

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS AMBIENTALES**



**MODELO DE REACTOR ANAEROBIO  
Y FILTRO DE FLUJO VERTICAL INVERSO PARA  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Tesis

Para optar el título de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

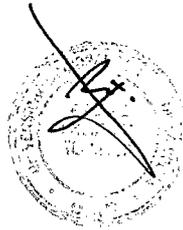
Presentado por:

**FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**

Promoción 2010

Tingo María – Perú

2012



**N20**

**D71**

**Dionisio Montalvo, Franklin**

Modelo de reactor anaerobio y filtro de flujo vertical inverso para tratamiento de aguas residuales - Tingo María 2012

106 páginas.; 52 cuadros; 21 fgrs.; 40 ref.; 30 cm.

Tesis (Ingeniería Ambiental) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Recursos Naturales Renovables.

**1. REACTOR**

**2. FILTRO**

**3. TRATAMIENTO**

**4. AGUAS RESIDUALES**

**5. CALIDAD**

**6. EFICIENCIA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
Tingo María – Perú

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



## **ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

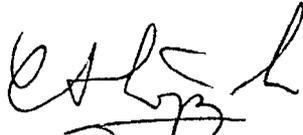
Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 12 de octubre del 2012, a horas 1:00 p.m. en la Sala de Grados de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, para calificar la Tesis titulada:

### **“MODELO DE REACTOR ANAEROBIO Y FILTRO DE FLUJO VERTICAL INVERSO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES”**

Presentado por el Bachiller: **Franklin Dionisio Montalvo**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara aprobado con el calificativo de “ **MUY BUENO**”

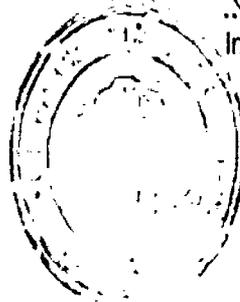
En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del Título correspondiente.

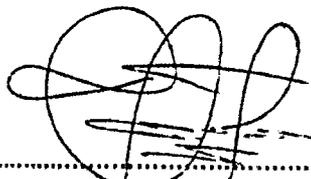
Tingo María, 12 de octubre del 2012.

  
.....  
Dr. CÉSAR S. LÓPEZ LÓPEZ  
Presidente

  
.....  
Ing. RICARDO M. CHÁVEZ ASENCIO  
Miembro

  
.....  
Ing. M.Sc. NELINO FLORIDA ROFNER  
Miembro



  
.....  
Blgo. M.Sc. EDILBERTO CHUQUILÍN BUSTAMANTE  
Asesor

## DEDICATORIA

A mis padres Pascual y Lusía:  
el agradecimiento por  
brindarme la oportunidad de  
vivir y ayudarme a salir  
adelante.

A mis hermanos Tania, Zoraida,  
Jherson, Limber y Darwin, para  
ustedes he trazado este ejemplo y  
para Zaida que desde el cielo siempre  
me ha acompañado.

A Rubén por ser mi segundo padre,  
por comprenderme y apoyarme.

A mis Tíos: Elena, Flor y Marco,  
Víctor y Lila, Hugo y Sofía, Adrián y  
Bety, Roos, Sonel, Olga, Wilson,  
Juan, Esther, Lizbeth y Michel; por su  
cariño y apoyo en los momentos  
difíciles.

## **AGRADECIMIENTO**

- A DIOS, por darme esta gran oportunidad y por acompañarme en todo momento.
- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, por contribuir en mi especialización profesional.
- Al Blgo. M.Sc. Edilberto Chuquilin Bustamante, asesor del presente trabajo de investigación científica, por su aporte durante el trabajo de investigación.
- Al Ing. Francisco Quezada Neciosup, por orientarme a desarrollar el presente trabajo de investigación.
- A mis jurados de tesis: Dr. Cesar Samuel López López, Ing. Ricardo Chávez Asencio, Ing. Nelino Florida Roffner, por sus oportunas sugerencias.
- A todas las personas que de una u otra forma me brindaron su apoyo moral y muy en especial a mis amigos: Víctor, Henry, Osmar, Patsy, María, Ángela, Shirley, Miluska, Keilly, Kelly y Richard; gracias por sus consejos y amistad.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN.....	17
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1. Aguas residuales.....	19
2.1.1. Aguas residuales domesticas (ARD).....	19
2.1.2. Composición, características fisicoquímicas y biológicas del agua residual.....	20
2.2. Procesos de tratamiento de las aguas residuales domesticas...	20
2.2.1. Tratamiento aerobio.....	22
2.2.2. Sistemas convencionales de tratamiento anaerobio.....	23
2.2.2.1. Tanque séptico.....	24
2.2.2.2. Tanque imhoff.....	24
2.2.2.3. Lagunas aerobias.....	25
2.2.3. Tratamiento anaerobio.....	25
2.2.3.1. Factores que influyen en el tratamiento anaerobio de aguas residuales.....	27
2.2.4. Procesos de alta tasa.....	29
2.2.4.1. Filtro anaerobio.....	29
2.2.4.2. Biofiltros.....	30
2.2.4.3. Reactores de lecho fluidizado o lecho expandido....	31

2.2.4.4. Reactor UASB.....	31
2.2.5. Colocasia esculenta.....	31
2.3. Propiedades químicas del agua .....	32
2.3.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	32
2.3.2. Demanda química del oxígeno (DQO).....	33
2.3.3. Oxígeno disuelto (OD).....	33
2.3.4. Potencial de hidrogeno (pH).....	33
2.3.5. Sólidos totales en suspensión (SST).....	33
2.4. Estándares de calidad ambiental (ECA).....	34
2.5. Límites máximos permisibles (LMP).....	34
2.6. Teoría de modelos.....	34
2.6.1. Semejanza.....	35
2.6.1.1. Semejanza geométrica.....	35
2.6.1.2. Semejanza cinemática.....	35
2.6.1.3. Semejanza dinámica.....	36
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1. Descripción de la zona de trabajo.....	38
3.1.1. Lugar de ejecución.....	38
3.1.2. Características ambientales del área de estudio.....	38
3.2. Materiales y equipos.....	39
3.2.1. Materiales.....	39
3.2.2. Equipos.....	39
3.3. Metodología.....	39
3.3.1. Criterios de diseño del modelo Reactor Anaerobio y Filtro de Flujo Vertical Inverso (RAFFVI).....	39

3.3.1.1. Población.....	39
3.3.1.2. Dotación de agua.....	40
3.3.1.3. Datos básicos para la determinación del tamaño de los caudales de prueba.....	40
3.3.2. Características hidráulicas del reactor anaerobio.....	41
3.3.2.1. Rango de caudales de trabajo.....	41
3.3.2.2. Tiempo de retención hidráulico.....	41
3.3.2.3. Diseño del reactor anaerobio (Modelo).....	42
3.3.3. Características hidráulicas del filtro.....	44
3.3.3.1. Características del medio de contacto.....	44
3.3.3.2. Composición del lecho filtrante.....	44
3.3.3.3. Profundidad del lecho filtrante.....	45
3.3.3.4. Rango de caudales de trabajo.....	45
3.3.3.5. Tasa de filtración.....	45
3.3.3.6. Diseño del filtro de flujo vertical inverso (Modelo)...	46
3.3.4. Acondicionamiento del área de estudio.....	47
3.3.5. Montaje del RAFFVI.....	48
3.3.6. Puesta en marcha del RAFFVI.....	48
3.3.6.1. Prueba hidráulica.....	48
3.3.6.2. Puesta en marcha.....	48
3.3.7. Operación del RAFFVI.....	49
3.3.8. Parámetros de operación.....	49
3.3.9. Muestreo.....	49
3.3.10. Análisis de parámetros.....	50
3.3.10.1. Determinación de temperatura.....	50

3.3.10.2.	Determinación de pH.....	51
3.3.10.3.	Determinación de sólidos totales en suspensión..	51
3.3.10.4.	Determinación de oxígeno disuelto (OD).....	51
3.3.10.5.	Determinación del número más probable de coliformes termotolerantes.....	51
3.3.10.6.	Control de caudales.....	52
3.3.11.	Componentes complementarios y en estudio.....	52
3.3.11.1.	Tanque.....	53
3.3.11.2.	Sedimentador (Tratamiento primario).....	53
3.3.11.3.	Reactor anaerobio (Tratamiento primario).....	54
3.3.11.4.	Filtro de flujo vertical inverso (Tratamiento secundario).....	54
3.4.	Diseño experimental.....	55
3.5.	Tratamientos en estudio.....	56
3.6.	Variables.....	57
3.6.1.	Variables dependientes.....	57
3.6.2.	Variables independientes.....	57
IV.	RESULTADOS.....	58
4.1.	Temperatura.....	58
4.2.	Potencial de hidrogeno (pH).....	60
4.3.	Sólidos totales en suspensión.....	63
4.4.	Oxigeno disuelto.....	67
4.5.	Coliformes termotolerantes.....	70

4.6. Propuesta de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para el internado de varones Callao y Sheraton de la UNAS.....	74
V. DISCUSIÓN.....	88
5.1. Temperatura.....	88
5.2. Potencial de hidrogeno (pH).....	89
5.3. Sólidos totales en suspensión.....	90
5.4. Oxígeno disuelto.....	91
5.5. Coliformes termotolerantes.....	93
VI. CONCLUSIÓN.....	95
VII. RECOMENDACIONES.....	97
VIII. ABSTRACT.....	98
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
X. ANEXOS.....	106

## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>Página</b>
1. Datos básicos para la determinación del tamaño de planta.....	46
2. Cálculo de la demanda de producción máxima diaria.....	46
3. Propuesta de caudales de prueba para los sistemas de tratamiento.....	46
4. Caudales de prueba.....	47
5. Tiempo de llenado o tiempo de retención hidráulica TRH del reactor anaerobio.....	47
6. Tiempo de llenado o tiempo de retención hidráulica TRH del filtro de flujo vertical inverso.....	48
7. Tiempo de llenado o tiempo de retención hidráulica TRH del modelo RAFFVI.....	48
8. Ingreso de datos para el dimensionamiento del reactor anaerobio.....	49
9. Resultados de dimensionamiento para el reactor anaerobio.....	49
10. Factor de forma.....	50
11. Composición del lecho filtrante.....	50
12. Caudales de ingreso a los filtros.....	51
13. Tasa de filtración de los filtros.....	52
14. Ingreso de datos para el dimensionamiento del filtro de flujo vertical inverso.....	52
15. Resultados de dimensionamiento para el filtro de flujo vertical inverso.	53

16. Parámetros de operación.....	55
17. Periodo de medición.....	56
18. Descripción de los tratamientos estudiados.....	63
19. Resultados de temperatura promedio tomados en el afluente (Sedimentador) y efluente del RAFFVI.....	65
20. Resultados de pH promedio tomados en el afluente (Sedimentador) y efluente del RAFFVI.....	68
21. Pruebas de múltiple rangos para pH respecto del uso de la <i>Colocasia e.</i> en el modelo RAFFVI.....	72
22. Pruebas de múltiple rangos para pH respecto del caudal.....	73
23. Resultados de STS tomados en el afluente (Sedimentador) y efluente del RAFFVI.....	74
24. Pruebas de múltiple rangos para STS respecto del uso de la <i>Colocasia e.</i> en el modelo RAFFVI.....	78
25. Pruebas de múltiple rangos para STS respecto del caudal.....	79
26. Resultados de OD tomados en el afluente (Sedimentador) y efluente del RAFFVI.....	80
27. Pruebas de múltiple rangos para OD respecto del uso de la <i>Colocasia e.</i> en el modelo RAFFVI.....	84
28. Pruebas de múltiple rangos para OD respecto del caudal.....	85
29. Resultados de coliformes termotolerantes encontrados en el afluente (Sedimentador) y efluente del RAFFVI.....	86
30. Pruebas de múltiple rangos para coliformes termotolerantes respecto del uso de la <i>Colocasia e.</i> en el modelo RAFFVI.....	90

31. Pruebas de múltiple rangos para coliformes termotolerantes respecto del caudal.....	91
32. Periodo de diseño recomendable.....	91
33. Vida útil de los elementos de un sistema de tratamiento.....	91
34. Población de diseño.....	92
35. Clasificación de la dotación del agua en el Perú.....	92
36. Datos básicos para la determinación del tamaño de planta.....	92
37. Cálculo del caudal de tratamiento.....	92
38. Características de las aguas residuales del efluente de los SS.HH del internado de varones de la UNAS.....	93
39. Dimensionamiento de la caja de distribución.....	93
40. Dimensionamiento del reactor anaerobio.....	93
41. Zona de decantación.....	94
42. Zona de salida (Canal de recolección).....	94
43. Zona de lodos (Colector).....	95
44. Profundidad del reactor.....	95
45. Dimensionamiento del lecho de secado de lodos.....	95
46. Escalas de las dimensiones del reactor anaerobio.....	96
47. Dimensionamiento del filtro de flujo vertical inverso.....	96
48. Resultados de dimensionamiento del filtro de flujo vertical inverso.....	96
49. Escalas de las dimensiones del filtro de flujo vertical inverso.....	97
50. Presupuesto del prototipo del RAFFVI para tratamiento de aguas residuales del internado de varones Callao y Sheraton de la UNAS.....	97
51. Evaluación de impactos ambientales con la matriz de Leopold.....	101
52. Medidas de prevención y mitigación ambiental.....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1. Puntos de muestreo.....	56
2. Modelo de tratamiento RAFFVI.....	61
3. Diseño experimental.....	62
4. Influencia del sistema de tratamiento y el caudal de prueba en la variación de la temperatura.....	66
5. Verificación del cumplimiento del LMP para la temperatura.....	67
6. Variación del pH, según el caudal para el sistema RAFFVI.....	71
7. Variación del pH, según el caudal para el sistema RAFFVI con <i>Colocasia e</i> .....	71
8. Influencia del sistema de tratamiento y el caudal de prueba en la variación del pH.....	71
9. Verificación del cumplimiento del LMP para el pH.....	72
10. Eficiencia de remoción de STS, según el caudal para el sistema RAFFVI.....	76
11. Eficiencia de remoción de STS, según el caudal para el sistema RAFFVI con <i>Colocasia e</i> .....	77
12. Influencia del sistema de tratamiento y el caudal de prueba en la variación de los STS.....	77
13. Verificación del cumplimiento del LMP para los STS.....	78
14. Variación de OD, según el caudal para el modelo RAFFVI.....	82

15. Variación de OD, según el caudal para el modelo RAFFVI con <i>Colocasia e</i> .....	82
16. Influencia del sistema de tratamiento y el caudal de prueba en la variación del OD.....	83
17. Verificación del ECA – Agua categoría IV, concentración de OD en los ríos de la selva.....	84
18. Eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes, según el caudal para el modelo RAFFVI.....	88
19. Eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes, según el caudal para el modelo RAFFVI.....	88
20. Influencia del sistema de tratamiento y el caudal de prueba en la variación de coliformes termotolerantes.....	89
21. Verificación del cumplimiento del LMP para coliformes termotolerantes	90

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se implementó y evaluó el funcionamiento del modelo Reactor Anaerobio y Filtro de Flujo Vertical Inverso (RAFFVI), logrando tratar el agua residual encontrado en el canal contaminado por el efluente de los servicios higiénicos del internado de varones de la UNAS.

Siendo la temperatura, pH, oxígeno disuelto, sólidos totales en suspensión, coliformes termotolerantes y la eficiencia de remoción las variables dependientes del tipo de tratamiento y caudal de prueba utilizado, asimismo, luego de la instalación del modelo RAFFVI se realizaron las pruebas hidráulicas, puesta en marcha y operación respectiva, procediendo posteriormente a evaluar *in situ* los parámetros de temperatura, pH y oxígeno disuelto y en laboratorio los parámetros de sólidos totales en suspensión (diferencia de pesos) y coliformes termotolerantes (NMP de coliformes termotolerantes) encontrados en el modelo RAFFVI con y sin presencia de *Colocasia e.* con cuatro caudales de prueba (0.5, 1, 2 y 4) mL/s, donde la mayor eficiencia de remoción de sólidos totales en suspensión fue de 70.30% y la mayor eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes fue de 96.14% en ambos casos fueron obtenidos por el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* También se observó que los caudales probados no influenciaron

en la variación de temperatura, pH, sólidos totales en suspensión y oxígeno disuelto, pero si en la concentración de coliformes termotolerantes ya que a 0.5 mL/s la capacidad de remoción alcanzada por el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* fue de 96.14% y a 4 mL/s la capacidad de remoción alcanzada por el mismo modelo fue de 47.83%. Asimismo, el modelo y el caudal de prueba cumplieron con el Límite Máximo Permisible establecido por el MINAM (2010), para los parámetros de temperatura, pH, sólidos totales en suspensión y coliformes termotolerantes es el RAFFVI con *Colocasia e.* para un caudal de 0.5 y 1 mL/s. por ello se planteó el diseño del prototipo RAFFVI como una propuesta de tratamiento alternativo.

## I. INTRODUCCIÓN

Para tener éxito en el control de la calidad de las aguas, es necesario conocer las propiedades del agua susceptibles de cambio en las diversas formas en que existen en la tierra y como las usa el hombre, asimismo según PEÑA y VALENCIA (1998), se debe promover el tratamiento de las aguas residuales, para disminuir los niveles de contaminación en las fuentes receptoras y por ende los riesgos potenciales para la salud pública y el ambiente acuático.

Por ello, es de suma importancia el uso de reactores anaerobios y filtros de flujo vertical inverso como alternativa de tratamiento de aguas residuales y con ello obtener tratamientos eficientes y así disponer efluentes finales de alta calidad, disponible para reutilizar en el riego de áreas verdes o simplemente devolverlo a los cuerpos de agua.

Es así que los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas tienen como objetivo principal el reducir algunas características indeseables, de manera tal que el uso o disposición final de estas aguas, cumpla con las normas y requisitos mínimos definidos por las autoridades sanitarias. Para ello se instaló en el área de influencia directa del canal contaminado por las aguas residuales del servicio higiénico del internado de

varones de la UNAS el modelo de un reactor anaerobio y un filtro de flujo vertical inverso.

Como interrogante se planteó ¿El uso del modelo RAFFVI para tratar aguas residuales, será capaz de remover la carga de contaminantes que tiene este efluente, cumpliendo con los Límites Máximos Permisibles (LMPs) del Perú?

Se planteó como hipótesis que el uso del modelo RAFFVI mejora la calidad del agua residual, encontrándose los parámetros evaluados dentro del rango establecido en los Límites Máximos Permisibles y permitan su disposición final adecuada; de la cual se plantearon los siguientes objetivos.

