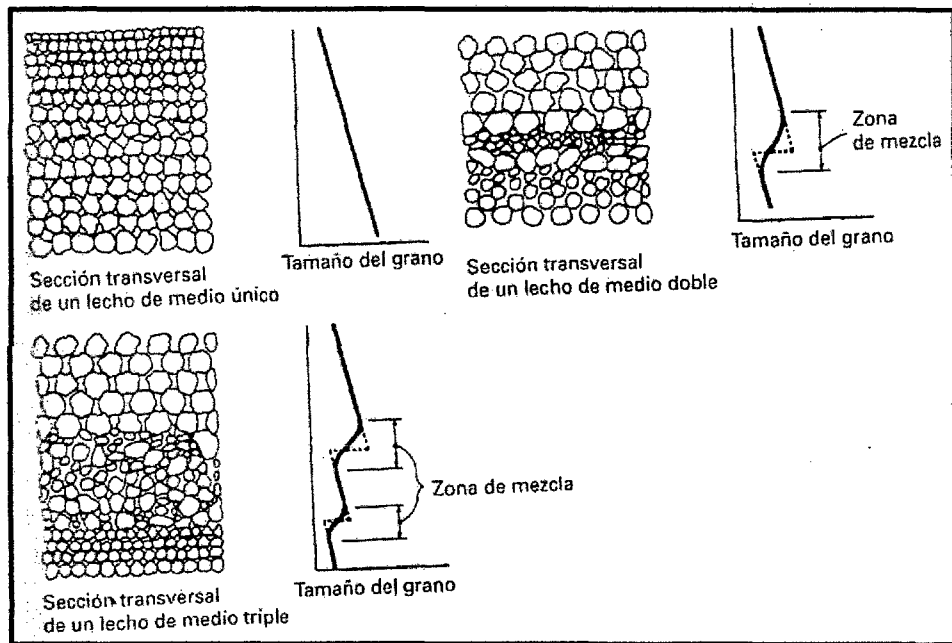
Debido a la amplia diversidad en la configuración y funcionamientos que se realiza durante la filtración; su clasificación puede realizarse por las siguientes categorías:

### **II.2.2.1 SEGÚN TIPO DE FUNCIONAMIENTO**

En relación con el tipo de funcionamiento, los filtros se pueden clasificar en continuos y semicontinuos. Los filtros semicontinuos se mantienen en funcionamiento hasta que se empieza a deteriorar la calidad del efluente o hasta que se produce una pérdida de carga excesiva en el filtro. Cuando se alcanza este punto, se detiene el filtro y se procede a su lavado para eliminar los sólidos acumulados. En los filtros continuos, los procesos de filtración y lavado se llevan a cabo de manera simultánea.

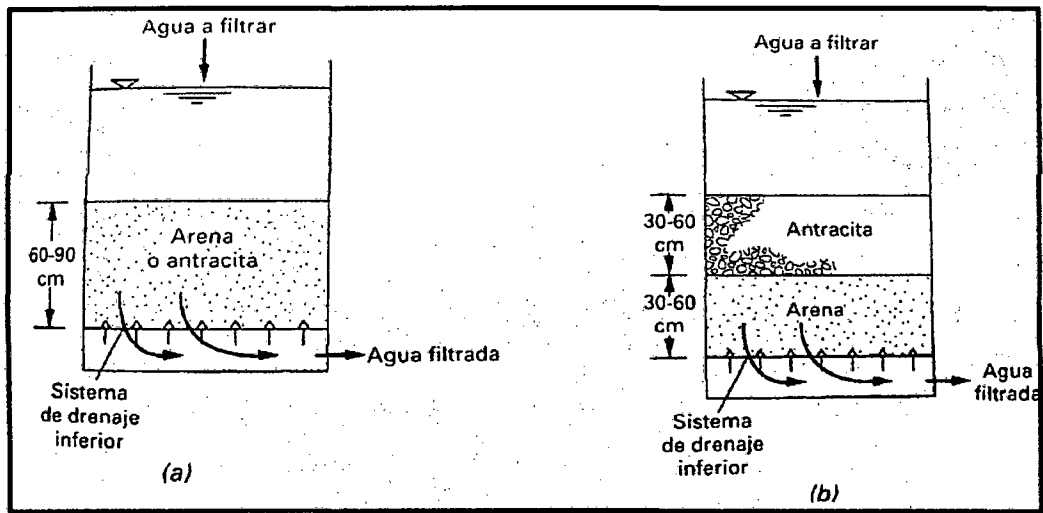
### **II.2.2.2 SEGÚN TIPO DE MEDIO FILTRANTE**

Los principales tipos de configuración de los lechos filtrantes empleados actualmente para la filtración de aguas residuales se pueden clasificar en función del número de capas de material filtrante: de una única capa, los de doble capa y los filtros multicapa (véase Figura 2). En filtros de flujo descendente convencionales, los tamaños de los granos de cada capa se distribuyen, de menor a mayor, después del lavado a contracorriente. En los filtros que cuentan con más de una capa, el grado en que se mezclan los materiales de las diferentes capas depende de la densidad y de la diferencia de tamaños entre los granos del material que compone cada una de las capas.



**Figura 2: Diagrama esquemático de la estratificación del lecho después del lavado de filtros de medio único, doble y triple, Metcalf y Eddy (1995).**

Los lechos filtrantes de doble y triple capa, así como los de capa única profundos, se desarrollaron para permitir que los sólidos en suspensión presentes en el líquido a filtrar puedan penetrar a mayor profundidad dentro del lecho filtrante, con lo cual se aprovecha más la capacidad de almacenamiento de sólidos dentro del filtro. En cambio, en los filtros de capa única poco profundos, se ha podido comprobar que gran parte de la eliminación de sólidos en suspensión se produce en los primeros milímetros de la capa filtrante. El hecho de que los sólidos penetren a mayor profundidad, también permite ciclos de filtración más largos, puesto que se reduce el ritmo de aumento de las pérdidas de carga producidas (ver Figura 3)



**Figura 3: Filtros convencionales flujo descendente monomedio (a) y bimedio (b), Metcalf y Eddy (1995)**

### II.2.2.3 SEGÚN SENTIDO DE FLUJO EN LA OPERACIÓN

Los principales tipos de filtros empleados para la filtración de efluentes de aguas residuales se pueden clasificar en filtros de flujo ascendente y filtros de flujo descendente. El más común es por mucho, el filtro de flujo descendente (ver Figura 4)

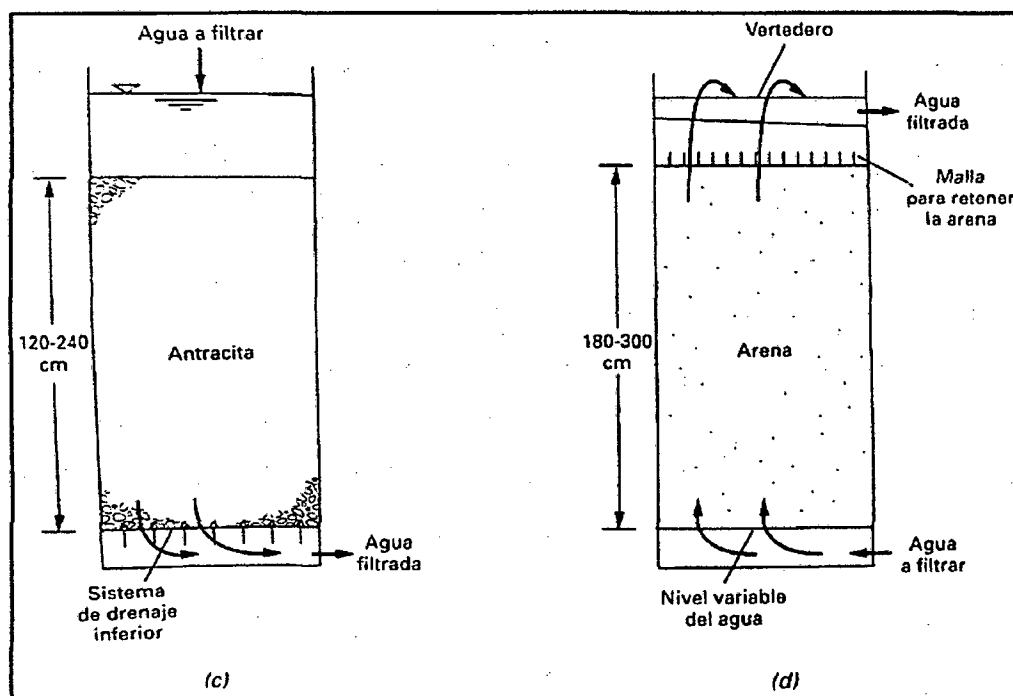


Figura 4: Filtros profundos de flujo descendente (c) y ascendente (d), Metcalf y Eddy (1995)

#### II.2.2.4 SEGÚN MÉTODO DE CONTROL DE FLUJO

El ritmo de flujo a través de un filtro se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Velocidad de Flujo} = \frac{\text{Fuerza impulsadora}}{\text{Resistencia del Filtro}}$$

En esta ecuación, la fuerza actuante representa la pérdida de presión en la circulación a través del filtro. Al poner en funcionamiento el filtro, la fuerza actuante solo debe vencer la resistencia que ofrecen el lecho filtrante limpio y el sistema de recogida de agua filtrada. A medida que se van acumulando sólidos, la fuerza actuante deberá vencer la resistencia que ofrece el lecho filtrante obstruido y el sistema de recogida de agua filtrada. Los principales métodos usados para el control del flujo que pasa a través de los filtros de gravedad se pueden clasificar en (1) filtración a caudal constante, y (2) filtración a caudal variable decreciente.

**Filtración a caudal constante.** En el proceso de filtración a caudal constante se controla el caudal de entrada o el caudal efluente para asegurar que el caudal que circula a través del filtro es constante. El control del caudal de entrada se realiza mediante vertederos o bombeo, mientras que el control del caudal efluente se lleva a cabo mediante la instalación de una válvula de accionamiento manual o automático. Al inicio del ciclo, gran parte de la fuerza actuante disponible se disipa en la válvula, que se encuentra casi cerrada. Al irse incrementando la pérdida de carga en el paso por el filtro, la válvula se va abriendo progresivamente. Dado que las válvulas de control necesarias son elementos caros y que se han producido diversos problemas de funcionamiento con estos elementos, se han desarrollado sistemas alternativos de control del caudal cuyo uso está más extendido, como los vertederos y los sistemas de bombeo.

**Filtración a caudal variable.** En el proceso de filtración a caudal variable caudal que pasa a través del filtro va disminuyendo conforme aumenta la pérdida de carga. El control del caudal que circula por el filtro también se puede llevar a cabo, tanto a la entrada del filtro como a la salida. Cuando el caudal alcanza el valor del caudal mínimo de proyecto, se detiene el filtro y se procede a su lavado. Para mayores detalles sobre este método y sobre otros alternativos, consúltese la bibliografía incluida al final de este.

## II.2.2 VARIABLES DEL PROCESO DE FILTRACIÓN

En la Tabla 6 se indican las principales variables a considerar en el proceso de filtración para la eliminación de sólidos en suspensión remanentes. Se ha comprobado que las variables más importantes del proceso de diseño son, posiblemente, la naturaleza de las partículas presentes en el agua a filtrar, el tamaño del material o materiales que componen el filtro, y el caudal de filtración (Tabla 6, variables 1, 4 y 6).



**Tabla 6: Variables que intervienen en el diseño de filtros de medio granular**

<b>Principales variables que intervienen en el diseño de filtros de medio granular*</b>	
<b>Variable</b>	<b>Significado</b>
1. Características del medio filtrante a) Tamaño del grano b) Distribución del tamaño del grano c) Forma, densidad y composición del grano d) Carga del medio	Afectan a la eficacia de eliminación de partículas y al aumento de la pérdida de carga.
2. Porosidad del Lecho Filtrante	Determina la cantidad de sólidos almacenables en el filtro.
3. Profundidad del Lecho Filtrante	Afecta a la pérdida de carga y a la duración del ciclo.
4. Velocidad de Filtración	Utilizada junto con las variables 1, 2, 3 y 6 para calcular la pérdida de carga con agua limpia.
5. Pérdida de carga admisible	Variable de proyecto.
6. Características del agua residual a tratar a) Concentración de sólidos en suspensión b) Distribución y tamaño del floculo o partícula c) Consistencia del floculo d) Carga del floculo o partícula e) Propiedades del floculo	Afectan a las características de eliminación para una configuración dada del lecho filtrante. Las características indicadas del agua a tratar pueden ser controladas, hasta cierto punto, por parte del proyectista.

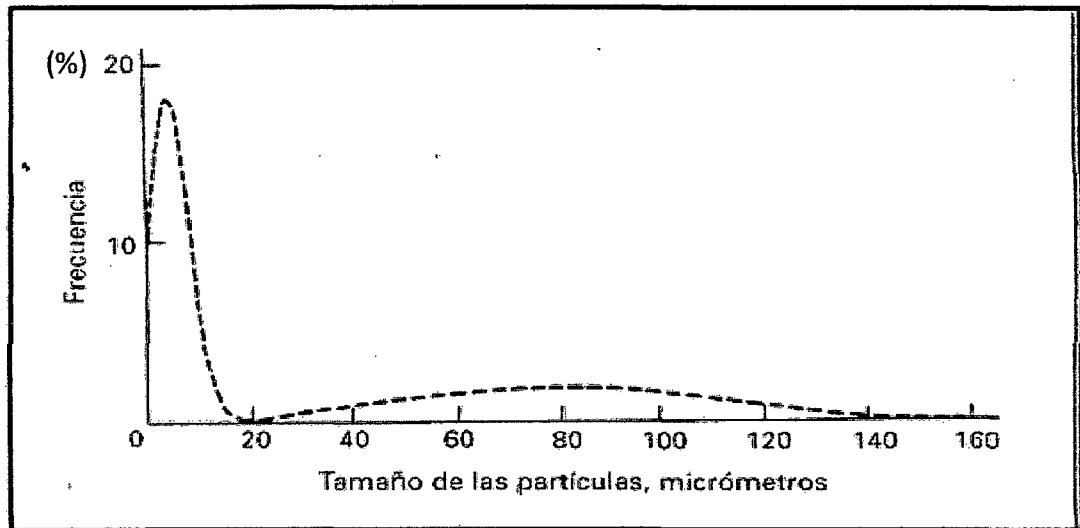
**Fuente: Metcalf y Eddy (1995)**

**Características del agua a filtrar.** Las características más importantes del agua a filtrar son la concentración de sólidos en suspensión, el tamaño y la distribución de tamaños de las partículas, y la consistencia de los flóculos. Generalmente, la concentración de sólidos en suspensión en el efluente de plantas de lodos activados y de filtros percoladores varía entre 6 y 30 mg/l. Debido a que esta concentración suele ser el parámetro de mayor interés, para el control práctico del proceso de filtrado se suele emplear el valor de la turbiedad. Se ha podido comprobar que, dentro de ciertos límites, existe una correlación entre la concentración de sólidos en suspensión en las aguas residuales tratadas y los valores medidos de la turbiedad.

Una expresión típica (Metcalf y Eddy - 1995) de la relación entre ambos parámetros en el caso de procesos de lodos activados con mezcla completa, es la siguiente:

$$\text{Sólidos en suspensión, SS, mg/l} = (2,3 \text{ a } 2,4) \times (\text{Turbiedad, NTU})$$

En la Figura 5 se muestran los datos típicos sobre el tamaño y distribución de los tamaños de las partículas sólidas presentes en el efluente de una planta de lodos activados a escala piloto que opera con un tiempo de retención celular medio de 10 días, habiéndose realizado observaciones similares en plantas a escala real. Como se puede apreciar, las partículas se encuentran en dos intervalos de tamaños distintos: partículas pequeñas, con tamaño de superficie (equivalente al diámetro circular) entre 1 y 15 micras, y partículas grandes, cuyo tamaño varía entre 50 y 150 micras. Además de estos tamaños, casi siempre se suele encontrar en los efluentes tratados un reducido número de partículas cuyo tamaño sobrepasa las 500 micras. Estas últimas partículas son ligeras y amorfas, y no sedimentan fácilmente. A partir del análisis de la distribución de tamaños de las partículas, es posible concluir que el tamaño principal de las partículas pequeñas es del orden de 3 a 5 micras, y el correspondiente a las partículas grandes se sitúa en torno a las 80 o 90 micras. La fracción pesada de las partículas más pequeñas representa en torno al 40-60% del total. Sin embargo, estos porcentajes estimados pueden presentar variaciones en función de las condiciones de funcionamiento del proceso biológico y del grado de floculación conseguido en las instalaciones de tratamiento previo.



**Figura 5: Distribución de los tamaños de partículas de un efluente tratado, Metcalf y Eddy (1995)**

La observación más significativa relacionada con el tamaño de las partículas consiste en que la distribución de tamaños resulta ser bimodal. Este hecho es importante, puesto que influye sobre los mecanismos de eliminación que puedan tener lugar durante la filtración. Por ejemplo, parece razonable suponer que el mecanismo de eliminación de partículas de 1 micra de tamaño será diferente del que consiga la eliminación de las partículas de 80 micras (o incluso mayores). El carácter bimodal de la distribución de los tamaños de las partículas también se ha observado en las plantas de tratamiento de aguas

**Características del medio filtrante.** La característica del medio filtrante que más afecta al proceso de filtración es el tamaño del grano. El tamaño del grano afecta tanto a la pérdida de carga en la circulación del agua a través del filtro como a la tasa de variación de dicho aumento durante el ciclo de filtración. Si el tamaño de grano efectivo del medio filtrante es demasiado pequeño, la mayor parte de la fuerza actuante se empleara para vencer la resistencia de fricción provocada por el lecho filtrante, mientras que si el tamaño efectivo es demasiado grande, muchas de las

partículas de menor tamaño presentes en el agua a filtrar pasaran directamente a través del filtro sin ser eliminadas.

**Velocidad de filtración.** La velocidad de filtración es un parámetro importante por cuanto afecta a la superficie necesaria del filtro. Para una aplicación dada del filtro, la velocidad de filtración dependerá de la consistencia de los flóculos y del tamaño medio de grano del lecho filtrante. Por ejemplo, si los flóculos son de débil consistencia, las velocidades de filtración elevadas tenderán a romper los flóculos y a arrastrar gran parte de los mismos a través del filtro. Se ha observado que las velocidades de filtración dentro del intervalo de 4,8 a 19,2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>xh) no afectan la calidad del efluente del filtro, debido a la propia resistencia del floculo biológico.

**Tabla 7: Características Físicas de los Filtros de medio granular comúnmente utilizados**

Características Físicas de los Filtros de medio granular comúnmente utilizados								
Funcionamiento del filtro	Tipo de filtro (nombre común)	Detalles del lecho filtrante			Dirección de flujo de fluido	Flujo de Lavado	Caudal de Circulación a través del filtro	Comentario
		Tipo de lecho filtrante	Medio filtrante	Profund. medio, cm				
Semicontinúo	Convencional	Medio único	Arena o antracita	75	Descendente	Discontinuo	Constante/ Variable	Es el tipo de filtro mas empleado
Semicontinúo	Convencional	Medio doble	Arena y antracita	90	Descendente	Discontinuo	Constante/ Variable	Filtro diseñado para aumentar la duración del ciclo
Semicontinúo	Convencional	Medio múltiple	Arena, antracita y granate	90	Descendente	Discontinuo	Constante/ Variable	Filtro diseñado para aumentar la duración del ciclo
Semicontinúo	Lecho profundo	Medio único	Arena o antracita	120-180	Descendente	Discontinuo	Constante/ Variable	
Semicontinúo	Lecho profundo	Medio único	Arena	120-180	Ascendente	Discontinuo	Constante	
Semicontinúo	Lecho pulsatorio	Medio único	Arena	27,5	Descendente	Discontinuo	Constante	Se inyecta aire de forma intermitente para romper la capa superficial y aumentar la duración del ciclo
Continuo	Lecho profundo	Medio único	Arena	120-180	Ascendente	Continuo	Constante	El lecho de arena se mueve en dirección contraria al flujo del fluido
Continuo	Puente móvil	Medio único	Arena	27,5	Descendente	Semicontinúo	Constante	El lavado a contracorriente de las celdas filtrantes individuales se realiza de forma secuencial
Continuo	Puente móvil	Medio doble	Arena	40	Descendente	Semicontinúo	Constante	El lavado a contracorriente de las celdas filtrantes individuales se realiza de forma secuencial

Fuente: Metcalf y Eddy (1995)

## II.2.2 FILTRO DE ARENA

Los filtros de arena son una de las tecnologías más antiguas para el tratamiento de aguas residuales que se conoce. Cuando se emplean de forma adecuada consiguen llegar a niveles de remoción de contaminantes muy elevados. Consisten en lechos de material granular, de tamaño de grano relativamente uniforme, adecuadamente drenados en el fondo. Se emplean generalmente como un sistema complementario para aguas tratadas previamente mediante otros sistemas.

A pesar de que la filtración es una de las principales operaciones unitarias empleadas en el tratamiento del agua potable, la filtración de efluentes provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales es una práctica relativamente reciente. Sin embargo, aunque el diseño, la configuración física y la operación de los filtros tienen los mismos principios básicos en ambas aplicaciones, debe tomarse en cuenta que hay diferencias muy importantes entre la aplicación de la filtración para agua potable y para efluentes secundarios de aguas residuales o, en general, aguas residuales pretratadas. Hoy en día, la filtración se emplea, de modo generalizado, para conseguir una mayor eliminación de sólidos en suspensión (incluida la  $DBO_5$ ) de los efluentes de los procesos de tratamiento biológicos y químicos, remoción de turbiedad, metales pesados y también se emplea para la eliminación del fósforo precipitado por vía química.

La remoción de los sólidos suspendidos contenidos en el agua residual, dentro del lecho filtrante granular, en todos los casos, es el resultado de un proceso muy complejo que involucra mecanismos de remoción diferentes como el cribado, la interceptación, la adsorción y la absorción, floculación y sedimentación.

El diseño de una eficiente y económica planta de tratamiento de desagüe está basado en factores tales como: la calidad y características de agua residual, los límites máximos permisibles, selección de los procesos unitarios a utilizarse y además, de un análisis tanto de viabilidad económica como de su posterior buena

operación y mantenimiento, no existiendo fórmula única o método simple que determine los procesos o el tipo de planta a utilizarse en un determinado caso.

Para el diseño del lecho filtrante se pueden considerar configuraciones recomendadas como:

Tabla 8: Configuración recomendada para filtros seleccionados

ítem	Características	Valor	
		Intervalo	Típico
<b>01</b>	<b>Convencional (estratificado)</b>		
01.01	Arena:		
a)	Profundidad, cm	50.0 - 75.0	60.0
b)	Tamaño efectivo, mm	0.40 - 0.80	0.65
c)	Coefficiente de uniformidad	1.20 - 1.60	1.50
d)	Velocidad de filtración, m/h	4.88 - 14.66	7.33
01.02	Antracita:		
a)	Profundidad, cm	60.0 - 90.0	75.0
b)	Tamaño efectivo, mm	0.80 - 2.00	1.30
c)	Coefficiente de uniformidad	1.30 - 1.80	1.60
d)	Velocidad de filtración, m/h	4.88 - 19.54	9.77
<b>02</b>	<b>Lecho poco profundo (reducido)</b>		
02.01	Arena:		
a)	Profundidad, cm	25.0 - 30.0	28.0
b)	Tamaño efectivo, mm	0.35 - 0.60	0.45
c)	Coefficiente de uniformidad	1.20 - 1.60	1.50
d)	Velocidad de filtración, m/h	4.88 - 14.66	7.33
02.02	Antracita:		
a)	Profundidad, cm	30.0 - 75.0	40.0
b)	Tamaño efectivo, mm	0.80 - 1.50	1.30
c)	Coefficiente de uniformidad	1.30 - 1.80	1.60
d)	Velocidad de filtración, m/h	4.88 - 14.66	7.33
<b>03</b>	<b>Lecho Profundo (no estratificado)</b>		
03.01	Arena:		
a)	Profundidad, cm	90.0 - 180.0	120.0
b)	Tamaño efectivo, mm	2.00 - 3.00	2.50
c)	Coefficiente de uniformidad	1.20 - 1.60	1.50
d)	Velocidad de filtración, m/h	4.88 - 24.43	12.21
03.02	Antracita:		
a)	Profundidad, cm	90.0 - 210.0	150.0
b)	Tamaño efectivo, mm	2.00 - 4.00	2.75
c)	Coefficiente de uniformidad	1.30 - 1.80	1.60
d)	Velocidad de filtración, m/h	4.88 - 24.43	12.21

Fuente: Tratamiento de aguas residuales, Jairo Romero (2004)



### **II.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DE FILTRACIÓN**

La operación completa de filtración consta de dos fases: filtración y lavado o regeneración. Mientras la descripción de los fenómenos que se producen durante la fase de filtración es prácticamente idéntica para todos los sistemas de filtración que se emplean para las aguas residuales, la fase de lavado es bastante diferente en función de si el filtro es de funcionamiento continuo o semicontinuo. Tal como expresan sus nombres, en los filtros de funcionamiento semicontinuo la filtración y el lavado son fases que se dan una a continuación de la otra, mientras que en los filtros de funcionamiento continuo ambas fases se producen de forma simultánea.

Las características operacionales de los filtros en general se muestran en la Tabla 9.

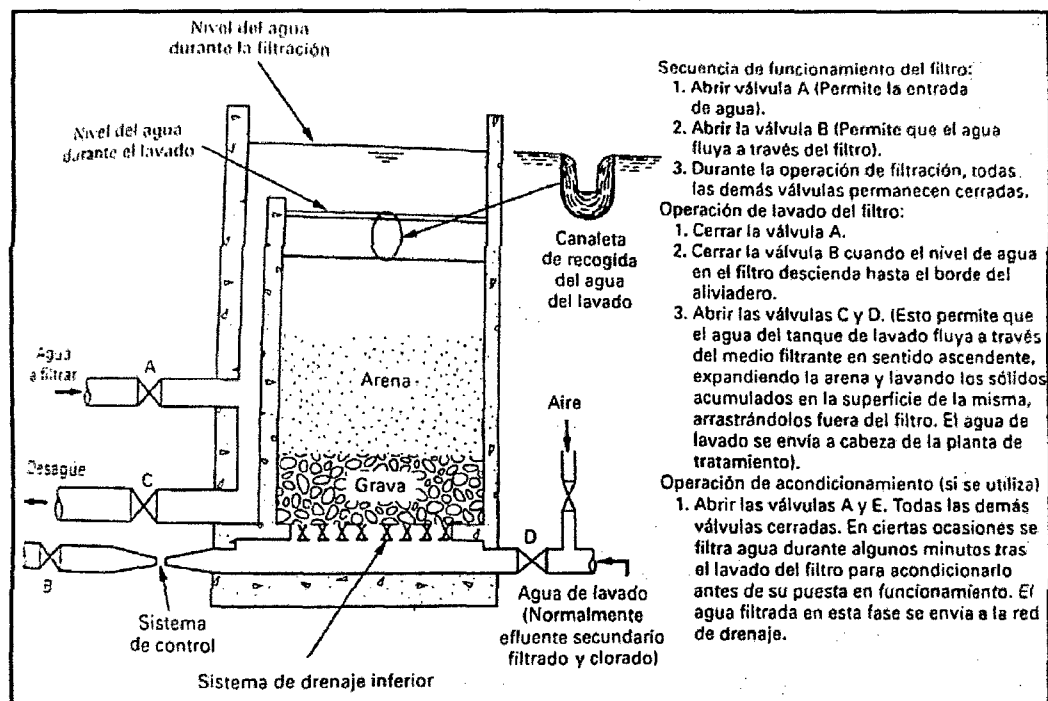
**Tabla 9: Características operacionales de filtros granulares comúnmente utilizados**

Características operacionales de los filtros granulares comúnmente utilizados		
Tipo de Filtro	Funcionamiento durante la fase de filtración	Funcionamiento durante la fase de lavado
<b>Convencional</b> Semicontinúo, mono, bi, y multimedio, flujo descendente	El líquido a filtrar circula a través del lecho filtrante en sentido descendente. En función del método de control del caudal circulante, este puede ser constante o variable	Cuando la turbiedad del efluente empieza a aumentar, o cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, se lava el filtro invirtiendo el sentido de circulación en el mismo. En la operación de lavado se emplea agua y aire
<b>Lecho Profundo</b> Semicontinúo, mono-medio, flujo descendente	El líquido a filtrar circula a través del lecho filtrante en sentido descendente. En función del método de control de caudal circulante, este puede ser constante o variable	Cuando la turbiedad del efluente empieza a aumentar, o cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, se lava el filtro invirtiendo el sentido de circulación en el mismo. En la operación de lavado se emplea agua y aire
<b>Lecho Profundo</b> Semicontinúo, mono-medio, flujo ascendente	El líquido a filtrar circula a través del lecho filtrante en sentido ascendente. El caudal circulante suele ser constante.	Cuando la turbiedad del efluente empieza a aumentar, o cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, se lava el filtro invirtiendo el sentido de circulación en el mismo. En la operación de lavado se emplea agua y aire
<b>Lecho Pulsante</b> Semicontinúo, mono-medio, flujo descendente	El líquido filtrante circula a través del lecho filtrante en sentido descendente. Conforme aumenta la pérdida de carga, se inyecta aire para romper la capa superficial y para redistribuir los sólidos. El caudal circulante suele ser constante.	Cuando la turbiedad del efluente empieza a aumentar, o cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, se lava el filtro invirtiendo el sentido de circulación en el mismo. Durante la operación de lavado continua entrando líquido en el filtro. También se utiliza el lavado por vía química.
<b>Lecho Profundo</b> Continuo, mono-medio, flujo ascendente	El líquido a filtrar circula en sentido descendente a través del lecho filtrante, que se desplaza hacia abajo en dirección a contracorriente. El caudal circulante suele ser constante	El medio filtrante se lava a contracorriente de forma continua bombeando la arena desde el fondo del filtro con un air-lift hasta un dispositivo de lavado de arenas. Una vez limpia, la arena se distribuye en la parte superior del lecho filtrante.
<b>Puente móvil</b> Continuo, mono y bimedio, flujo descendente	El líquido a filtrar circula a través del lecho filtrante en sentido descendente. El líquido se sigue filtrando mientras se lavan las celdas individuales. El caudal circulante suele ser constante.	Cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, las celdas individuales se lavan sucesivamente, invirtiendo el sentido del flujo en cada una de ellas. El agua de lavado se elimina mediante una bomba.

**Fuente: Metcalf y Eddy (1995)**

Se muestran las características físicas y de funcionamiento de los filtros de medio granular que se emplean para el tratamiento de las aguas residuales.

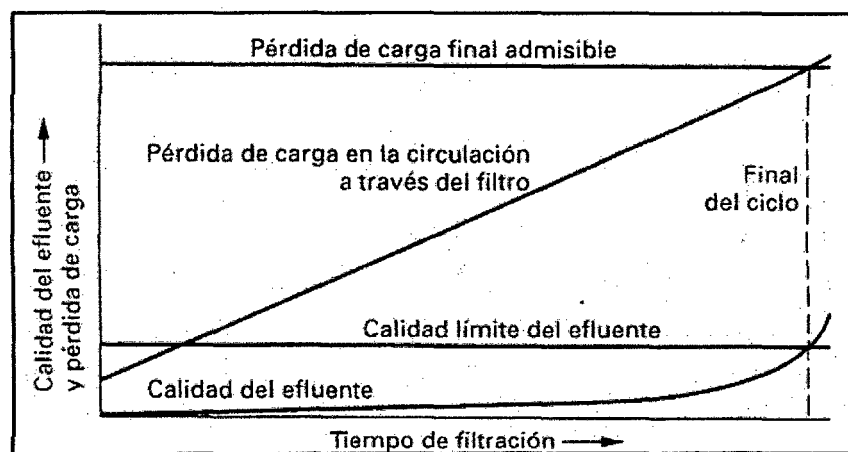
**Operaciones de filtración semicontinuas.** En el esquema de la Figura 6 se identifica tanto la fase de filtración como de lavado de un filtro convencional de funcionamiento semicontinúo. La fase de filtración en la que se elimina la materia particulada, se lleva a cabo haciendo circular el agua través de un lecho granular, con o sin la adición de reactivos químicos. Dentro del estrato granular, la eliminación de los sólidos en suspensión contenidos en el agua residual se realiza mediante un complejo proceso en el que intervienen uno o más mecanismos de separación como el tamizado, interceptación, impacto, sedimentación y adsorción.



**Figura 6: Representación esquemática de un filtro convencional de Flujo descendente por gravedad en medio granular, Metcalf y Eddy (1995)**

El final del ciclo de filtrado (fase de filtración o carrera de filtración), se alcanza cuando empieza a aumentar el contenido de sólidos en suspensión en el efluente hasta alcanzar un nivel máximo aceptable, o cuando se produce una pérdida de carga prefijada en la circulación a través del lecho filtrante (véase Figura 7).

Idealmente, ambas circunstancias se producen simultáneamente. Una vez se ha alcanzado cualquiera de estas condiciones, se termina la fase de filtración, y se debe lavar el filtro a contracorriente para eliminar la materia (sólidos en suspensión) que se ha acumulado en el seno del lecho granular filtrante. Para ello, se aplica un caudal de agua de lavado suficiente para fluidificar (expandir) el medio filtrante granular y arrastrar el material acumulado en el lecho. Para mejorar y favorecer la operación de lavado del filtro, suele emplearse una combinación de agua y aire. En la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales, el agua de lavado, que contiene los sólidos en suspensión que se eliminan en el proceso de filtración, se retorna a las instalaciones de sedimentación primaria o al proceso de tratamiento biológico.



**Figura 7: Representación esquemática del ciclo de filtración, Metcalf y Eddy (1995)**

**Operaciones de filtración continua.** En los filtros de funcionamiento continuo, como el filtro de puente de translación o el filtro de flujo Ascendente, las fases de filtración y de lavado se realizan simultáneamente. Es importante señalar que al emplear filtros de funcionamiento continuo no existen los conceptos de turbiedad límite del efluente ni de pérdida de carga máxima admisible en la circulación a través del lecho filtrante.

### CAPITULO III: MARCO LEGAL

---

#### III.7. ASPECTOS LEGALES DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERU

A continuación se indican los principales documentos legales emitidos por el Gobierno Peruano. (Ver Anexo N° 01, para mayor detalle):

- A. Constitución Política del Perú 1993.  
Artículos 66° y 68°.
- B. Ley de Reforma sobre Descentralización: Ley N° 27680.  
Artículos 192° y 195°.
- C. Ley General de Salud: Ley N° 26842.  
Artículos 96° y 104°.
- D. Ley General del Ambiente: Ley N° 28611.  
Artículos 29°, 31°, 32°, 120°, 121° y 122°.
- E. Estándares de Calidad ambiental (ECA) para agua: Decreto Supremo N° 002-2008 MINAM.  
Estándares de Calidad ambiental (ECA) para agua - Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales.
- F. Disposiciones para la implementación de los ECA para agua: Decreto Supremo N° 023-2009 MINAM.  
Artículos 2° y 7°.
- G. Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR domesticas o municipales: Decreto Supremo N° 003-2010 MINAM.  
Artículos 1° y 3°. 13

- H. Ley marco para el crecimiento de la Inversión Privada: Decreto Legislativo N° 757.  
Artículos 53° y 55°.
- I. Ley Orgánica de Gobiernos Regionales: Ley N° 27902.
- J. Ley Orgánica de Municipalidades: Ley N° 27972.  
Artículos 80° y 141°.
- K. Ley de creación, organización y funciones del MINAM: Decreto Legislativo N° 1013.  
Artículos 1°, 3°, 6° y 7°.
- L. Ley de Recursos Hídricos: Ley N° 29338 (2009).  
Artículos 5°, 9°, 10°, 11°, 25°, 34°, 44°, 45°, 59°, 73°, 75°, 76°, 79°, 80°, 81°, 82°, 83°, 92°, 120°, 121°, 122°, 125°.
- M. Resolución Jefatural N° 0291-ANA.  
Artículos 1°, 2° y 6°.
- N. Resolución Jefatural N° 0351-ANA.
- O. TUPA MINSAs y sus órganos desconcentrados: D.S. N° 013-2009-SA.
- P. Ley del sistema nacional de evaluación de impacto ambiental: Ley N° 27446.  
Artículos 1°, 5° y 15°.
- Q. Ley General de servicios de saneamiento: Ley N° 26338.  
Artículos 4°, 8°, 9° y 10°.

- R. Reglamento de la ley general de servicios de saneamiento: D.S. N° 09-95-PRES.  
Artículos 17°, 55° y 56°.
- S. Directiva N° 180-97 SUNASS.  
N° 05. 14
- T. Código del medio ambiente: D.L. N° 613.  
Artículos 107°, 113° y 114°.
- U. Resolución ministerial N° 0030-84.S.A./DVM.  
Artículos 1° y 4°.
- V. Código penal: D.L. N° 635.  
Artículos 304°, 305 y 307°.
- W. Guía de la OMS

### **III.8. ENTIDADES INVOLUCRADAS**

A continuación se indican las principales entidades involucradas en el cumplimiento del marco legal.

- A) Ministerio del Ambiente (MINAM)
- B) Autoridad Nacional del Agua (ANA)
- C) Ministerio de Agricultura (MINAG)
- D) Ministerio de Economía y Finanzas (MEF)
- E) Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento
- F) Superintendencia Nacional de Servicio de Saneamiento (SUNASS)
- G) Ministerio de Salud (MINSa)

## CAPITULO IV: OBJETIVOS

---

### IV.9. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el filtro de arena como unidad de post-tratamiento de aguas residuales, a fin de remover microorganismos patógenos como coliformes termotolerantes, solidos suspendidos volátiles y huevos de helmintos.