- Evaluar la temperatura, pH, sólidos totales en suspensión, oxígeno disuelto y coliformes termotolerantes.
- Evaluar el rendimiento del modelo propuesto a través de la variación inicial y final de los parámetros:
- Verificar que los parámetros evaluados del efluente del modelo propuesto se encuentren dentro de los Límites Máximos Permisibles – agua.
- Realizar la propuesta de diseño del prototipo del RAFFVI, si el rendimiento es aceptable.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Aguas residuales**

Las aguas residuales crudas son las aguas procedentes de usos domésticos, comerciales, agropecuarios y de procesos industriales, o una combinación de ellas, sin tratamiento posterior a su uso (MDSMA, 1995).

Los diversos tipos de aguas residuales reciben nombres descriptivos según su procedencia, siendo una de sus características típicas la presencia de sustancias consumidoras de oxígeno en comparación con el agua (Cuadro 65 del Anexo), por ejemplo, de un río (ALAERTS, 1995).

#### **2.1.1 Aguas residuales domésticas (ARD)**

Según ALAERTS (1995), en la práctica no existe una clara distinción entre las ARD y las aguas residuales municipales, aunque últimamente incluyen una cantidad desconocida de agua residual industrial. En algunas ciudades, el componente industrial excede el 50 %. Las ARD se generan a partir de distintas fuentes (Cuadro 66 del Anexo).

### **2.1.2. Composición, características fisicoquímicas y biológicas del agua residual**

Según VAN HAANDEL y LETTINGA (1998), los constituyentes más importantes de los residuos líquidos confieren al agua residual propiedades físicas, químicas o biológicas indeseables. La composición y la concentración de estos constituyentes dependerán hasta cierto punto de las costumbres socio-económicas de la población contribuyente. Según ALAERTS (1995), la composición del agua residual está determinada por el caudal y por su fuente.

Las aguas residuales consisten básicamente en: agua, sólidos disueltos y sólidos en suspensión. Los sólidos son la fracción más pequeña (representan menos del 0.1 % en peso), pero representa el mayor problema a nivel del tratamiento. El agua provee sólo el volumen y el transporte de los sólidos (STERLING, 1995).

### **2.2 Procesos de tratamiento de las aguas residuales domesticas**

Reviste mayor importancia, desde el punto de vista del saneamiento ambiental, la necesidad del tratamiento de las aguas residuales generadas por las distintas actividades de una población o ciudad, ya que a partir de las mismas, se realizará la recarga de los acuíferos. Además el vertimiento de estas aguas residuales, dependiendo del grado de descarga, ocasiona problemas de contaminación en el suelo, las aguas subterráneas y el aire (DSENY, 1995).

Por ello el objetivo principal del tratamiento de las aguas residuales es corregir sus características indeseables, de tal manera que su uso o disposición final pueda ocurrir de acuerdo con las reglas y criterios definidos por las autoridades legislativas. Los tratamientos incluirán la reducción de la concentración de por lo menos uno de los cinco constituyentes más importantes del agua residual (DSENY, 1995):

- Sólidos en suspensión.
- Material orgánico (biodegradable).
- Nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo).
- Organismos patógenos.
- Metales pesados.

Según STERLING (1995), los diferentes tipos de tratamientos de las aguas residuales se han desarrollado en forma sencilla y general hacia dos propósitos: 1) La captación o separación de los sólidos de acuerdo a su sedimentabilidad. 2) La estabilización biológica de los sólidos restantes. La magnitud de estos propósitos dependerá del tipo de tratamiento empleado.

Actualmente existe una gran variedad de sistemas para el tratamiento de aguas residuales sin embargo, estos deberían ser seleccionados sobre la base del contexto local específico donde serán aplicados (BOLLER, 1997). De manera general, se puede afirmar que en los países desarrollados el número de alternativas factibles puede estar limitado debido a una regulación ambiental más estricta. De otro lado en los países en desarrollo el número de opciones puede ser más alto debido a la existencia de

diversos estándares de calidad (PEÑA, 1998). VON SPERLING (1995, citado por Peña, 1998), argumenta que todos estos factores son críticos al seleccionar preliminarmente los sistemas más adecuados para un contexto particular.

Según SOUZA (1997), la selección de tecnologías para la recolección y tratamiento de las aguas residuales deberá considerar, cada vez en mayor medida, alternativas que incluyan el reúso de agua. Existen trabajos donde se resalta el hecho de adoptar una adecuada metodología para la selección del tratamiento de agua residual, tal como los presentados por (VEENSTRA; MADERA *et al.* 1998).

En el Cuadro 67 del Anexo se observan criterios para la selección de un sistema de tratamiento recomendados por (LETTINGA y HULSHOFF, 1995). Asimismo STERLING (1995), presenta una comparación de los aspectos más importantes en el proceso de selección de tecnología para el tratamiento de agua residual (Cuadro 68 del Anexo).

### **2.2.1. Tratamiento aerobio**

El proceso aerobio se caracteriza porque la descomposición de la materia orgánica (MO) se lleva a cabo en una masa de agua que contiene oxígeno disuelto (OD). En este proceso participan bacterias aerobias o facultativas. El desdoblamiento de la MO es realizado, a través de procesos bioquímicos con la intervención de enzimas producidas por las bacterias en sus procesos vitales (MOSCOSO y LEÓN, 1996).

Las comunidades microbianas aerobias tienen muchas ventajas específicas: tienen potenciales de energía libre altos, permitiendo que se operen una variedad de mecanismos bioquímicos paralelos. Estas comunidades son capaces de trabajar con bajos niveles de sustrato, condiciones medio ambientales variables y una multitud de químicos diferentes en el afluente (VOCHTEN *et al.*, 1988).

### **2.2.2. Sistemas convencionales de tratamiento anaerobio**

La baja eficiencia de remoción de los primeros sistemas de tratamiento anaerobio: "tanque séptico", "tanque Imhoff", debe ser atribuida a una falla fundamental: existe muy poco o ningún contacto entre la masa bacteriana anaerobia del sistema y el material no sedimentable del afluente. Por esa razón, mucho del material disuelto o hidrolizado no puede ser metabolizado y acaba siendo descargado del sistema de tratamiento con el efluente. En estos diseños, la importancia del contacto entre el lodo y el material orgánico no fue reconocida y el bajo desempeño de los sistemas anaerobios era atribuido a una inferioridad intrínseca con relación a los sistemas aerobios; sin embargo, un sistema de tratamiento anaerobio de aguas residuales puede tener una alta eficiencia en la remoción de MO, aún con muy poco tiempo de residencia (VAN HAANDEL y LETTINGA, 1998).

Tal como lo señala Lettinga (1995) citado por PEÑA (1998), el tratamiento anaerobio debería ser el método principal de depuración dados sus beneficios y enormes potenciales. Aunque los sistemas convencionales de tratamiento aerobio alcanzan excelentes eficiencias, ellos no reúnen los

criterios necesarios para la sostenibilidad de las inversiones en escenarios de recursos de capital y mano de obra calificada escasos.

#### **2.2.2.1. Tanque séptico**

Los tanques de esta clase poseen una serie de fallas, tanto como unidades de sedimentación como de digestión, principalmente porque la septicidad no se puede confinar únicamente a los lodos. Las aguas efluentes son privadas de su frescura y los sólidos levantados por el gas forman una nata o costra desagradable en la que la digestión es lenta y rara vez completa. Están orientados hacia la producción de: 1) un lodo incoloro granular que se acumula en el tanque y que se debe remover a intervalos regulares, generalmente al subsuelo por enterramiento, y 2) de un efluente séptico que, en general, se evacúa por transminación al suelo desde los sistemas de irrigación subsuperficial (FAIR *et al.*, 1992).

#### **2.2.2.2. Tanque Imhoff**

El proceso de eliminación de sólidos sedimentables y de digestión anaerobia de los mismos, en un tanque Imhoff, es similar al proceso que se produce en una fosa séptica. Los sólidos pasan a través de una abertura situada en la parte inferior de la cámara de sedimentación al compartimento inferior para su digestión sin calentamiento. La acumulación de espumas se produce en la cámara de sedimentación. Los gases producidos durante la digestión en el compartimento inferior escapan a través del sistema de venteo. La propia configuración de la abertura que comunica ambas cámaras en la

parte inferior de la cámara de sedimentación impide el paso a la misma de los gases generados en la digestión y de las partículas de fango que ascienden por boyancia desde la capa de fango depositada en el fondo debido a la presencia de gases (METCALF y EDDY, 2004).

### **2.2.2.3 Lagunas aerobias**

No son fundamentalmente diferentes de un tanque séptico, teniendo lodo en el fondo de la laguna. Generalmente son mucho mayores que un tanque séptico y normalmente no están cubiertas. Son usadas ampliamente para el tratamiento de aguas residuales normalmente como un paso preliminar en lagunas de estabilización en serie. El tiempo de retención en lagunas anaerobias es más largo (2 a 5 días) que el del tratamiento primario y por tanto la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica del oxígeno (DBO) más elevada (VAN HAANDEL y LETTINGA, 1998).

### **2.2.3. Tratamiento anaerobio**

Según LETTINGA *et al.* (1995), el tratamiento anaerobio es una tecnología relativamente nueva, que ofrece muchas posibilidades:

- Lograr una protección efectiva del medio ambiente a bajo costo.
- Para países en desarrollo se hace accesible (importación no costosa de equipos).
- Para recuperar/preservar recursos y estimular la producción agrícola.