#### IV.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros básicos de diseño necesarios que permitan desarrollar una alternativa de sistema de tratamiento terciario por filtración de arena para su aplicación a pequeñas comunidades rurales.
- Monitorear y estimar el porcentaje de remoción principalmente de coliformes termotolerantes y sólidos suspendidos volátiles en cada unidad de filtro.
- Comparar los sistemas de filtración de flujo ascendente y descendente.
- Obtener las mejores condiciones de caudal y turbiedad que permitan una adecuada remoción en la carrera de filtración.
- Obtener la duración promedio de una carrera de filtración, así como también sus parámetros para un buen lavado.
- Obtener la mejor configuración de la granulometría y estratificación del filtro.



- Determinar la remoción de los filtros de arena comparativamente entre los filtros ascendente y descendente tanto en la configuración de filtro de lecho convencional y lecho reducido.
- Determinar la eficiencia en la remoción de huevos de helmintos en los diferentes filtros, tanto descendente como ascendente y de lecho convencional con el reducido.

## CAPITULO V: MATERIALES Y MÉTODOS

---

### V.10. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La parte experimental de la investigación se realizó en 6 etapas:

- La primera etapa es realizar el diseño del filtro
- La segunda etapa es ubicar un lugar para el funcionamiento del filtro.
- La tercera etapa es el montaje de los filtros de arena ascendente y descendente.
- La cuarta etapa es verificar las condiciones hidráulicas como el caudal y tiempo de retención hidráulica por medio de pruebas hidráulicas con turbiedad artificial.
- La quinta etapa es simular un efluente de un tratamiento secundario y realizar las mediciones analíticas (fisicoquímicas y microbiológicas) del afluente y efluente de los filtros, regular el caudal y darle mantenimiento adecuado.
- La sexta etapa es la interpretación de los análisis y resultados.

### V.11. DISEÑO DEL FILTRO

El diseño del filtro es realizado definiendo el tipo de filtro a utilizarse; en una primera etapa, se utiliza el filtro de arena de lecho extendido; posteriormente se recurrió al filtro de arena con lecho reducido. En ambos casos se puso en funcionamiento los filtros en flujo ascendente y descendente (unidades en paralelo) para comparar los resultados a iguales condiciones, como se aprecia en la gráfica siguiente:

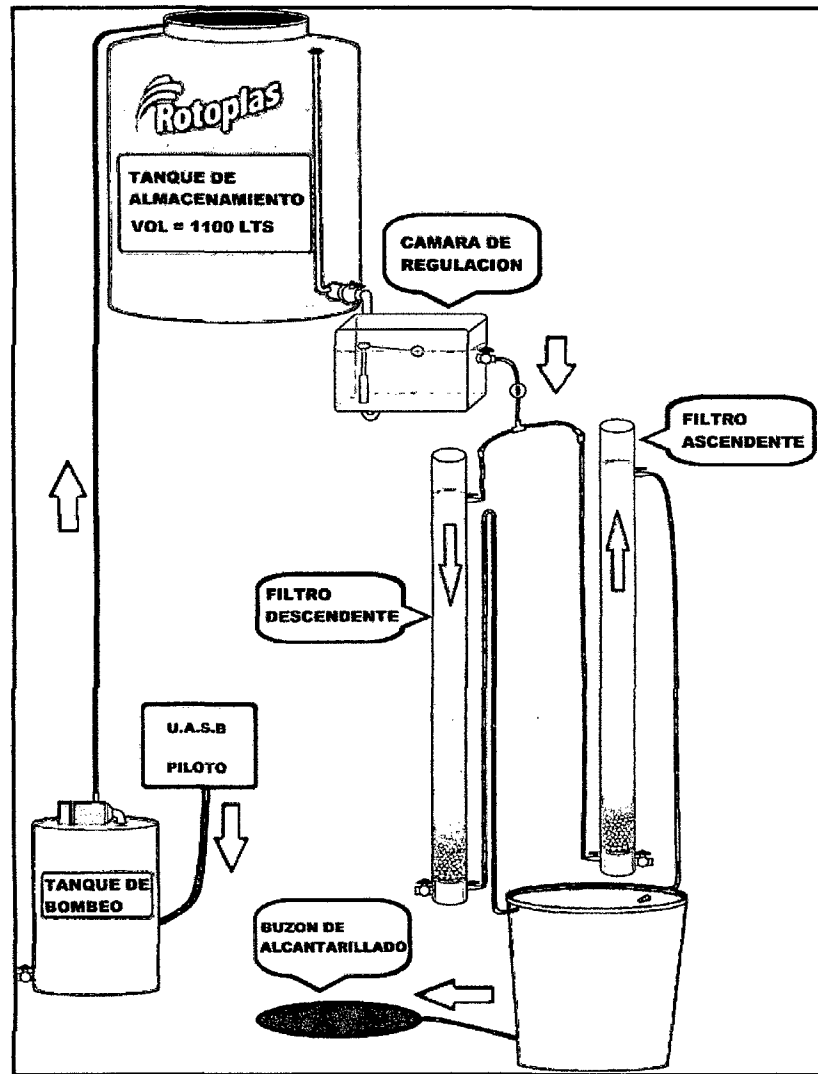
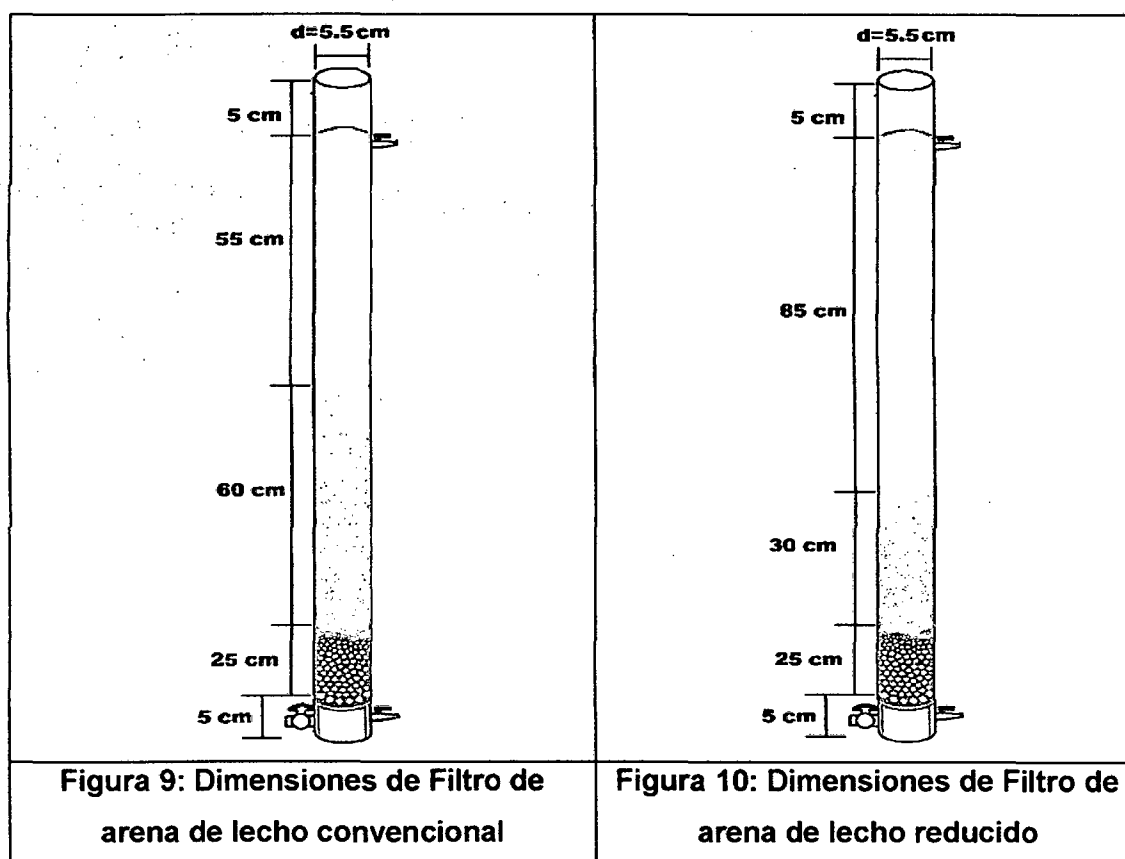


Figura 8: Esquema de Planta de Filtros de Arena

Como ya se mencionó se utilizaron dos configuraciones de filtros utilizados en diferentes etapas que detallaremos más adelante.



## V.12. UBICACIÓN

El desarrollo de la presente investigación se realizó en la PTAR ubicada en CITRAR-FIA-UNI, que cuenta con las condiciones favorables, materiales y equipos necesarios para el análisis y monitoreo del agua. Asimismo, dicha planta se sitúa en la Universidad Nacional de Ingeniería, a la altura de la puerta N° 7.

El filtro de tesis se encuentra armado en la parte posterior a las lagunas y ubicado en las coordenadas UTM 8671427.94 m S y 276690.30 m E, a una elevación aproximada de 103 m.s.n.m.

### V.13. MONTAJE DE LOS FILTROS DE ARENA



**Figura 11: Ubicación de la Planta Piloto de Filtros de Arena**

El montaje de los filtros de arena se efectuó aproximadamente a 7 metros del reactor UASB Piloto, las consideraciones que se toman en cuenta son de acuerdo al diseño propuesto. Para el sistema completo se consideró la siguiente secuencia:

1. El efluente del reactor UASB es llevado por gravedad y por medio de mangueras que conducen el agua tratada a un tanque de bombeo ubicado a un nivel inferior al de los filtros, este tanque cuenta con un sistema de rebose que transporta el excedente hacia un buzón que se conecta a la red de alcantarillado.
2. Del tanque de bombeo, el agua almacenada es impulsada diariamente por medio de una bomba de  $\frac{1}{2}$  Hp hasta un tanque de almacenamiento Rotoplast de 1100 l el cual se encuentra a una cota superior al de los filtros.

3. En el tanque de almacenamiento se mezcla el agua residual pretratadas con agua para luego ser conducido por tuberías hasta la caja de regulación de presión la cual cuenta con una válvula flotadora para mantener un nivel y flujo constante de agua hacia los filtros.
4. De la cámara de regulación se conduce por medio de mangueras de 3/8" hasta un dispositivo de derivación para cada uno de los filtros; asimismo incluye válvulas y llaves que permiten la regulación de los caudales.
5. Cada filtro tiene un flujo ascendente o descendente según sea el caso, para lo cual el ingreso será por la zona inferior o superior respectivamente. Asimismo cada filtro cuenta con válvulas para el control del flujo, orificios para efectuar el rebose durante el Retrolavado y válvula de Purga para efectuar el drenaje total cuando se requiera vaciar la unidad de filtro.
6. El efluente del tratamiento es conducido por la carga hidráulica de los mismos filtros a un depósito, en dicho trayecto las tuberías cuentan con sistemas de derivación para poder hacer el monitoreo correspondiente a la salida de cada de las unidades respectivas.
7. Desde el depósito el agua tratada es llevada por gravedad hacia la red de alcantarillado existente.

#### **V.14. EQUIPOS EMPLEADOS**

Los equipos empleados en esta investigación para los procesos y operaciones fueron los siguientes:

- Bomba ½ HP.
- Tanque de Bombeo.
- Tanque de Almacenamiento.

- Tanque de Regulación.
- Dos (02) unidades de filtros de arena de acrílico
- Tuberías de PVC C-10
- Mangueras de 3/8"
- Válvulas plásticas para las mangueras (utilizadas comúnmente en sistema de recirculación de aire en peceras)

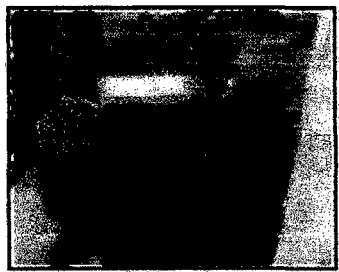
## V.15. COMPONENTES DE LA PLANTA DE FILTROS DE ARENA

### V.7.1. SISTEMA DE BOMBEO

La bomba se utilizó para bombear el agua tratada por el reactor UASB. Las especificaciones son las siguientes:

$$Q_{\max} = 27 \text{ l/min.}$$

$$H_{\max} = 24 \text{ m.}$$



**Figura 12: Bomba Periférica de 1/2 HP**

El Sistema de Bombeo cuenta con la siguiente configuración:

- a) Tanque de bombeo de 400 litros de capacidad; que sirve como recipiente de almacenamiento del efluente del reactor UASB y su posterior bombeo.
- b) Válvula Purga; la cual sirve en caso este requiera ser vaciado para su limpieza u otras actividades.

- c) Sistema de rebose, conformado por un embudo en su interior 20 cm antes del límite superior del recipiente conectado a través de una manguera con el alcantarillado municipal, el objetivo es derivar el exceso de agua tratada por el reactor UASB piloto en caso de que el líquido almacenado sobrepase la capacidad del tanque o de que no se realice el bombeo diario.



**Figura 13: Montaje del Equipo de Bombeo**

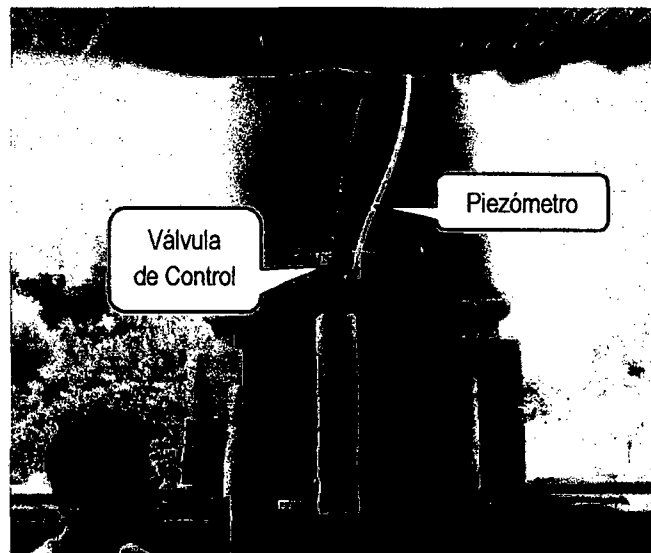
#### **V.7.2. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO**

El Sistema de Almacenamiento cuenta con la siguiente configuración:

- a) Tanque de 1100 litros de capacidad marca ROTOPLAST; que sirve como recipiente de almacenamiento del efluente impulsado desde el tanque de bombeo.



- b) Válvula de Control de Salida general; la cual sirve para la apertura y cierre del caudal de salida del tanque de bombeo, en caso este requiera ser vaciado para su limpieza u otras actividades.
- c) Piezómetro; para medir el nivel de agua en el tanque.



**Figura 14: Sistema de válvulas y piezómetro**

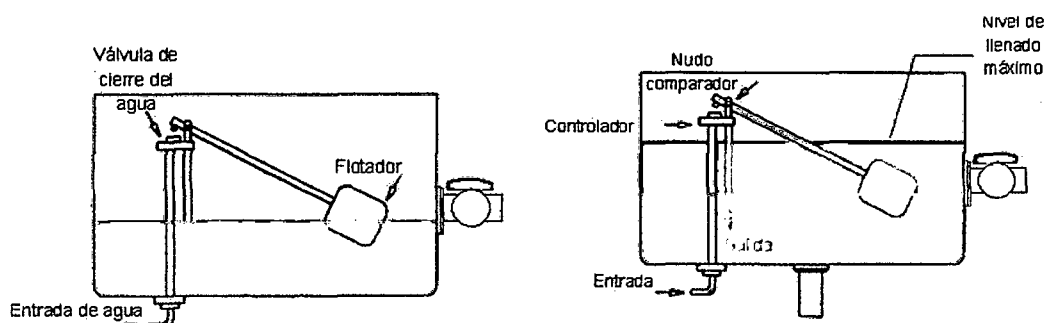


**Figura 15: Sistema de Almacenamiento**

### V.7.3. SISTEMA DE REGULACIÓN

El sistema de regulación cuenta con la siguiente configuración:

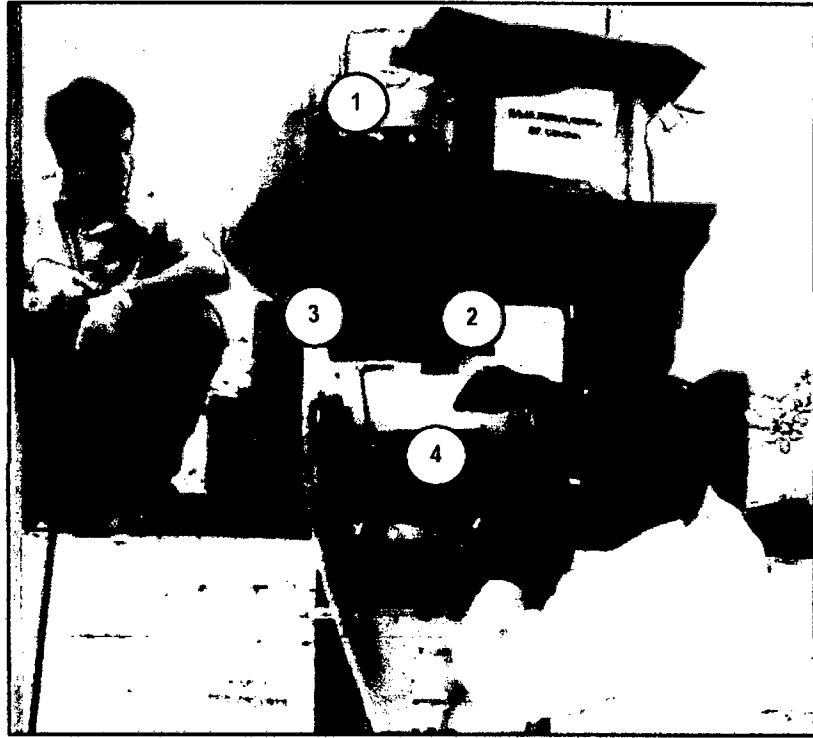
- a) Tanque de regulación; con válvula flotadora para mantener el nivel del agua en el tanque y en consecuencia una carga constante sobre los filtros durante todo el periodo de funcionamiento.



**Figura 16: Esquema de Funcionamiento del Tanque de Regulación**

Como se aprecia en la figura anterior, la cámara reguladora cuenta con una válvula flotadora que cierra el ingreso de agua al encontrarse la cámara llena y apertura el ingreso de manera gradual al ir descendiendo el nivel de agua en el tanque.

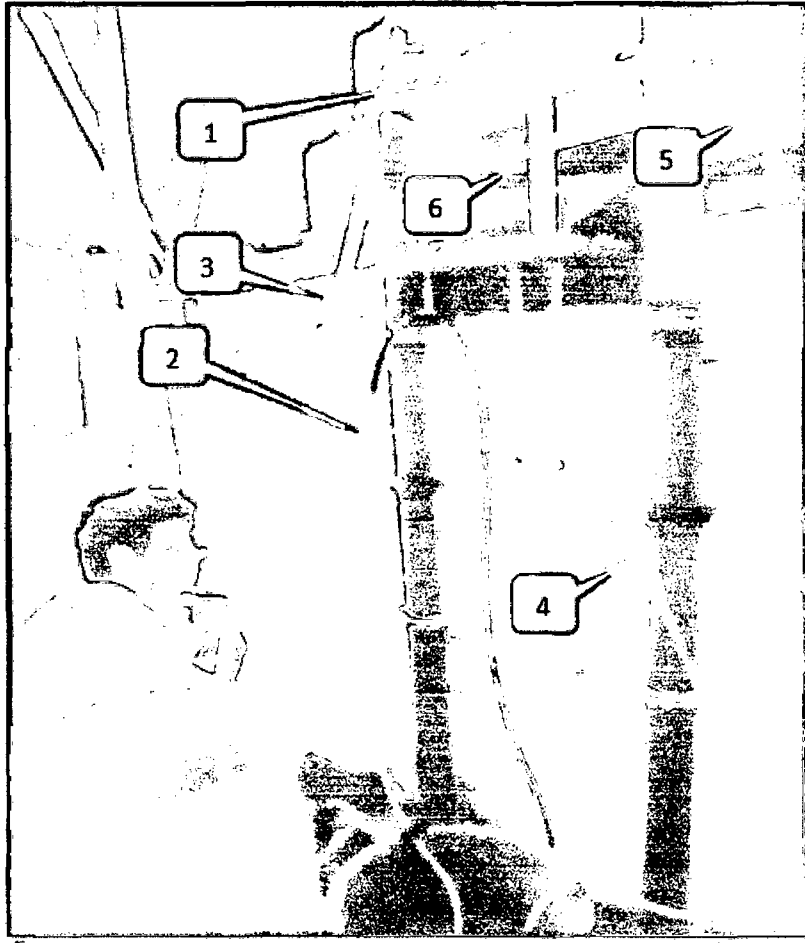
b) Sistema de válvulas para la distribución de caudales.



**Figura 17: Sistema de válvulas para la distribución de caudales**

Donde:

1. Válvula de salida del Tanque de Regulación
  2. Válvula tee para distribuir caudales
  3. Válvulas reguladoras de caudal (posteriormente reemplazadas por llave de pinza hoffman)
  4. Válvulas para equipo de venoclisis, para las tomas de muestra antes del ingreso al filtro
- c) Sistema de mangueras y válvulas para el ingreso del efluente.  
d) Sistema de mangueras y válvulas para la salida del efluente.  
e) Sistema de mangueras y válvulas para el lavado de los filtros.



**Figura 18: Sistema de mangueras para lavado de filtros**

Donde:

1. Tubería de ingreso de agua cruda al filtro descendente
2. Tubería de salida de agua tratada del filtro descendente
3. Tubería de rebose durante el retrolavado
4. Tubería de ingreso de agua cruda al filtro ascendente
5. Tubería de salida de agua tratada del filtro ascendente
6. Probeta graduada para medicion y control del caudal

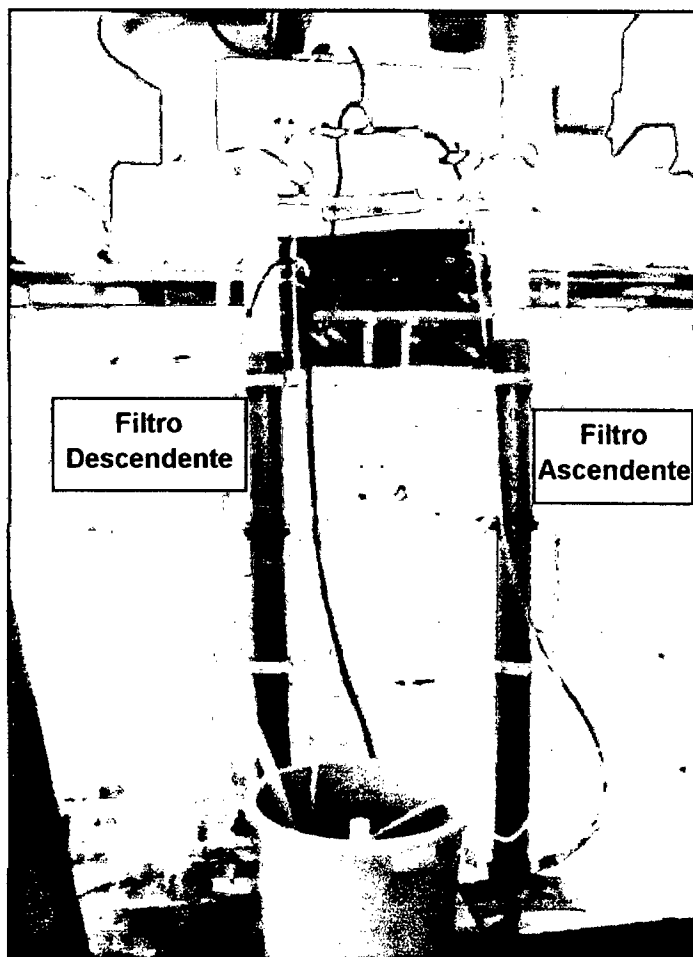
#### V.7.4. FILTRO DE ARENA

Para la construcción de los filtros de arena se consideró que tengan la misma configuración: una capa de arena y una capa de grava (de las mismas características granulométricas y en las mismas proporciones), a fin de que los resultados en las pruebas en paralelo, sean comparables entre sí.

El procedimiento consistió en seleccionar una tasa inicial adecuada para el funcionamiento de los filtros igual a  $120 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \times \text{d})$ , asimismo la altura del lecho para las configuraciones del filtro empleadas (convencional y reducido) basado en la bibliografía consultada.

Luego, para efectos de un mejor control y facilidad en la operación, se consideró utilizar un módulo de filtro con el menor diámetro posible, de tal manera que el caudal sea bajo a fin de mantener la tasa elegida y respetar la altura del lecho, sin afectar la integridad estructural del módulo, según lo anterior el módulo de filtro midió 1.50 m de alto y 5.5 cm de diámetro.

Finalmente, con el modulo del filtro elegido, se calculó el caudal requerido para una operación semi-continua del filtro.



**Figura 19: Módulos de Filtros ascendente y descendente**

Cada filtro se componen de una tubería de acrílico con orificios para las válvulas de purga, válvulas de lavado y válvulas de rebose. Se adiciono un soporte para el falso fondo con orificios de 1/4" para el paso del afluente y elevado a 5 cm sobre la base del filtro. Asimismo contiene grava la cual brinda soporte al lecho de arena, y la arena la cual va a tener la función de retener el material orgánico y microbiológico del efluente. Tanto la arena como la grava fueron seleccionadas y tamizadas, para formar el medio filtrante.

Para evitar la formación de algas en el lecho filtrante se cubrió con plástico opaco impidiendo el ingreso de la luz solar al interior del filtro (véase Figura 19)

El filtro de arena se compone de:

**a) Arena**

Debe ser caracterizada, seleccionada y tamizada para ser utilizada en el filtro.

**Características de las arena a utilizar**

Para la realización de esta tesis se evaluó dos configuraciones de tamizado de arena cada una de las cuales se detallan a continuación:

**Tabla 10: Configuración recomendada para filtros seleccionados**

ítem	Características	Valor	
		Intervalo	Típico
<b>01</b>	<b>Convencional</b>		
01.01	Arena:		
a)	Profundidad, cm	50.0 - 75.0	60.0
b)	Tamaño efectivo, mm	0.40 - 0.80	0.65
c)	Coefficiente de uniformidad	1.20 - 1.60	1.50
d)	Velocidad de filtración, m/h	4.88 - 14.66	7.33
<b>02</b>	<b>Lecho poco profundo (reducido)</b>		
02.01	Arena:		
a)	Profundidad, cm	25.0 - 30.0	28.0
b)	Tamaño efectivo, mm	0.35 - 0.60	0.45
c)	Coefficiente de uniformidad	1.20 - 1.60	1.50
d)	Velocidad de filtración, m/h	4.88 - 14.66	7.33

La primera es conocida como filtro convencional, se caracteriza por tener relativamente grandes granos de arena en su composición, generando una gran porosidad, por lo que tiene una gran capacidad de retención de materia orgánica y *microorganismos*, funciona como un reactor anaerobio formándose una gran película orgánica (compuesta principalmente de bacterias y otros microorganismos) en la entrada al filtro.

La segunda es conocida como filtro de lecho reducido, y se caracteriza por tener granos de menor diámetro en su composición, por tanto el volumen de sus intersticios interiores poseen menos capacidad de almacenamiento de materia orgánica y/o *microorganismos* que otros filtros. Su ventaja radica en que al tener menor tamaño de intersticios, quedan atrapada materia orgánica y microorganismos de menor tamaño haciendo más eficiente su tratamiento, pero dando bajos tiempos de operación.

Según recomendaciones del libro Metcalf & Eddy (1995) sugiere las configuraciones del filtro debido a las siguientes razones:

- El material escogido es arena por ser el material más accesible para poblaciones rurales.
- Los tipos filtros escogidos son los del tipo convencional y de lecho reducido por ser los más económicos al requerir menor altura de lecho filtrante.

#### **Selección y tamizado de la arena**

- La arena empleada es del tipo silícica, es por ello que se seleccionó la arena de construcción, luego de eso fue transportada a los laboratorios de la *Faculta de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería*.
- En ambos casos la arena debe de ser de tipo esférica, que son las más recomendables por que permiten un mejor lavado de los filtros.



### a.1) Configuración del lecho de arena en filtro convencional

La configuración de la arena seleccionada cumple con estas características:

Tamaño efectivo: 0.40 mm a 0.80 mm; recomendable 0.65 mm

Coefficiente de uniformidad: 1.20 a 1.60; recomendable 1.50

Profundidad del Filtro: 0.50 m a 0.75 m; recomendable 0.60 m

La curva granulométrica que cumple estas condiciones es la que se muestra en la Figura 20: Curva Granulométrica de la arena para el filtro convencional

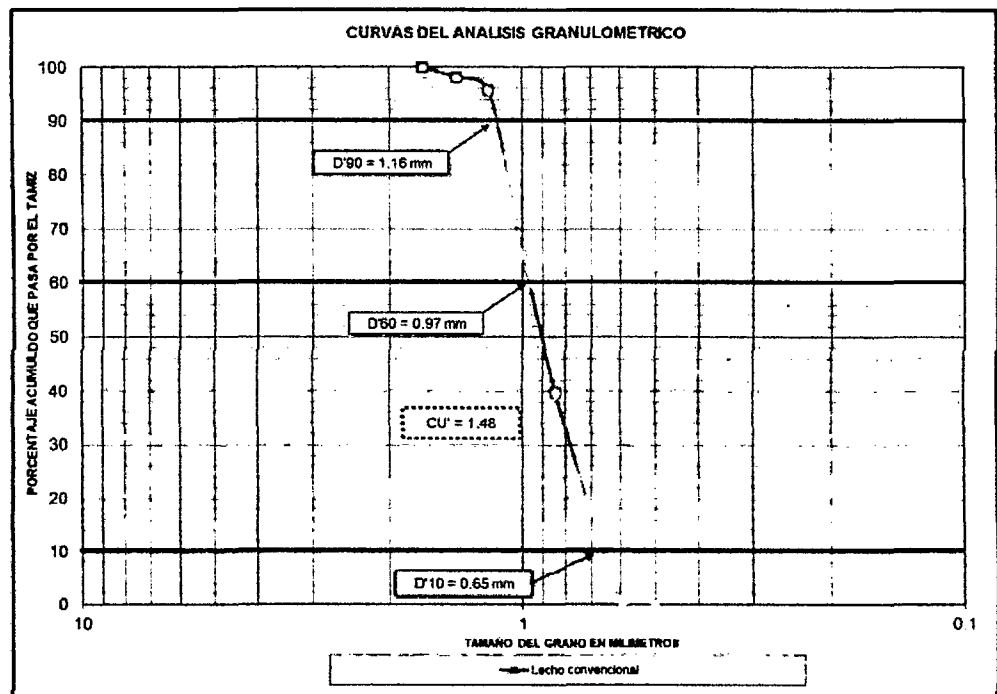


Figura 20: Curva Granulométrica de la arena para el filtro convencional

Según la curva granulométrica de la arena se seleccionó las mallas número: 18, 20, 25 y 30 (Mallas Estándar para Normas Americanas e inglesas). Las cantidades que se preparó de cada una de ellas fueron como se presentan la Tabla 11.

**Tabla 11: Material retenido en mallas de tamizado – Filtro convencional**

Malla N°	Abertura (pulg)	Abertura (mm)	Peso	%Peso Retenido	%Acumulado	
					Retenido	Pasa
8	0.094	2.38	0.000	0.000	0.000	100.00
10	0.079	2.00	0.00	0.000	0.000	100.00
12	0.066	1.68	0.00	0.000	0.000	100.000
14	0.056	1.41	0.16	1.825	1.825	98.175
16	0.047	1.19	0.22	2.434	4.259	95.741
18	0.039	1.00	2.74	30.447	34.706	65.294
20	0.033	0.84	2.30	25.579	60.285	39.715
25	0.028	0.71	1.93	21.483	81.768	18.232
30	0.023	0.59	1.61	17.928	99.696	0.304
35	0.020	0.50	0.03	0.304	100.000	0.000
40	0.017	0.42	0.00	0.000	100.000	0.000
50	0.012	0.30	0.00	0.000	100.000	0.00
70	0.008	0.21	0.00	0.000	100.000	0.00
100	0.006	0.15	0.00	0.000	100.000	0.00
140	0.004	0.10	0.00	0.000	100.000	0.00
200	0.003	0.07	0.000	0.000	100.000	0.00
FONDO			0.000	0.000	100.00	0.00
			9.000	100		

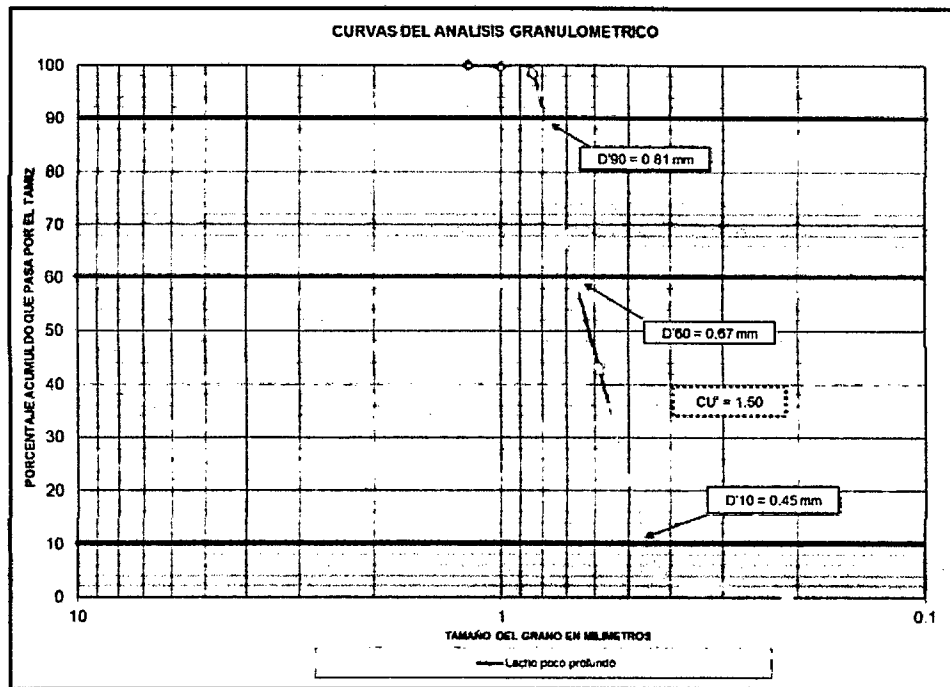
Luego fue lavada con agua potable a poca presión para no quebrar los granos que la componen.

#### a.2) Configuración del lecho de arena en filtro de lecho reducido

La configuración de la arena seleccionada cumple con estas características:

- Tamaño efectivo: 0.35 mm a 0.60 mm; recomendable 0.45 mm
- Coeficiente de uniformidad: 1.20 a 1.60; recomendable 1.50
- Profundidad del Filtro: 0.25 m a 0.30 m; recomendable 0.28 cm

La curva granulométrica que cumple estas condiciones es la que se muestra en la Figura 21



**Figura 21: Curva Granulométrica de la arena para el filtro reducido**

Según la curva granulométrica de la arena se seleccionó las mallas número: 25, 30, 35 y 40 (Mallas Estándar para Normas Americanas e inglesas). Las cantidades que se preparó de cada una de ellas fueron como se presentan la Tabla 12

**Tabla 12: Material retenido en mallas de tamizado – Filtro reducido**

Malla N°	Abertura (pulg)	Abertura (mm)	Peso	%Peso Retenido	%Acumulado	
					Retenido	Pasa
8	0.094	2.38	0.000	0.000	0.000	100.00
10	0.079	2.00	0.000	0.000	0.000	100.00
12	0.066	1.68	0.000	0.000	0.000	100.000
14	0.056	1.41	0.000	0.000	0.000	100.000
16	0.047	1.19	0.000	0.000	0.000	100.000
18	0.039	1.00	0.019	0.212	0.212	99.788
20	0.033	0.84	0.115	1.275	1.487	98.513
25	0.028	0.71	2.716	30.174	31.662	68.338
30	0.023	0.59	2.257	25.074	56.736	43.264
35	0.020	0.50	1.912	21.249	77.986	22.014
40	0.017	0.42	1.606	17.850	95.835	4.165
50	0.012	0.30	0.191	2.125	97.960	2.04
70	0.008	0.21	0.184	2.040	100.000	0.00
100	0.006	0.15	0.000	0.000	100.000	0.00
140	0.004	0.10	0.000	0.000	100.000	0.00
200	0.003	0.07	0.000	0.000	100.000	0.00
FONDO			0.000	0.000	100.00	0.00
			9.000	100		

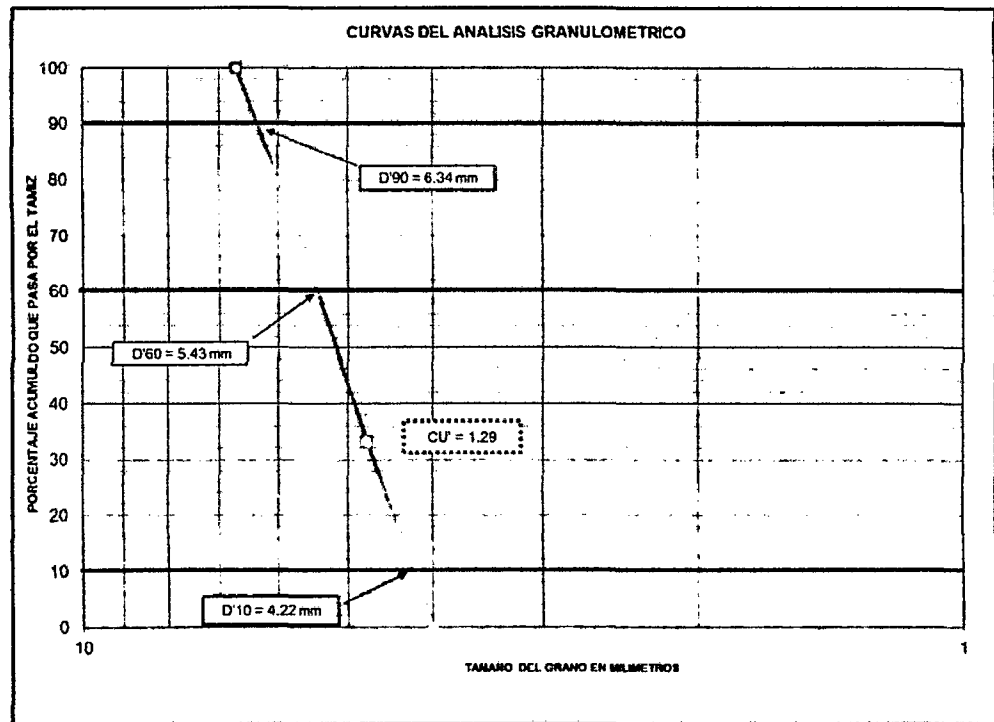
Luego fue lavada con agua potable a poca presión para no quebrar los granos que la componen.

#### b) Grava

La grava fue seleccionada de una cantera de piedra chancada para la construcción. Se procedió a conformar el soporte de grava con material obtenido del cernido con las malla 3, 4 y 5 en porciones iguales. El tamizado se realizó en el laboratorio de ensayos de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. Luego fue lavada con agua potable a presión.

- Tamaño efectivo: 4.22 mm
- Coeficiente de uniformidad: 1.29 mm
- Profundidad: 0.30 m

La curva granulométrica que cumple estas condiciones es la que se muestra en la Figura 22



**Figura 22: Curva de la grava para el filtro de lecho reducido**

Según la curva granulométrica de la grava, se seleccionó las mallas número: 3, 4, 5 (Mallas Estándar para Normas Americanas e inglesas) y se preparó cantidades iguales obteniendo en total un peso de 500 g como se presentan la Tabla 13.

Tabla 13: Material retenido en mallas de tamizado – Grava

Malla N°	Abertura (pulg)	Abertura (mm)	Peso	%Peso Retenido	%Acumulado	
					Retenido	Pasa
0.265	0.264	6.70	0.000	0.000	0.000	100.00
3 1/2	0.220	5.60	1.000	33.333	33.333	66.67
4	0.187	4.76	1.000	33.333	66.667	33.33
5	0.157	4.00	1.000	33.333	100.000	0.00
6	0.132	3.35	0.000	0.000	100.000	0.00
8	0.094	2.38	0.000	0.000	100.000	0.00
10	0.079	2.00	0.000	0.000	100.000	0.00
12	0.066	1.68	0.000	0.000	100.000	0.00
14	0.056	1.41	0.000	0.000	100.000	0.00
16	0.047	1.19	0.000	0.000	100.000	0.00
18	0.039	1.00	0.000	0.000	100.000	0.00
20	0.033	0.84	0.000	0.000	100.000	0.00
25	0.028	0.71	0.000	0.000	100.000	0.00
30	0.023	0.59	0.000	0.000	100.000	0.00
FONDO			0.000	0.000	100.000	0.00
			3.000	100		

## V.16. CONDICIONES HIDRÁULICAS

### V.8.1. TIEMPO DE RETENCIÓN DE LOS FILTRO

El tiempo de retención hidráulico en un principio es el mismo en cada uno de los filtros, y varía en forma decreciente según va aumentando el tiempo de operación o desde que se efectuó el último lavado del filtro.

En tal sentido la determinación teórica del tiempo de retención, se realiza partiendo de la premisa de que el filtro se encuentra limpio y la porosidad del medio es la adecuada para el paso del agua a tratar.

El filtro tiene una tasa de  $121.22 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  dicho valor se tomó teniendo en cuenta ensayos realizados según la bibliografía consultada.

El proceso de cálculo para la determinación del tiempo de retención fue el siguiente:

1. Se calibro el equipo de manera constante a fin de obtener un caudal (Q) de 200 ml/min o 0.0002 m<sup>3</sup>/min en el efluente de cada filtro.

$$Q = 200 \frac{ml}{min} = 0.0002 \text{ m}^3/min$$

2. Se procede a determinar el área (As) de cada módulo de filtro

$$As = \frac{(0.055)^2 \times \pi}{4} = 0.002376 \text{ m}^2$$

3. Luego se calculó el volumen útil de cada filtro, como sabemos esta varía dependiendo a la configuración respectiva al tipo de lecho filtrante, el filtro de lecho convencional posee 60 cm de altura de lecho y el filtro de lecho reducido posee 30 cm de altura de lecho. Se incluye el volumen del agua sobre la superficie del lecho y el volumen útil correspondiente a los 25 cm del soporte de grava.

- $V_{red} = As \times H_{red}$
- $V_{conv} = As \times H_{conv}$
- $V_{grava} = A_{grav} \times H_{grava}$
- $V_{agua} = As \times H_{agua}$

Descripción	Sección Filtro (m <sup>2</sup> )	Prof. (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Volumen (litros)
Vred =	0.00238	x 0.30	= 0.0007	0.713
Vconv =	0.00238	x 0.60	= 0.0014	1.425
V grava =	0.00238	x 0.25	= 0.0006	0.594
V agua conv =	0.00238	x 0.55	= 0.0013	1.307
V agua red =	0.00238	x 0.85	= 0.0020	2.019

Dónde:

- **Vconv:** Volumen Total de ocupación de arena de la sección del filtro de Lecho Convencional.

- **Vred:** Volumen Total de ocupación de arena de la sección del filtro de Lecho Reducido.
- **Vgrav:** Volumen Total de ocupación de grava, la cual no cambia al variar el tipo de lecho filtrante.
- **As:** Área total de la sección del filtro
- **Hred:** Altura de arena del filtro de lecho reducido
- **Hconv:** Altura de arena del filtro de lecho convencional
- **Hgrav:** Altura de arena del filtro de lecho convencional

4. Finalmente se divide el volumen de cada filtro entre el caudal y se multiplica por la porosidad correspondiente a cada configuración del lecho utilizado.

$$TRH_{red} = \frac{V_{red}}{Q} \times \rho_{red} \quad ; \quad TRH_{conv} = \frac{V_{conv}}{Q} \times \rho_{conv} \quad ; \quad TRH_{grava} = \frac{V_{grava}}{Q} \times \rho_{grava}$$

$$TRH_{red} = \frac{0.7127 (l)}{0.2 (l/min)} \times 55\% + \frac{0.594 (l)}{0.2 (l/min)} \times 35\% + \frac{2.0195 (l)}{0.2 (l/min)} = 13.097 \text{ min}$$

$$TRH_{conv} = \frac{1.4255 (l)}{0.2 (l/min)} \times 55\% + \frac{0.594 (l)}{0.2 (l/min)} \times 35\% + \frac{1.3067 (l)}{0.2 (l/min)} = 11.065 \text{ min}$$

Dónde:

- **Q:** Caudal
- **TRHred:** Tiempo de retención hidráulica teórica de la sección del filtro de lecho reducido que ocupa la arena.
- **TRHconv:** Tiempo de retención hidráulica teórica de la sección del filtro de lecho convencional que ocupa la arena.
- **TRHgrav:** Tiempo de retención hidráulica teórica de la sección del filtro que ocupa la grava, siendo indistinto el flujo del filtro.



- **$p_{red}$** : Porosidad de la sección del filtro de lecho reducido que ocupa la arena.
- **$p_{conv}$** : Porosidad de la sección del filtro de lecho reducido que ocupa la arena.
- **$p_{grav}$** : Porosidad de la sección del filtro de la sección del filtro que ocupa la grava, siendo indistinto el flujo del filtro.

Teniendo en cuenta que el tiempo de retención hidráulica puede variar según las condiciones hidráulicas del filtro se procedió a realizar una prueba de trazadores la cual consistió en preparar una solución salina de con la cual fue colocado en *nuestra cámara de regulación para luego hacerla atravesar ambos filtros, dando como resultado un tiempo de retención de 12.40 minutos para los filtros de lecho convencional y de 11.50 minutos para los filtros de lecho reducido*

#### **V.8.2. CAUDAL**

Para el control y regulación del caudal se utilizó una cámara reguladora que permitía *mantener un nivel de agua fijo, de tal manera que se obtenga un caudal constante.*

Asimismo se emplearon pinzas Hoffman, para la calibración de caudal a utilizar se ajustó a un valor de 100 ml por 30 segundos o su equivalente de 200 ml/min.

Sin embargo, al utilizarlas en el filtro funcionando con desagüe, se vio la necesidad de calibrar el equipo con mayor frecuencia llegando a tres (03) veces al día, debido a que los sólidos provenientes del efluente se acumulaban en las paredes de las tuberías obstruyéndolas parcialmente.

## V.17. MÉTODOS ANALÍTICOS

### V.9.1. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

#### V.9.1.1. TEMPERATURA

Para la medición de la temperatura, se tomaron muestras del afluente y los efluentes de los filtros y fueron analizadas in situ con un medidor de PH/Temperatura eléctrica de electrodo, marca Corning PH/Ion meter 450 que pertenece al laboratorio de CITRAR-FIA-UNI, de la facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería.

#### V.9.1.2. PH

De igual manera para la medición del PH, se tomaron muestras del afluente y los efluentes de los filtros y se analizaron in situ con un medidor de PH/Temperatura eléctrica de electrodo, marca Corning PH/Ion meter 450. Este equipo durante la primera carrera de filtración se encontraba fuera de servicio por lo que no se pudieron realizar los análisis.

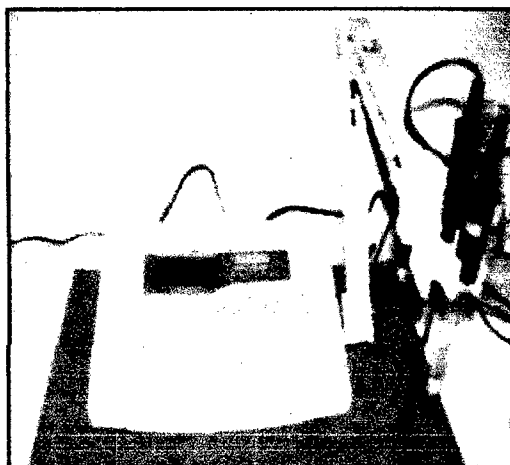


Figura 23: Medidor de PH/Temperatura eléctrica de electrodo

### V.9.1.3. TURBIEDAD

La medición de la turbiedad es de suma importancia para el control y operación de los filtros, así como para la determinación del inicio y fin del ciclo de lavado. En tal sentido se procedió a medir in situ al ingreso y salida de cada filtro utilizando un Colorímetro, marca HACH DR/890.



Figura 24: Colorímetro, marca HACH DR/890

### V.9.1.4. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Para la determinación de los Sólidos Suspendidos, fue realizada en el Laboratorio de Investigación del Agua, de la facultad de Ingeniería Ambiental; para ello se requirió de los siguientes materiales:

- Filtros de fibra de vidrio: Whatman 934 AH o Gelman A/E o Milipore AP 40.
- Preferentemente de 4,7 cm de diámetro.
- Equipo de filtración por vacío: embudo de membrana filtrante, preferentemente de 4,7 cm de diámetro, frasco de succión de suficiente volumen para la muestra, trampa de agua, bomba de vacío.

- Estufa para operar a 103-105 °C.
- Mufla para operar a 550 ± 50 °C.
- Desecador conteniendo un desecante con indicador coloreado de humedad.
- Balanza analítica de precisión 0.1 mg.
- Probetas 100ml

El procedimiento a emplear:

- Colocar el filtro en el crisol de porcelana poroso en la base. Aplicar vacío y enjuagar con tres porciones de 20 mL de agua destilada. Continuar la succión hasta eliminar totalmente el agua.
- Secar en estufa 103-105 °C por 1 hora en un soporte de porcelana o similar. Si se va a determinar volátiles muflar por 15 min a 550 °C, enfriar en desecador y pesar.
- Una vez que se obtuvo el peso constante del filtro, pesarlo inmediatamente antes de usarlo.
- Colocar el filtro en el crisol de porcelana poroso, mojar el filtro con una pequeña cantidad de agua destilada.
- Tomar un volumen de muestra homogeneizada que de un residuo seco entre 2.5 y 200 mg. Verter el volumen medido en el embudo de filtración. Comenzar la succión. Lavar 3 veces sucesivas con 10 mL de agua destilada cada vez, permitiendo un completo drenaje en los lavados. Continuar la succión por 3 minutos hasta que la filtración sea completa.
- Remover el filtro y colocarlo sobre un soporte de porcelana. Secar por 1 hora a 103-105 °C en estufa, enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y pesar.
- Repetir el ciclo de secado, enfriado, y pesado hasta peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor que el 4% del peso previo o 0.5 mg.
- Colocar el filtro anterior en la mufla a 550 ± 50 °C durante 1 hora. Enfriar en desecador y pesar. Repetir la secuencia hasta obtener peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor que el 4% del peso previo o 0.5 mg.

$$SST, mg/L = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

$$SSF, mg/L = \frac{(P_3 - P_1) \times 1000}{V}$$

$$SSV, mg/L = SST - SSF$$

Donde:

SST = sólidos suspendidos totales en mg/L.

SSF = sólidos suspendidos fijos en mg/L.

SSV = sólidos suspendidos volátiles en mg/L.

P1 = peso del filtro preparado en mg.

P2 = peso del filtro más el residuo seco a 103-105 °C en mg.

P3 = peso del filtro más el residuo calcinado a 550 °C en mg.

V = volumen de muestra tomado en mL.

#### V.9.1.5. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO<sub>5</sub>)

La determinación de la "Demanda Bioquímica de Oxígeno", fue realizada en el **Laboratorio de Investigación del Agua**, de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, de acuerdo con el método Winkler: Prueba de Requerimiento de Oxígeno Bioquímico de 5 días.

### V.9.2. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

#### V.9.2.1 COLIFORMES TERMOTOLERANTES

##### (1) APLICACIÓN

Esta normativa técnica se utiliza para la determinación de Coliformes Termotolerantes en aguas naturales superficiales o subterráneas, aguas recreacionales y aguas residuales filtrando un volumen determinado de la muestra, y obteniendo resultados en 24 horas mediante el método de conteo de colonias.

##### (2) RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1 El grupo de bacterias coliformes Termotolerantes para la técnica de filtración por membrana se define como todos los bacilos gram negativos, aerobios y algunos anaeróbicos facultativos, no formadores de endosporas, que cuando se incuban en medio M-FC por  $24 \pm 2$  horas a  $44.5 \pm 0.2$  °C desarrollan colonias color azul.
- 2.2 El principio de esta técnica consiste en la filtración de un volumen conocido de muestra a través de una membrana de nitrato de celulosa y su incubación en un medio de cultivo selectivo a 44.5 °C por 24 hs. Este medio selectivo y la temperatura de incubación disminuyen el desarrollo de bacterias no coliformes que afectarían negativamente el crecimiento de los coliformes Termotolerantes.

#### (3) PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

El análisis y el recuento deben ser realizados utilizando túnica y guantes descartables a fin de evitar el riesgo de contraer enfermedades.

#### (4) INTERFERENCIAS

- 4.1 Aguas con gran turbiedad y baja densidad de coliformes Termotolerantes; presencia de tóxicos orgánicos como fenoles; existencia de una carga de bacterias no coliformes muy grande.

#### (5) MUESTREO Y PRESERVACIÓN

- 5.1 La muestra debe ser colectada en frascos de vidrio, o de polipropileno auto lavable, de boca ancha, y estériles. El frasco debe llenarse, dejando una cámara de aire para poder homogeneizar la muestra antes de procesarla.
- 5.2 El tiempo entre la toma de la muestra y su análisis debe ser el menor posible. Se aconseja procesar la muestra el mismo día de obtenida. De no ser esto posible por razones prácticas, la muestra debe ser almacenada en oscuridad y a una temperatura menor a 10 °C. Para aguas naturales el período máximo de conservación de la muestra es de 24 hs.

#### (6) INSTRUMENTAL

- 6.1 Equipo de filtración: embudo y portafiltro poroso que se puedan trabar entre sí y sean autoclavables; bomba de vacío; kitasato de 1 litro o mayor; trampa de agua entre el kitasato y la bomba de vacío.

- 6.2 Balanzas de precisión
- 6.3 Incubadora a  $44.5 \pm 0.2$  °C con termómetro.
- 6.4 Equipo de recuento: microscopio binocular con un aumento de 10 a 15X y una fuente de luz fluorescente posicionada formando un ángulo de 60 80 °C con la placa (de preferencia).
- 6.5 Autoclave
- 6.6 Mecheros
- 6.7 Placas de Petri estériles, de plástico descartables (o de vidrio) de 47 mm de diámetro aproximadamente u otro tamaño adecuado.
- 6.8 Filtros Whatman cuadrículados estériles de  $0.45 \mu\text{m} \pm 0.02 \mu\text{m}$  de diámetro de poro, libre de glicerina y sin áreas hidrofóbicas, de 47 mm de diámetro.
- 6.9 Pinzas de acero inoxidable para filtros, sin extremidades rugosas.
- 6.10 Frascos de vidrio marcados a un volumen de 100 ml, estériles para diluciones con tapa de rosca.
- 6.11 Pipetas automáticas de 10 ml y de rango variable, y peras de succión para cada una de las pipetas automáticas.
- 6.12 Matraz o Vaso de Precipitado de vidrio estéril para preparación del medio de cultivo.

#### (7) INSUMOS

- 7.1 Peptona
- 7.2 Etanol
- 7.3 Medio de cultivo M-FC Agar
- 7.4 Agua destilada

#### (8) PRECAUCIONES PARA LA OPERACIÓN

- 8.1 El matraz o vaso de precipitado de vidrio que se emplee en la realización del medio de cultivo, así como en el procedimiento analítico debe estar lavado, enjuagado con agua destilada y esterilizado.
- 8.2 Las placas de petri de vidrio deben estar estériles. Pueden ser reutilizadas después de lavadas y autoclavadas para una nueva prueba. Guardar las

placas en la oscuridad para evitar la fotorreparación por no más de 2 semanas después de esterilizadas.

- 8.3 los embudos de filtración, pinzas y demás instrumentos para la *manipulación y filtración de la muestras deben ser esterilizados previos a su utilización.*
- 8.4 Es imprescindible al iniciar el análisis limpiar la mesada de trabajo con alcohol y realizar el análisis entre dos mecheros para mantener lo mejor posible las condiciones de esterilidad.

#### (9) OPERACIONES PREVIAS

- 9.1 Preparación del agua peptonada al 0,1%
  - Adicionar 1 g de peptona a 1000 ml de agua destilada, y disolver agitando.
  - Asegurar la tapa del recipiente y esterilizar en autoclave por 15 minutos a 121 °C.
  - Almacenar en refrigeradora hasta un máximo de 30 días y rotular el recipiente indicando, nombre del reactivo, fecha de elaboración, y técnico responsable.
- 9.2 Preparación del medio de cultivo
  - El medio de cultivo debe prepararse según instrucciones del fabricante en el envase, en material de vidrio estéril, sin necesidad de ser autoclavado. Disolver y fundir en baño María o según lo indicado en el envase. Hervir 1 minuto.
  - Puede almacenarse a 1- 4,4 °C por un período máximo de 14 días, ya sea en Erlenmeyer o repartido en las placas.
- 9.3 Preparación de las Placas de Petri
  - Previo a la distribución del medio de cultivo en las placas de Petri estériles, termostatizarlo a 45 °C. Colocar aproximadamente 3 mL de medio por cada placa de 47 mm de diámetro, bajo condiciones de esterilidad.
  - Dejar solidificar sobre la mesada de trabajo.



- Las placas de Petri antes de usarse deben rotularse en el fondo de las mismas con lápiz graso, indicando número de muestra y dilución efectuada.
- Preparación de frascos de vidrio para diluciones
- *Estos frascos se preparan en caso de que sea necesario hacer diluciones de la muestra antes de filtrar.*
- Colocar  $90 \pm 0.2$  mL de agua peptonada en los frascos de vidrio. Tapar con la tapa de rosca. Colocar los tubos en una gradilla o cesto y cubrir con papel aluminio o papel de embalaje.
- Autoclavar por 15 minutos a  $121$  °C.

#### (10) ANÁLISIS DE LA MUESTRA

- 10.1 El volumen de muestra a ser filtrado se determina de acuerdo a la densidad bacteriana esperada y el origen de la muestra. En caso de ser necesario se preparan diluciones en cascada en los tubos de dilución, adicionando 10 ml de muestra o de la dilución previa, a los 90 mL de agua peptonada. Se recomienda filtrar 2 volúmenes diferentes de muestra en múltiplo de 10. Si no se dispone de valores históricos de la muestra es conveniente filtrar tres volúmenes diferentes.
- 10.2 Conectar el equipo de filtración con embudo estéril. Colocar un filtro estéril con la superficie cuadrículada hacia arriba sobre el portafiltros poroso del embudo utilizando pinzas humedecidas en alcohol, flambeadas y a temperatura ambiente.
- 10.3 Filtrar un volumen aproximado a 10 mL de agua peptonada estéril para humedecer el filtro.
- 10.4 Homogeneizar la muestra agitándola o usando el vortex (si se hicieron diluciones en tubos), y filtrar el volumen seleccionado.
- 10.5 Luego enjuagar el embudo filtrando aproximadamente 10 mL de agua peptonada estéril. Retirar el filtro con pinzas estériles y colocarlo en la placa de Petri sobre el medio, con la parte cuadrículada hacia arriba, evitando la formación de burbujas de aire, pasar suavemente la pinza por el borde del filtro para sacar el aire. No tocar con la pinza el área de filtración del filtro ya

que se arrastran células bacterianas. Asegurarse de que todo el filtro quede en contacto con el medio de cultivo. Cerrar la placa y colocarla en la mesada para luego ser incubada.

- 10.6 Luego de filtrar cada muestra descontaminar los embudos humedeciéndolos con alcohol y flambeándolos. Una vez que el alcohol se consume hacer pasar suficiente agua peptonada estéril para lavar el sistema y enfriarlo más rápidamente.
- 10.7 Si el volumen a filtrar es poco (1 mL) colocar en el embudo aproximadamente 10 mL de agua peptonada estéril y luego la muestra, para lograr una mejor distribución de la misma sobre la membrana al ser filtrada.
- 10.8 Siempre comenzar la serie de filtración por la dilución mayor para no contaminar el embudo.
- 10.9 Incubar las placas de Petri en posición invertida, en la estufa de  $44.5 \pm 0.2$  °C durante  $24 \pm 2$  horas.

#### Recuento

- 10.10 Las colonias típicas de coliformes termotolerantes son de distintas tonalidades de azul. Las colonias grises o crema son consideradas como no coliformes, aunque existen colonias de Coliformes Termotolerantes atípicas que se presentan de color crema por lo que se recomienda realiza la verificación a posteriori.
- 10.11 El recuento de colonias se realiza en las placas que contengan entre 20 y 60 colonias de coliformes típicas y no más de 200 colonias de cualquier tipo.

#### (11) ANÁLISIS DE DATOS

11.1 La ecuación que se emplea es la siguiente:

$$C. \text{ Termotolerantes (ufc/100ml)} = \frac{\text{colonias de coliformes contadas} \times 100}{\text{mL de muestra filtrados}}$$

Ufc corresponde a Unidades Formadoras de Colonias.

- 11.2 Si las colonias crecen uniéndose sobre la membrana se informa como crecimiento confluyente con o sin presencia de coliformes y se sugiere la realización de otro muestreo del mismo punto.
- 11.3 Si el número de colonias típicas de coliformes termotolerantes fuera entre 20 y 60 pero la placa posee más de 200 colonias de cualquier tipo, se informa como mayor al recuento realizado y se aconseja la realización de otro muestreo en ese punto.
- 11.4 Si el número de colonias típicas es mayor a 60, el recuento se realiza siguiendo alguno de los procedimientos que se detallan a continuación y se informa como valor estimado.
- *Dividir la placa en 4 cuadrantes, contar en uno, multiplicar por cuatro.*
  - *Contar 10 cuadrados del filtro al azar, promediar, multiplicar por el número total de cuadrados del filtro.*
- 11.5 Si el recuento es cero, hay dos casos a considerar:
- *Cuando el volumen filtrado es de 100 mL, se informa <1 ufc/100 mL.*
  - *Cuando el volumen filtrado es menor 100 mL, considerar 1 ufc en el mayor volumen filtrado, calcular la densidad de coliformes termotolerantes, y expresar los resultados como < valor obtenido.*
- 11.6 Si el número de colonia a contar es menor a 20 se suman los recuentos de todas las placas, se divide entre la suma de los volumen filtrados, y se multiplica por 100. El resultado se expresa como ufc/100ml. Por ejemplo si se examinan 50, 25 y 10 ml, y el conteo en dichas placas es de 15, 6 y <1 respectivamente, el resultado es el siguiente:
- $$25 \text{ coliformes/100ml} = \frac{(15+6+0) * 100}{(50+25+10)}$$
- 11.7 Dejar registro en las rutas de análisis, del intervalo de confianza al 95% que se espera para dicho recuento de coliformes termotolerantes (ufc/100ml).

Para recuentos menores a 20 ufc/100ml, utilizar la siguiente tabla:

Límites de confianza para la determinación de coliformes por Membrana Filtrante, utilizando resultados expresados en ufc/100 ml de muestra.

**Tabla 14: Límites de confianza para conteo de colonias**

N° de colonias de coliformes contadas	Límites de Confianza al 95%	
	Límite inferior	Límite superior
0	0	3.7
1	0.1	5.6
2	0.2	7.2
3	0.6	8.8
4	1	10.2
5	1.6	11.7
6	2.2	13.1
7	2.8	14.4
8	3.4	15.8
9	4	17.1
10	4.7	18.4
11	5.4	19.7
12	6.2	21
13	6.9	22.3
14	7.7	23.5
15	8.4	24.8
16	9.2	26
17	9.9	27.2
18	10.7	28.4
19	11.5	29.6
20	12.2	30.8

### 11.8 Interpretación de resultados:

Al efectuarse la evaluación de datos, se considera que un resultado ha excedido un valor guía o estándar de calidad, cuando el límite inferior para el intervalo de confianza de la incertidumbre de la medición es mayor que tal valor.

## (12) CONTROL DE CALIDAD ANALÍTICO

### 12.1 Calidad del proceso analítico:

Control de esterilidad de los materiales empleados en el análisis, filtrando al inicio y al final del procesamiento de muestras, 100 mL de agua estéril e incubando la placa con el filtro bajo las mismas condiciones que las muestras. Si los controles indican contaminación, volver a analizar las muestras afectadas.

Control de las condiciones de incubación cada vez que se analizan muestras (control de temperatura de la incubadora)

Control de medios de cultivo a través del empleo de cultivos puros de colección positivos y negativos, cada vez que se analizan muestras.

Verificación mensual del 5% de las muestras realizadas en el Sector, aislando de cada muestra ambiental 10 colonias siguiendo el procedimiento "Control de calidad analítico para verificar coliformes termotolerantes determinados por la técnica de filtración por membrana para lograr un mayor reconocimiento de colonias típicas y no típicas por parte del analista". Cuando corresponda, ajustar el conteo basado en el porcentaje de verificación y expresar el resultado como coliformes termotolerantes verificados. Si no es posible hacer las verificaciones en el momento, aislar las colonias en tripticasa soya agar (TSA) y guardarlas en la heladera a 1-4.4 °C hasta que se puedan procesar.

### 12.2 Control de la precisión:

Para el control de la precisión del método se debe establecer el Criterio de Precisión tal como se detalla en el Manual de Control de Calidad Analítico. Dicho criterio debe ser establecido para los diferentes tipos de aguas que

sean analizados por la técnica de membrana filtrante.

Al comienzo de nuevos programas de monitoreo hacer la mayor cantidad posible de muestras por duplicado para obtener un nuevo criterio de *precisión rápidamente*. Una vez que está establecido el criterio de precisión, analizar el 10% de las muestras que ingresan al Sector cada día por duplicado (siendo el mínimo de duplicados a realizar igual a 1), y calcular el logaritmo de cada par de duplicados. La diferencia entre ambos no debe superar el valor de precisión previamente establecido.

12.3 Reproducibilidad: Chequeo mensual de recuento entre analistas, aceptando como máximo una variación del 10%.

12.4 Repetibilidad: Chequeo mensual del recuento de un mismo analista a través de la duplicación de los conteos de una misma placa, aceptando como máximo una variación del 5%.

#### **V.9.2.2 HUEVOS DE HELMINTOS**

El conteo de huevos de helmintos se realizó siguiendo el siguiente protocolo analítico

- *Colectar un (1) litro de la muestra a evaluar en un recipiente limpio, seco y estéril. Dejar sedimentar por 24 horas.*
- *Transcurrido este tiempo extraer, sin agitar el recipiente, el 90% de la muestra dejando aproximadamente 100 ml (en el fondo del recipiente). Desechar la muestra extraída.*
- *A continuación, agitar suavemente y homogenizar la muestra que está contenida en el recipiente (100 ml), para luego repartirla equitativamente en 4 tubos Falcon en la cantidad de 25 ml cada uno.*
- *Seguidamente, colocar los 4 tubos Falcon en la centrífuga por un espacio de 15 minutos a una velocidad de 2, luego de los cuales extraer solo el sobrenadante de cada uno de los 4 tubos (en el momento de la extracción tratar en lo posible de no agitar los tubos para evitar que el sedimento pueda mezclarse con el sobrenadante).*

- Luego, añadir a cada tubo suero fisiológico (solución salina al 0,9%) hasta cubrir el último rastro de sedimento que se observa en la pared de los tubos.
- Cerrar fuertemente los tubos y empaquetarlos con cuidado para su traslado.

#### V.18. LABORES DE MANTENIMIENTO DE LOS FILTROS

Las labores de mantenimiento que se realizaron a la planta de filtros fueron las siguientes:

- Proteger con una cobertura plástica opaco que impida el ingreso de luz solar a las unidades de los filtros para evitar la formación de algas que interfieran en el proceso de tratamiento, y lograr resultados más objetivos.
- Reemplazo de las tuberías y válvulas obstruidas y/o en mal estado, a fin de lograr su correcto funcionamiento y obtener caudales más exactos.
- Tapar y proteger los depósitos de las unidades de bombeo, almacenamiento, regulación y los filtros de vectores, insectos y/u objetos extraños que podrían afectar el tratamiento durante su operación alterando los resultados que conllevarían a una interpretación equivocada.
- Lavar el tanque de almacenamiento cada 30 días.



**Figura 25: Recubrimiento de los filtro para evitar la formación de algas por ingreso de luz solar**

## V.19. LAVADO DE FILTROS DE ARENA

En nuestro caso el lavado se realizó cada vez que la calidad del efluente desmejore. La mayoría de los problemas del filtro se originan en un lavado deficiente incapaz de:

- a. Desprender la película que recubre los granos del lecho.
- b. Romper grietas o cavidades en donde se acumula el material que trae el agua.
- c. Transportar el material desde el interior del lecho hasta las canaletas de lavado.

Para el lavado de los filtros de arena es recomendable el aplicar flujo de agua en sentido ascendente debido a que logra la fluidificación del medio (Arboleda, 2000). Según la Tabla 15, la velocidad de lavado ser 0.6 a 1.2 m/min. La carga estática se obtuvo a partir del nivel de agua almacenada en cilindros elevados junto al tanque de almacenamiento, alcanzando una altura hasta el nivel máximo de agua de 4.00 metros.



**Tabla 15: Caudales Típicos de lavado a contracorriente para fluidificar diversos tipos de lechos filtrantes**

Lavado ascendente con agua		Agitación Auxiliar		Medio filtrante con que se usa este lavado
Tipo	Descripción	Tipo	Descripción	
De alta velocidad (0.60 a 1.20 m/min)	Se usa velocidad constante durante el lavado con fluidificación de todas las capas del medio filtrante y estratificación de partículas.	Sin agitación auxiliar.	Se usa lavado ascendente solo.	Arena fina sola arena y antracita.
		Con agua.	- Con chorros fijos. - Con chorros rotatorios.	Arena fina sola arena y antracita.
		Con aire.	Aire sin flujo ascendente primero y agua sola después.	Arena fina sola arena y antracita.
De "baja velocidad (0.25 a 0.45 m/min)	Velocidad constante durante el lavado sin fluidificación de partículas.	Con aire.	Aire primero separadamente del flujo ascendente que se inyecta después.	Arena gruesa sola.
	Velocidad inicial más baja durante la primera fase del lavado que durante la segunda sin fluidización en ambas.	Con aire.	Aire simultáneamente con el agua primero y luego agua sola a una rata mayor.	Arena gruesa sola.
De baja velocidad seguida de alta velocidad (0.25 a 0.30 + 0.60 a 1.0 m/min)	Velocidad baja durante la primera fase de lavado sin fluidificación y alta durante la segunda con fluidificación de partículas.	Con aire.	Aire simultáneamente con un flujo ascendente bajo primero y agua sola con alta velocidad después.	Arena gruesa sola.

\* Nota: por arena fina se entiende la de un T.E. = 0.45 a 0.55 mm y arena gruesa la de un T.E. = 0.8 a 1.2 mm.

**Fuente: Teoría y practica de la purificacion del agua, Jorge Arboleda (2000)**

Esta carga hidráulica y el caudal adecuado, permitirán lograr la expansión aproximada del lecho en un 25%. Asimismo permitirá la liberación de los sólidos retenidos durante la carrera de filtración, posteriormente, el volumen de agua del *retrolavado se almacena en un depósito para su análisis de los sólidos, así utilizarlo como indicador y determinar por comparación cuál de los filtros lograr mayor remoción de sólidos.*

El proceso de lavado tuvo una duración de 8 minutos en las tres primeras carreras de filtración en las cuales se utilizó la presión por la carga estática de los tanques de almacenamiento de agua de lavado y 15 minutos en las siguientes carreras de *filtración en las cuales se utilizó un tanque de agua para dar una presión de 2.30 a cada uno de los filtros.* Dichos tiempos se determinaron en la etapa de las pruebas hidráulicas con turbiedad superficial y se fijó en ese rango por ser el mínimo necesario para que el filtro de flujo ascendente quede bien lavado. Hay que considerar que el filtro de flujo descendente terminaba su lavado minutos antes, pero para tener una buena comparación entre los sentidos de los filtros, en todas las carreras de filtración realizadas se tomaron los mismos tiempos de lavado en ambos *filtros.*

El lavado fue tal que logro la fluidificación del medio de manera adecuada; sin embargo también se destruye la capa biológica formada en la superficie del medio. Por tal motivo, la siguiente carrera de lavado, deberá implicar un tiempo para la formación de la nueva capa biológica, posteriormente esta capa lograr una mejor adsorción de los sólidos y microorganismos presentes debido a su alta actividad *biológica.*

Luego, se procedió el lavado de los filtros por medio de la válvula de  $\frac{1}{2}$  pulgada ubicada en la parte inferior de cada unidad, denominada válvula de lavado (aunque ocasionalmente cumple la función de purga). El proceso se describe a continuación:

1. Se cierra las válvulas de operación normal, es decir de ingreso a los filtros ascendente y descendente.
2. Se conecta la manguera de lavado de diámetro  $\frac{3}{4}$ " desde el tanque de almacenamiento de agua de lavado hasta el filtro a lavar (uno a la vez).
3. Se apertura la válvula de  $\frac{1}{2}$  pulgada, permitiendo el ingreso a través del falso fondo y el medio filtrante desde la grava gruesa hasta la arena de grano más fino, mientras se inicia el cronometro para el control del tiempo.
4. Se verifica la expansión del lecho con una regla para lograr la fluidificación del medio, y en consecuencia, la correcta limpieza
5. Asimismo se efectúa un control del tiempo de lavado
6. El agua de lavado utilizada se conduce a un depósito de almacenamiento, del cual se tomara la muestra para realizar el análisis de los sólidos.
7. La muestra obtenida de 01 litro. es llevada al laboratorio para su análisis y posterior interpretación de los resultados.

El proceso de lavado se realizaba cuando la carrera de filtración ya había terminado, es decir, cuando el efluente de los filtros dejaba de tener la calidad deseada expresada en turbiedad y empezaba a decaer la remoción de la misma. Este parámetro por ser de fácil y rápida lectura, servía para decidir el momento propicio para realizar el lavado.

El lavado se realizaba a ambos filtros de manera independiente, hasta lograr su completa limpieza, teniendo cuidado de no perder material filtrante durante el lavado.

## CAPITULO VI: RESULTADOS

---

### VI.20 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

#### VI.1.1TEMPERATURA

La temperatura se midió al ingreso de los filtros y a la salida de cada uno de ellos, *también en cada uno de los monitoreos, por lo que se cuenta en algunos casos con varias mediciones por día, es por ello que se han tomado valores promedio para presentar los resultados en forma diaria.*

La temperatura se midió desde la segunda carrera de filtración el día 10 de Julio del 2012 el hasta la última carrera de filtración que fue la novena el día 06 de Diciembre del 2013. Normalmente se tomó dos a tres mediciones durante el día, *la primera a las 9.00 a.m. la segunda a las 12.00 pm y la tercera a las 4.00 pm aproximadamente o en la mañana y en la tarde cuando fueron dos mediciones diarias.* Los valores promedio de temperatura se muestran a continuación:

##### **VI.1.1.1 Resultados de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho convencional**

*En total en este tipo de filtro se realizaron 05 carreras de filtración, las primeras 04 carreras de filtración se realizaron en la estación de invierno y la última de estas carreras de filtración se realizó en la transición a la estación de primavera.*

Según la Tabla 16: Valores de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho convencional, Se aprecia que la temperatura en la estación de invierno obtuvo valores entre 17.4 °C y 23.5 °C y el rango

de las temperaturas promedios entre las carrera de filtración que se realizó en la estación de primavera estuvo entre 21.2 °C y 24.6 °C.