Tres rangos definidos de temperatura pueden ser distinguidos en el tratamiento anaerobio (LETTINGA *et al.*, 1995):

- Una digestión fría psicrófila, entre los 0°C y 20°C.
- Una digestión mesófila, entre 20°C y 42°C.
- Una digestión termófila, por encima de los 42°C hasta los 75°C.

Los límites de estos rangos están definidos por la temperatura a la cual la velocidad de decaimiento de la bacteria empieza a exceder la velocidad de crecimiento. Si se tiene un agua residual normal, el tratamiento termófilico podría consumir demasiada energía y el psicrófilico podría consumir mucho espacio (LETTINGA *et al.*, 1995).

El tratamiento anaerobio necesita integración y un plan de tratamiento global, para lograr una completa remoción y recuperación/rehúso de los constituyentes del agua residual, también otros sistemas de tratamiento (por ejemplo aerobios y/o físico-químicos) son requeridos (LETTINGA *et al.*, 1995).

Según VAN HAANDEL y LETTINGA (1998), un sistema de tratamiento anaerobio tenderá a desarrollar una población bacteriana compatible con la naturaleza del MO y de las cargas hidráulicas y orgánicas. En un sistema de tratamiento "maduro" (que tiene una población compatible con el material orgánico del afluente) son importantes para la eficiencia de remoción del material orgánico biodegradable los siguientes factores:

- La naturaleza del material orgánico a ser digerido.

- La existencia de factores ambientales adecuados para la digestión anaerobia.
- Tamaño de la población bacteriana (eficiencia de retención de lodo en el sistema).
- Intensidad de contacto entre MO afluente y población bacteriana.
- Tiempo de permanencia del agua residual en el sistema.

### **2.2.3.1. Factores que influyen en el tratamiento anaerobio de aguas residuales**

El curso del proceso de digestión anaerobia, es afectado fuertemente por un número de factores ambientales. Para la aplicación óptima del proceso de tratamiento anaerobio de las aguas residuales, es de mucha importancia tener conocimiento suficiente sobre el efecto de estos factores (LETTINGA *et al.*, 1995).

**Temperatura:** Un importante aspecto de la temperatura en los sistemas anaerobios, es que el decaimiento de la bacteria anaerobia a temperaturas menores a 15 °C es muy bajo. Esto significa que el lodo anaerobio puede ser preservado por largos períodos de tiempo, sin que pierda mucho su actividad, haciendo que el tratamiento anaerobio sea muy atractivo para aguas residuales que se descargan discontinuamente.

**pH:** La producción de metano se desarrolla óptimamente a un valor de pH entre 6.5 a 7.5. Valores exactos para el rango de pH no pueden ser

dados ya que en algunos casos la digestión del metano se desarrollará más allá de este rango.

**Capacidad buffer:** El contenido del reactor debe tener suficiente capacidad buffer para neutralizar una eventual acumulación de ácidos grasos volátiles y por supuesto la mezcla debe ser adecuada para evitar zonas ácidas dentro del reactor.

**Nutrientes:** El tratamiento biológico anaerobio de las aguas residuales es desarrollado por bacterias, las cuales deben crecer durante el tratamiento, de otra forma serían lavados fuera del sistema. Por esta razón el agua residual debe contener un número de compuestos a partir de los cuales la bacteria pueda sintetizar sus constituyentes celulares.

**Toxicidad en la digestión anaerobia:** Por encima de una cierta concentración cualquier componente puede ser inhibitorio, aún los ingredientes (substratos) para los organismos. Sin embargo en un rango de concentración baja muchos de estos compuestos naturales pueden estimular el metabolismo de las bacterias.

Para VAN HAANDEL y LETTINGA (1998), la temperatura es el factor ambiental de mayor importancia en la digestión anaerobia de aguas residuales.

#### **2.2.4. Procesos de alta tasa**

Según VAN HAANDEL y LETTINGA (1998), los sistemas modernos de tratamiento anaerobio, también llamados sistemas de segunda generación, tienen algún mecanismo de retención de lodo que permite la retención de una gran masa de lodo, lo que lo distingue de los sistemas clásicos. La retención de lodo es tan importante que los sistemas modernos son generalmente clasificados según el mecanismo que permite la retención. Existen básicamente dos mecanismos para retención de lodos en los sistemas de tratamiento de alta tasa:

Inmovilización de lodo a través de adherencia a un material inerte de soporte. En esta categoría están: Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente o Descendente y Reactor de Lecho Fluidizado o Expandido.

Separación sólido-líquido del afluente con retorno de los sólidos separados al reactor. En esta categoría están los procesos de contacto con un decantador externo o el reactor UASB con un decantador interno. Casos especiales son: 1) cuando el reactor anaerobio también es decantador, es decir cuando no hay un dispositivo especial de separación de las zonas de digestión y decantación y 2) cuando los flocs de los lodos también funcionan como los gránulos de un lecho expandido o llamado lecho de lodo granulado expandido.

##### **2.2.4.1 Filtro anaerobio**

Históricamente es importante porque fue el primer tratamiento anaerobio que demostró la viabilidad técnica de aplicar cargas elevadas (10 a

20 Kg/m<sup>3</sup>.día). Entre las desventajas del filtro anaerobio se tienen: 1) alto costo del cuerpo filtrante y 2) problemas operacionales, ocurren entupimientos, principalmente cuando el agua residual tiene una concentración elevada de sólidos en suspensión (CANEPA, 2005).

#### **2.2.4.2 Biofiltros**

El diseño de los biofiltros es muy variable, pueden ser sistemas cerrados o abiertos, en uno o múltiples lechos de soporte. Se considera que la biofiltración es una de las tecnologías más económicas, en especial por la capacidad que tiene en el tratamiento eficiente de flujos de líquidos poco y muy contaminados. Un factor importante es que la biofiltración, es un proceso de oxidación biológica, se aplica exclusivamente para la eliminación de contaminantes oxidables, compuestos orgánicos parcialmente oxidados o compuestos minerales reducidos. El soporte utilizado en los biofiltros debe ser reemplazado por obvias razones, los soportes orgánicos sirven de fuente de los nutrientes para los microorganismos y por lo tanto se degradan o se agotan las reservas de nutrientes disponibles. La frecuencia de reemplazo de los soportes es muy variable y depende de su naturaleza y las características físico – químicas y biológicas del efluente a tratar. De manera general, se considera que los soportes tienen una esperanza de vida promedio del orden de 3 a 5 años (GALINDO y RUIZ, 2007).

#### **2.2.4.3 Reactores de lecho fluidizado o lecho expandido**

Tiene un medio granular que es mantenido en suspensión, como resultado de la resistencia friccional del flujo ascendente del agua residual. El medio granular usado inicialmente era arena, más tarde se demostró que los medios con una resistencia más baja (antracita, plásticos de alta densidad) son más adecuados, porque permiten una reducción en la velocidad del líquido, disminuyéndose así los costos de bombeo. El reactor de lecho expandido es similar al de lecho fluidizado, pero la velocidad del líquido en el primero es insuficiente para provocar la fluidización del lecho granular, el lecho se expande de 10 a 20% (Figura 22 del Anexo) (VAN HAANDEL y LETTINGA, 1998).

#### **2.2.4.4 Reactor UASB**

El reactor UASB fue desarrollado en la década del '70 por el Prof. Lettinga y su equipo de la Universidad Agrícola de Wageningen – Holanda. Es el sistema más usado de tratamiento de aguas residuales de alta tasa. Varias unidades en escala real están ubicadas en diferentes países, operando en regiones tropicales y subtropicales; sin embargo, pocos estudios se han realizado en regiones con clima templado (VAN HAANDEL y LETTINGA, 1998).

#### **2.2.5. Colocasia esculenta**

Según el SIAC (2008), es una planta perenne tropical, usadas como ornamentales y en ocasiones llamadas oreja de elefante. Puede vegetar

en arrozales o en tierras altas donde el agua es suministrada constantemente por lluvia o irrigación, su clasificación taxonómica es:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Lilioidae

Orden: Alismatales

Familia: Araceae

Subfamilia: Aroideae

Tribu: Colocasieae

Género: *Colocasia*

Especie: *C. esculenta*

Nombre binomial: *Colocasia esculenta*

## 2.3. Propiedades químicas del agua

### 2.3.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Según el CEPIS (2004), corresponde a la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica por acción bioquímica aerobia. Se expresa en mg/L. Esta demanda es ejercida por las sustancias carbonadas, las nitrogenadas y ciertos compuestos químicos reductores.

### **2.3.2. Demanda química del oxígeno (DQO)**

Según el CEPIS (2004), equivale a la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores presentes en un agua sin la intervención de los organismos vivos.

### **2.3.3. Oxígeno disuelto (OD)**

Según el CEPIS (2004), la presencia de oxígeno disuelto es esencial en el agua; proviene principalmente del aire, los niveles bajos o ausencia de oxígeno en el agua, puede indicar contaminación elevada, condiciones sépticas de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa; por ello se le puede considerar como un indicador de contaminación.

### **2.3.4. Potencial de hidrógeno (pH)**

Indica el comportamiento ácido básico del agua. Es una propiedad de carácter químico de vital importancia para el desarrollo de la vida acuática. Es un buen parámetro de carácter general para determinar la calidad de un agua. Habitualmente las aguas naturales tienen un cierto carácter básico con unos valores de pH correspondidos entre 6,5 a 8,5 (ROMERO, 1998).