Además en la *Figura 26: Variación de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho convencional*, se aprecia que las temperaturas menores se dieron en la tercera carrera de filtración y las mayores en la quinta carrera.

**Tabla 16: Valores de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho convencional**

PARÁMETRO	TEMPERATURA DEL AFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACION (días)	16			49			20			23			23		
ESTACIÓN	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS (°C)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	17.4	20.3	23.5	17.7	18.8	20.3	19.7	21.5	23.5	21.2	23.1	24.6

- \*N.M.: No Medido

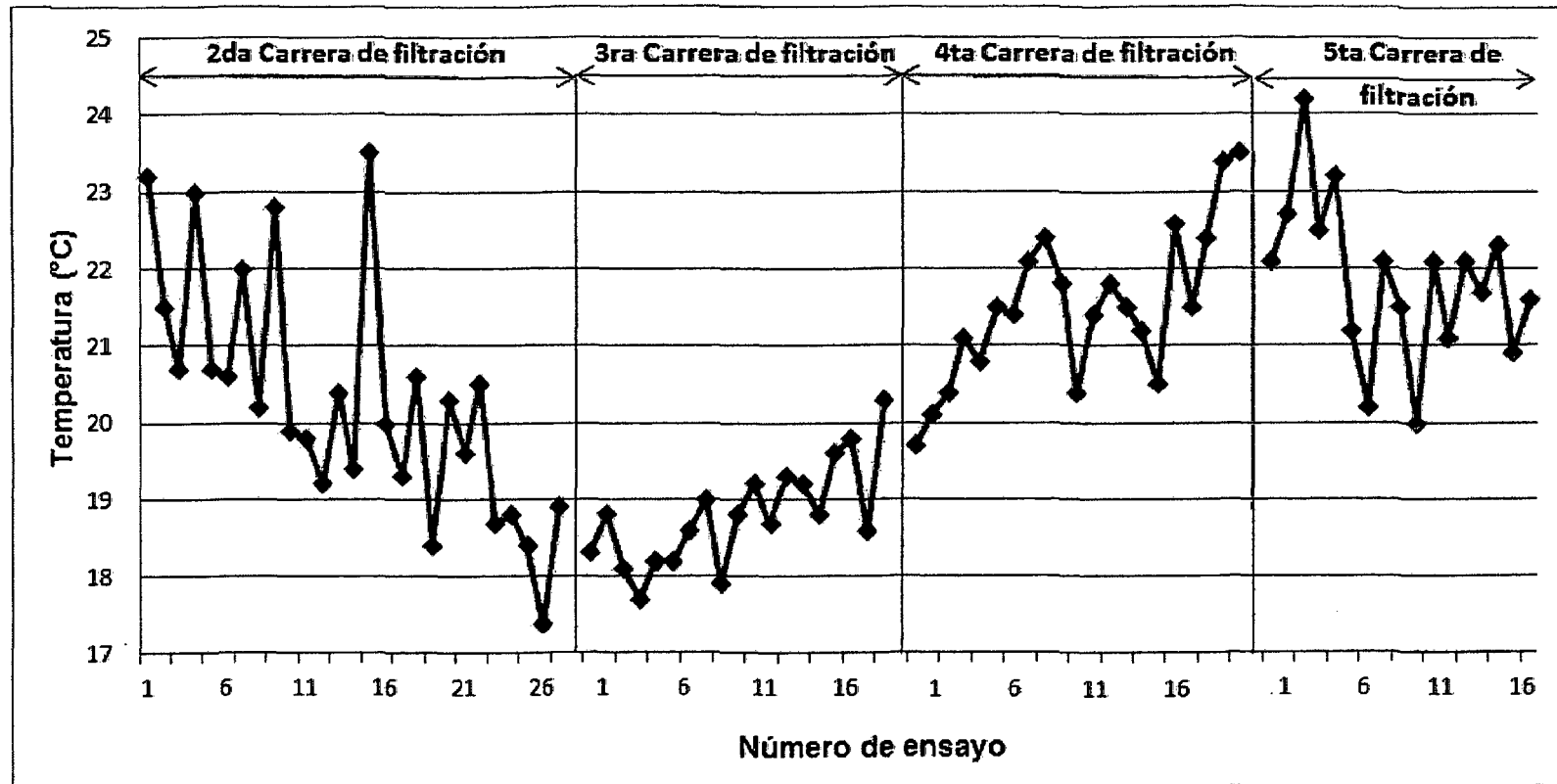


Figura 26: Variación de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho convencional

#### **VI.1.1.2 Resultados de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente.**

De la Tabla 17 se observa que a lo largo de todas las carreras de filtración la temperatura a la salida de los Filtros de arena no vario significativamente respecto de a la del afluente y una de las razones de ello es el poco tiempo de *retención hidráulica del filtro* de solo 12.40 minutos, lo cual junto al elevado calor específico del agua ocasiona que no haya una transferencia de calor significativa.

La temperatura varió desde un máximo de 24.5 ° C en la estación de primavera hasta un mínimo de 17.4 ° C en la estación de invierno para el filtro de flujo ascendente y desde un máximo de 24.6 ° C en la estación de primavera hasta un *mínimo de 17.1 ° C en la estación de invierno para el filtro de flujo descendente*, no encontrando una alguna relación entre el cambio de temperatura de los filtros y el tipo de flujo de los mismos.



**Tabla 17: Valores de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente**

PARAMETRO	TEMPERATURA DEL EFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACION (días)	16			49			20			23			23		
ESTACION	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (°C)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	17.4	20.2	23.6	17.5	18.7	20.4	20	21.6	23.7	21.7	23.2	24.5
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (°C)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	17.2	20.0	23.1	17.1	18.7	20.1	20.2	21.5	23.8	21.4	23.1	24.6

- \*N.M.: No Medido

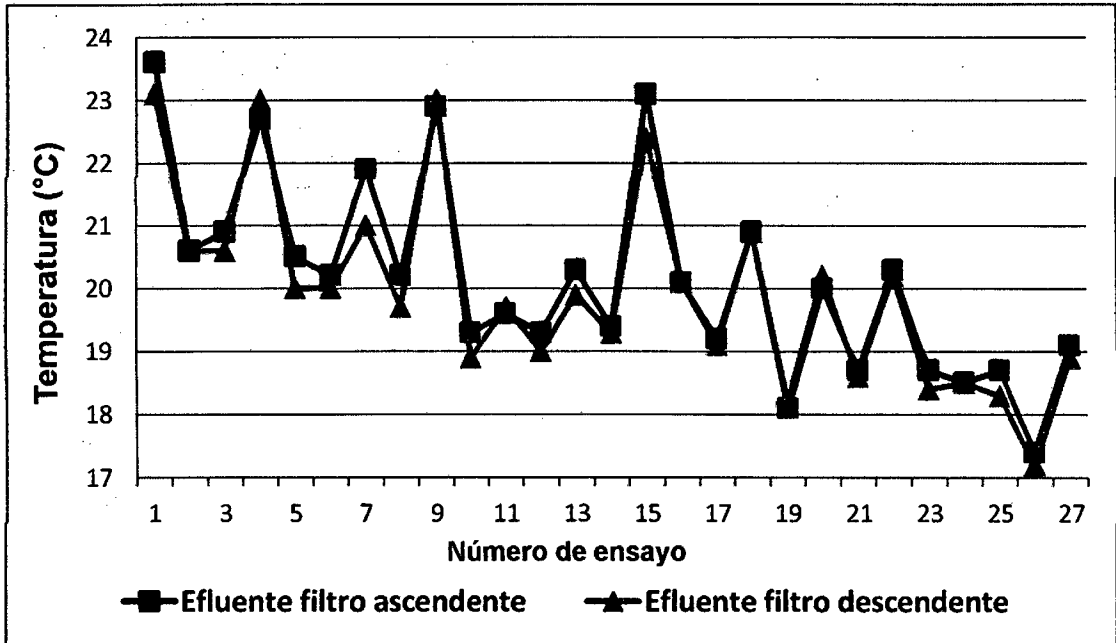


Figura 27: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de la segunda carrera de filtración

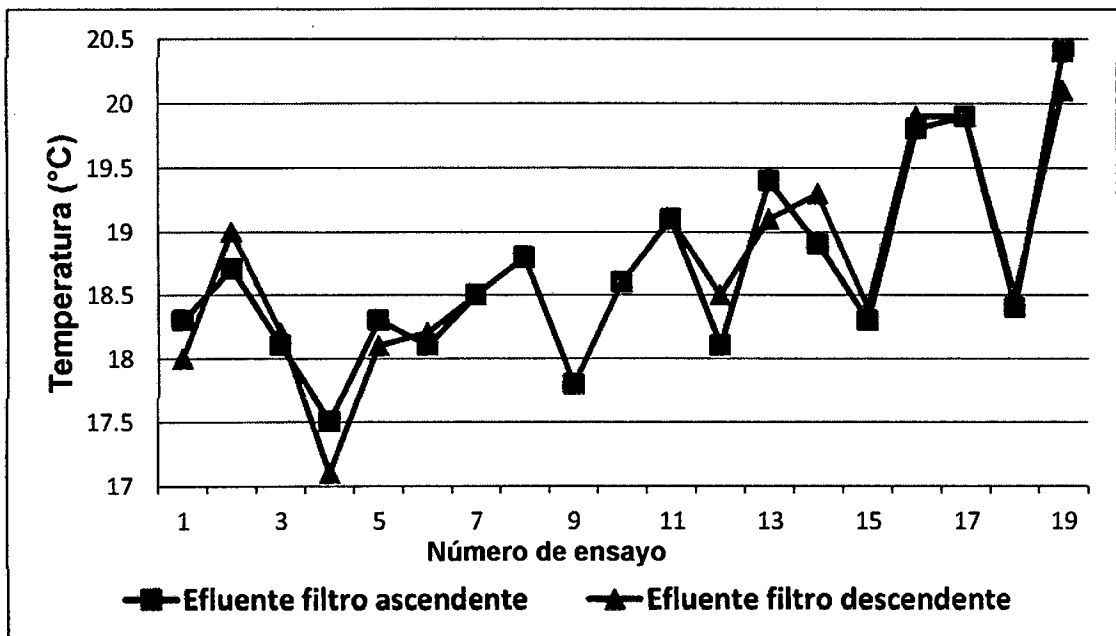


Figura 28: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de la tercera carrera de filtración

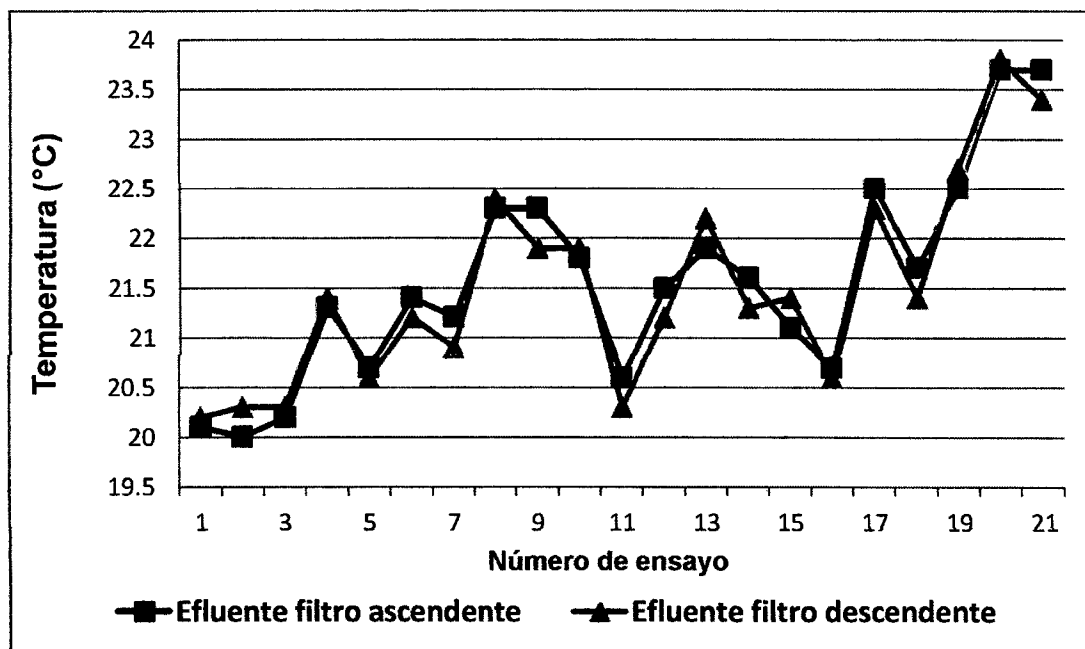


Figura 29: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de la cuarta carrera de filtración

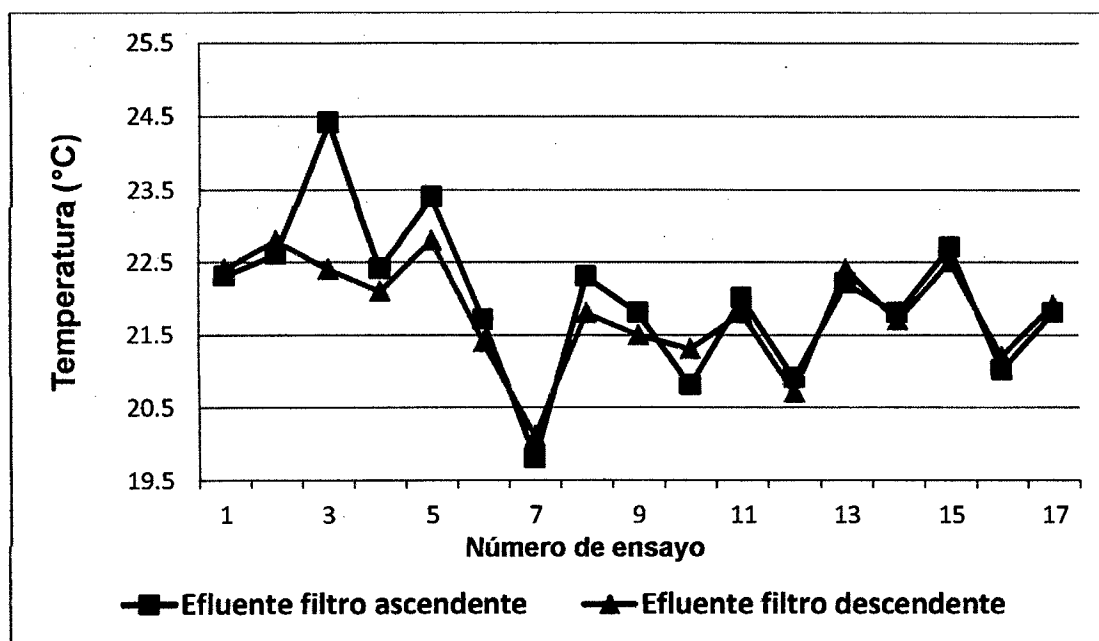


Figura 30: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho convencional de la quinta carrera de filtración

### **VI.1.1.3 Resultados de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho reducido**

La temperatura del afluente es afectada directamente por la estación en la que se encuentre, y debido a que las mediciones de las carreras de filtración del filtro de lecho reducido se realizaron en meses de primavera (transición entre invierno y verano), se registraron temperaturas ambiente muy variables, según ello es posible apreciar en la Tabla 18 que las temperaturas en el afluente oscilan entre un amplio rango considerando los pocos días en que se han realizado las mediciones.

En total en este tipo de filtro se realizaron 04 carreras de filtración, todas ellas en época de primavera.

Según la Tabla 18 Se aprecia que la temperatura en el efluente estuvo entre los valores de 20.7 °C y 23.9 °C y el rango de las temperaturas promedios entre las carreras de filtración.

Tabla 18: Valores de la caracterización de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho reducido

PARÁMETRO	TEMPERATURA DEL AFLUENTE											
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO											
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288		
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12			26/11/12 - 20/11/12			03/12/12 - 03/12/12			06/12/12 - 06/12/12		
DURACIÓN(días)	7			5			1			1		
ESTACIÓN	PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS (°C)	20.9	22.0	23.1	20.7	22.4	23.9	21.6	22.1	22.3	22.3	22.8	23.5

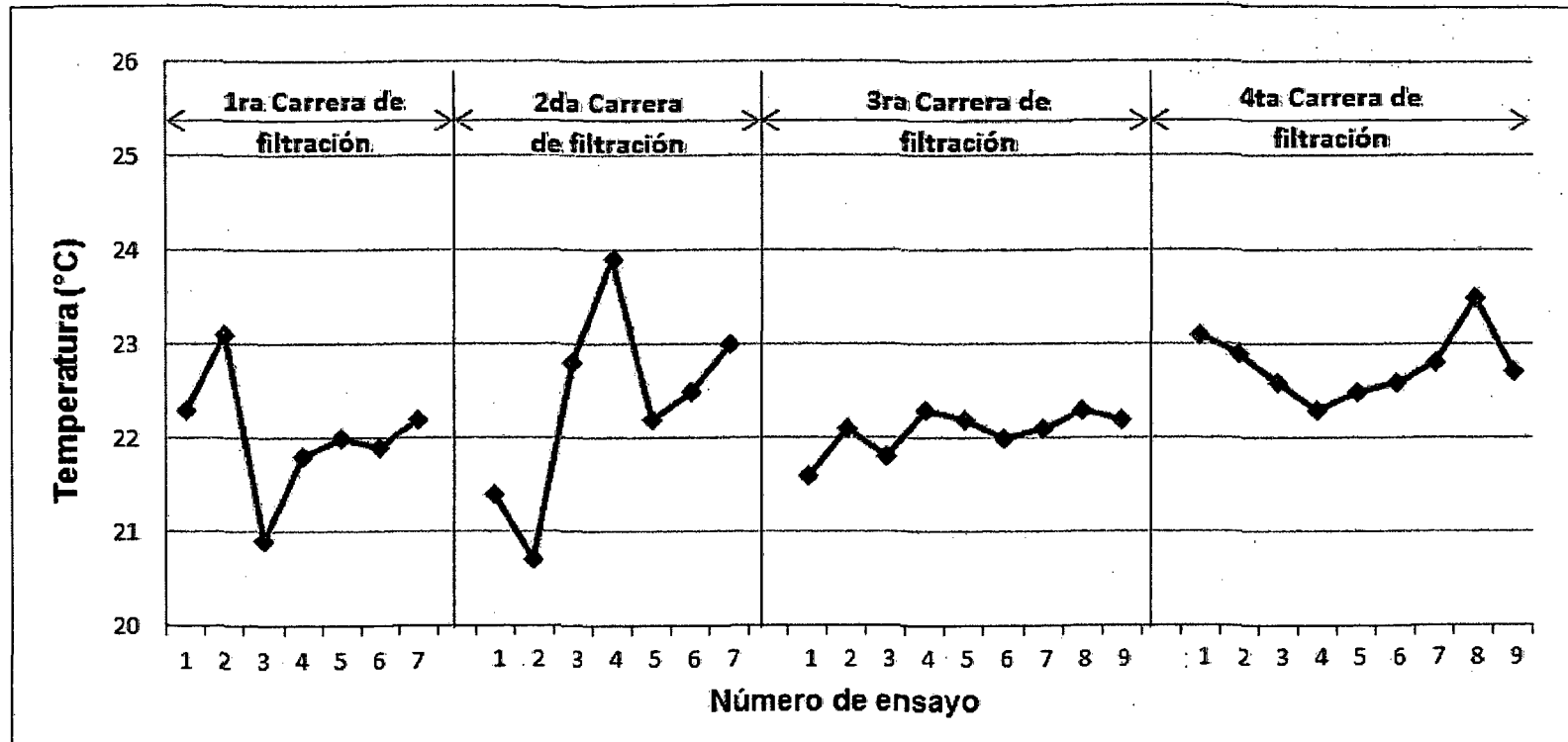


Figura 31: Valores de la temperatura en el afluente de los filtros de lecho reducido

#### **VI.1.1.4 Resultados de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.**

De la Tabla 19: Valores de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente y las figuras Figura 32: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la primera carrera de filtración., Figura 33: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la segunda carrera de filtración., Figura 34: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la tercera carrera de filtración. y Figura 35: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la cuarta carrera de filtración.; se observa que a lo largo de todas las carreras de filtración la temperatura a la salida de los Filtros de arena, no varió significativamente respecto al afluente y una de las razones de ello se debe poco tiempo de retención hidráulica del filtro de solo 11.50 minutos, y al elevado calor específico del agua ocasiona que no haya una transferencia de calor significativa.

Además se observó que la temperatura varió desde un máximo de 23.7 °C en la estación hasta un mínimo de 20.5 °C en la estación de invierno para el filtro de flujo ascendente y desde un máximo de 23.8 °C en la estación hasta un mínimo de 20.4 °C para el filtro de flujo descendente, no encontrando alguna relación entre el cambio de temperatura de los filtros y el tipo de flujo de los mismos.

**Tabla 19: Valores de la caracterización de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente**

PARAMETRO	TEMPERATURA DE LOS EFLUENTES											
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO											
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288		
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12			26/11/12 - 20/11/12			03/12/12 - 03/12/12			06/12/12 - 06/12/12		
DURACIÓN (días)	7			5			1			1		
ESTACIÓN	PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (°C)	20.7	21.9	22.9	20.5	22.36	23.7	21.2	22.07	22.4	22.2	22.73	23.3
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (°C)	21	22.01	22.8	20.4	22.36	23.8	21.1	22.02	22.5	22.2	22.86	23.4



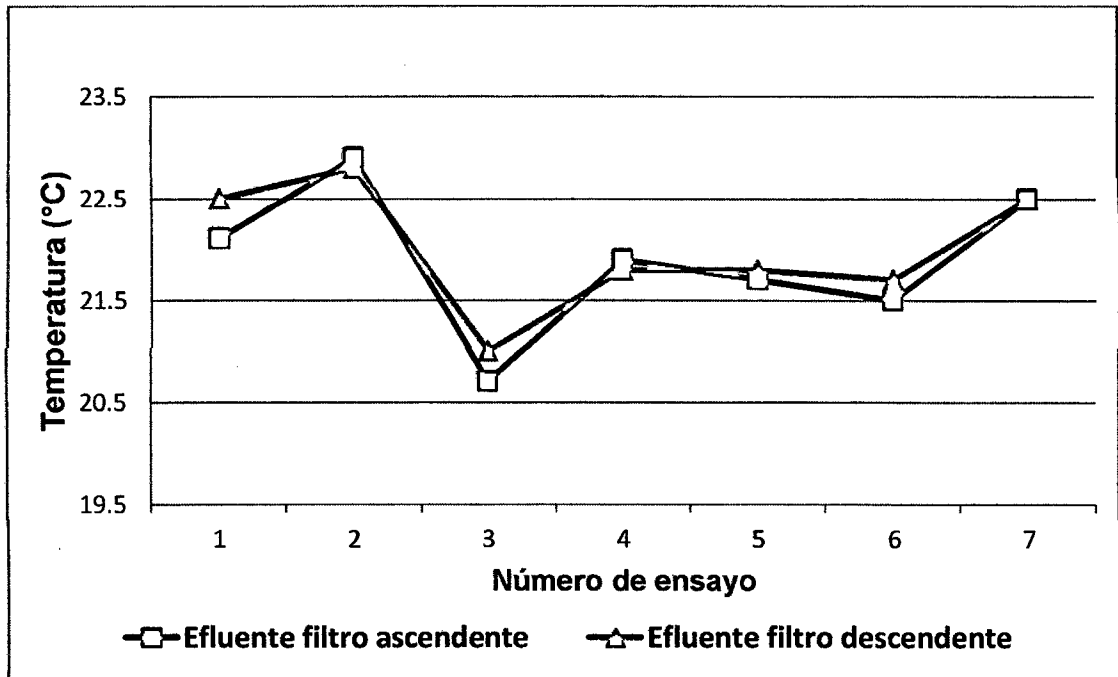


Figura 32: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la primera carrera de filtración.

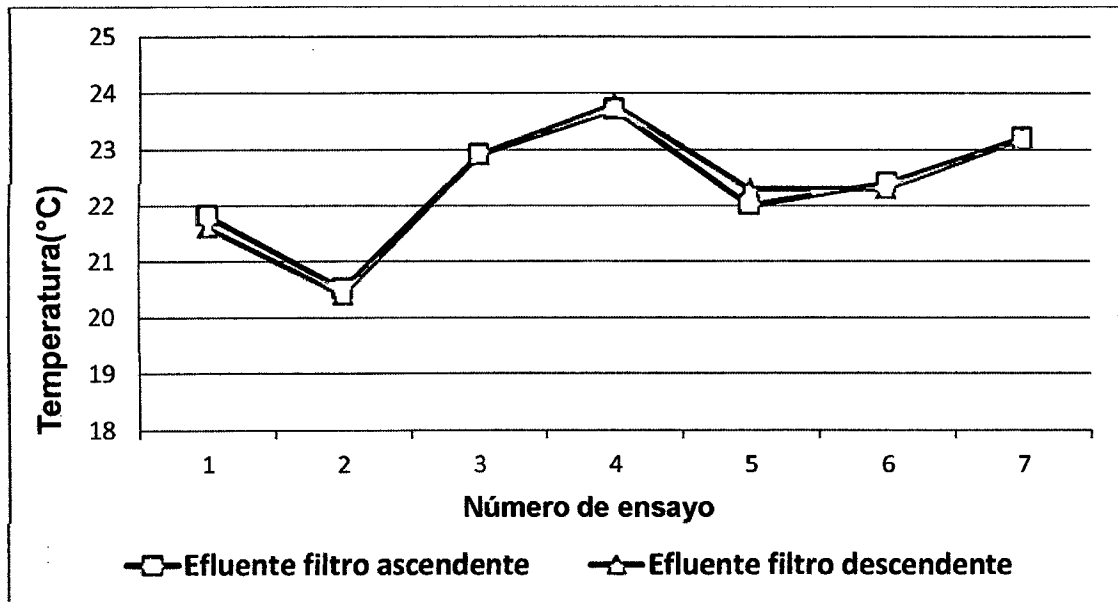


Figura 33: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la segunda carrera de filtración.

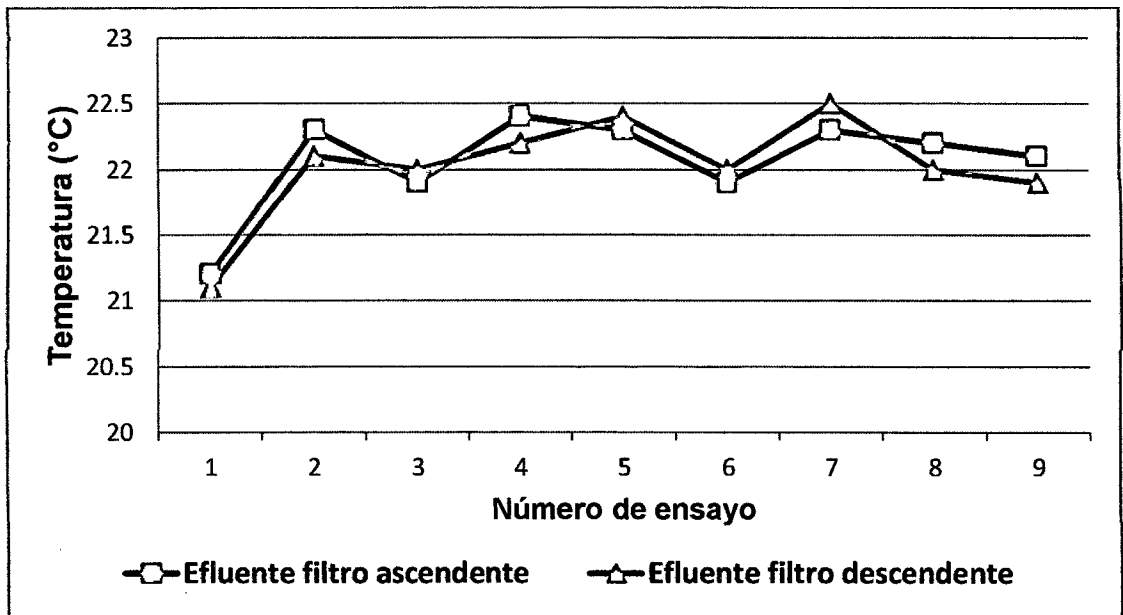


Figura 34: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la tercera carrera de filtración.

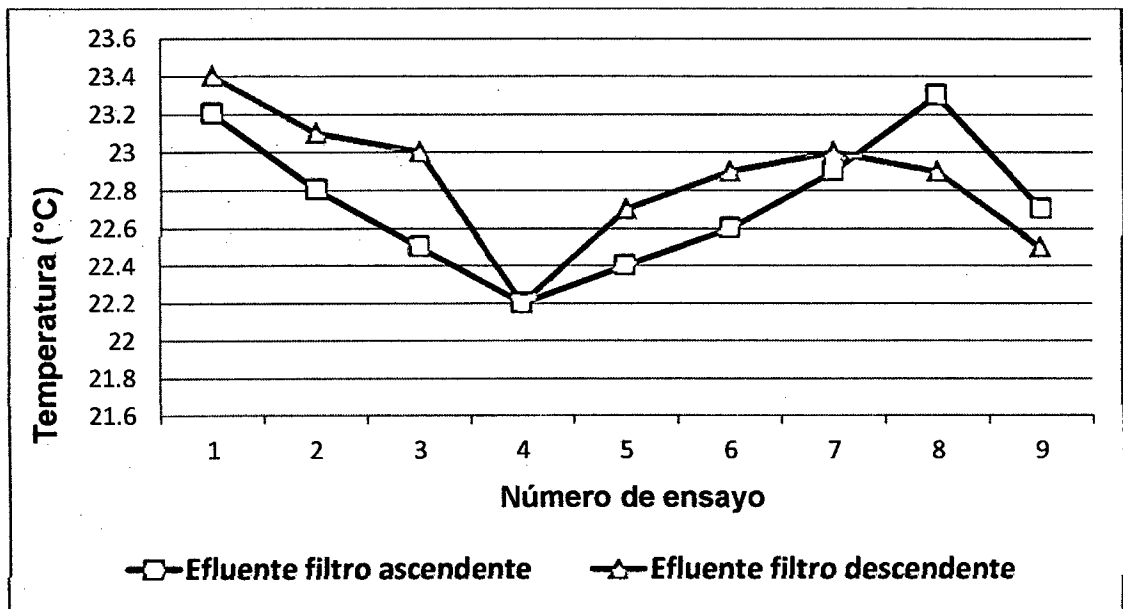


Figura 35: Valores de la temperatura en el efluente de los filtros de lecho reducido de la cuarta carrera de filtración.

## VI.1.2 pH

El pH se midió diariamente desde la segunda carrera de filtración el día 10 de Julio del 2012 el hasta la última carrera de filtración que fue la novena el día 06 de Diciembre del 2013. Generalmente se tomó dos a tres mediciones durante el día, la primera a las 9.00 a.m. la segunda a las 12.00 pm y la tercera a las 4.00 pm aproximadamente o en la mañana y en la tarde cuando fueron dos mediciones diarias. Los valores promedio del pH se muestran a continuación.

### VI.1.2.1 Resultados de la caracterización del pH del afluente de los filtros de lecho convencional.

De la Tabla 20: Valores de la caracterización del pH en el afluente de los filtros de lecho convencional, se aprecia que el pH siempre estuvo variando en entre los valores de 7.22 y 7.95, además este parámetro estuvo influenciado por dos por dos condiciones principales:

a.- El efluente había estado almacenado en 03 tanques anteriormente: tanque de bombeo (400 litros), tanque elevado de almacenamiento (1100 litros), y un tanque de regulación de presión (14 litros), los cuales en conjunto daban un tiempo de retención hidráulica de 2.2 días dichos tanques hacían la función de cámaras de equalización estabilizando los valores de pH.

b.- El afluente de los filtros de arena es una mezcla de efluente de un reactor UASB y agua potable ambos de naturaleza neutra es por ello que no vario significativamente el pH de la mezcla de estos.

Considerar además que para las carreras de filtración de lecho convencional se consideró una dilución en proporciones iguales de efluente del reactor UASB y de Agua Potable.

- Se aprecia en la Tabla 20: Valores de la caracterización del pH en el afluente de los filtros de lecho convencional que el valor máximo de pH se dio en la segunda carrera de filtración cuando fue de 7.95 y el valor mínimo se dio en la misma *carrera de filtración* cuando fue de 7.22, cuando lo cual no se distingue una tendencia de los valores de pH.

Tabla 20: Valores de la caracterización del pH en el afluente de los filtros de lecho convencional

PARAMETRO	pH DEL AFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACIÓN (días)	16			49			20			23			23		
ESTACIÓN	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS	N.M.	N.M.	N.M.	7.22	7.51	7.95	7.32	7.44	7.58	7.31	7.49	7.65	7.38	7.49	7.62

- \*N.M.: No Medido

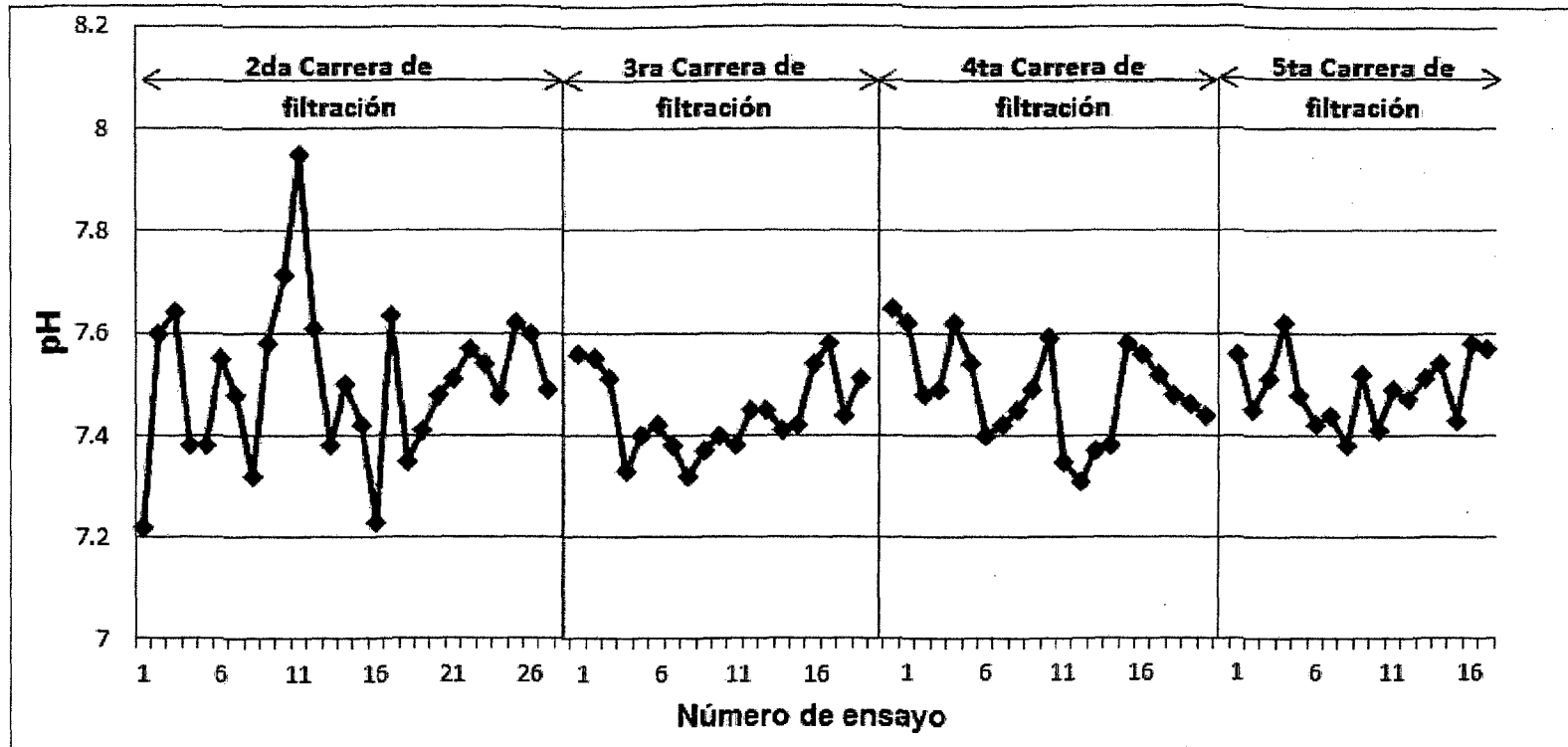


Figura 36: Variación del pH en el afluente de los filtros de lecho convencional

### **VI.1.2.2 Resultados de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente.**

Según la Tabla 21, y la filtración. Figura 39: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la cuarta carrera de filtración., Figura 40: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la quinta carrera de filtración., es posible distinguir que el valor de pH del efluente del Filtro de Flujo Ascendente respecto del afluente del Filtro de Flujo Descendente fue ligeramente superior en este tipo de filtro. Eso se dio porque Después de pasar el tiempo de arranque de los filtros de arena que fue de alrededor de una semana, se formaba una capa biológica compuesta por diversos microorganismos los cuales producían reacciones químicas principalmente en el ingreso de este tipo de filtros y éstas hacían variar dicho *parámetro*.

En la Tabla 21: Valores de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho convencional se aprecia que el valor máximo de pH en el filtro de flujo ascendente se da en la segunda carrera de filtración con un valor de 7.85 en contraposición el mayor valor de pH del filtro de flujo descendente también se da en la segunda carrera de filtración con un valor de 7.96.

Tabla 21: Valores de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho convencional

PARAMETRO	pH DEL EFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACION(días)	16			49			20			23			23		
ESTACION	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE	*N.M	*N.M.	*N.M.	7.45	7.72	7.85	7.43	7.56	7.72	7.34	7.51	7.68	7.38	7.52	7.66
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE	*N.M	*N.M.	*N.M.	7.09	7.71	7.96	7.43	7.61	7.75	7.38	7.54	7.72	7.41	7.54	7.72

- \*N.M.: No Medido



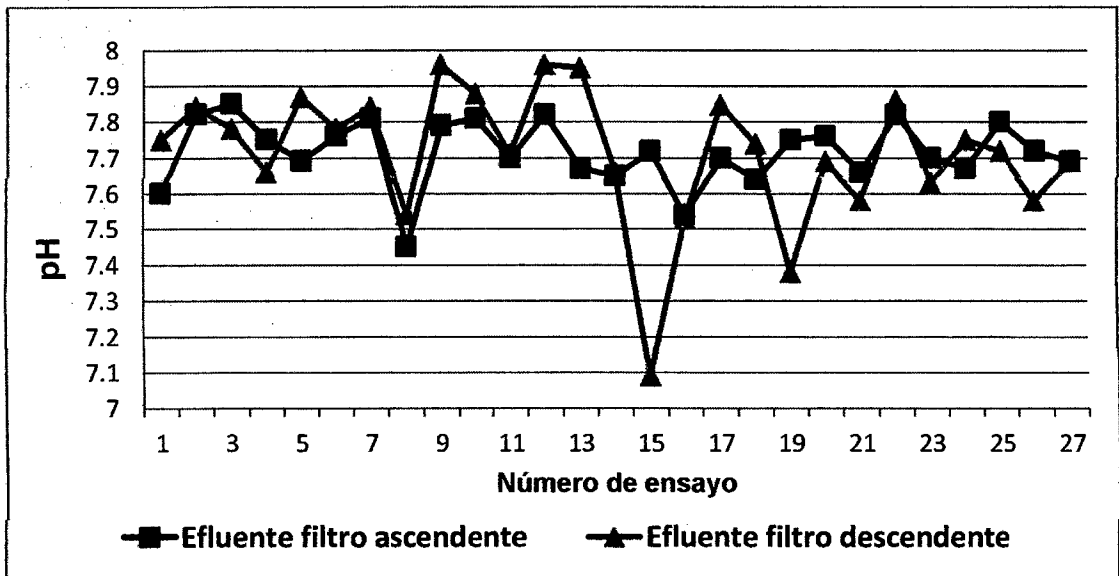


Figura 37: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la segunda carrera de filtración.

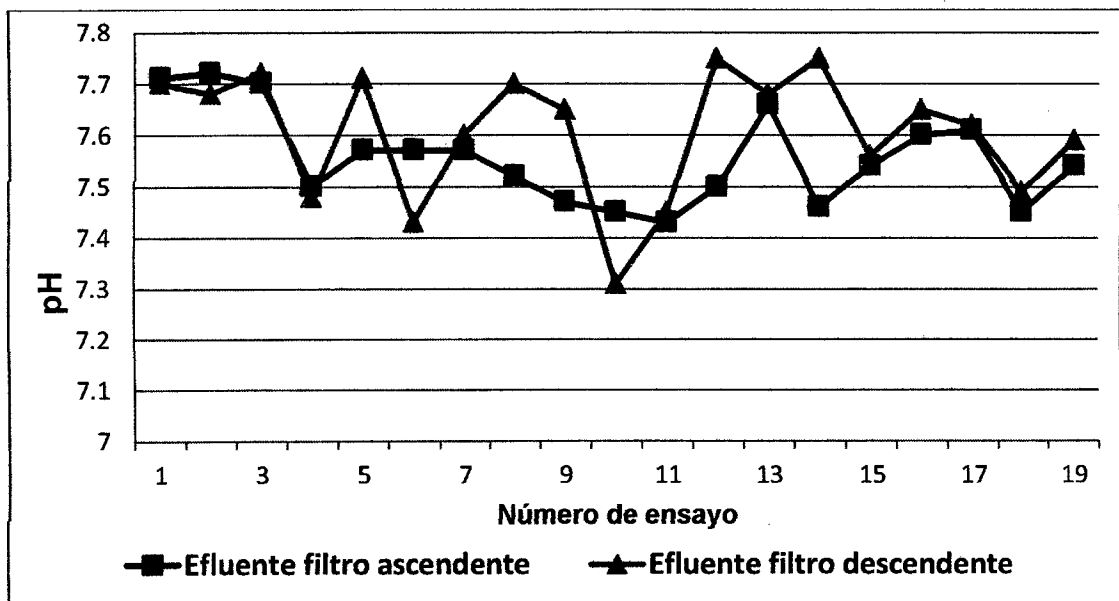


Figura 38: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la tercera carrera de filtración.

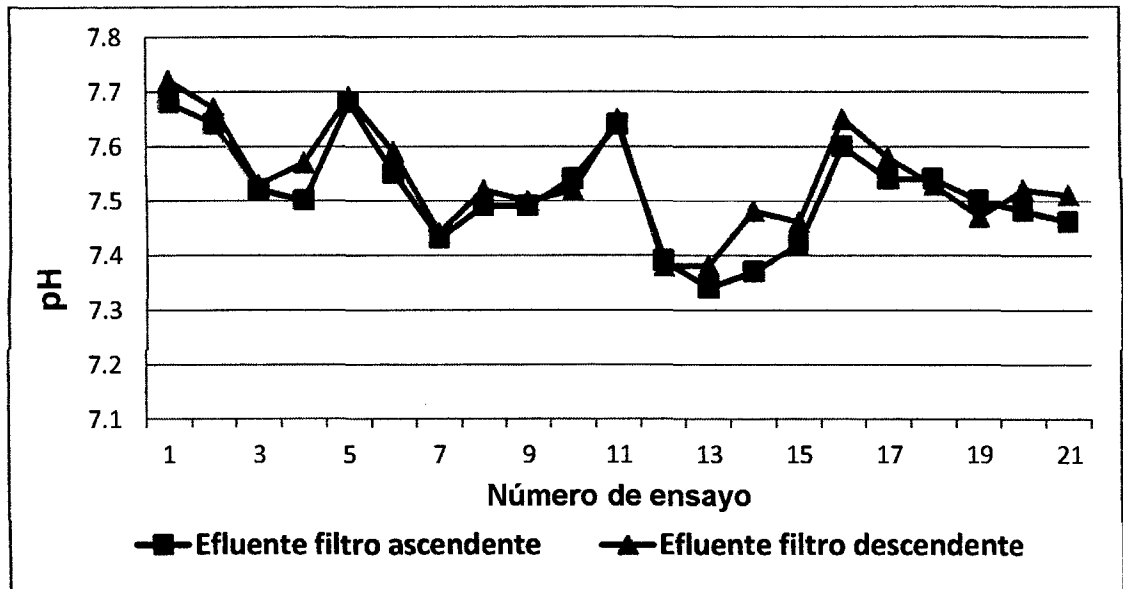


Figura 39: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la cuarta carrera de filtración.

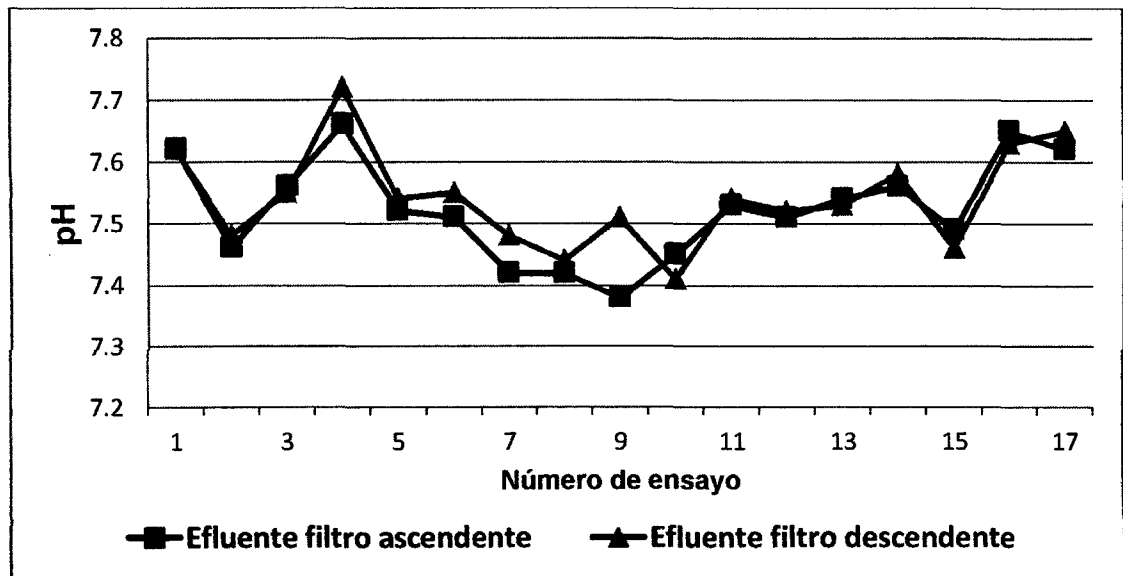


Figura 40: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho convencional en la quinta carrera de filtración.

### **VI.1.2.3 Resultados de la caracterización del pH del afluente de los filtros de lecho reducido.**

Según la Tabla 22: Valores de la caracterización del pH en el afluente de los filtros de lecho reducido, para el afluente de este tipo de filtro no hay una relación directa entre el pH con la temperatura, por dos motivos principales:

1.- Este efluente había estado almacenado en 03 tanques anteriormente, los cuales en conjunto daban un tiempo de retención hidráulica de 2.2 días, dichos tanques hacían la función de cámaras de ecualización estabilizando los valores de pH.

2.- El afluente de los filtros de arena es una mezcla de efluente del reactor UASB y agua potable ambos de naturaleza neutra, lo que hace regular su pH.

En la Tabla 22 se aprecia que el pH estuvo entre los valores mínimos de 7.33 y máximos 7.62, todo ellos entre los meses de noviembre y diciembre.

Tabla 22: Valores de la caracterización del pH en el afluente de los filtros de lecho reducido

PARÁMETRO	pH DEL AFLUENTE											
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO											
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288		
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12			26/11/12 - 20/11/12			03/12/12 - 03/12/12			06/12/12 - 06/12/12		
DURACIÓN (días)	7			5			1			1		
ESTACIÓN	PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS	7.39	7.46	7.52	7.33	7.41	7.50	7.45	7.55	7.62	7.39	7.45	7.53

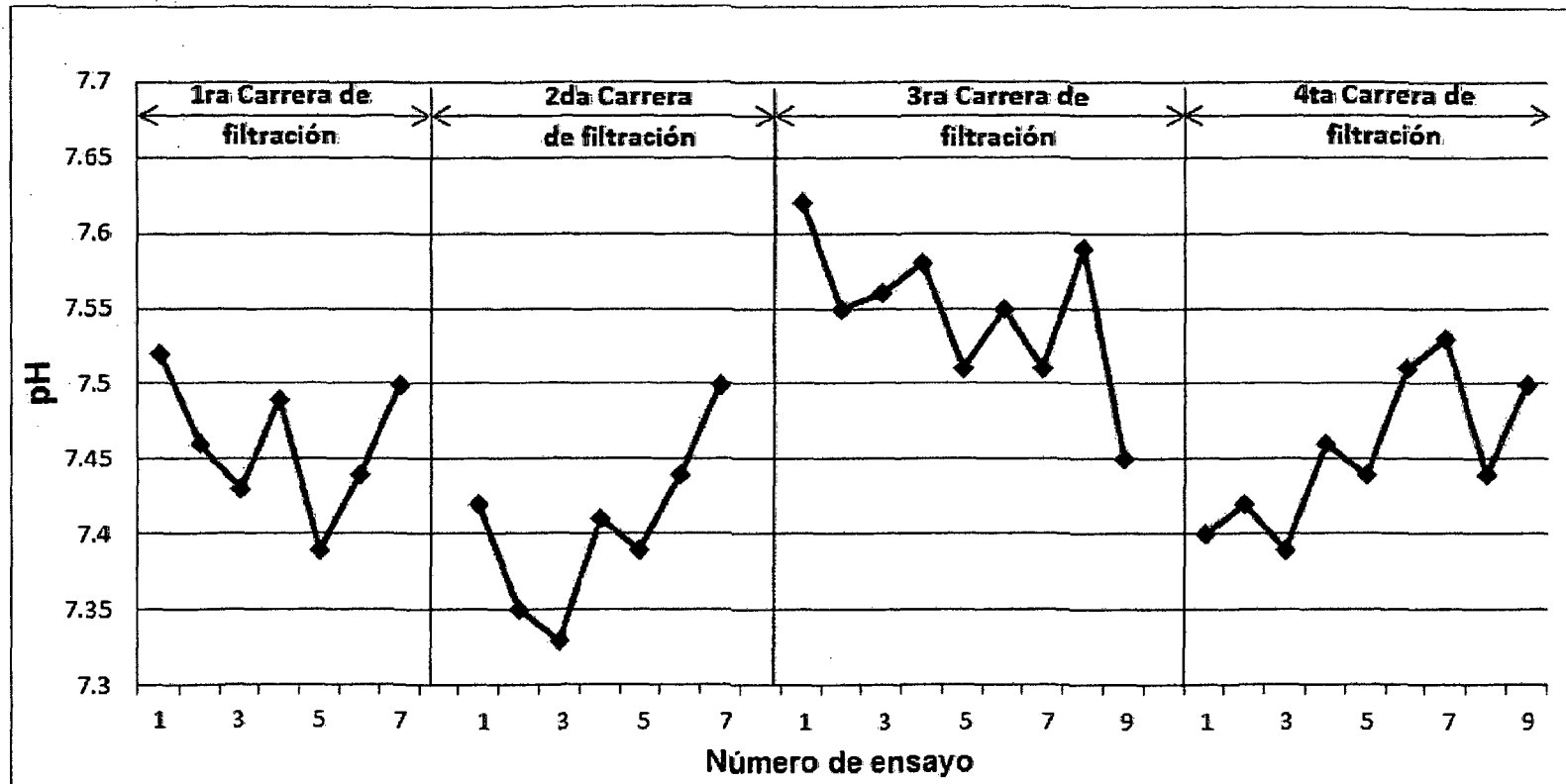


Figura 41: Valores del pH en el afluente de los filtros de lecho reducido

#### **VI.1.2.4 Resultados de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.**

Según la Tabla 23: Valores de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente y la Figura 42: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la primera carrera de filtración., la Figura 43: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la segunda carrera de filtración., la Figura 44: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la tercera carrera de filtración. y la Figura 45: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la cuarta carrera de filtración., es posible ver que no hubo variaciones significativas en los valores de pH del efluente del filtro de flujo ascendente respecto del afluente del filtro de flujo descendente, ello debido a que las carreras de filtración eran muy cortas de una semana las primeras y las dos últimas de un día, lo que provocaba que no se produjeran reacciones biológicas que pudieran alterar el pH del efluente de los filtros.

Además según la Tabla 23: Valores de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente es aprecia que el valor máximo de pH en el filtro de flujo ascendente se da en la octava carrera de filtración con un valor de 7.61. El de mayor valor de pH del filtro de flujo descendente también se da en la octava carrera de filtración con un valor de 7.63.

**Tabla 23: Valores de la caracterización del pH en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente**

PARAMETRO	pH DE LOS EFLUENTES											
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO											
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288		
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12			26/11/12 - 20/11/12			03/12/12 - 03/12/12			06/12/12 - 06/12/12		
DURACION (días)	7			5			1			1		
ESTACION	PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE	7.41	7.46	7.53	7.34	7.41	7.49	7.48	7.54	7.61	7.38	7.45	7.52
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE	7.4	7.46	7.51	7.34	7.42	7.52	7.43	7.55	7.63	7.35	7.45	7.51

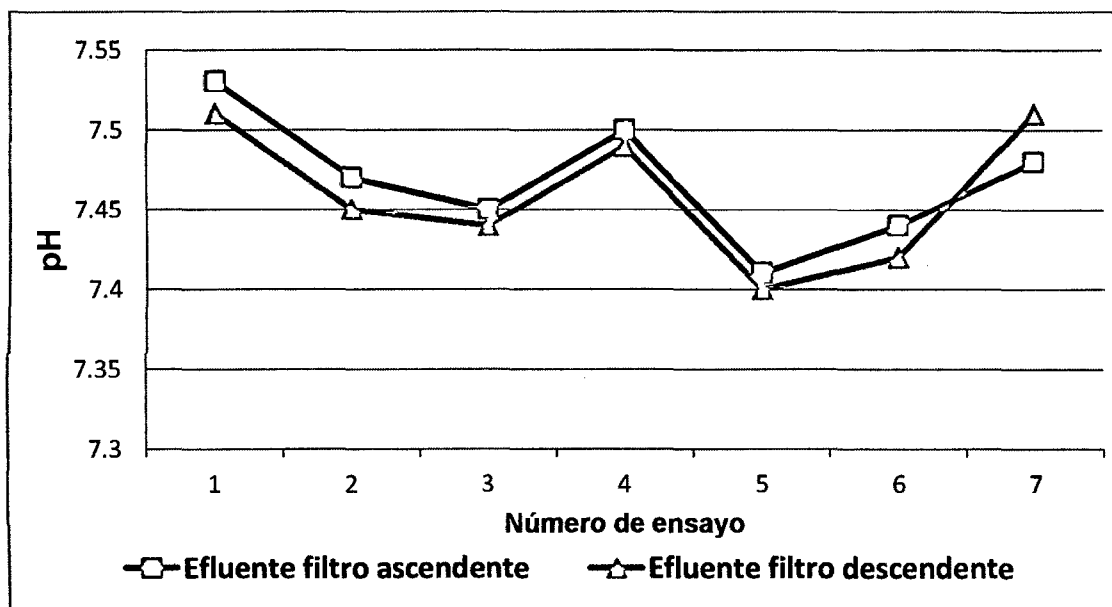


Figura 42: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la primera carrera de filtración.

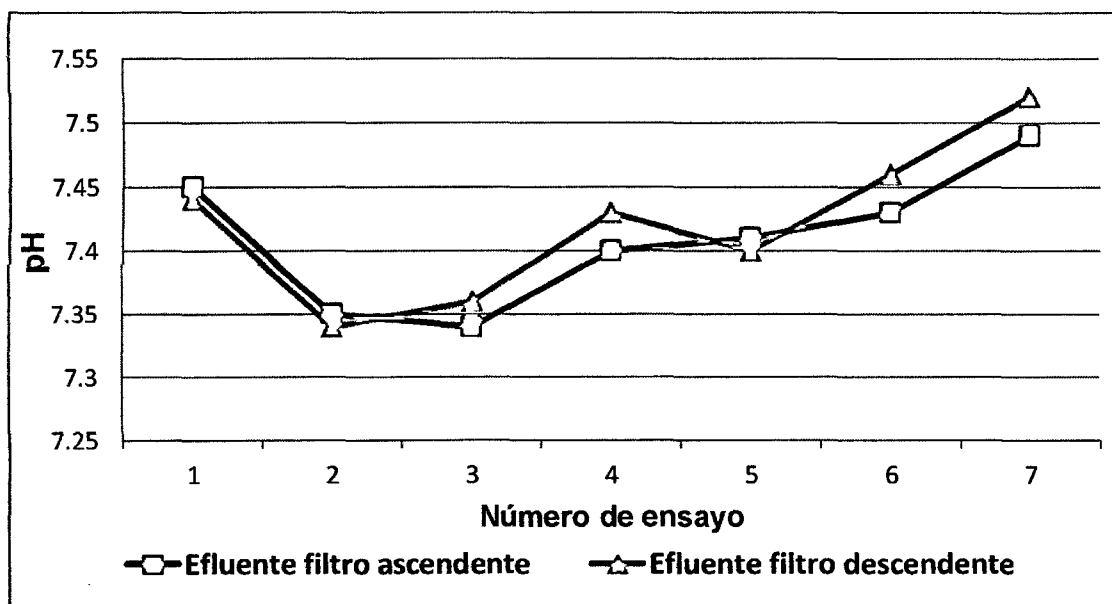


Figura 43: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la segunda carrera de filtración.



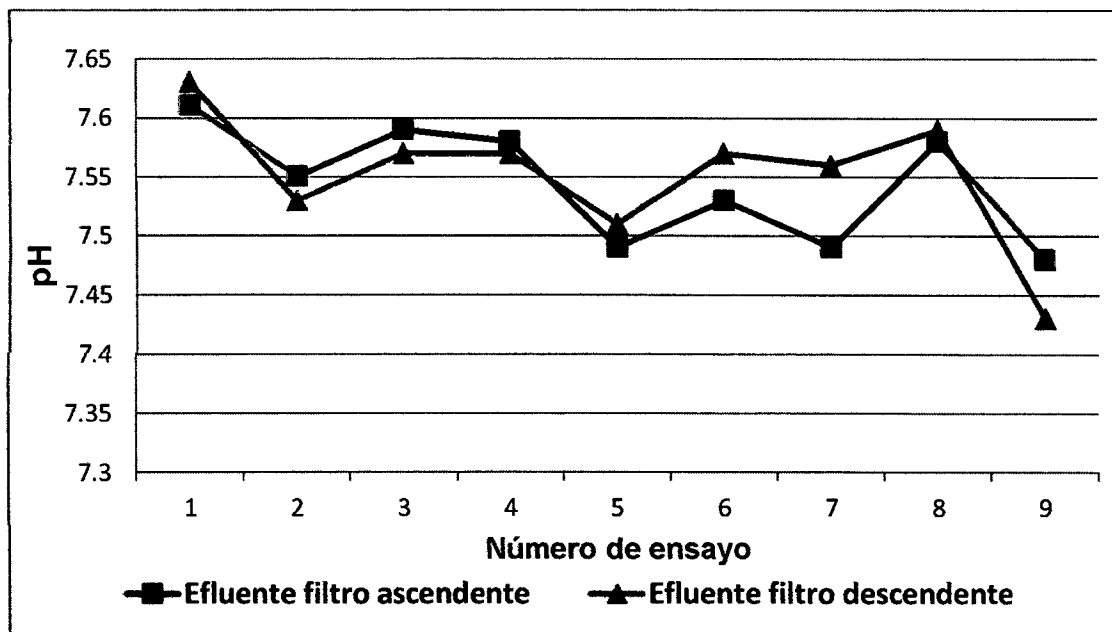


Figura 44: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la tercera carrera de filtración.

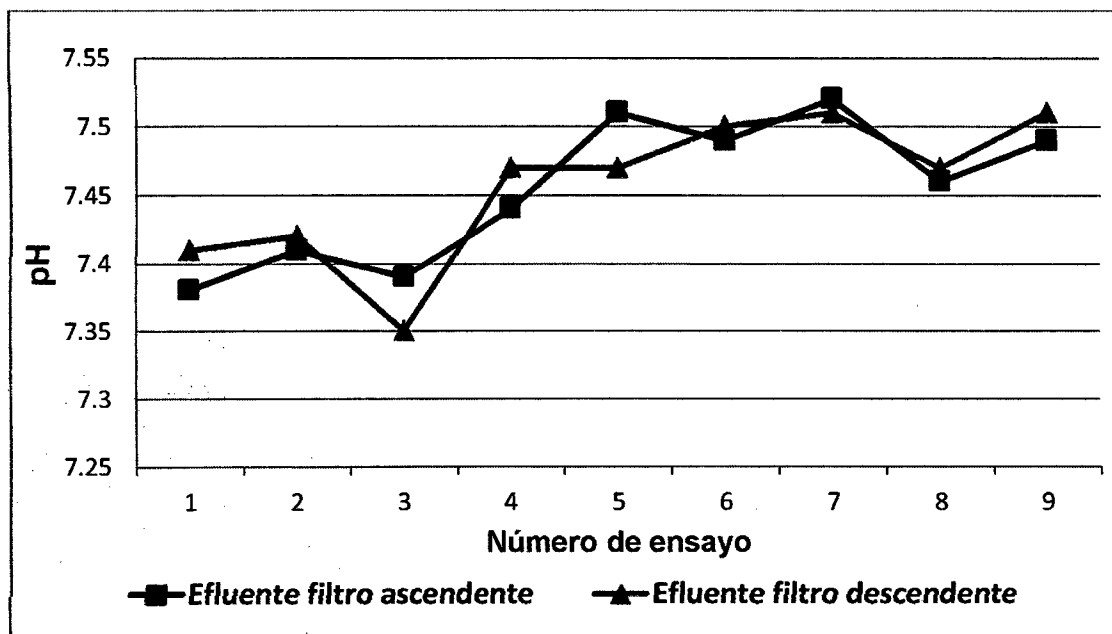


Figura 45: Variación del pH del efluente de los filtros de lecho reducido en la cuarta carrera de filtración.

### **VI.1.3 TURBIEDAD**

La Turbiedad se midió diariamente desde las carreas de filtración de las pruebas hidráulicas del 23 de Abril del 2012 hasta la novena carrera de filtración del 06 de Diciembre del 2012. Normalmente se tomó dos a tres mediciones durante el día, la primera a las 9.00 a.m. la segunda a las 12.00 pm y la tercera a las 4.00 pm aproximadamente o en la mañana y en la tarde cuando fueron dos mediciones diarias.

#### **VI.1.3.1 Resultados de la caracterización de la Turbiedad del Afluente de los Filtros de Lecho Convencional.**

El valor de la turbiedad ha ido variando a lo largo de todas las carreas de filtración, influenciado principalmente por las variación del agua residual cruda domestica que es la que alimenta al reactor UASB y luego este alimenta a nuestros filtros de arena.

Además hay que considerar que aunque el proceso de filtración se dio de forma continua todos los días de la semana y sus 24 horas, ha habido intervalos de tiempo de algunas horas en los cuales el filtro se encontró inoperativo por problemas de mantenimiento y justo después de ello se realizaron los análisis de turbiedad, dando resultados mayores a los que normalmente resultaría según su tendencia.

Según la Tabla 24: Valores de la caracterización de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho convencional la turbiedad en el afluente varió desde un valor mínimo de 12 UNT hasta un máximo de 100 UNT en este tipo de filtros de arena, dicho valor máximo se dio después de que el filtro dejo de funcionar por falta de bombeo alrededor de 3 horas.

Tabla 24: Valores de la caracterización de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho convencional

PARAMETRO	TURBIEDAD DEL AFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACIÓN (días)	16			49			20			23			23		
ESTACIÓN	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS (UNT)	17	33.8	54	13	44.7	100	16	32.4	66	12	28.2	50	16	30.6	46

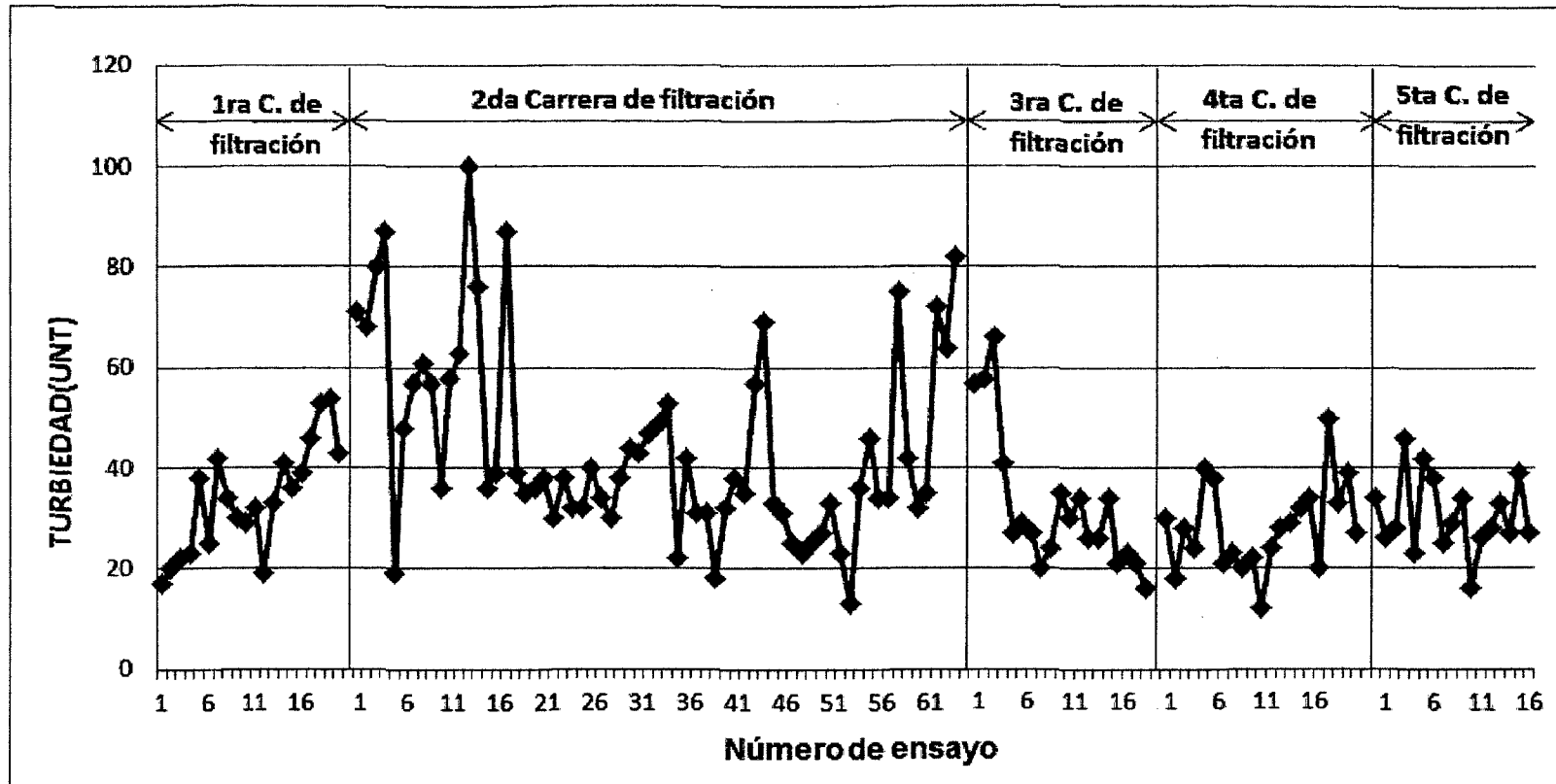


Figura 46: Variación de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho convencional

### **VI.1.3.2 Resultados de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.**

De la Tabla 25: Valores de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente, es posible ver que en las cinco carreras de filtración de este tipo de filtro Los filtros tanto ascendente como descendente, presentan similares eficiencias en la remoción de la turbiedad, para ser más precisos la diferencia en la eficiencia es de solo 0.8% superior el filtro de flujo ascendente al filtro de flujo descendente, la cual no es una ventaja representativa, sino más bien un error estadístico de la igualdad de eficiencias en remoción de turbiedad.

Además hay que considerar que aunque el proceso de filtración se dio de forma continua todos los días de la semana y sus 24 horas, ha habido intervalos de tiempo de algunas horas en los cuales el filtro se encontró inoperativo por problemas de mantenimiento y justo después de ello se realizaron los análisis de turbiedad, dando resultados mayores a los que indicarían su tendencia.

El porcentaje de remoción de la turbiedad fue relativamente bajo, tanto en el periodo de arranque de una semana como en el periodo propio de operación de estos filtros de un poco más de dos semanas. El promedio de la eficiencia de la remoción de la turbiedad en las carreras de filtración para ambos filtros fue de entre 35% y 45%.

Para este tipo de filtro se pudo apreciar la formación de una capa biológica en la parte superior del Filtro de Flujo Descendente luego de una semana de empezada la carrera de filtración, pero dicha capa biológica no produjo mejoras en su eficiencia de remoción de la turbiedad según las tablas, de forma equivalente se pudo apreciar zonas con alta carga orgánica en la parte

inferior del Filtro de Flujo Ascendente lo cual tampoco produjo diferencias en la eficiencia de su remoción de la turbiedad.

Además en la Tabla 25: Valores de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente es posible apreciar que los resultados de la turbiedad en los efluentes tanto del filtro ascendente como del filtro descendente son muy similares, especialmente en valores promedios.

**Tabla 25: Valores de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente**

PARÁMETRO	TURBIEDAD DE LOS EFLUENTES														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACIÓN (días)	16			49			20			23			23		
ESTACIÓN	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (UNT)	7	22.3	36	7	25.1	70	7	21.1	48	6	16.9	36	11	16.2	22
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (UNT)	9	23.3	42	4	25.4	69	10	18.7	41	3	16.4	40	12	17.0	25

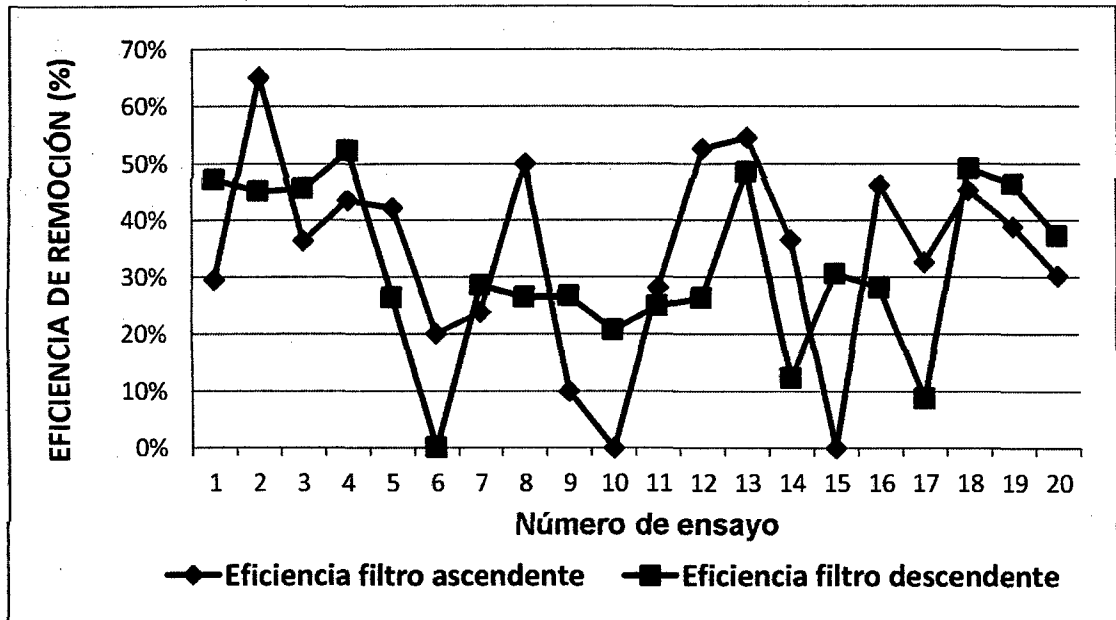


Figura 47: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la primera carrera de filtración.

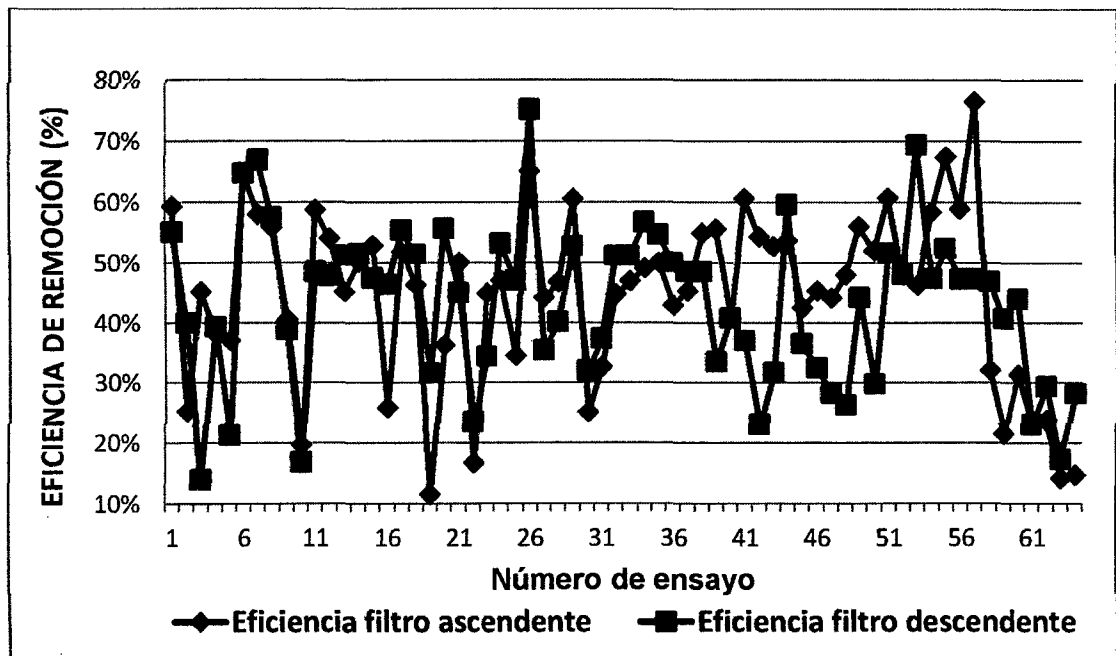


Figura 48: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la segunda carrera de filtración.