### **2.3.5. Sólidos totales en suspensión (SST)**

Para determinar los sólidos totales suspendidos de una muestra obtenida, se puede determinar por el método más simple de las diferencias de pesos (SEOANEZ, 1999; RHEINHEIMER, 1987).

## **2.4 Estándares de calidad ambiental (ECA)**

Según el MINAM (2008), los estándares de calidad ambiental tienen el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente (Cuadro 69 del Anexo).

## **2.5. Límites máximos permisibles (LMP)**

Según el MINAM (2010), el límite máximo permisible es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan al efluente líquido de actividades que generan contaminación, y que al ser excedidas por estas, causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (Cuadro 70 del Anexo).

## **2.6. Teoría de modelos**

En los ensayos experimentales del flujo en un determinado prototipo, a veces no es posible realizar los ensayos con el propio prototipo, por su tamaño o por la dificultad de reproducir las condiciones reales de flujo, con lo que se realizan los ensayos con modelos a escala (MARTINEZ, 2008).

### 2.6.1. Semejanza

Prototipo, modelo y sus respectivos flujos considerados, están relacionados entre sí por tres tipos de semejanza: geométrica, cinemática y dinámica (MARTINEZ, 2008).

#### 2.6.1.1. Semejanza geométrica

Con un factor de escala de longitudes constante entre modelo y prototipo (NL). En determinados modelos, el factor de escala de longitudes se hace variar de una dirección a otra (MARTINEZ, 2008).

$$NL = \frac{\textit{Longitud característica del modelo}}{\textit{Longitud característica del prototipo}}$$

$$NL^2 = \frac{\textit{Área característica del modelo}}{\textit{Área característica del prototipo}}$$

$$NL^3 = \frac{\textit{Volumen característico del modelo}}{\textit{Volumen característico del prototipo}}$$

#### 2.6.1.2. Semejanza cinemática

La semejanza geométrica del campo de velocidades, con un factor de escala de velocidades entre modelo y prototipo (MARTINEZ, 2008).

$$NV = \frac{\textit{Velocidad característica del modelo}}{\textit{Velocidad característica del prototipo}}$$

La relación entre los dos factores de escala de longitudes y de velocidades, viene determinada por el factor de escala de tiempos (MARTINEZ, 2008).

$$NT = \frac{NL}{NV} = \frac{\textit{Tiempo característico del flujo en el modelo}}{\textit{Tiempo característico del flujo en el prototipo}}$$

### 2.6.1.3. Semejanza dinámica

La semejanza dinámica del campo de las distintas fuerzas que puedan intervenir en el flujo, con un factor de escala de fuerzas, que debe ser constante, entre modelo y prototipo (MARTINEZ, 2008).

$$NF = \frac{\textit{Fuerza característica del modelo}}{\textit{Fuerza característica del prototipo}}$$

El factor de escala de fuerzas, es el que va a permitir establecer las condiciones del flujo en el ensayo del modelo a partir de las condiciones del flujo en el prototipo, y obtener “fuerzas, potencias y rendimientos” del prototipo a partir de sus correspondientes valores experimentales en el modelo. Es decir, para la semejanza de los campos de fuerzas de inercia y de esfuerzos viscosos, entre modelo y prototipo, el número de reynolds del modelo debe ser el mismo que el del prototipo (MARTINEZ, 2008).

En el momento de obtener datos cuantitativos entre un modelo y un prototipo, se necesita que haya similitud dinámica entre ambos, lo cual requiere que se de similitud geométrica entre el modelo y el prototipo (STREETER y WYLIE, 1998).

Según SANCHEZ (2010), en los reactores aerobio y anaerobio se pueden escalar directamente con el caudal, dado que las velocidades que se manejan son demasiado pequeñas, haciendo que los números de Reynolds ( $R$ ) y Froude ( $F$ ) tienden a cero.

Asímismo según SANCHEZ (2010), se pueden hacer diseños de experimentos para estas unidades en dos etapas en la primera se debe variar las dimensiones de las placas, el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, las rugosidades de las placas, y el tamaño de las partículas a ser sedimentadas y en la segunda etapa se procederá a experimentar a diferentes regímenes de caudal, lo cual permitirá comparar la eficiencia del sistema contra los números adimensionales de Reynolds y de Froude, lo que permitirá replicar este modelo a cualquier escala.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Descripción de la zona de trabajo**

##### **3.1.1. Lugar de ejecución**

La investigación se realizó en el área cercana a la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la UNAS cuyas coordenadas UTM son por el este 390326 y por el norte 8970861 (Figura 37 del Anexo), en el Laboratorio de Microbiología General y en el Laboratorio de Conservación de Suelos y Agua de la FRNR de la UNAS, ubicado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado y departamento de Huánuco, durante los meses de Febrero a Julio.

##### **3.1.2. Características ambientales del área de estudio**

El área de estudio estuvo comprendido dentro de un clima tropical-húmedo, caracterizado por presentar una temperatura promedio anual de 24 °C.

El promedio anual de precipitaciones es de 3,428.8 mm., varía en intensidad, duración y frecuencia; por encontrarse en un piso altitudinal de 668.00 m.s.n.m. de selva alta, se manifiesta un clima muy lluvioso que se producen entre los meses de noviembre a abril y alcanza un máximo extremo

en el mes de enero con un promedio mensual de 4,830.6 mm, humedad relativa de 87% y una temperatura media anual de 24 °C, (gabinete de meteorología UNAS).

## **3.2. Materiales y equipos**

### **3.2.1. Materiales**

Los materiales que se usaron para la implementación de los modelos de tratamiento fueron los siguientes: cajas de teknopor con tapas, tubería de agua, manguera, válvulas, pegamento, silicona.

### **3.2.2. Equipos**

Los equipos que se usaron para la ejecución del presente trabajo de investigación fueron los siguientes: oxímetro (HANNA) modelo HI 9146, pHmetro (SERENGO) modelo SG2, termómetro digital incorporado al pHmetro (SERENGO) modelo SG2 (ROAST), balanza analítica marca PRECISA modelo XB 120A y un calentador marca SCHOTT modelo H3 CAT, debidamente calibrados.

## **3.3. Metodología**

### **3.3.1 Criterios de diseño del modelo Reactor Anaerobio y Filtro de Flujo Vertical Inverso RAFFVI**

### 3.3.1.1 Población

Para el diseño del modelo de tratamiento se tomó la producción de una persona y con ello se plantearon los caudales de prueba.

### 3.3.1.2 Dotación de agua

Según la clasificación del INEI (1998), para poblaciones pequeñas recomienda tomar 260 L/hab/día como dotación de agua asignada.

### 3.3.1.3 Datos básicos para la determinación del tamaño de los caudales de prueba

Cuadro 1. Datos básicos para la determinación del tamaño de planta

Variables de Cálculo	
Porcentaje de pérdida de agua(%P)	0.04
Cobertura o porcentaje de población servida (%C)	1
Coefficiente De variación de Consumo Máximo Diario (K1)	1.3
Coefficiente De variación de Consumo Máximo Horario (K2)	2.5
Dotación de agua (L/hab/día)	260

Fuente: INEI (1998).

Cuadro 2. Calculo de la demanda de producción máxima diaria

Población	Población de diseño servida (hab)	Demanda producción promedio (L/s)	Demanda de producción máxima diaria (L/s)
A	$B=A*\%C$	$C=B*Dot/((1-\%P)*86400)$	$D=C*K1$
1	1	0.003	0.004

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3. Propuesta de caudales de prueba para los sistemas de tratamiento

Caudales de prueba	
Caudal de prueba 1 (mL/s)	0.5
Caudal de prueba 2 (mL/s)	1

Caudal de prueba 3 (mL/s)	2
Caudal de prueba 4 (mL/s)	4

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2 Características hidráulicas del reactor anaerobio

#### 3.3.2.1 Rango de caudales de trabajo

En el sedimentador se colocaron 8 salidas, cuyas tuberías tuvieron una válvula que graduó el caudal de salida del sedimentador e ingreso al reactor anaerobio, se trabajó con cuatro caudales de prueba:

Cuadro 4. Caudales de prueba

Descripción	Caudal	Unidades
Reactor anaerobio 1	0.5	mL/s
Reactor anaerobio 2	1	mL/s
Reactor anaerobio 3	2	mL/s
Reactor anaerobio 4	4	mL/s

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.3.2.2 Tiempo de retención hidráulico

Según LETTINGA (1995), el tiempo de retención hidráulica para reactores anaerobios UASB es de 7 horas, para nuestro diseño se propuso los siguientes tiempos de retención hidráulica.

Cuadro 5. Tiempo de llenado o tiempo de retención hidráulica TRH del reactor anaerobio

Descripción	Caudal (mL/s) (A)	Tiempo de retención hidráulica (B)	Volumen (mL) (C)=(A)x(B)
Reactor anaerobio 1	0.5	2h 16 min y 40s	4100

Reactor anaerobio 2	1.0	1 h 08 min y 20s	4100
Reactor anaerobio 3	2.0	0 h 34 min y 10s	4100
Reactor anaerobio 4	4.0	0h 17min y 05s	4100

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6. Tiempo de llenado o tiempo de retención hidráulica TRH del filtro de flujo vertical inverso.

Descripción	Caudal (mL/s) (A)	Tiempo de retención hidráulica (B)	Volumen (mL) (C)=(A)x(B)
Filtro 1	0.5	2 h 46 min y 40 s	5000
Filtro 2	1.0	1 h 23 min y 20 s	5000
Filtro 3	2.0	0 h 41 min y 40 s	5000
Filtro 4	4.0	0 h 20 min y 50 s	5000

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7. Tiempo de llenado o tiempo de retención hidráulica TRH del modelo RAFFVI.