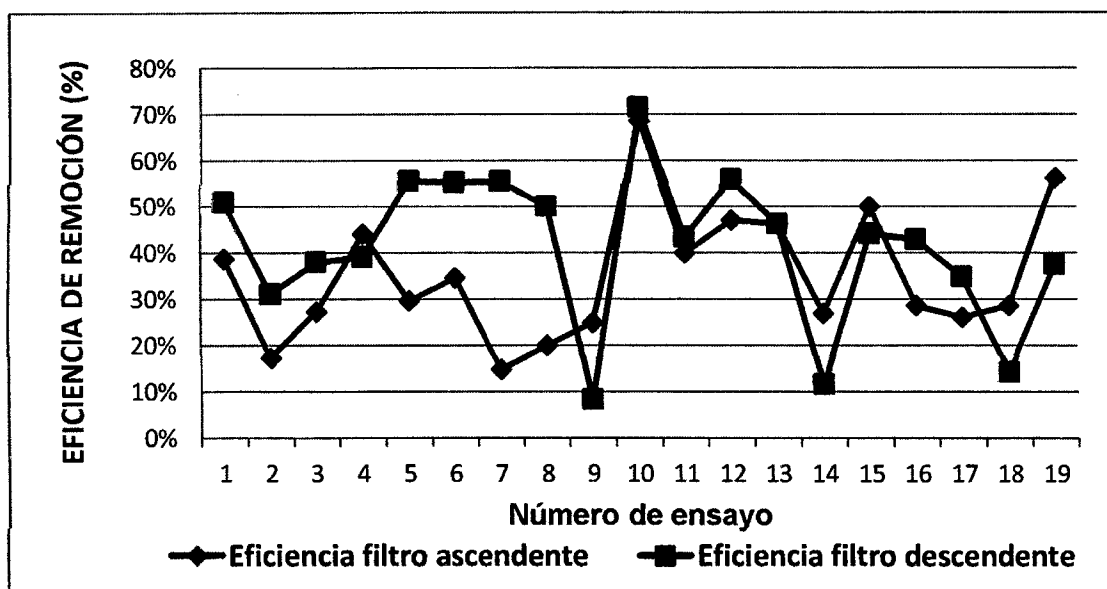


Figura 49: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la tercera carrera de filtración.

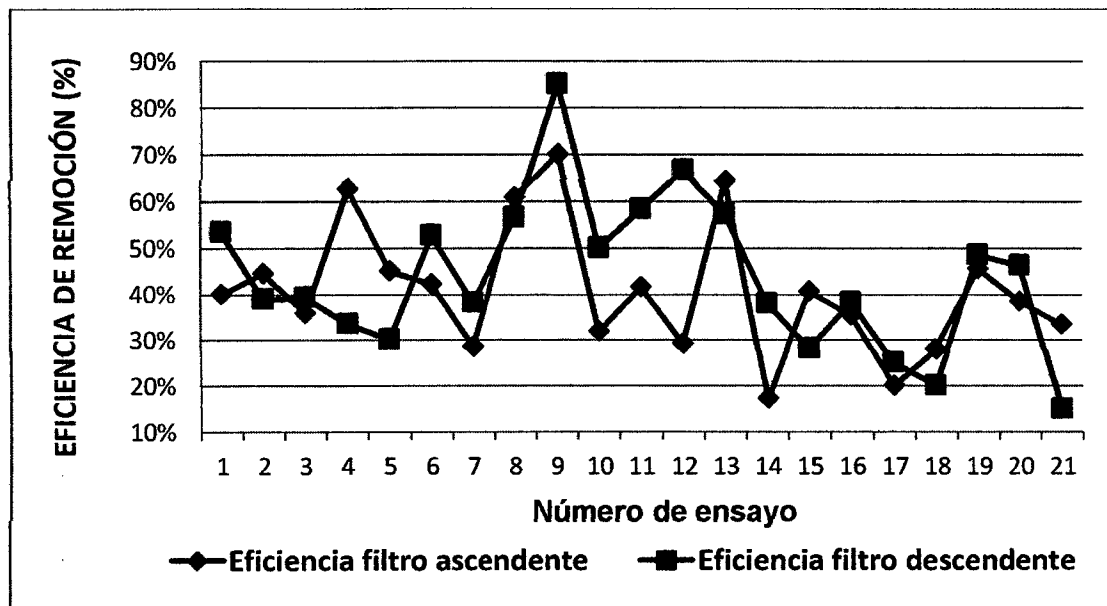


Figura 50: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la cuarta carrera de filtración.

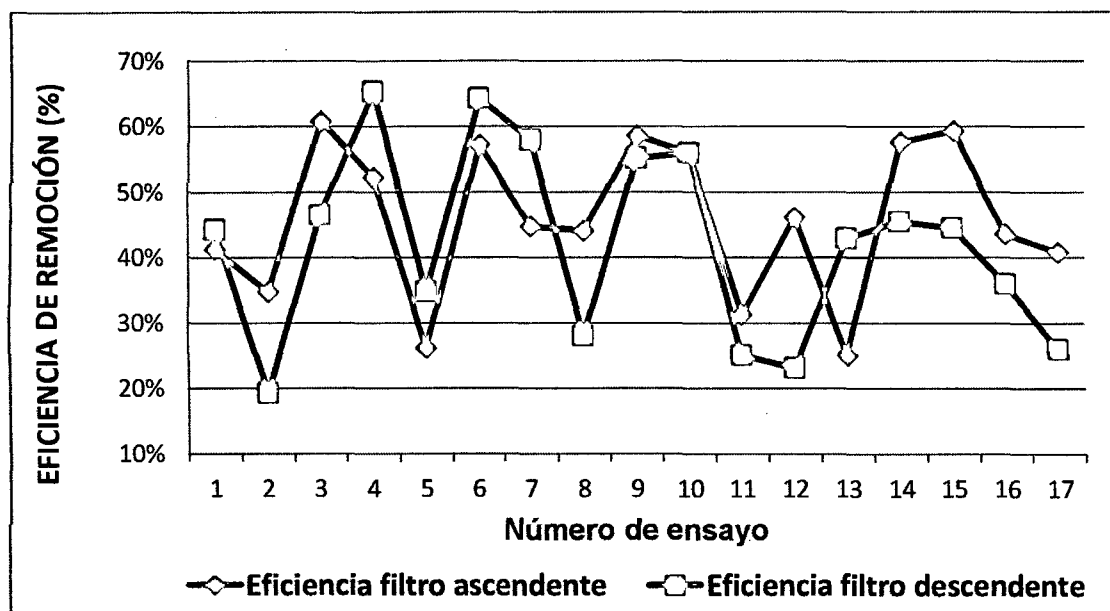


Figura 51: Variación de la turbiedad del efluente de los filtros de lecho convencional en la quinta carrera de filtración.

### **VI.1.3.3 Resultados de la caracterización de la turbiedad del afluente de los filtros de lecho reducido.**

De la Tabla 26: Valores de la caracterización de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho reducido se aprecia que el valor de la turbiedad ha ido variando a lo largo de todas las carreas de filtración, influenciado principalmente por las variación del agua residual cruda domestica que es la que alimenta al reactor UASB y luego este alimenta a nuestros filtros de arena.

Para este tipo de lecho filtrante se probó con un efluente más diluido que con el filtro de lecho convencional, se utilizó una dilución de dos terceras parte de agua potable con una parte de efluente del reactor UASB logrando con ello menores valores de turbiedad inicial.

Además también se aprecia en la Tabla 26: Valores de la caracterización de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho reducido, los valores de turbiedad estuvieron en un rango de 8 a 27 UNT, ello debido a que en el corto tiempo que estuvieron operativos los filtros no hubo interrupciones en su funcionamiento.

Tabla 26: Valores de la caracterización de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho reducido

PARAMETRO	TURBIEDAD DEL AFLUENTE											
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO											
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288		
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12			26/11/12 - 20/11/12			03/12/12 - 03/12/12			06/12/12 - 06/12/12		
DURACION (días)	7			5			1			1		
ESTACION	PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS (UNT)	15	22.6	27	14	17.0	21	8	11.0	15	10	16.4	22

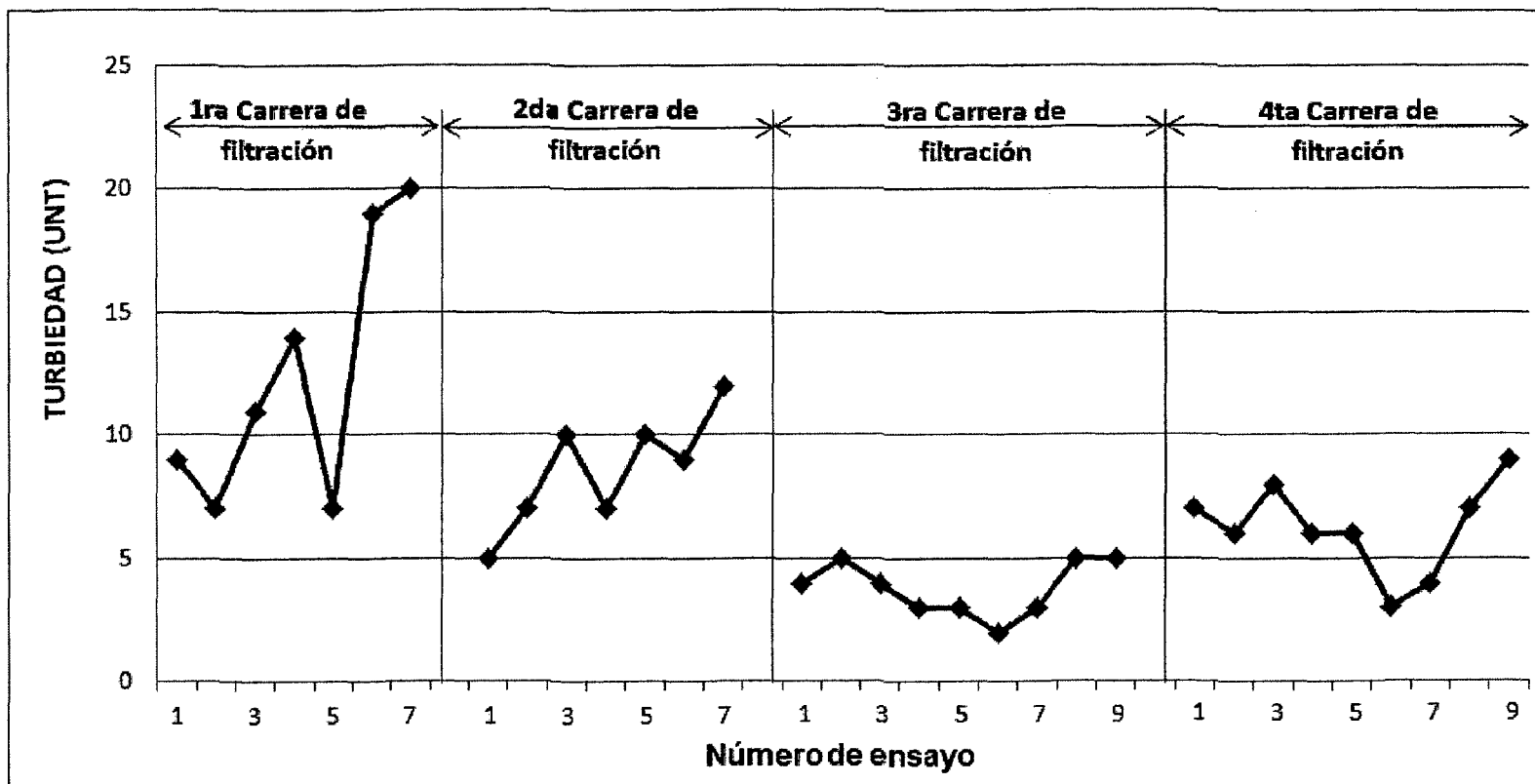


Figura 52: Variación de la turbiedad en el afluente de los filtros de lecho reducido

#### **VI.1.3.4 Resultados de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.**

Se aprecia en la Tabla 27: Valores de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho reducido, que en las cuatro carreras de filtración de esta configuración del lecho, que los filtros, de ambos sentidos de filtración, muestran una ligera diferencia en la eficiencia de la remoción de la turbiedad, siendo mayor la remoción de la turbiedad en el filtro ascendente en un 6.2% sobre el filtro descendente. Se puede apreciar además que la remoción de la turbiedad promedio en cada una de estas carreras es superior al del filtro ascendente al del filtro descendente afirmando la tendencia a ser superior en remoción de turbiedad.

El porcentaje de remoción de la turbiedad fue relativamente alto. El promedio de la eficiencia en las carreras de filtración en la remoción de la turbiedad para los filtros de lecho reducido fue de entre 60 % y 80%.

Tabla 27: Valores de la caracterización de la turbiedad en el efluente de los filtros de lecho reducido

PARAMETRO	TURBIEDAD DE LOS EFLUENTES											
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO											
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288		
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12			26/11/12 - 20/11/12			03/12/12 - 03/12/12			06/12/12 - 06/12/12		
DURACION (días)	7			5			1			1		
ESTACION	PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (UNT)	7	12.4	20	5	8.571	12	2	3.7	5	3	6	9
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (UNT)	6	11.8	22	4	8.429	14	2	2.8	4	3	6	9

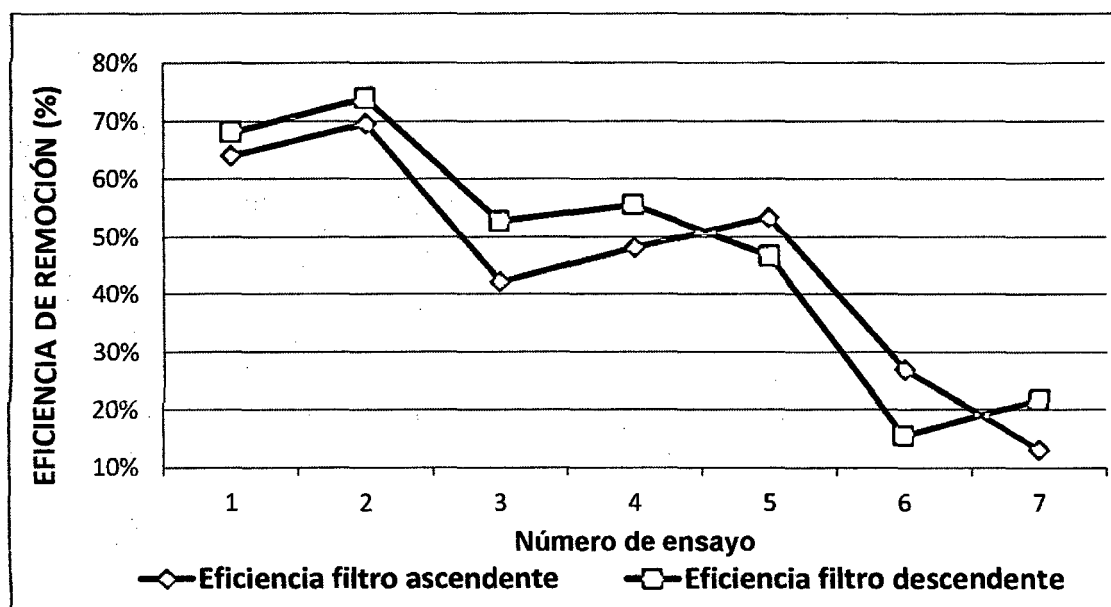


Figura 53: Eficiencia de remoción de turbiedad en los filtros de Lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente de la primera carrera de filtración.

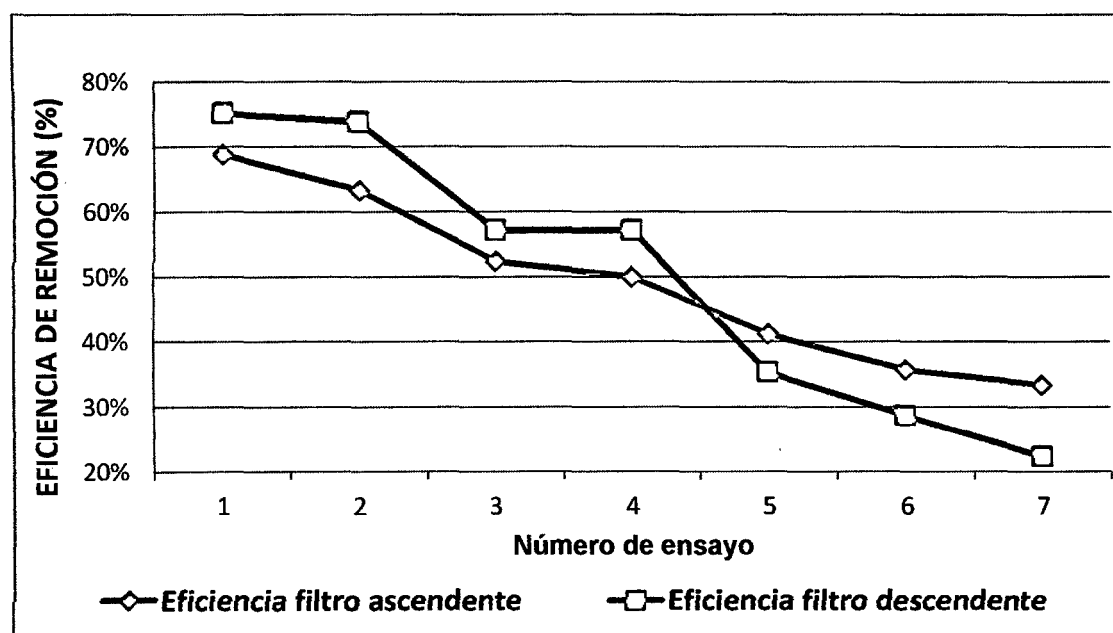


Figura 54: Eficiencia de remoción de turbiedad en los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente de la segunda carrera de filtración.



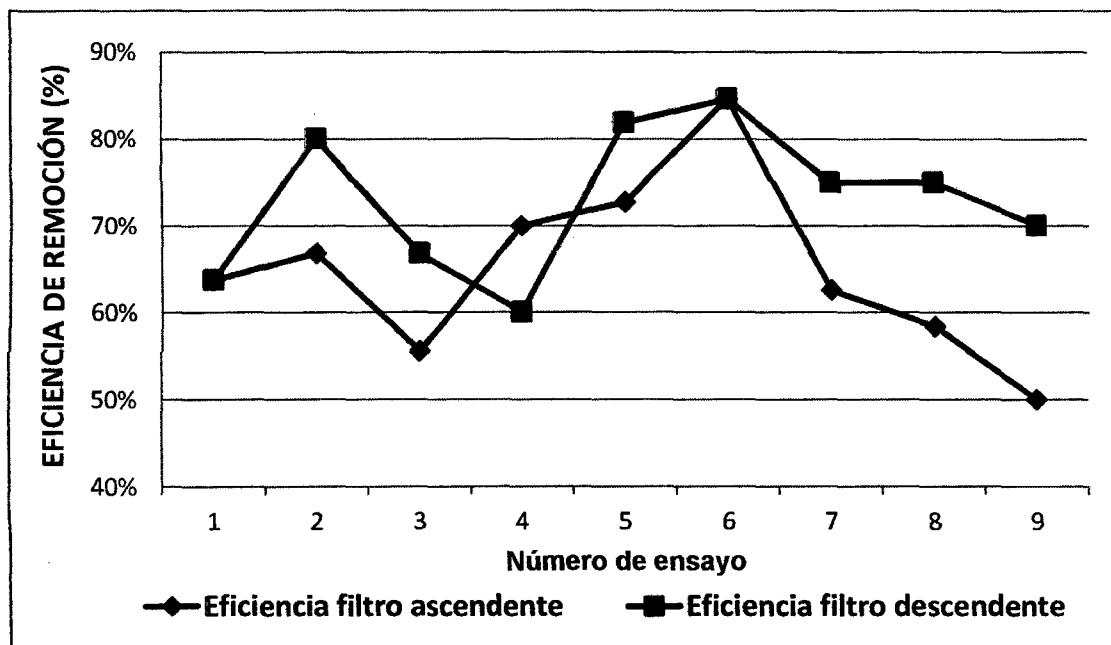


Figura 55: Eficiencia de remoción de turbiedad en los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente de la tercera carrera de filtración.

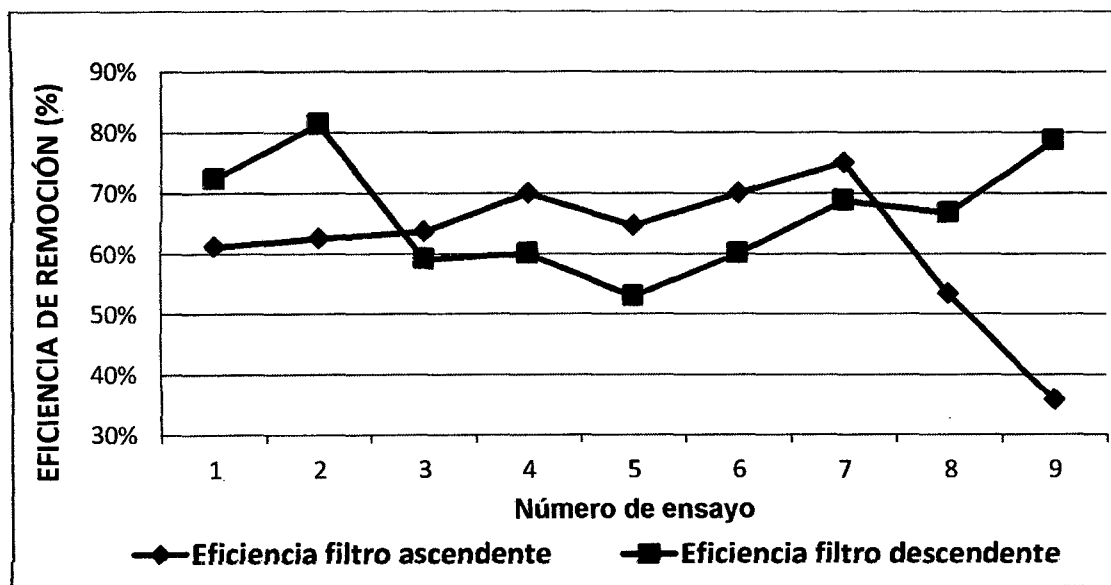


Figura 56: Eficiencia de remoción de turbiedad en los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente de la cuarta carrera de filtración.

#### **VI.1.4 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES**

Se midió desde el día 11/07/2012 el cual corresponde al primer día de iniciada la segunda carrea de filtración hasta la novena carrera de filtración del 06 de Diciembre del 2012. Normalmente se tomaron dos mediciones por semana cuando las carreras de filtración eran de varias semanas, pero cuando las carreras de filtración duraban un solo día se ha tomado solo una medición por carrera de filtración, todas ellas se realizaron entre las 8.00am y 9.00am.

##### **VI.1.4.1 Resultados de la caracterización de los sólidos suspendidos volátiles en el afluente de los filtros de arena de lecho convencional.**

Los sólidos suspendidos volátiles que representan la masa bacteriana, llegan hasta los filtros de arena desde el reactor UASB mezclado en proporciones iguales con agua potable en este tipo de filtración, estos SSV se ven afectados por tres factores principales:

*Las bacterias del efluente en las cámaras de bombeo, almacenamiento y de regulación de caudal va aumentando a medida que consumen la materia orgánica presente en dicho efluente.*

La masa bacteriana se diluye con el agua potable en las diluciones que se realizan en la cámara de almacenamiento, disminuyendo así el parámetro de SSV.

El agua potable con que se diluye el efluente del reactor UASB tiene pequeñas concentraciones de cloro residual, según la reglamentación vigente, por tanto hay un pequeño proceso de cloración en la cámara de almacenamiento.

Tabla 28: Valores de la caracterización de los SSV en el afluente de los filtros de lecho convencional

PARAMETRO	SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES DEL AFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACION (días)	16			49			20			23			23		
ESTACION	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS (mg/l)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	15	51.1	134	45	77.7	110	24	78.0	182	34	65.4	94

- \*N.M.: No Medido

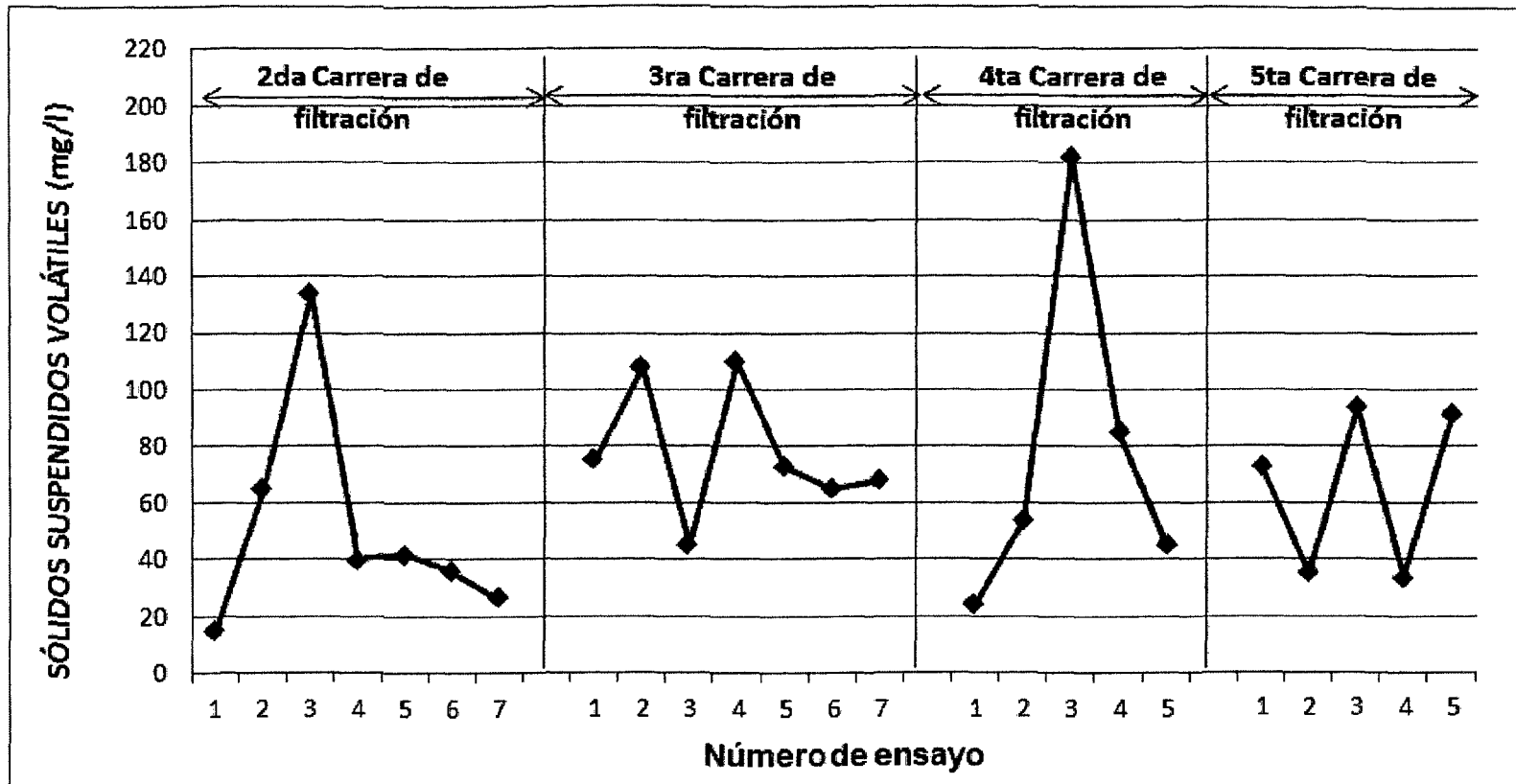


Figura 57: Valores de los Sólidos Suspendedos Volátiles en el afluente de los filtros de lecho convencional.

**VI.1.4.2 Resultados de la caracterización de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente de los filtros de arena de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente.**

En la comparación entre los dos filtros de diferente flujo vemos que no hay una diferencia apreciable entre uno u otro, ya que en las carreras "2" y "5" el filtro ascendente tiene mayor eficiencia y en las carreras "3" y "4" los filtro de flujo descendente tienen mayor eficiencia en la remoción de este parámetro.

Los sólidos suspendidos volátiles luego del proceso de filtrado, en el módulo de flujo descendente tuvo como valor máximo 83 mg/l y como valor mínimo 6 mg/l, mientras que el filtro de flujo ascendente tuvo como valor máximo 11 mg/l y como valor mínimo 100 mg/l.

Tabla 29: Valores de la caracterización de los SSV en el efluente de los filtros de lecho convencional

PARAMETRO	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES DEL EFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACIÓN (días)	16			49			20			23			23		
ESTACIÓN	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (mg/l)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	12	35.6	100	16	33.6	75	11	30.4	45	16	33.4	51
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (mg/l)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	12	31.1	71	17	41.9	83	6	23.4	39	14	27.4	45

- \*N.M.: No Medido

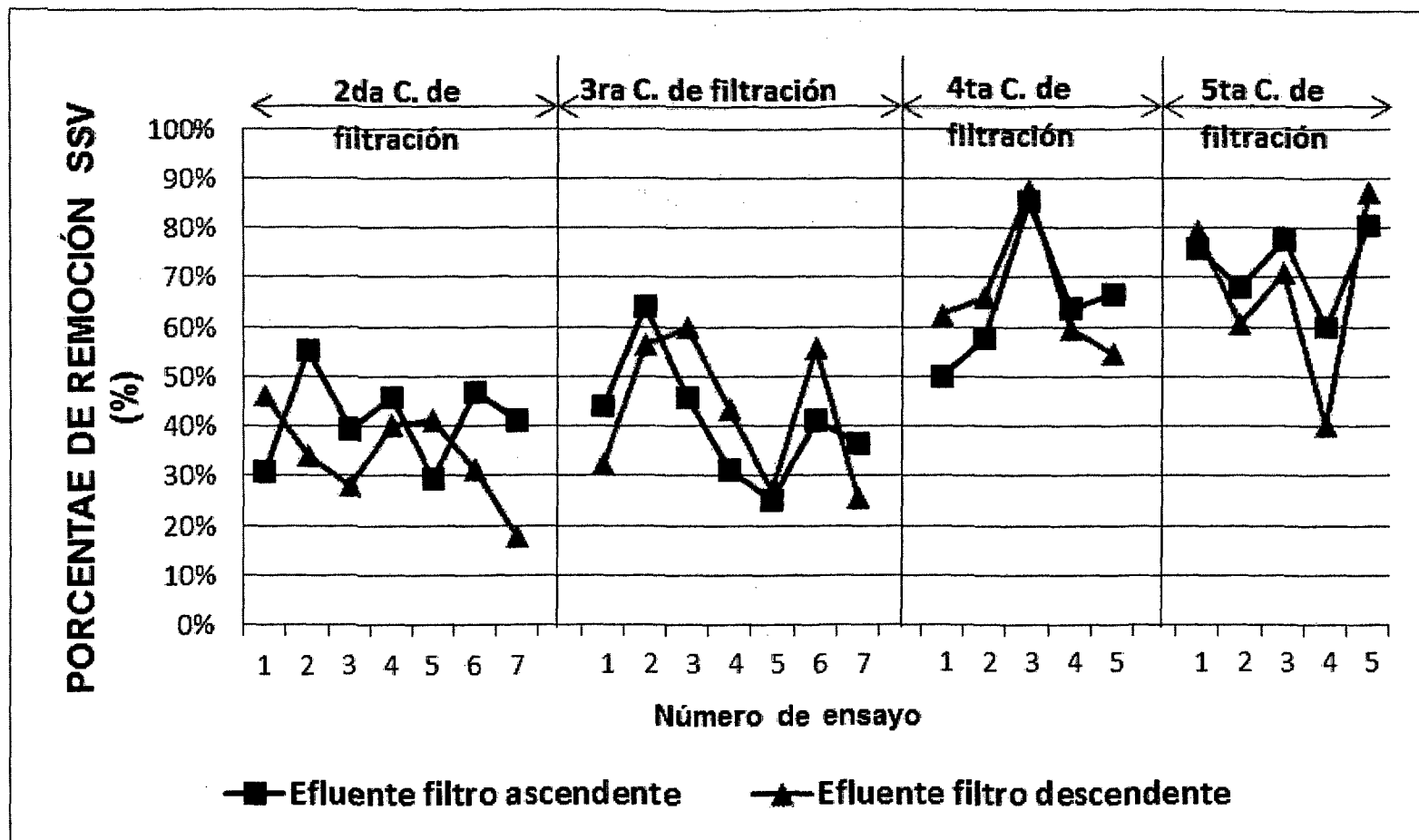


Figura 58: Valores de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente de los filtros de lecho convencional

#### **VI.1.4.3 Resultados de la caracterización de los sólidos suspendidos volátiles en el afluente de los filtros de arena de lecho reducido.**

Al igual que en el filtro de lecho convencional, el afluente de este tipo de filtro es una mezcla entre efluente del reactor UASB y el agua potable, pero en este caso el agua potable representa dos terceras partes del afluente y el efluente del reactor UASB solo representa un tercio del total del afluente. Y de igual modo los SSV son afectados por tres motivos diferentes, los cuales son los mismos que en el lecho convencional pero lo afectan de diferente manera, ya que la cloración producto del cloro residual del agua potable es más importante en este tipo de filtro por estar el agua potable en mayor proporción, y esto afecta a los sólidos suspendidos volátiles porque ellos representan la masa bacteriana; de igual manera la dilución con agua potable hace disminuir a un este parámetro, y el tiempo de retención en las cámaras anteriores a los filtros también lo afecta pero en la misma medida que en el filtro de lecho convencional.



Tabla 30: Valores de la caracterización de los SSV en el afluente de los filtros de lecho reducido

PARAMETRO	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES DEL AFLUENTE					
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO					
CARRERA	1ra CARRERA		2da CARRERA		3ra CARRERA	4ta CARRERA
CAUDAL (l/día)	288		288		288	288
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12		26/11/12 - 20/11/12		03/12/12 - 03/12/12	06/12/12 - 06/12/12
DURACION (días)	7		5		1	1
ESTACIÓN	PRIMAVERA		PRIMAVERA		PRIMAVERA	PRIMAVERA
MEDICIÓN	1RA	2DA	1RA	2DA	ÚNICA	ÚNICA
RESULTADOS (mg/l)	64	68	47	69	12.0	41.0

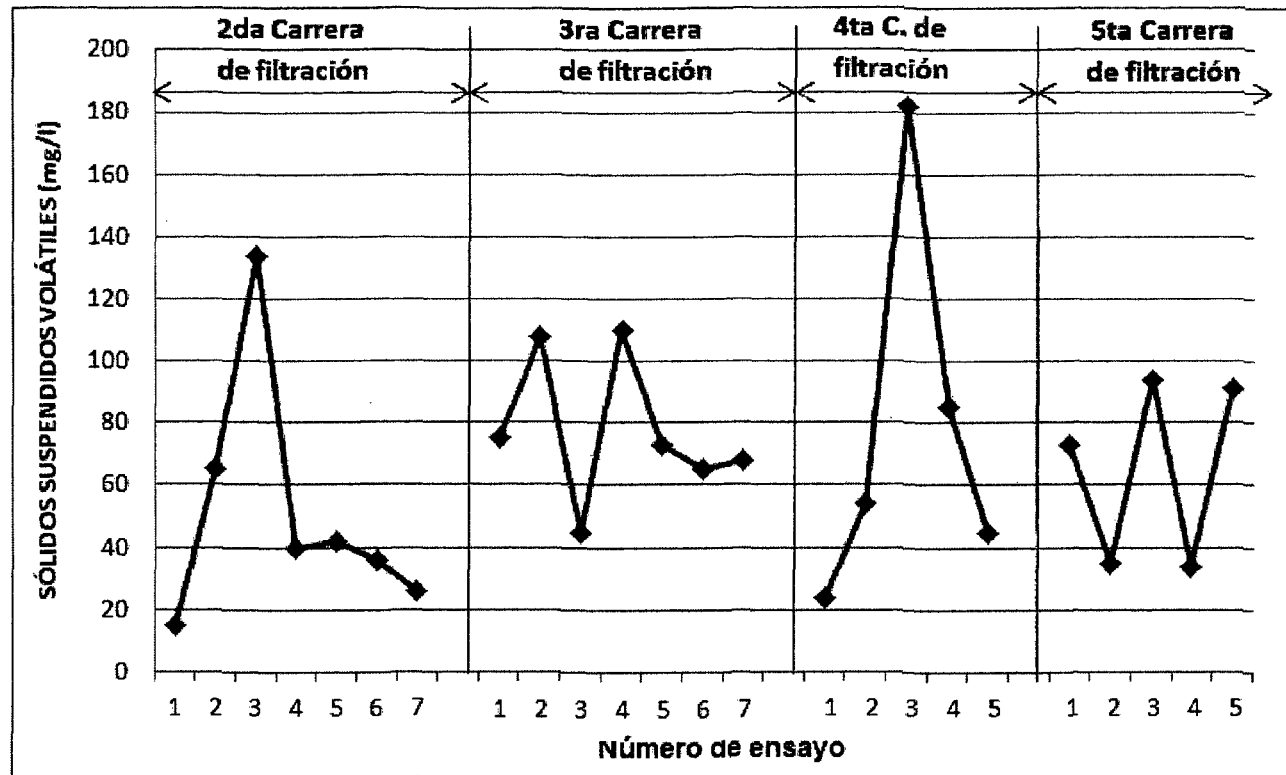


Figura 59: Eficiencias de remoción de los sólidos suspendidos volátiles en el afluente de los filtros de lecho reducido

#### **VI.1.4.4 Resultados de la caracterización de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente de los filtros de arena de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.**

La eficiencia para la remoción de este parámetro se encuentra en el rango de 50% a 80% tanto para el filtro de flujo ascendente y el de flujo descendente. Estos valores de eficiencia no varían al aumentar el periodo de operación entre de lavados.