Descripción	Tiempo de retención hidráulica total
Modelo RAFFVI 1	5 h 03 min y 20 s
Modelo RAFFVI 2	2 h 31 min y 40 s
Modelo RAFFVI 3	1 h 15 min y 50 s
Modelo RAFFVI 4	0 h 37 min y 55 s

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2.3 Diseño del reactor anaerobio (Modelo)

De acuerdo a las consideraciones técnicas sustentadas en el cuadro 2, 5 y 7 se propuso las siguientes dimensiones para el reactor anaerobio:

Cuadro 8. Ingreso de datos para el dimensionamiento del reactor anaerobio.

Ingreso de datos	Signo	Unidad	Valor
Número de unidades	N		1
Separación entre placas y pared en el plano horizontal	e'	cm	3
Espesor de las placas	e	cm	0.30
Longitud del módulo de placas	l	cm	24
Caudal de diseño de cada decantador	Qd	m <sup>3</sup> /s	0.0000005
Tasa de decantación real	qr	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día	27
Módulo de eficiencia de las placas	S		1
Ancho del módulo de placas	b	cm	20
Ancho total neto de la zona de decantación	B	cm	20
Viscosidad a 25 C°	n	cm <sup>2</sup> /s	0.00893
Angulo de inclinación de las placas	°	Grados	90
		Radian	1.57

Cuadro 9. Resultados de dimensionamiento para el reactor anaerobio.

Cálculo	Signo	Criterio	Resultado	Unidad
Espaciamiento entre placas	d	$d=e' \cdot \text{sen} \alpha - e$	3	cm
Longitud útil dentro de las placas	lu	$lu=l-e'$	21	cm
Longitud relativa del módulo de placas	L	$L=lu/d$	7.80	m
Coefficiente de forma del modulo	f	$f=\text{sen} \alpha (\text{sen} \alpha + L \cdot \text{cos} \alpha) / S$	1	
Área superficial de la unidad	As	$As = Qd / (f \cdot Vs)$	0.002	m <sup>2</sup>
Numero de separaciones formados entre las placas	N	$N = As \cdot \text{Sen} \alpha / (B \cdot d)$	0.30	
Longitud total del decantador	Lt	$Lt = l + (N \cdot d + (N+1) \cdot e) / \text{Sen} \alpha$	0.25	m
Velocidad media del flujo	Vo	$Vo = Qd \cdot 100 / (As \cdot \text{Sen} \alpha)$	0.03	cm/s
Radio hidráulico del modulo	Rh	$Rh = b \cdot d / (2 \cdot (b+d))$	1.19	cm
Numero de Reynolds Nr<500	Nr	$Nr = 4Rh \cdot Vo / n$	17	
Velocidad longitudinal máxima	V'o	$V'o = (Nr/8)^{0.5} \cdot Vs \cdot 100$	0.05	cm/s
Velocidad de sedimentación de las partículas	Vs	$Vs = qr / 86400$	0.000313	m/s
Tasa de decantación aparente	qa	$qa = V'o \cdot \text{sen} \alpha \cdot 86.4$	27	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día
Longitud de placas	Lp		4	cm
Espacio entre placas y base	Epb		2	cm
Altura de la base	Ab		4.40	cm
Altura total del modelo	At		10.40	cm

De acuerdo con la literatura y las evaluaciones de plantas, se han conseguido mejores resultados con los decantadores de ductos o placas con números de Reynolds inferiores a 500 (CEPIS, 2004).

### 3.3.3 Características hidráulicas del filtro

#### 3.3.3.1 Características del medio de contacto

Los medios de contacto son materiales inertes seleccionados como la piedra, grava, arena gruesa y topsoil. Con características y estructuras irregulares que propician el paso del agua, haciendo una función de filtro y la naturaleza áspera en el caso de la grava favorece la permanencia de la biopelícula en su superficie.

Cuadro 10. Factor de forma.

Forma del grano	Factor
Esférico	1.00
Casi esférico	0.95
Redondeado	0.90
Alargado	0.85

Fuente: CANEPA (2005).

#### 3.3.3.2 Composición del lecho filtrante

El filtro de flujo vertical inverso contó con 04 lechos bien distinguidos siendo los siguientes:

Cuadro 11. Composición del lecho filtrante.

Capa	Lecho	Medida (pulg)	Altura (cm)	Tasa de infiltración (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> *s)
Fondo	Piedra	3/4"	2	-
4ta	Piedra	3/8"	2	-
3ra	Grava	1/8"	2	-
2da	Arena gruesa	0.093	2	> 0.0042
1ra	Topsoil	0.075	2	0.0001 - 0.0042

Fuente: ROMERO (2000).

### 3.3.3.3 Profundidad del lecho filtrante

Para nuestro diseño se consideró el tratamiento previo que recibe el agua en el reactor anaerobio, además se tomó en cuenta la altura establecida para cada lecho de filtración siendo la profundidad máxima 10 cm.

### 3.3.3.4 Rango de caudales de trabajo

Los caudales de salida de cada reactor anaerobio deben asemejarse al caudal de ingreso, sin embargo deben ser menores o iguales, debido a la pérdida del agua en el transcurso de su recorrido, producto de la evaporación, el consumo de los seres vivos, etc.; asimismo la pérdida de agua en el transcurso del recorrido es mínima por ello despreciable para la investigación:

Cuadro 12. Caudales de ingreso a los filtros.

Descripción	Caudal	Unidades
Filtro 1	0.5	mL/s
Filtro 2	1	mL/s
Filtro 3	2	mL/s
Filtro 4	4	mL/s

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3.5 Tasa de infiltración

De acuerdo a los rangos de caudales de trabajo la tasa de infiltración varía para cada filtro de la siguiente manera:

$$T_f = Q/A$$

T<sub>f</sub> = Tasa de filtración

Q = Caudal

A = Área del lecho

Cuadro 13. Tasa de infiltración de los filtros.

Descripción	Caudal (mL/s) o (cm <sup>3</sup> /s)	Área (cm <sup>2</sup> )	Tasa de infiltración (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> *s)
Filtro 1	0.5	500	0.001
Filtro 2	1.0	500	0.002
Filtro 3	2.0	500	0.004
Filtro 4	4.0	500	0.008

Fuente: Elaboración propia.

Según ROMERO (2000), la arena tiene una tasa de infiltración mayor a 15 cm/hora o 0.0042 cm/s y el topsoil se encuentra entre 0.0001 y 0.0042 cm/s con ello la tasa de infiltración encontrada en los filtros se encuentra dentro del rango.

### 3.3.3.6 Diseño del filtro de flujo vertical inverso (Modelo)

Para el diseño del filtro de flujo vertical inverso se consideró los caudales de prueba propuestos en el cuadro 3; asimismo se tomó en cuenta el tiempo de retención hidráulico propuesto en el cuadro 6, por ello la velocidad del flujo, y el área de la superficie del lecho que realizó contacto con el fluido fueron diferentes; por otro lado el volumen total y parcial de los cinco medios utilizados fueron los mismos en todos los modelos evaluados.

Cuadro 14. Ingreso de datos para el dimensionamiento del filtro de flujo vertical inverso.

Ingreso de datos	Signo	Unidad	Valor
Número de unidades			1
Caudal de diseño	Q <sub>o</sub>	m <sup>3</sup> /s	0.05*10 <sup>-5</sup>

Conductividad hidráulica $K_5$	$K_5$	$\frac{\text{m}^3/\text{día}}{\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}}$	$4.32 \cdot 10^{-2}$ 800
Angulo de inclinación	Grados Radian		0.60 0.01
Pendiente del fondo del lecho (decimal)	$m = \text{sen} x$	%	0.01
Profundidad del agua en el filtro	Y	m	0.10
Longitud de la celda del filtro	L	m	0.25
Diámetro de los vacíos del medio	D	m	$0.12 \cdot 10^{-2}$
Viscosidad cinemática a 25 C°	$V_i$	$\text{m}^2/\text{s}$	$8.93 \cdot 10^{-7}$

Cuadro 15. Resultados de dimensionamiento para el filtro de flujo vertical inverso.

Cálculo	Criterio	Unidad	Resultado
Área de la sección transversal perpendicular al flujo $A_6$	$A_6 = Q / (k_5 \cdot s)$	$\text{m}^2$	$0.16 \cdot 10^{-1}$
Ancho de la celda del filtro	$W = A_6 / y$	m	0.20
Área superficial del filtro	$A_5 = LW$	m	0.05
Gradiente hidráulico s	$s = m \cdot y / L$	m/m	$0.03 \cdot 10^{-1}$
Velocidad de "Darcy" v	$v = Q / Wy$	m/día	2.70
	v	m/s	$0.03 \cdot 10^{-3}$
Numero de Reynolds $N_R < 1$	$Nr = (v \cdot D) / V_i$		0.04

El número de Reynolds es función de la velocidad de flujo, del tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua. En muchos casos  $N_R$  será mucho menor de 1, en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica efectiva será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy (LARA, 2005).

### 3.3.4. Acondicionamiento del área de estudio

Después de haber seleccionado el área para la instalación de los modelos de tratamiento de aguas residuales, se realizó el desbroce de la vegetación presente, nivelación del terreno y cercado del área de trabajo.

### **3.3.5 Montaje del RAFFVI**

Para el desarrollo de la investigación se construyó el modelo de tratamiento mostrado en la Figura 38 del Anexo.

### **3.3.6 Puesta en marcha del modelo RAFFVI**

#### **3.3.6.1 Prueba hidráulica**

Para el ensayo de la prueba hidráulica se llenó el modelo RAFFVI con agua, evaluando el grado de hermeticidad en paredes e interconexiones de la estructura, garantizando así la minimización de pérdidas del fluido y el buen funcionamiento del reactor anaerobio y del filtro de flujo vertical inverso, así como de todos los dispositivos previos a utilizar y demás conexiones que se realizaron.

La prueba hidráulica se realizó una vez instalado los dispositivos de ingreso y salida. Se procedió a llenar manualmente el tanque para que alimente a todo el sistema, el tiempo de prueba duró 5 horas.

#### **3.3.6.2 Puesta en marcha**

Se realizó la comprobación del funcionamiento del modelo y se puso en marcha el mismo.

Se requirió de alimentación del tanque para propiciar el funcionamiento del modelo.

### 3.3.7 Operación del RAFFVI

Después de la implementación del modelo se inició con la operación del reactor anaerobio y el filtro de flujo vertical inverso cada vez que se realizó la toma muestras para la investigación, con un tiempo de residencia aproximado a 3 meses.

### 3.3.8. Parámetros de operación

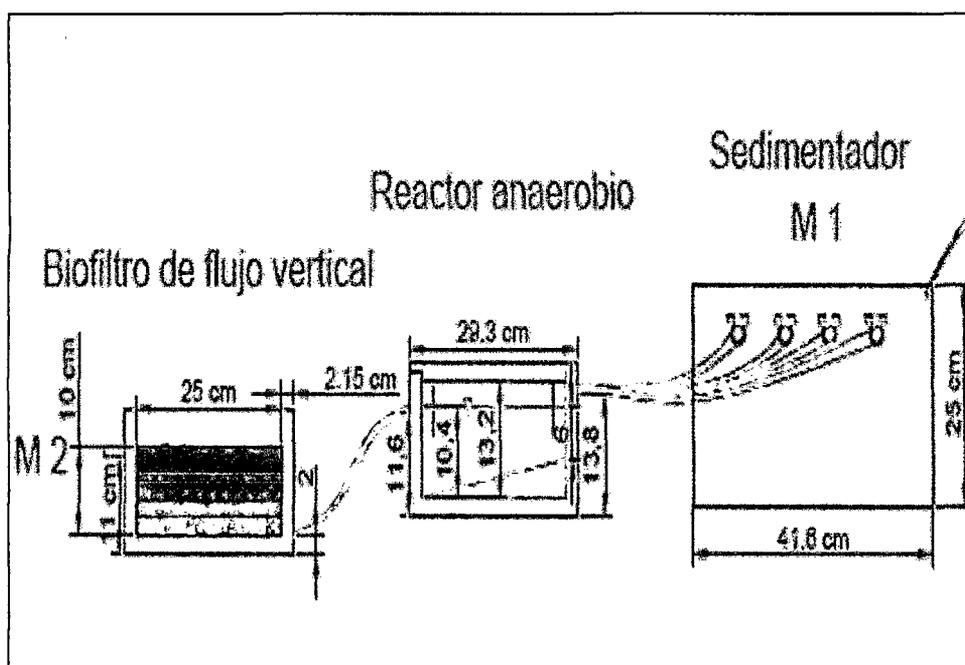
Los parámetros de control y variables de respuesta del reactor anaerobio y del filtro de flujo vertical inverso se presentan en la tabla siguiente.

Cuadro 16. Parámetros de operación.

Parámetros	Análisis
Microbiológico	NMP coliformes termotolerantes
Físico	Determinación pH
Físico	Temperatura
Físico	Sólidos totales en suspensión
Químico	Determinación de oxígeno disuelto (OD)

### 3.3.9. Muestreo

El primer muestreo se realizó en el sedimentador (M1) y el segundo muestreo se realizó en el efluente del filtro (M2) (ver figura 1), el horario en la que se tomaron las muestras fue al promediar las 8 am.



M = Punto de muestreo

Figura 1. Puntos de muestreo

Cuadro 17. Periodo de medición

Parámetros	Análisis	Periodo de medición	Total
Microbiológico	NMP coliformes termotolerantes	Cada 14 días	4
Físico	Determinación pH	Cada 7 días	10
Físico	Temperatura	Cada 7 días	10
Físico	Sólidos totales	Cada 14 días	5
Químico	Determinación de oxígeno disuelto	Cada 14 días	5

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.10. Análisis de parámetros

#### 3.3.10.1. Determinación de temperatura

Los datos de temperatura fueron tomados con el termómetro digital incorporado en el pH metro (SERENGO) modelo SG2.

### **3.3.10.2. Determinación de pH**

La determinación del potencial de hidrógeno se realizó *in situ* con el pH metro (SERENGO) modelo SG2.

### **3.3.10.3 Determinación de sólidos totales en suspensión**

Para determinar los sólidos totales suspendidos de una muestra obtenida, se puede determinar por el método más simple de las diferencias de pesos (SEOANEZ, 1999; RHEINHEIMER, 1987).

### **3.3.10.4. Determinación de oxígeno disuelto (OD)**

Se determinó utilizando un Oxímetro marca HANNA modelo HI 9146 debidamente calibrado, se tomó como dato inicial o testigo los datos registrados en el sedimentador, luego se tomaron los datos de cada uno de los modelos de prueba. Los resultados se reportaron en mg/L.

### **3.3.10.5 Determinación del número más probable de coliformes termotolerantes**

Se trabajó con caldo Brilla realizándose la técnica del número más probable (NMP) con serie de tres tubos y en tres etapas.

El medio se distribuyó en tubos de ensayo de 20 x 160 mm, conteniendo en su interior un tubito de Durham (REFAI, 1981; APHWA, 1999), desarrollándose la pruebas en las etapas de presunción y confirmación.

### 3.3.10.6. Control de caudales

El control del caudal de los modelos de prueba, se realizó mensualmente utilizando el método volumétrico, tomándose para ello una vez al mes, durante el tiempo de ejecución de la investigación. La medición del caudal se realizó en forma manual utilizando un cronómetro y un recipiente aforado. El procedimiento consistió en tomar un volumen de muestra cualquiera (V) y medir el tiempo transcurrido (t) desde que se introduce a la descarga hasta que se retira de ella; la relación de estos dos valores permite conocer el caudal (Q) en ese instante de tiempo. Se tuvo especial cuidado en el momento de la toma de muestra y la medición del tiempo, ya que es un proceso simultáneo donde el tiempo se toma en el preciso instante que el recipiente se introduce a la descarga y se detiene en el momento en que se retira de ella. Se realizaron varias mediciones y se calculó el promedio. El caudal se calculó con la siguiente fórmula:

$$Q=V/t$$

Siendo:

Q = caudal, en L/s

V = volumen, en L

t = tiempo, en segundos.

### 3.3.11. Componentes complementarios y en estudio

Los componentes en estudio del modelo diseñado estuvieron compuestos por un reactor anaerobio (Tratamiento primario) y un filtro de flujo

vertical inverso (Tratamiento secundario), como componente complementario se instaló un tanque y un sedimentador (Tratamiento primario) que alimentó a cada uno de los modelos propuestos con sus respectivos caudales de prueba (Figura 38 del Anexo).

#### **3.3.11.1. Tanque**

Se instaló un dispositivo cuyas medidas se aprecian en el Cuadro 72 del Anexo. Tuvo la siguiente función:

- Mantener el volumen de agua residual necesario para permitir el funcionamiento del sistema.
- Regular el caudal de agua para mantener el sistema con flujo continuo mientras se consume el volumen total del tanque.
- No se realizó la medición de ningún parámetro en este dispositivo.

#### **3.3.11.2. Sedimentador (Tratamiento primario)**

Se instaló un dispositivo cuyas medidas se aprecian en el Cuadro 73 del Anexo. Este dispositivo tuvo las siguientes funciones:

- Concentrar el agua residual proveniente del tanque.
- Decantar los sólidos en suspensión de mayor peso y volumen.
- Homogenizar el agua residual para que el fluido este en las mismas condiciones y tenga las mismas características antes de su ingreso al reactor anaerobio.

- En este punto se realizó la toma de muestras del agua residual para conocer las condiciones en las que realizó su ingreso al reactor anaerobio y al filtro de flujo vertical inverso.

### **3.3.11.3. Reactor anaerobio (Tratamiento primario)**

Se instaló el modelo del reactor anaerobio que permite condiciones anóxicas donde se desarrollan microorganismos anaerobios, cumplió las siguientes funciones:

- Sedimentar la materia orgánica, los sólidos suspendidos.
- Conformar el lodo activado.
- Generar gas metano.
- Atrapar sobrenadantes (Grasas, aceites, espumas).

### **3.3.11.4. Filtro de flujo vertical inverso (Tratamiento secundario)**

Se instaló el modelo del filtro conformado por varios lechos de arena, piedra y materia orgánica, además dentro del lecho existen microorganismos que conforman biopelículas, en la parte superior se instaló vegetación (*Colocasia e.*), por ello el filtro tuvo la siguiente función:

- Adsorber a través de la superficie del lecho los contaminantes presentes en el agua.
- Degradar con los microorganismos presentes en el lecho la materia orgánica presente en el agua.