La mejor eficiencia se logró con el filtro de flujo descendente el cual llegó hasta el 85% de remoción en la novena carrera de filtración y la menor eficiencia fue con el filtro de flujo ascendente el cual fue de 56%.

Tabla 31: Valores de la caracterización de los SSV en el efluente de los filtros de lecho reducido

PARAMETRO	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES DE LOS EFLUENTE					
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO					
CARRERA	1ra CARRERA		2da CARRERA		3ra CARRERA	4ta CARRERA
CAUDAL (l/día)	288		288		288	288
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12		26/11/12 - 20/11/12		03/12/12 - 03/12/12	06/12/12 - 06/12/12
DURACION (dias)	7		5		1	1
ESTACION	PRIMAVERA		PRIMAVERA		PRIMAVERA	PRIMAVERA
MEDICION	1RA	2DA	1RA	2DA	ÚNICA	ÚNICA
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (mg/l)	18	23	20	27	12	15
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (mg/l)	23.7	24.8	23.6	25.8	16	10

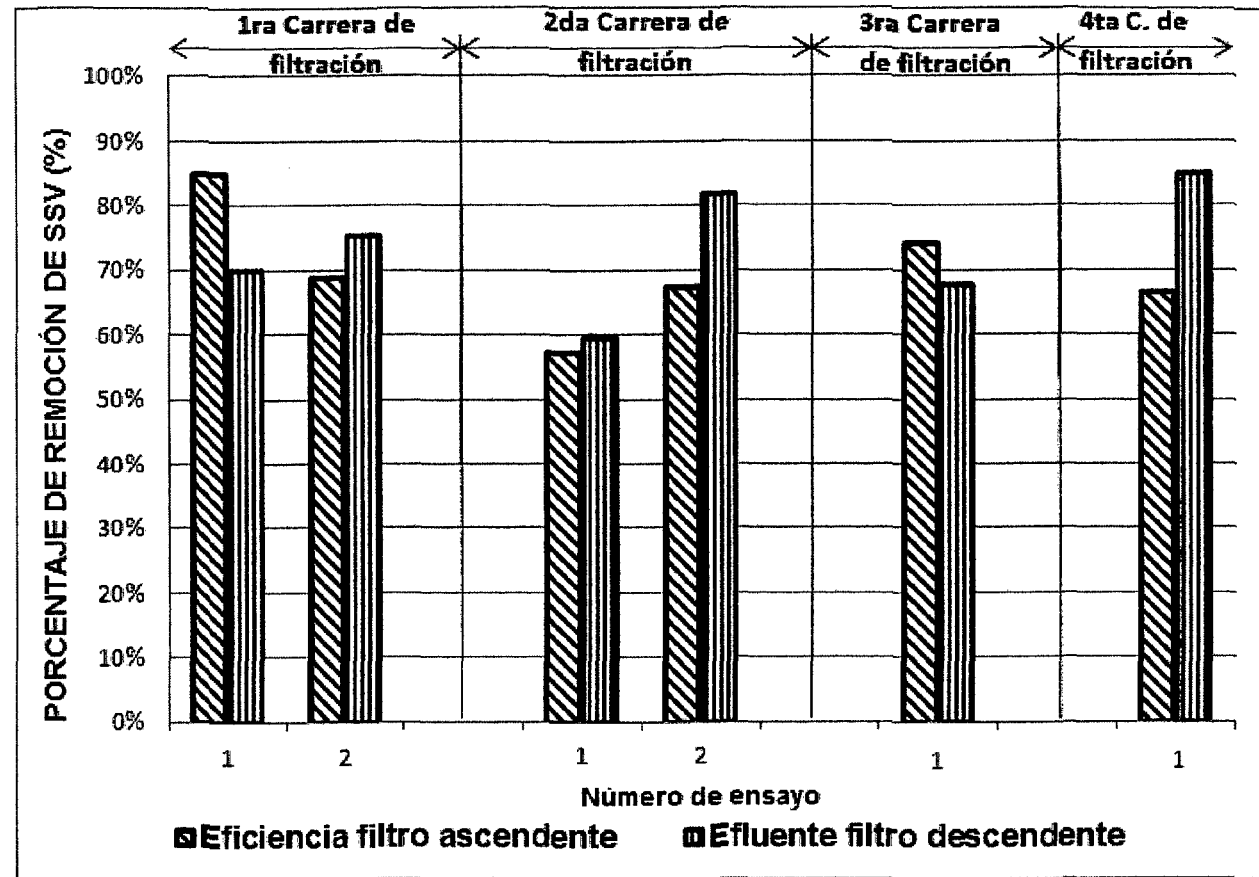


Figura 60: Porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente de los filtros de lecho reducido

## **VI.21 ANÁLISIS BIOLÓGICO**

### **VI.21.1 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO<sub>5</sub>)**

Se midió desde la cuarta carrera de filtración el 03 de setiembre del 2012 hasta la novena carrera de filtración del 06 de diciembre del 2012. Se tomó una medición por semana cuando las carreras de filtración eran de varias semanas, pero cuando las carreras de filtración duraban un solo día se ha tomado solo una medición por carrera de filtración, todas ellas se realizaron entre las 8.00am y las 9.00am.

#### **VI.2.1.1 Resultados de la caracterización de la DBO<sub>5</sub> en el afluente de los filtros de arena de lecho convencional.**

La DBO<sub>5</sub> en el ingreso de los filtros de arena es originada por la carga orgánica proveniente del efluente del reactor UASB, la cual ha tenido variaciones luego de haber pasado 2.2 días en los tanque previos (tanque de bombeo, tanque de almacenamiento y tanque de regulación) a los filtros.

La DBO<sub>5</sub> no ha variado considerablemente a través de las dos carreras de filtración que se realizaron en este tipo de filtros.

La DBO<sub>5</sub> en el afluente de los filtros ha sido como máximo 87 mg/l y como mínimo 38 mg/l.

**Tabla 32: Valores de la caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 05 días en el afluente de los filtros de lecho convencional**

PARAMETRO	DBO <sub>5</sub> DEL AFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACION (días)	16			49			20			23			23		
ESTACION	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS (mg/l)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	38	60.3	87	42	53.3	70

- \*N.M.: No Medido

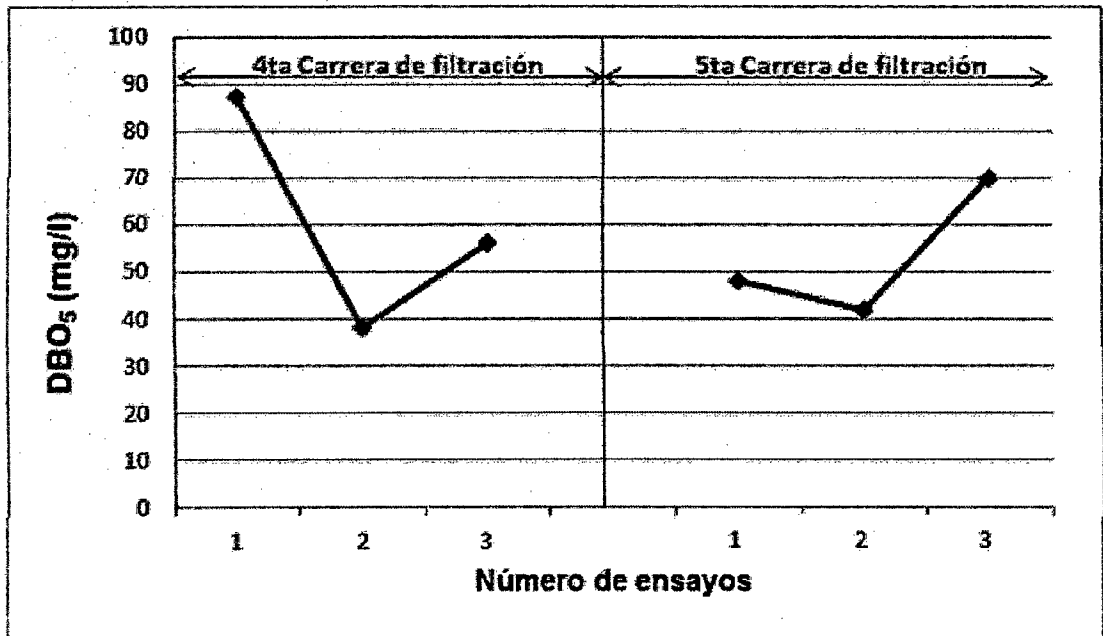


Figura 61: Valores de la DBO<sub>5</sub> en el afluente de los filtros de lecho convencional



### **VI.2.1.2 Resultados de la caracterización de la DBO<sub>5</sub> en el efluente de los filtros de arena de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente.**

Los resultados de la remoción de la DBO<sub>5</sub> variaron a lo largo de cada carrera de filtración ya que en el inicio de las carreras la eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> está cerca del 50% y hacia el final de las carreras la eficiencia estaba entre 60% y 80% tanto para los filtros de flujo ascendente y los filtros de flujo descendente según la Figura 62: Porcentaje de remoción de la DBO<sub>5</sub> en el afluente de los filtros de lecho convencional.

Una de las posibles razones de que ello sucediera es que en el filtro de flujo descendente se formaba una película espesa conformada por microorganismos de algunos centímetros de espesor en su ingreso que era en la parte superior, en cambio en el filtro de flujo ascendente la masa biológica se ubicaba en la parte baja del filtro, y se formaba de forma muy irregular en forma de pequeños cúmulos oscuros y no en forma propiamente de una película.

El filtro de flujo ascendente tiene una eficiencia en remoción de la DBO<sub>5</sub> promedio en su periodo de operación de 54% mientras el filtro de flujo descendente tiene una eficiencia promedio de 60%.

**Tabla 33: Valores de la caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 05 días en el afluente de los filtros de lecho convencional**

PARÁMETRO	DBO <sub>5</sub> DE LOS EFLUENTES														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACIÓN (días)	16			49			20			23			23		
ESTACIÓN	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (mg/l)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	16	27.7	42	16	22.0	29
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (mg/l)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	10	22.7	38	18	22.3	25

- \*N.M.: No Medido

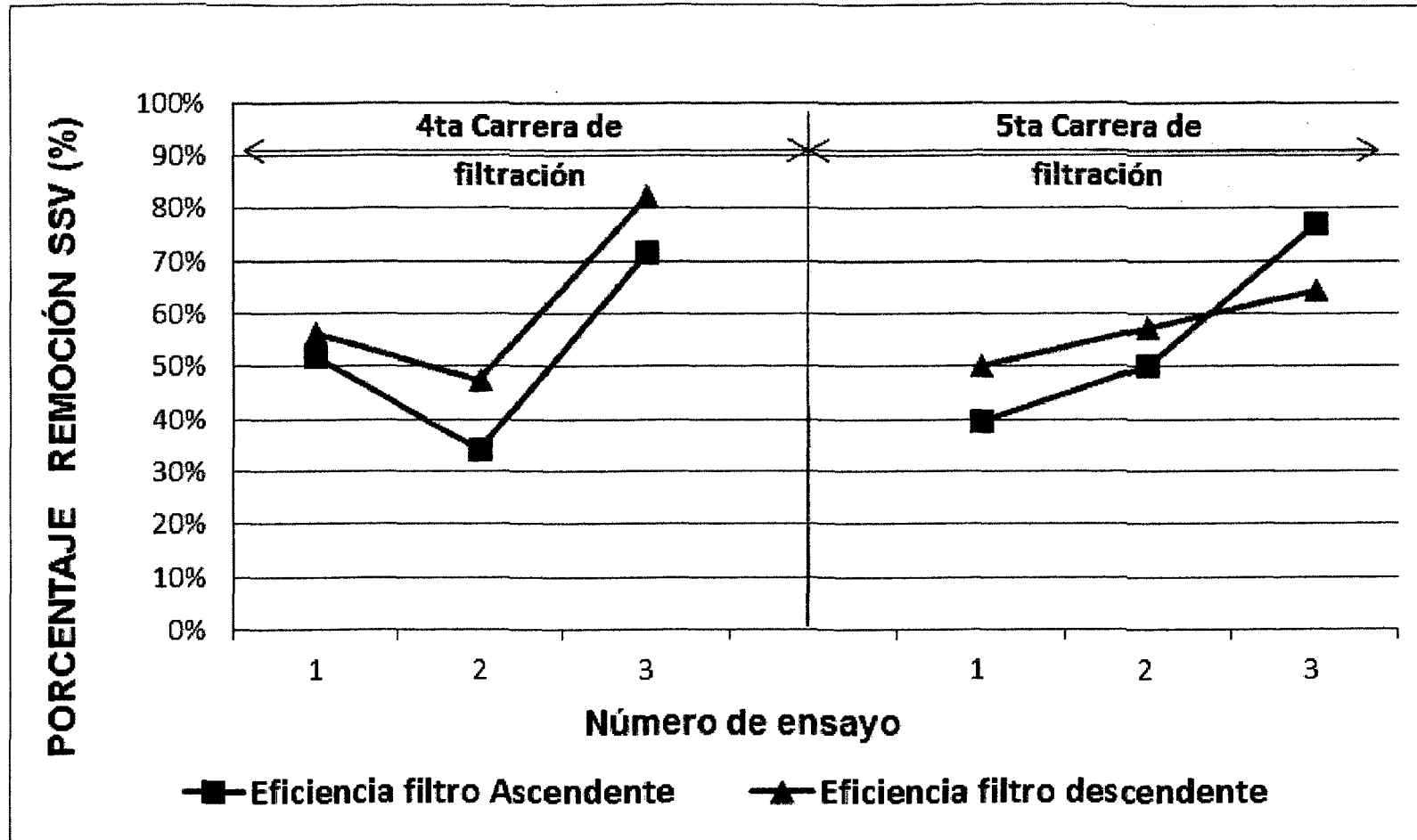


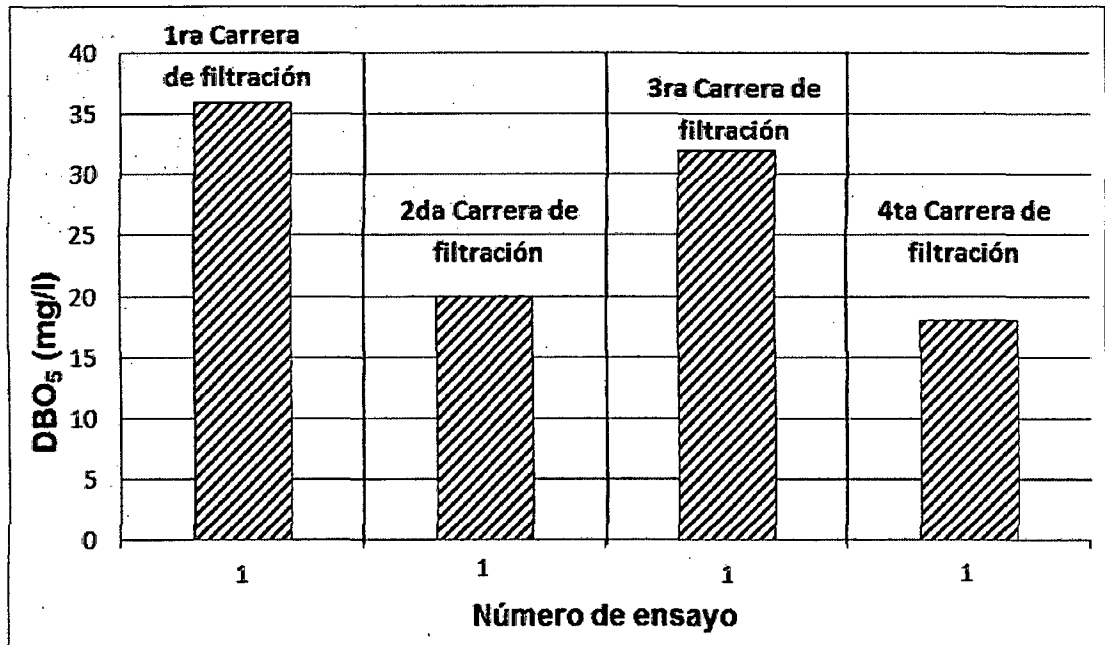
Figura 62: Porcentaje de remoción de la DBO<sub>5</sub> en el afluente de los filtros de lecho convencional

### **VI.2.1.3 Resultados de la caracterización de la DBO<sub>5</sub> en el afluente de los filtros de arena de lecho reducido.**

La DBO<sub>5</sub> presente en el afluente es la arrastrada desde el efluente del reactor UASB el cual ha sido diluido con agua potable en proporciones de "2" a "1" respectivamente, esta mezcla no ha variado a través de las cuatro carreras de filtración del filtro de lecho reducido que se realizaron.

**Tabla 34: Valores de la caracterización de la demanda bioquímica de oxígeno a 05 días en el afluente de los filtros de lecho reducido**

PARÁMETRO	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES DEL AFLUENTE			
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO			
CARRERA	1ra CARRERA	2da CARRERA	3ra CARRERA	4ta CARRERA
CAUDAL (l/día)	288	288	288	288
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12	26/11/12 - 20/11/12	03/12/12 - 03/12/12	06/12/12 - 06/12/12
DURACIÓN (días)	7	5	1	1
ESTACIÓN	PRIMAVERA	PRIMAVERA	PRIMAVERA	PRIMAVERA
MEDICIÓN	ÚNICA	ÚNICA	ÚNICA	ÚNICA
RESULTADOS (mg/l)	36	20	32	18



**Figura 63: Valores de la demanda bioquímica de oxígeno a 05 días en el afluente de los filtros de lecho reducido**

En la Tabla 35: Valores de la caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 05 días en el efluente de los filtros de lecho reducido, se pueden apreciar los variados valores de DBO<sub>5</sub> en el afluente del filtro de lecho reducido siendo su mayor valor en la sexta carrera de filtración cuando su valor fue de 36 mg/l y su menor valor se dio en la novena carrera de filtración cuando fue de 18 mg/l.

#### **VI.2.1.4 Resultados de la caracterización de la DBO<sub>5</sub> en el efluente de los filtros de arena de lecho reducido de flujo ascendente y de flujo descendente.**

La remoción de la DBO<sub>5</sub> para los filtros de lecho reducido es significativamente menor con respecto a los filtros de lecho convencional, eso si comparamos el periodo de operación de los filtros de lecho convencional, pero si comparamos con su periodo de arranque es bastante similar.

El filtro de flujo ascendente tiene una eficiencia en remoción de la DBO<sub>5</sub> promedio 44% mientras el filtro de flujo descendente tiene una eficiencia promedio de 47% según las cuatro mediciones realizadas.

Según Tabla 35 se aprecia que en las 02 primeras carreras y en la cuarta carrea de filtración, el filtro de flujo ascendente logró obtener los valores más bajos de DBO<sub>5</sub> en el efluente comparado con el filtro de flujo descendente.

**Tabla 35: Valores de la caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 05 días en el efluente de los filtros de lecho reducido**

PARÁMETRO	D.B.O(5) DE LOS EFLUENTES			
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO			
CARRERA	1ra CARRERA	2da CARRERA	3ra CARRERA	4ta CARRERA
CAUDAL (l/día)	288	288	288	288
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12	26/11/12 - 20/11/12	03/12/12 - 03/12/12	06/12/12 - 06/12/12
DURACIÓN (días)	7	5	1	1
ESTACIÓN	PRIMAVERA	PRIMAVERA	PRIMAVERA	PRIMAVERA
MEDICIÓN	ÚNICA	ÚNICA	ÚNICA	ÚNICA
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (mg/l)	23	12	14	10
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (mg/l)	20	9	22	8



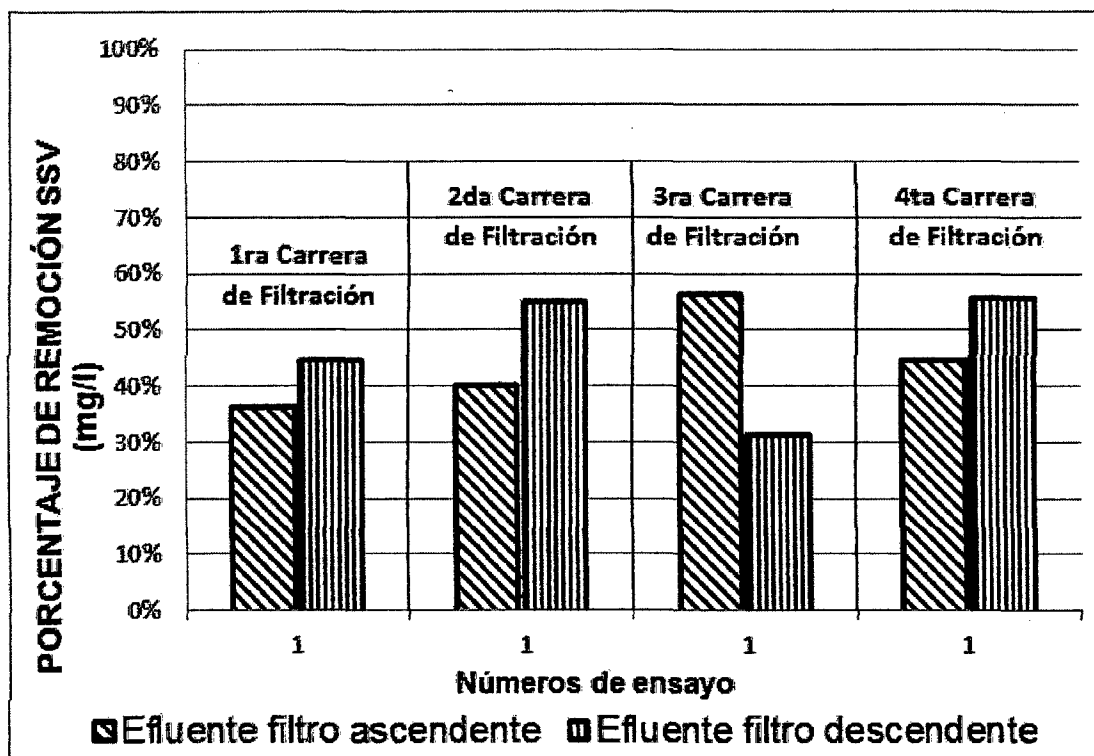


Figura 64: Eficiencia en remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a 05 días en el efluente de los filtros de lecho reducido

## VI.22 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

### VI.22.1 COLIFORMES TERMOTOLERANTES

Se midió desde la tercera carrera de filtración el 06 de agosto del 2012 hasta la novena carrera de filtración del 06 de diciembre del 2012. Se tomó una medición por semana cuando las carreras de filtración eran de varias semanas, pero cuando las *carreras de filtración duraban un solo día se ha tomado solo una medición por carrera de filtración*, todas ellas se realizaron en las mañanas.

#### **VI.3.1.1 Resultados de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de arena de lecho convencional.**

Los *Coliformes Termotolerantes en el ingreso de los filtros de arena de lecho convencional* provienen del efluente del reactor UASB, la cual ha tenido variaciones luego de haber pasado 2.2 días en los tanque previos (tanque de bombeo, tanque de almacenamiento y tanque de regulación) a los filtros.

Los coliformes termotolerantes variaron significativamente en el afluente de los filtros de arena su valor máximo fue de 282 000 UFC/100ml y su valor mínimo 5400 UFC/100ml.

**Tabla 36: Valores de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de lecho convencional**

PARÁMETRO	COLIFORMES TERMOTOLERANTES DEL AFLUENTE														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACIÓN (días)	16			49			20			23			23		
ESTACION	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS (UFC/100ml)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	5.40x10 <sup>4</sup>	6.35x10 <sup>4</sup>	7.30x10 <sup>4</sup>	1.04x10 <sup>5</sup>	2.39x10 <sup>5</sup>	4.48x10 <sup>5</sup>	2.40x10 <sup>4</sup>	1.27x10 <sup>5</sup>	2.82x10 <sup>5</sup>

- \*N.M.: No Medido

### **VI.3.1.2 Resultados de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el efluente de los filtros de arena de lecho convencional de flujo ascendente y de flujo descendente.**

Los resultados de la remoción de los coliformes termotolerantes para este tipo de lecho de arena depende mucho de la cantidad de coliformes en el ingreso, el cual es muy variable, ya que según ello se observa que la remoción de la turbiedad es mayor cuando mayor es la cantidad de coliformes que hay en el ingreso.

Según la Figura VI – 40 se puede apreciar que la remoción de los coliformes termotolerantes estuvo en el rango de 50% y 80%, cuando el afluente mostraba una concentración de 100 000 UFC/100ml, y cuando la concentración de coliformes termotolerantes fue inferior a dicha cantidad la remoción fue menor al 50%.

Se puede apreciar los valores promedios de los coliformes termotolerantes en la simulación de un efluente secundario está en el orden de 5 unidades logarítmicas y la remoción de este parámetro en este tipo de filtros es menor a una unidad logarítmica.

**Tabla 37: Valores de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el efluente de los filtros de lecho convencional**

PARAMETRO	COLIFORMES TERMOTOLERANTES DE LOS EFLUENTES														
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LÉCHO CONVENCIONAL														
CARRERA	1ra CARRERA			2da CARRERA			3ra CARRERA			4ta CARRERA			5ta CARRERA		
CAUDAL (l/día)	288			288			288			288			288		
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12			14/06/12 - 01/08/12			03/08/12 - 22/08/12			31/08/12 - 22/09/12			12/10/12 - 03/11/12		
DURACIÓN (días)	16			49			20			23			23		
ESTACIÓN	INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			INVIERNO			PRIMAVERA		
RANGO	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (UFC/100ml)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	4.10E+04	4.10E+04	4.10E+04	3.70E+04	6.58E+04	8.80E+04	1.78E+04	4.51E+04	9.14E+04
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (UFC/100ml)	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	*N.M.	4.52E+04	1.05E+05	1.65E+05	3.30E+04	3.87E+04	4.43E+04	4.30E+03	4.62E+04	1.22E+05

- \*N.M.: No Medido

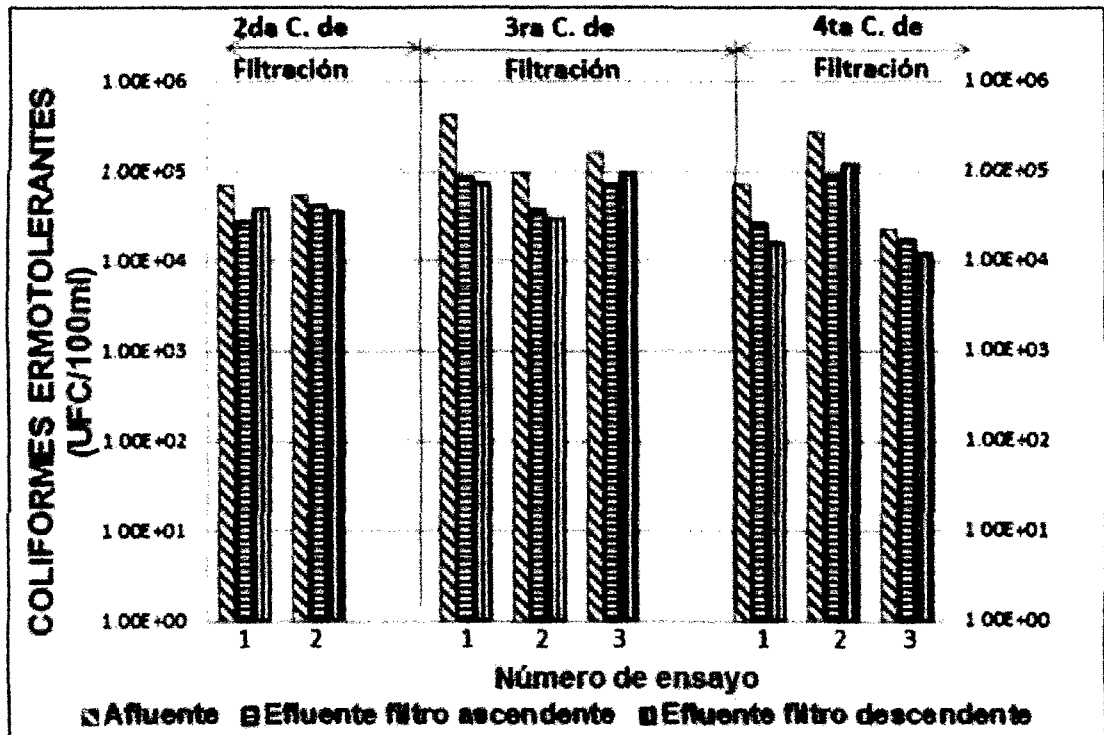


Figura 65: Comparación de valores de los coliformes termotolerantes en el afluente y los efluentes de los filtros de lecho convencional

### **VI.3.1.3 Resultados de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de arena de lecho reducido.**

Los coliformes termotolerantes en el ingreso de los filtros de arena de lecho reducido provienen del efluente del reactor UASB, la cual ha tenido variaciones luego de haber pasado 2.2 días en las cámaras antecesoras a los filtros, y por haber sufrido un proceso desinfección con cloro al entrar en contacto con el agua potable en las diluciones.

Los coliformes termotolerantes variaron significativamente en el afluente de los filtros de arena su valor máximo fue de 17 500 UFC/100ml y su valor mínimo 135 000 UFC/100ml.

Tabla 38: Valores de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de lecho reducido

PARÁMETRO	COLIFORMES TERMOTOLERANTES DEL AFLUENTE					
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO					
CARRERA	1ra CARRERA		2da CARRERA		3ra CARRERA	4ta CARRERA
CAUDAL (l/día)	288		288		288	288
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12		26/11/12 - 20/11/12		03/12/12 - 03/12/12	06/12/12 - 06/12/12
DURACIÓN (días)	7		5		1	1
ESTACIÓN	PRIMAVERA		PRIMAVERA		PRIMAVERA	PRIMAVERA
MEDICIÓN	1RA	2DA	1RA	2DA	ÚNICA	ÚNICA
RESULTADOS (UFC/100ml)	3.70x10 <sup>4</sup>	1.81x10 <sup>4</sup>	1.35x10 <sup>5</sup>	6.70x10 <sup>4</sup>	1.75x10 <sup>4</sup>	4.10x10 <sup>4</sup>

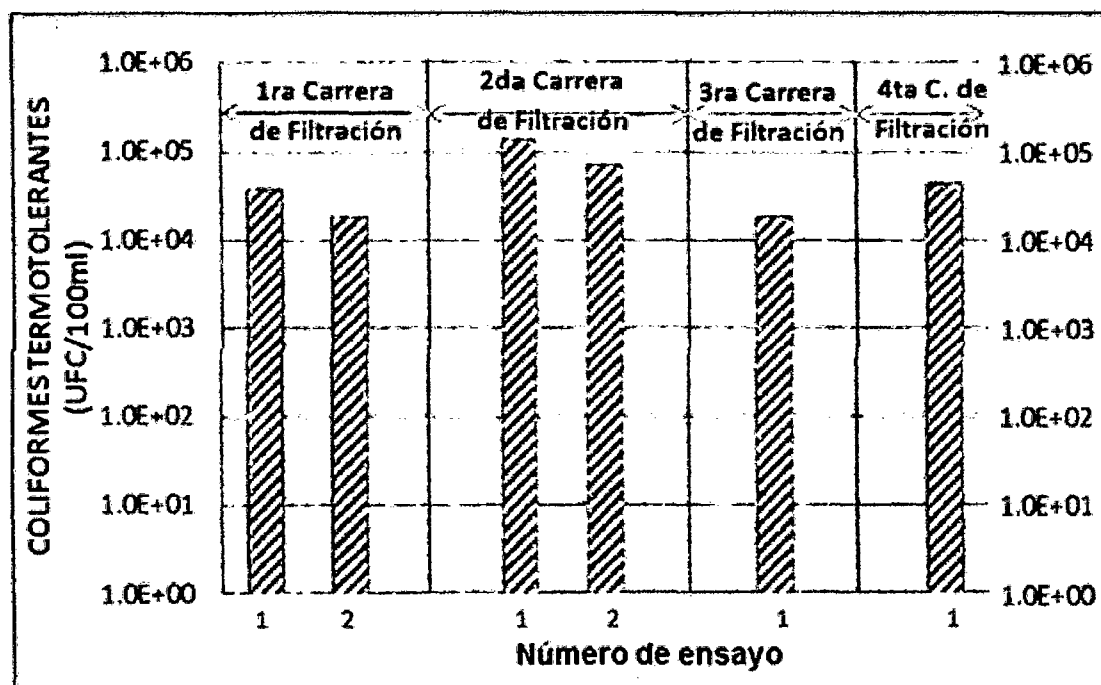


Figura 66: Valores de los coliformes termotolerantes en el afluente de los filtros de lecho convencional



#### **VI.3.1.4 Resultados de la caracterización de coliformes termotolerantes en el efluente de los filtros de arena de lecho reducido de flujo ascendente y flujo descendente.**

Los resultados muestran que los filtros remueven una unidad logarítmica de coliformes termotolerantes en promedio. Este tipo de lecho de arena muestran que el filtro de flujo ascendente presenta mejor eficiencia que los filtros de flujo descendente al tener una eficiencia promedio de 91% versus la eficiencia de 84% respectivamente (ver Figura 67)

Si observamos solo las dos últimas carreras de filtración cuya duración es de un día, vemos que la remoción de los coliformes termotolerantes es de alrededor del 90%, ello debido a que en este tipo de filtros no se espera a que se formen una película biológica, por ende los mecanismos preponderantes en estos procesos son físicos y no biológicos.

**Tabla 39: Valores de la caracterización de los coliformes termotolerantes en el efluente de los filtros de lecho reducido**

PARÁMETRO	COLIFORMES TERMOTOLERANTES DE LOS EFLUENTES					
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO REDUCIDO					
CARRERA	1ra CARRERA		2da CARRERA		3ra CARRERA	4ta CARRERA
CAUDAL (l/día)	288		288		288	288
PERIODO	15/11/12 - 21/11/12		26/11/12 - 20/11/12		03/12/12 - 03/12/12	06/12/12 - 06/12/12
DURACION (días)	7		5		1	1
ESTACIÓN	PRIMAVERA		PRIMAVERA		PRIMAVERA	PRIMAVERA
MEDICIÓN	1RA	2DA	1RA	2DA	ÚNICA	ÚNICA
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE	6.50x10 <sup>3</sup>	2.20x10 <sup>3</sup>	1.04x10 <sup>4</sup>	1.50x10 <sup>3</sup>	2.45x10 <sup>3</sup>	2.25x10 <sup>3</sup>

-\*N.M.: No Medido

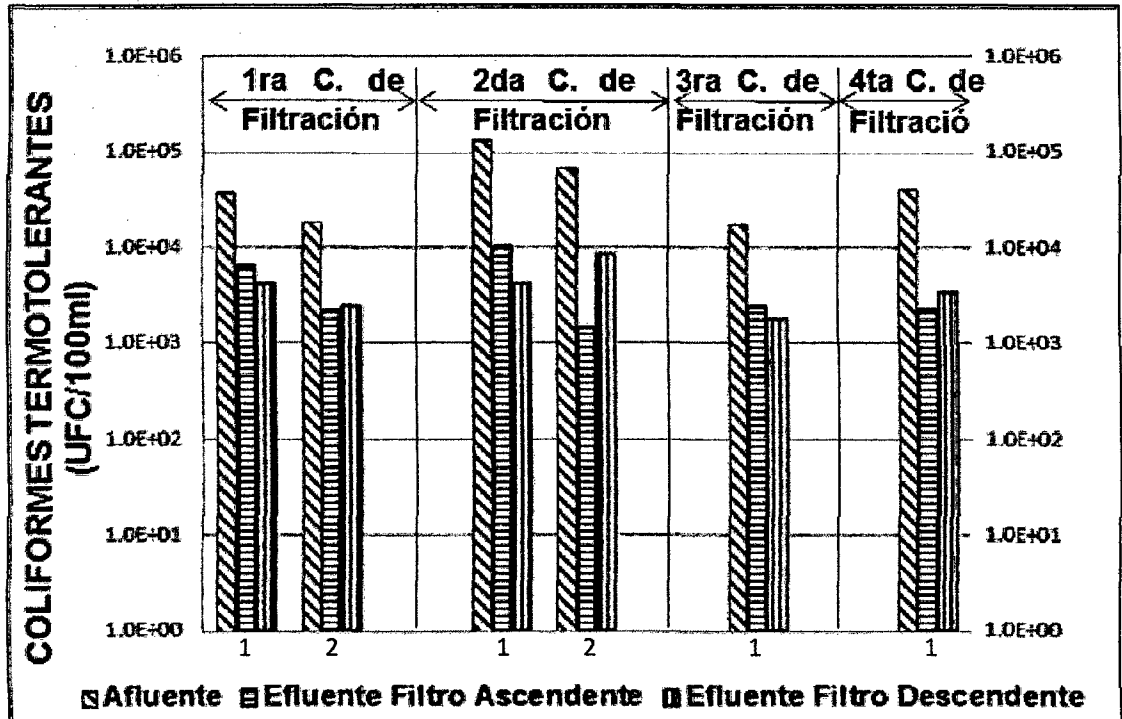


Figura 67: Comparación de valores de los coliformes termotolerantes en el afluente y los efluentes de los filtros de lecho reducido

## **VI.22.2 HUEVOS DE HELMINTOS**

Se midió desde la tercera carrera de filtración el 06 de agosto del 2012 hasta la quinta carrera de filtración del 03 de noviembre del 2012, se tomaron tres mediciones de este parámetro, todas ellas se realizaron en las mañanas.

### **VI.3.1.1 Resultados de la caracterización de huevos de Helmintos en el afluente de los filtros de arena de Lecho convencional.**

El número de huevos de helmintos en el ingreso de cada filtro de arena fue regularmente constante (100 huevos/l), sin embargo la cantidad de huevos de helmintos inoculados en el tanque de regulación fue la misma en las tres mediciones realizadas (alrededor de 625 huevos/l de afluente). Probablemente se produjo una sedimentación de los huevos en el tanque de regulación por ello la diferencia entre el número de huevos de helmintos inoculados y los que ingresaron a cada filtro. (Ver Tabla 40).

**Tabla 40: Valores de la caracterización de los huevos de helmintos en el afluente de los filtros de lecho convencional**

PARAMETRO	HUEVOS DE HELMINTOS DEL AFLUENTE				
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL				
CARRERA	1ra CARRERA	2da CARRERA	3ra CARRERA	4ta CARRERA	5ta CARRERA
CAUDAL (l/día)	288	288	288	288	288
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12	14/06/12 - 01/08/12	03/08/12 - 22/08/12	31/08/12 - 22/09/12	12/10/12 - 03/11/12
DURACION (días)	16	49	20	23	23
ESTACION	INVIERNO	INVIERNO	INVIERNO	INVIERNO	PRIMAVERA
RESULTADOS (Huevos Helmintos/100ml)	*N.M.	*N.M.	10	5	9

- \*N.M.: No Medido

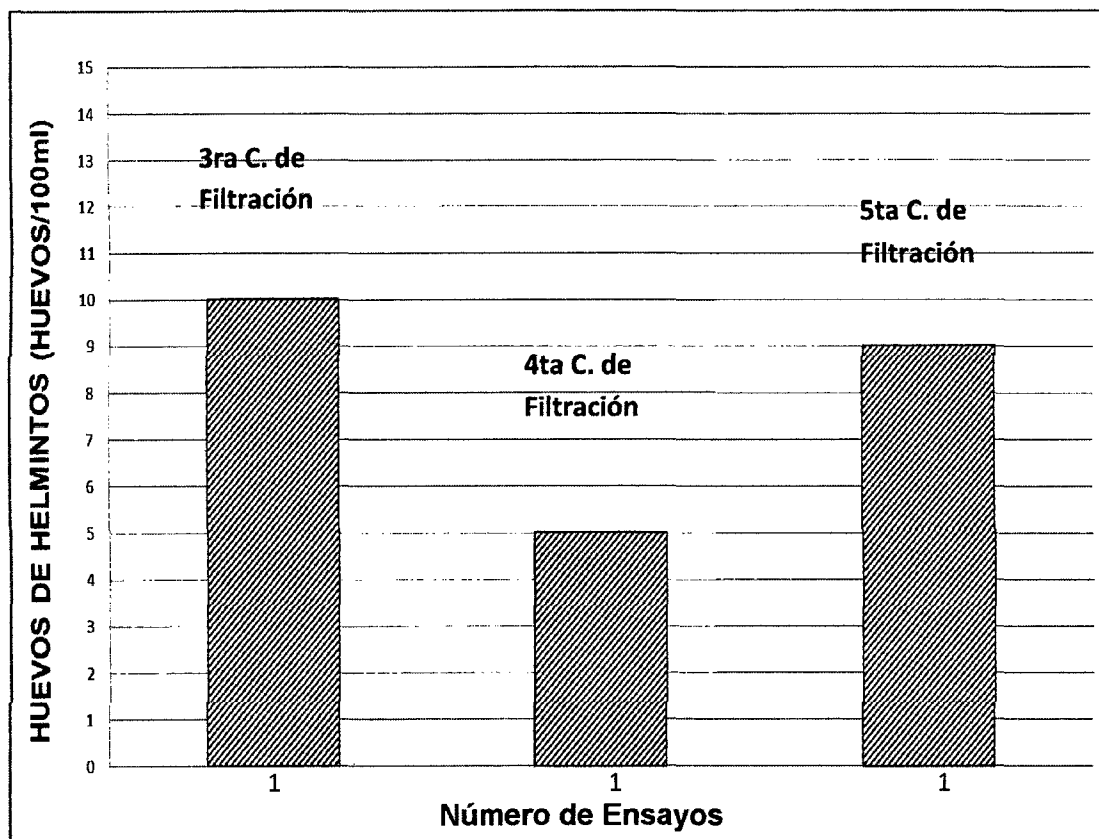


Figura 68: Valores de huevos de helmintos en el afluente de los filtros de lecho convencional

### **VI.3.1.2 Resultados de la caracterización de huevos de helmintos en el efluente de los filtros de arena de lecho convencional de flujo ascendente y flujo descendente.**

Según la Tabla 41: Valores de la caracterización de los huevos de helmintos en el efluente de los filtros de lecho convencional, los resultados muestran que los filtros de arena remueven entre un 60% y un 80% la cantidad de huevos de helmintos presentes en el afluente de los filtros de arena. No siendo concluyente cuál de los dos filtros tiene el mayor porcentaje de remoción ya que hay ocasiones en que cada uno ha tenido mayor porcentaje de remoción que el otro.

Además el resultado de la remoción pudo haber estado distorsionado por la presencia de otros microorganismos como algas, artrópodos, nematodos, esporas y protozoarios (vorticella), los cuales dificultan el correcto conteo de los huevos de helmintos estudiados.

**Tabla 41: Valores de la caracterización de los huevos de helmintos en el efluente de los filtros de lecho convencional**

PARAMETRO	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES DE LOS EFLUENTES				
TIPO DE FILTRO	FILTRO DE LECHO CONVENCIONAL				
CARRERA	1ra CARRERA	2da CARRERA	3ra CARRERA	4ta CARRERA	5ta CARRERA
CAUDAL (l/día)	288	288	288	288	288
PERIODO	29/05/12 - 13/06/12	14/06/12 - 01/08/12	03/08/12 - 22/08/12	31/08/12 - 22/09/12	12/10/12 - 03/11/12
DURACION (días)	16	49	20	23	23
ESTACION	INVIERNO	INVIERNO	INVIERNO	INVIERNO	PRIMAVERA
RESULTADOS FILTRO FLUJO ASCENDENTE (Huevos Helmintos/100ml)	*N.M.	*N.M.	4	2	3
RESULTADOS FILTRO FLUJO DESCENDENTE (Huevos Helmintos/100ml)	*N.M.	*N.M.	2	1	4

- \*N.M.: No Medido



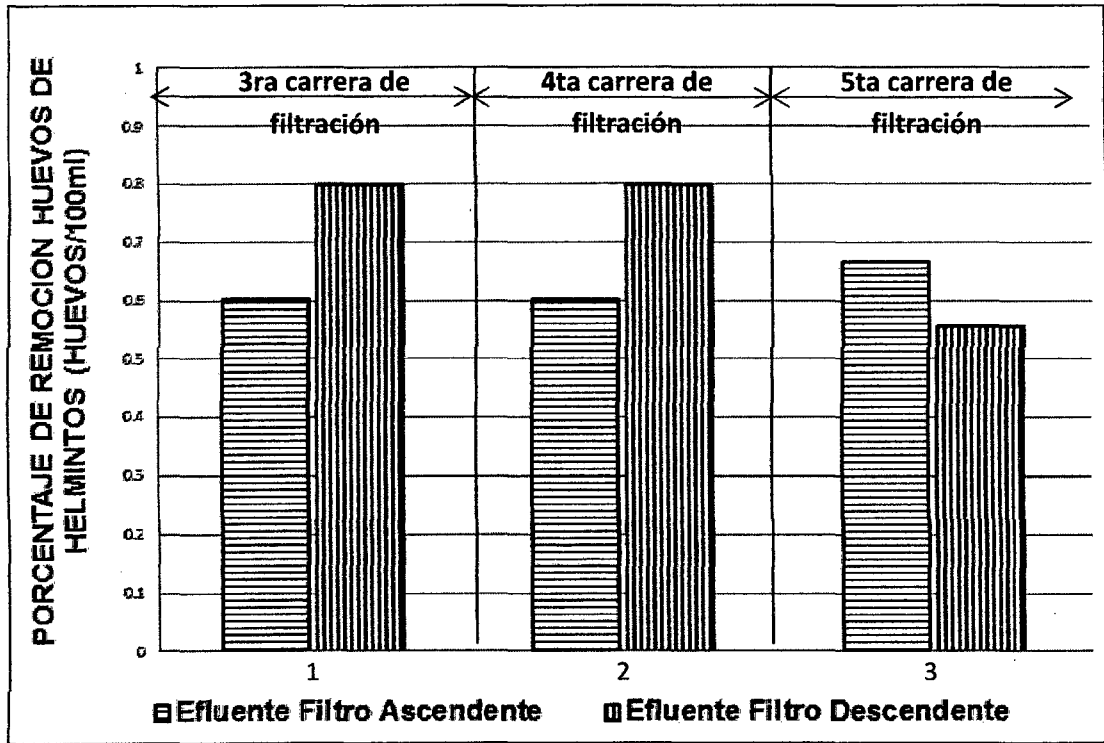


Figura 69: Eficiencia en remoción de huevos de helmintos en el efluente de los filtros de lecho convencional

## CAPITULO VII: ESTIMACIÓN DE COSTOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO

En base a los valores de los parámetros de diseño recolectados se estimó un costo unitario por tratamiento con filtros de arena en condiciones normales y con precios referenciales a fecha de Enero del 2014. A continuación se desarrolla el cálculo:

### 1) Pre-dimensionamiento del filtro

Tasa Seleccionada =	120.00 m <sup>3</sup> /d
Caudal Afluyente =	10.00 l/s
Caudal Afluyente =	864.00 m <sup>3</sup> /d
Area Teórica =	7.20 m <sup>2</sup>

<b>Dimensiones de Filtro</b>	
Largo (L) =	4.0 m
Ancho (B) =	2.0 m
Area Real =	8.0 m

Borde Libre (BL) =	1.00 m
Altura agua (H <sub>a</sub> ) =	1.50 m
H arena fina (H <sub>af</sub> ) =	0.65 m
H arena gruesa (H <sub>ag</sub> ) =	0.25 m
H grava (H <sub>g</sub> ) =	0.50 m
H soporte (H <sub>s</sub> ) =	0.25 m
H falso fondo (H <sub>f</sub> ) =	0.50 m
Espesor de fondo (e <sub>LF</sub> ) =	0.15 m
<b>H Total =</b>	<b>4.80 m</b>

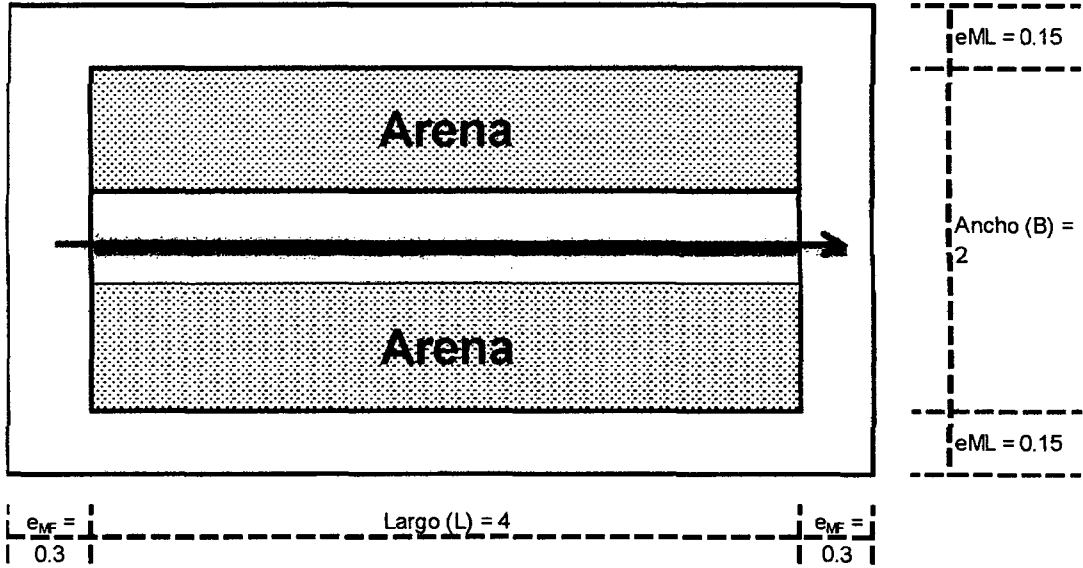
<b>Espesores de Muros</b>	
e <sub>ML</sub> =	0.15 m
e <sub>MF</sub> =	0.30 m

Como se puede apreciar se ha considerado los valores de diseño recomendados en la literatura revisada y utilizada en la presente investigación.

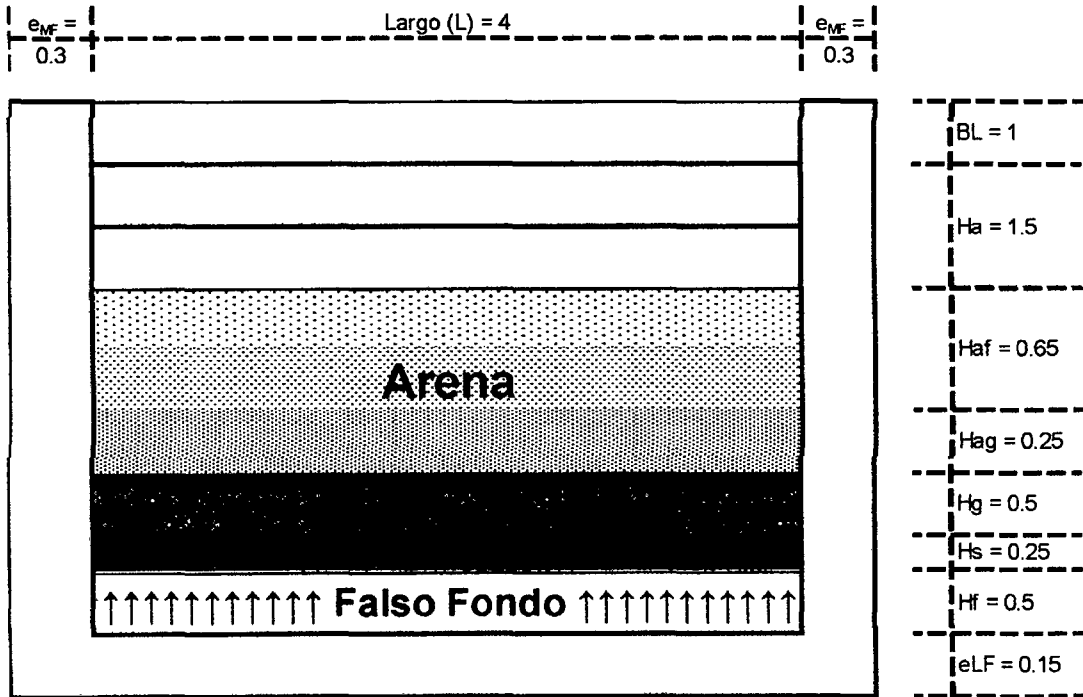
Asimismo se asumieron valores para el espesor de los muros y losas, a fin de tener los tamaños más apropiados para la determinación del metrado del filtro.

A continuación se muestra en un esquema las dimensiones obtenidas en el diseño del filtro.

**Esquema de Filtro de Arena**  
(medidas en metros)



**Vista de Perfil**



## 2) COSTOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO

## A) Presupuesto de Obra

Fecha: Enero 2014

Presupuesto de Obra											
Ítem	Partida	Nº	factor	L	B	H	e	unidad	Metrado	P. Unit. \$/.	Parcial \$/.
1	<b>Obras Civiles</b>										
1.1	Trazo y replanteo	1.00	1.00	4.50	2.50	-	-	m2	11.25	44.44	500.00
1.2	Excavación	1.00	1.00	4.00	2.00	4.80	-	m3	38.40	27.44	1,053.70
1.2	Eliminación de desmonte	1.00	1.20	4.00	2.00	4.80	-	m3	46.08	1.70	78.34
1.3	Refine y Nivelación	1.00	1.00	4.00	2.00	-	-	m2	8.00	71.26	570.08
1.4	Concreto Fc = 280 kg/m <sup>3</sup>							m3	19.08	488.17	9,314.28
	Muros Laterales	2.00	1.50	4.00	-	4.80	0.15	m3	8.64		
	Muros Frontales	2.00	1.50	-	2.00	4.80	0.30	m3	8.64		
	Losa Fondo	1.00	1.50	4.00	2.00	-	0.15	m3	1.80		
1.4	Encofrado y Desencofrado							m2	124.04	65.21	8,088.65
	Muros Laterales exteriores	2.00	1.00	4.60	-	4.80	-	m2	44.16		
	Muros Frontales exteriores	2.00	1.00	-	2.30	4.80	-	m2	22.08		
	Muros Laterales interiores	2.00	1.00	4.00	-	4.15	-	m2	33.20		
	Muros Frontales interiores	2.00	1.00	-	2.00	4.15	-	m2	16.60		
	Losa Fondo	1.00	1.00	4.00	2.00	-	-	m2	8.00		
1.5	Acero							kg	2,062.80	4.22	8,705.02
	Muros Laterales	1.00	110.00	Vol Concreto =		8.64	-	kg	950.40		
	Muros Frontales	1.00	110.00	Vol Concreto =		8.64	-	kg	950.40		
	Losa Fondo	1.00	90.00	Vol Concreto =		1.80	-	kg	162.00		
1.4	Tarrajeo							m2	57.80	28.50	1,647.30
	Muros Laterales interiores	2.00	1.00	4.00	-	4.15	-	m2	33.20		
	Muros Frontales interiores	2.00	1.00	-	2.00	4.15	-	m2	16.60		
	Losa Fondo	1.00	1.00	4.00	2.00	-	-	m2	8.00		
1.6	Medio Filtrante										
	Arena Fina	1.00	1.00	4.00	2.00	0.65	-	m3	5.20	36.97	192.24
	Arena Gruesa	1.00	1.00	4.00	2.00	0.25	-	m3	2.00	43.94	87.88
	Grava canto rodado	1.00	1.00	4.00	2.00	0.50	-	m3	4.00	252.10	1,008.40
2	Tubería PVC-U DN 200							m	36.00	25.74	926.64
	Tub. Entrada	1.00	1.50	4.00	-	-	-	m	6.00		
	Tub. Distribución	2.00	1.50	4.00	-	-	-	m	12.00		
	Tub. Salida	1.00	1.50	4.00	-	-	-	m	6.00		
	Tub Lavado	1.00	1.50	4.00	-	-	-	m	6.00		
	Tub Vaciado	1.00	1.50	4.00	-	-	-	m	6.00		
3	Equipamiento Hidráulico							und	4.00	16.20	64.80
	Valv. Comp. Entrada	1.00	1.00	-	-	-	-	und	1.00		
	Valv. Comp. Salida	1.00	1.00	-	-	-	-	und	1.00		
	Valv. Comp. Vaciado	1.00	1.00	-	-	-	-	und	1.00		
	Valv. Com. Lavado	1.00	1.00	-	-	-	-	und	1.00		
<b>(A) Costo Directo Obra (\$/.) =</b>											<b>32,237.32</b>

B) Costos de Operación y Mantenimiento		Fecha: Enero 2014									
		Operación y Mantenimiento									
Ítem	Descripción	Nº	factor	Meses			und	Metrado	P. Unit S/.	Parcial S/.	
1	Operador	2.00	0.10	12.00	-	-	glb	2.40	1,500.00	3,600.00	
2	Materiales y equipos O&M	1.00	0.10	12.00	-	-	glb	1.20	1,000.00	1,200.00	
3	Monitoreo y Análisis Laboratorio	1.00	1.00	12.00	-	-	glb	12.00	100.00	1,200.00	
4	Reposición y cambio tub, valv, etc.	1.00	0.05	12.00	-	-	glb	0.60	991.44	594.86	
<b>(B) Costo Operación Y Mant.</b>										<b>6,594.86</b>	

### (C) Costo unitario de tratamiento

Del Análisis de costos, obtenemos el siguiente resumen:

**(A) Costo Directo Obra (S/.) = 32,237.32**

Debido a que la inversión se realiza para el periodo de vida útil de la PTAR, la estructura y la capacidad de funcionamiento sufre depreciación del activo. Por lo tanto se dividió el monto total de la inversión entre este un periodo de 10 años para obtener la depreciación anual, considerando un valor residual = 0.

**Depreciación (S/./año) = 3,223.73**

**(B) Costo Operación Y Mant. (S/.) = 6,594.86**

**Total de Costos (S/./año) = 9,818.60**

**Caudal a tratar (m<sup>3</sup>/año) = 315,360.00**

**Costo Unit. Trat. Filtros Arena (S/./m<sup>3</sup>) = 0.031**

Por lo tanto el costo de tratamiento con filtros de arena tiene un costo de 0.031 soles. Cabe mencionar que el costo considera la depreciación del componente y los costos de operación y mantenimiento., de manera referencial.

## CAPITULO VIII: DISCUSIÓN

---

- Según la bibliografía los filtros de arena de flujo intermitente como en nuestro experimento tienen un periodo de arranque, un periodo de operación y luego un breve periodo de lavado. Y las divisiones entre cada periodo dependen, de la capacidad hidráulica del filtro, las características del agua a tratar, la granulometría del filtro, etc., pero en forma práctica de la eficiencia de la remoción de la turbiedad. Según ello el filtro al presentar una disminución notable en su eficiencia en remoción de turbiedad se procede a comenzar su ciclo de lavado pero en ninguna carrera de filtración se puede apreciar una diferencia entre el periodo de arranque y el periodo de operación ya que no hay diferencia notable en su curva de eficiencia en remoción de turbiedad. Ello solo se puede apreciar con los datos de la remoción de la  $DBO_5$ .
- Los filtros de arena de lecho convencional en esta investigación han mostrado menor eficiencia de la que se preveía en un principio en casi todos los parámetros excepto de la  $DBO_5$ , ello nos diría a simple vista que el tratamiento por filtración de arena con lecho convencional no es recomendable para que se realice a escala real, lo cual no es realmente cierto, porque analizando sus ventajas como la de tener un periodo entre lavados prolongado, poca área de trabajo, es tentativo poder utilizar una batería de estos filtros en serie para poder lograr cumplir con los reglamentos requeridos, siempre y cuando se hagan las pruebas a escala pilotos necesarias.

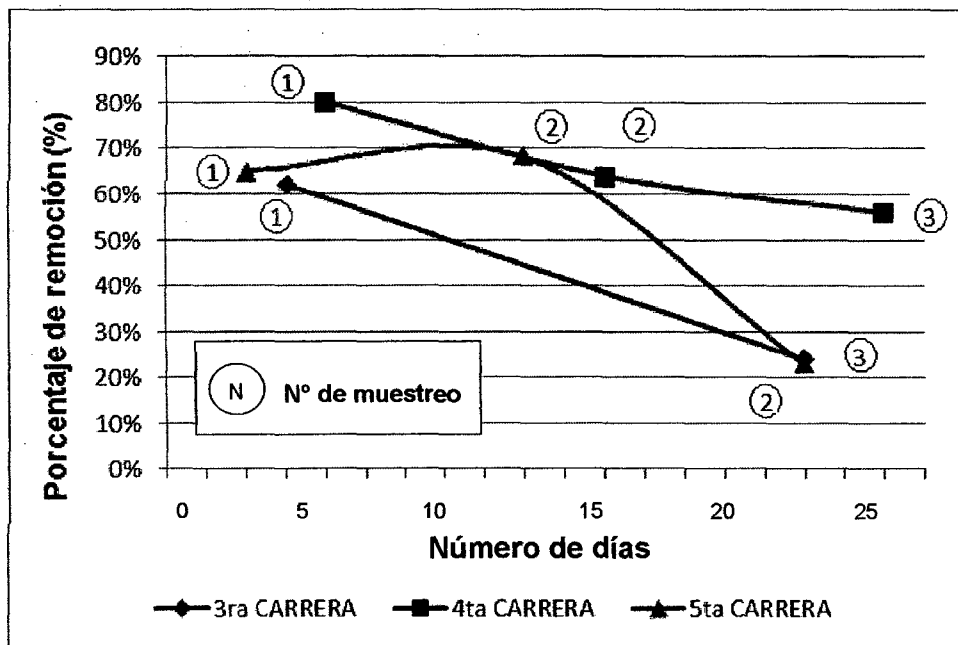


Figura 70.- Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes en el filtro de lecho convencional y de flujo ascendente versus días de operación del filtro

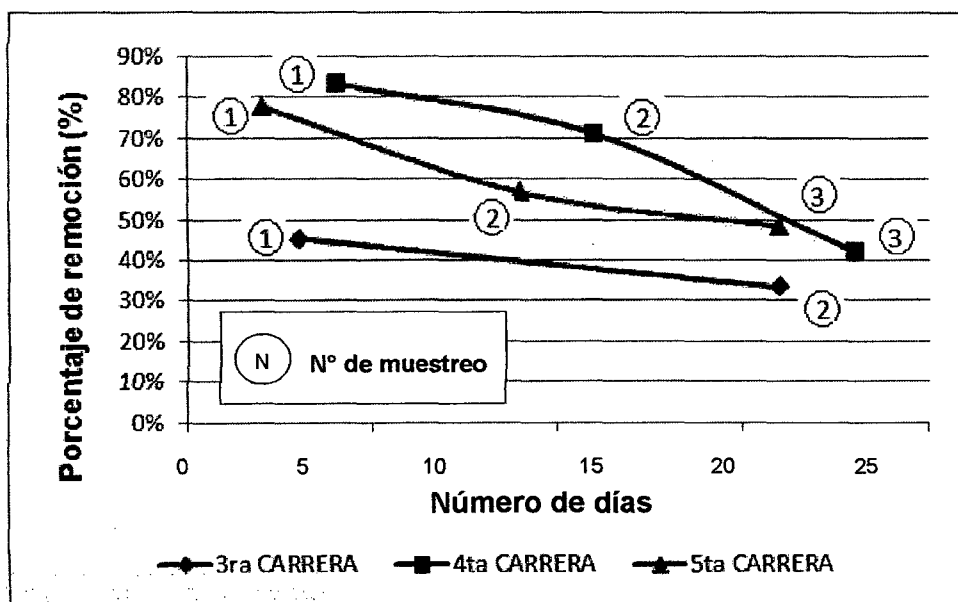


Figura 71.- Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes en el filtro de lecho convencional y de flujo descendente versus días de operación del filtro.

- Las pruebas demuestran que los filtros de lecho reducido de flujo ascendente y descendente con una tasa han mostrado una eficiencia en remoción de turbiedad para un caudal de 288 l/día y con un tiempo de retención de 11.50 minutos de entre 60 y 80% lo que estimula a poder utilizarla a una escala real. Basándose en la operación misma de los filtros hay una ventaja destajada en el filtro de flujo descendente y es que este requiere menos volumen de agua para el lavado por ser un lavado a en contra del sentido de las carreras de filtración.
- Los filtros de arena traen muchas ventajas: un solo operador que le dedique una pequeña parte de su tiempo, costo eléctrico nulo si las condiciones hidráulicas son las adecuadas, poco área para su operación, materiales de fácil acceso y de costos mínimos.
- Una forma bastante común de mejorar el tratamiento por filtración es la adición de un sistema de tratamiento de coagulación – floculación previa a los filtros de arena, pero ello demandaría costos bastantes mayores que los propios filtros, tanto en construcción, operación, equipamiento, energía eléctrica, químicos, etc. por lo que esta alternativa no es recomendable para los fines planteados en esta investigación que es la de brindar un sistema de tratamiento terciarios para pequeñas comunidades rurales.
- Para un caudal de 288 l/día y con un tiempo de retención de 12.40 minutos los filtros de arena de lecho convencional removieron los huevos de helmintos inoculados artificialmente en el ingreso de los filtros con una eficiencia de entre 60% y 80%, los que demuestra su efectividad en la remoción de este parámetro y dan pie a una investigación más profunda, además en el análisis se pudo ver que existen otros microorganismos en el afluente de los filtros como: nematodos, artrópodos, protozoarios (vorticella), algas y esporas los cuales pueden causar interferencias en el conteo de los huevos de helmintos.



- La remoción de coliformes termotolerantes en los filtros de arena de lecho convencional para un caudal de 288 l/día y un tiempo de retención de 12.40 minutos fue de entre 50% y 80% lo cual se considera baja para un tratamiento terciario, con respecto a los filtros de lecho reducido se obtuvo una remoción de más de una unidad logarítmica (más de 90%) y en algunos casos llegando hasta casi dos unidades de remoción lo cual está dentro de los rangos de un tratamiento efectivos en la remoción de estos parámetros. La diferencia entre los lechos empleados es el tamaño de los granos de arenas y por ende de sus poros, pero los filtros de lecho reducido a pesar tener poros más pequeños que los de los filtros convencionales siguen siendo muy grandes comparados con el tamaños de las bacterias, por lo que se descarta que la diferencia en la remoción de bacterias sea por los mecanismos físicos de retención. El factor determinante para esta diferencia en remociones puede deberse a que en el filtro de lecho convencional se forma una película biológica compuesta en gran medida por bacterias las cuales pueden ser arrastradas por el flujo de agua hacia el efluente disminuyendo su eficiencia en la remoción de bacterias termotolerantes lo cual no sucede en el filtro de lecho reducido por tener una película biológica mucho menor a la anterior. Además no hubo una diferencia clara en la eficiencia en remoción de este parámetro entre las carreras de filtración con flujo ascendente y las de flujo descendente.

## CAPITULO IX: CONCLUSIONES

---

- Se concluye que los filtros de arena de lecho convencional no muestran una buena eficiencia en remoción del parámetro de coliformes termotolerantes ya que para un caudal de 288 L/día y con un tiempo de retención de 12.40 minutos tienen un porcentaje de remoción menor a una unidad logarítmica ( $\log_{10}$ ) y decrece a medida que va aumentando el tiempo de operación del filtro. Aparentemente a medida que aumenta el tiempo de operación, la capa biológica en el ingreso de los filtros aumenta el arrastre de las bacterias presentes en dicha capa hacia salida de los filtros.
- Los filtros de arena de lecho reducido estudiados presentan una remoción de coliformes termotolerantes mayor a una unidad logarítmica para un caudal de 288 L/día y con un tiempo de retención de 11.50 minutos llegando incluso hasta 02 unidades logarítmicas de eficiencia en dicho parámetro.
- En el ingreso de los filtros de arena de lecho convencional se forma una película biológica que según observación hecha por el microscopio estaba formada principalmente por bacterias, protozoarios y algas. Dicha película biológica se observaba a simple vista después de una semana de operación iba creciendo a medida que pasaban los días hasta que finalmente se colmataba el filtro.
- Se reportó una relación directa entre el aumento de la película biológica y el incremento de la eficiencia de la remoción de la DBO5 llegando a alrededor del 70% para un caudal de 288 L/día y con un tiempo de retención de 11.50 minutos.
- Los filtros de lecho reducido no mostraron una capa biológica visible por su corto periodo de duración, y solo presentaron remociones de la DBO5 en el rango de 30 % a 55 %.

- Se concluye que los filtros de flujo descendente son mejores que los de flujo ascendente en la eficiencia de remoción de la  $DBO_5$  pero los filtros de flujo ascendente tienen mayor eficiencia en la remoción de los demás parámetros físicos, químicos y biológicos analizados en esta investigación.
- En la carrera de filtración de un día se obtuvieron los mejores resultados en la remoción de los parámetros de turbiedad (80%), coliformes termotolerantes (01 unidad logarítmica) y sólidos suspendidos volátiles (85%).
- Los filtros de lecho convencional de flujo ascendente como los de flujo descendente presentaron una carrera de filtración de alrededor de 03 semanas, en cambio los filtros de arena de lecho reducido presentaron una carrera de filtración variable entre 1 semana y un día.
- Se concluye que los filtros de flujo ascendente requieren mayor cantidad de agua (8%) para un buen lavado comparado con los filtros de flujo descendente (5%) independientemente del tipo de lecho que se utilice. Estos volúmenes están referidos a la cantidad de agua de lavado en comparación con el efluente del sistema.
- Se concluye que el mejor filtro para una comunidad rural es el filtro de flujo descendente y de lecho convencional ya que estos filtros requieren de menor personal para su operación y mantenimiento, también requieren menor cantidad de agua para el lavado, pero la eficiencia en la eliminación de huevos de helmintos (40% a 80%) no es suficiente para su utilización como agua de riego según las directrices de la OMS-1989, ya que para este parámetro se requiere tener menos de un huevo de helminto por cada litro.

- Para poder construir un sistema de filtros de flujo descendente de lecho convencional para la Planta de tratamiento ubicada en CITRAR-FIA-UNI (Caudal de diseño de 10 l/s) se requiere una inversión aproximada de 32,237.32 soles como costo directo para su construcción. Con respecto a la operación del sistema, se estima que para la operación y mantenimiento de los filtros se requeriría 6,594.86 soles anuales.
- Se recomienda la utilización de los filtros de arena de lecho reducido para pueblos de gran tamaño (superior a 5000 habitantes) ya que estos filtros requieren mayor mantenimiento y operación constantes y de esa forma aprovechar su mejor eficiencia en la remoción de coliformes fecales.

## CAPITULO X: RECOMENDACIONES

---

- Realizar investigaciones de los filtros de arena en serie, primero un filtro de lecho convencional y luego un filtro de lecho reducido; el primero de flujo ascendente y el siguiente de flujo descendente para no perder energía hidráulica.
- Lavar los tanques de almacenamiento periódicamente una vez al mes aprovechando el retro lavado de los filtros, para evitar que se formen colonias de microorganismos adheridos a los equipos de almacenamiento y así evitar la formación de natas en la superficie.
- Realizar un buen lavado de los filtros de arena utilizando una altura de agua de más de 4 m (respecto del nivel del drenaje de los filtros). Este lavado permitirá tener una expansión del lecho de alrededor del 30% y menor a 6 m para que no haya una excesiva expansión que pueda arrastrar el lecho filtrante hacia la salida del agua de lavado de los filtros. Y su importancia radica en que con un buen lavado se obtienen carreras de filtración prolongadas.
- Mantener la película biológica en el ingreso de los filtros de arena ya que según los resultados de esta investigación se logran mejores remociones en la eliminación de la  $DBO_5$ .

**ANEXO N° 1**

---

**A) REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Murgel Samuel Branco (1969), **Hidrobiología aplicada a la Ingeniería Sanitaria**, 1ra. Edición, Sao Paulo, Brasil.
- American Public Health Association – APHA (1981), **Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 5th. Edition, Washington D.C., USA.
- Metcalf & Eddy (1991), **Wastewater Engineering – Treatment, disposal and reuse**, 3rd. Edition, New York, USA.
- Robert Barnes (1996), **Zoología de los Invertebrados**, 6ta. Edición, México D.F., México.
- Ministerio de Vivienda y Construcción (2006), **Norma de Saneamiento S.090: Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales**, 1ra. Edición, Lima, Perú.
- Enrique Jimeno Blasco (1998), **Análisis de Aguas y Desagües**, 2da. Edición, Lima, Perú.
- Sergio Rolim Mendoza (1999), **Lagunas Aireadas Mecánicamente**, 1ra. Edición, Organización Panamericana de la Salud, Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Enrique C. Valdez & Alba B. Vázquez (2003), **Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales**, 1ra. Edición, México D.F., México.
- José Ferrer Polo (2008), **Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales**, 1ra. Edición, México D.F., México.
- Pasic I. (1990), **Modified polyurethane carrier for biochemical wastewater treatment**, Water Science & Technology - IWA Publishing, London, UK.
- Alaerts G.J., Veenstra S., Bentvelsen M. and Van Duijl L.A. (1993), **Feasibility of anaerobic sewage treatment in sanitation strategies in developing countries**, Water Science & Technology - IWA Publishing, London, UK.

- Hebert H. P. Pang (2010), **Environmental Anaerobic Technology: Applications and New Developments**, Imperial College Press, London, UK.
- Rachel M. Ayres & D. Duncan Mara (1996) **Analysis of Wastewater for Use in Agriculture - A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques**, Department of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, England.
- Romero Rojas, Jairo Alberto (2005) **Tratamiento de aguas residuales : teoría y principios de diseño**, Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia.
- Jorge Arboleda, Valencia (2000) **Teoría y Practica de la Purificación del Agua**, Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Francisco Unda Panzo (2003) **Ingeniería Sanitaria Aplicada a Saneamiento y Salud Publica**, Mexico D.F., Mexico.
- Quezada Neciosup, Francisco Ignacio (1999) **Diseño y evaluación de un módulo de filtración de arena por gravedad**, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Ruddy Noriega Pissani y Julio Ingar Aponte (1979) **Sobre Filtros a presión para pequeñas comunidades rurales**, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

## B) REFERENCIAS EN LA WEB

- <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/1726/1/TREBALL8.pdf> (Último acceso: julio 2012)
- <http://www.selba.org/EspTaster/Ecologica/Agua/Nitrificacion.htm> (Último acceso: Julio 2012)
- <http://ento.psu.edu/extension/factsheets/es/es-moth-flies-in-the-home> (Último acceso: Julio 2012)
- <http://books.google.com.pe/books?id=WAYsni4st9QC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> (Último acceso: mayo 2012)
- <http://www.aguamarket.com/diccionario/> (último acceso: mayo 2012)

- [http://www.jst.go.jp/asts/asts\\_t2/thailand/200803/presentation/s2-1.pdf](http://www.jst.go.jp/asts/asts_t2/thailand/200803/presentation/s2-1.pdf) (Último acceso: mayo 2012)
- [http://www.ambientum.com/revista/2002\\_05/BIODISCO1.asp](http://www.ambientum.com/revista/2002_05/BIODISCO1.asp) (Último acceso: mayo 2012)