- Propiciar la interacción microbiana
- Adsorber a través de las raíces de *Colocasia e.* los nutrientes presentes en el lecho.
- Este es el punto final donde se tomó las muestras del agua residual para conocer las condiciones en las que sale del filtro de flujo vertical inverso.

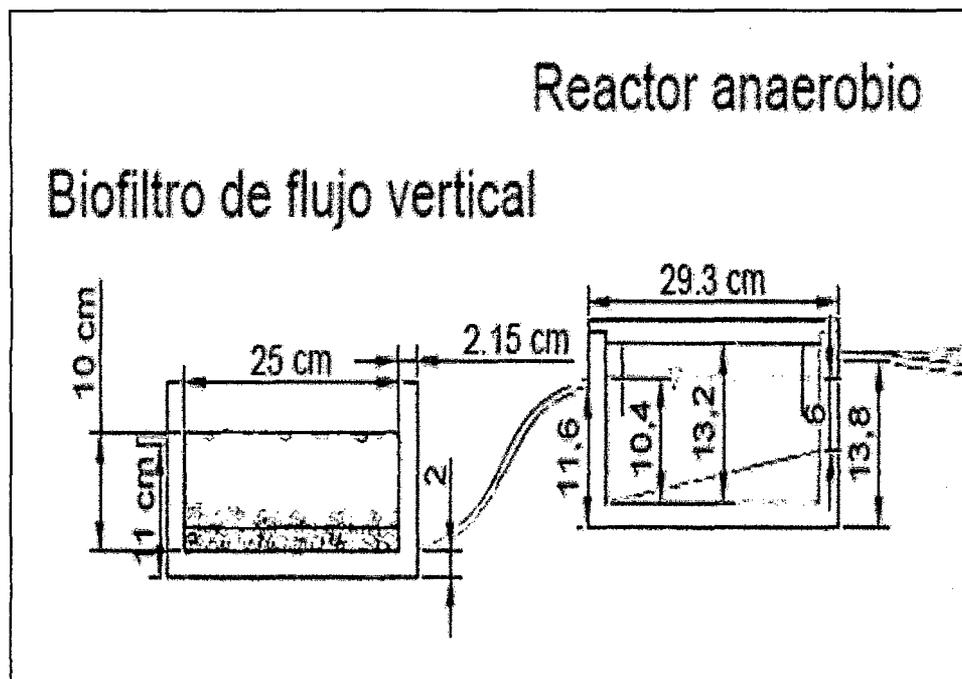
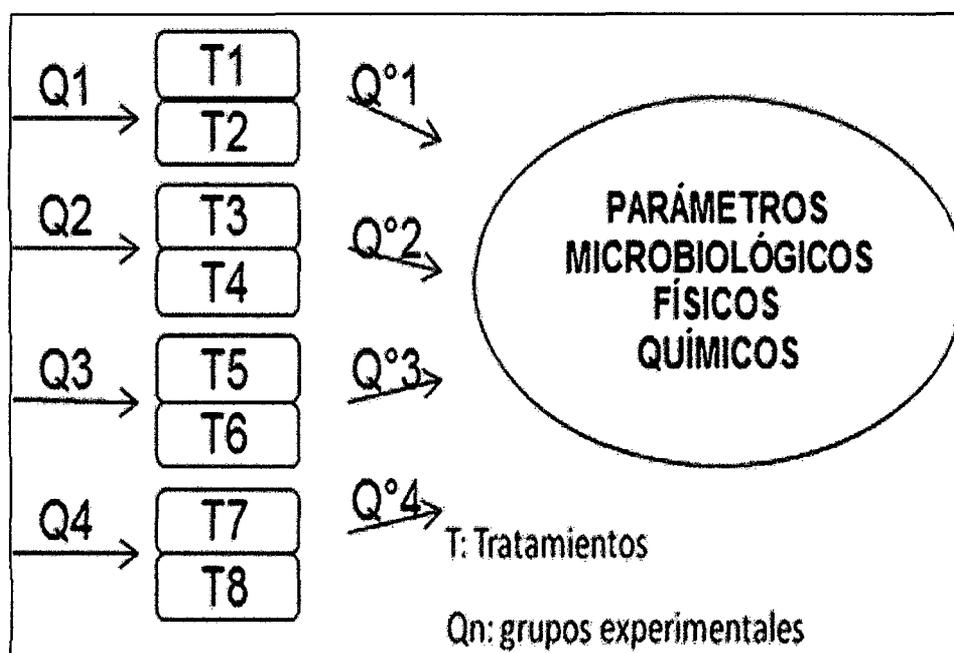


Figura 2. Modelos de tratamiento RAFFVI.

### 3.4. Diseño experimental

Se adaptó un diseño experimental con estímulo creciente, en el cual se trabajó dos tipos de sistemas de tratamiento (ST1: RAFFVI, ST2: RAFFVI con *Colocasia e.*), con cuatro caudales de prueba (Q1: 0.5 mL/s, Q2: 1 mL/s, Q3: 2 mL/s y Q4: 4 mL/s), de modo que se evaluó el rendimiento del modelo en remoción de sólidos totales en suspensión, coliformes

termotolerantes y se evaluó la variación porcentual del pH, temperatura y oxígeno disuelto, según el siguiente esquema:



Tn= Tratamientos, Qn= Caudal a ser tratado, Q'n= Caudal tratado

Figura 3. Diseño experimental

### 3.5. Tratamientos en estudio

Los tratamientos en estudio utilizados fueron los siguientes:

Cuadro 18. Descripción de los tratamientos estudiados.

Tratamiento	Caudales de prueba (mL/s)	Sistema de tratamiento
T1	0.5	RAFFVI
T2	0.5	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i>
T3	1	RAFFVI
T4	1	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i>
T5	2	RAFFVI
T6	2	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i>
T7	4	RAFFVI
T8	4	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i>

### **3.6. Variables**

#### **3.6.1. Variables dependientes**

Entre las variables dependientes evaluadas tenemos:

- Coliformes termotolerantes
- Sólidos totales en suspensión (STS)
- Oxígeno disuelto (OD)
- Potencial de hidrogeno (pH)
- Temperatura
- Eficiencia de remoción.

#### **3.6.2. Variables independientes**

Entre las variables independientes evaluadas tenemos:

- Sistema de tratamiento RAFFVI con y sin *Colocasia* e.
- Caudal (Q1, Q2, Q3 y Q4).

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Temperatura

En el cuadro 19 se presentan los datos registrados de temperatura, tomados en el afluente (Sedimentador) y efluente del RAFFVI para cuatro caudales de prueba y dos tipos de filtro (Filtro con y sin *Colocasia e.*), estos datos fueron tomados en un horario promedio de las 8 a.m.; en la figura 4 se muestra la relación entre caudal y temperatura encontrada en cada sistema de tratamiento y la figura 5 muestra la verificación del cumplimiento del LMP para la temperatura.

Cuadro 19. Resultados de temperatura tomados en el afluente (Sedimentador) y efluente del modelo RAFFVI.

Caudales de prueba (mL/s)	Sedimentador (Afluente) (Temperatura promedio)	RAFFVI (Efluente) (Temperatura promedio)	Variación de Temperatura promedio (%)	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i> (Efluente) (Temperatura promedio)	Variación de temperatura promedio (%)
0.5	25	25	0	25	0
1	25	25	0	25	0
2	25	25	0	25	0
4	25	25	0	25	0

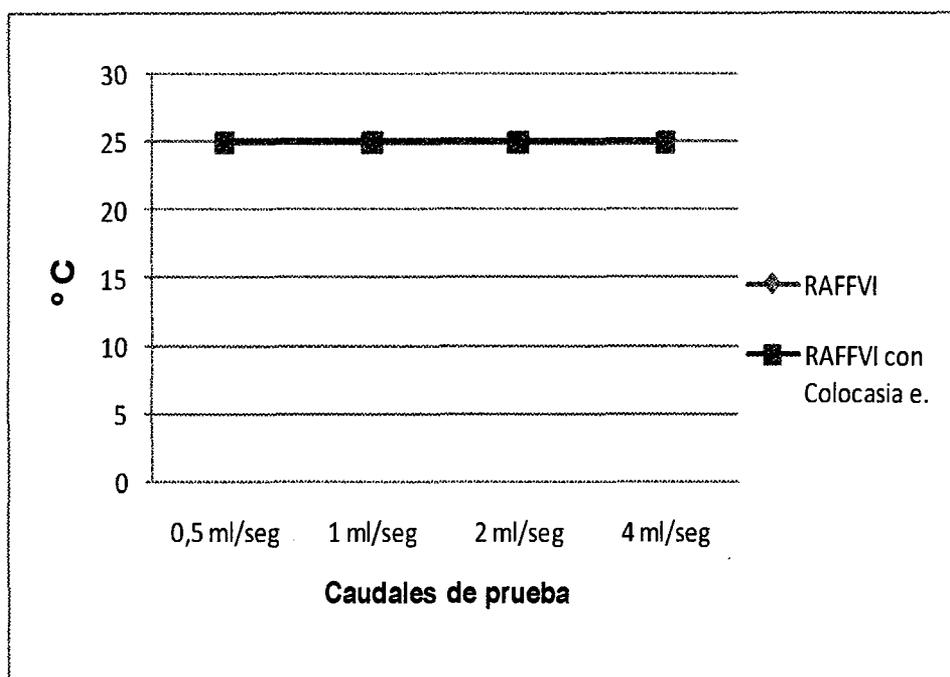


Figura 4. Influencia del modelo y el caudal en la variación de temperatura.

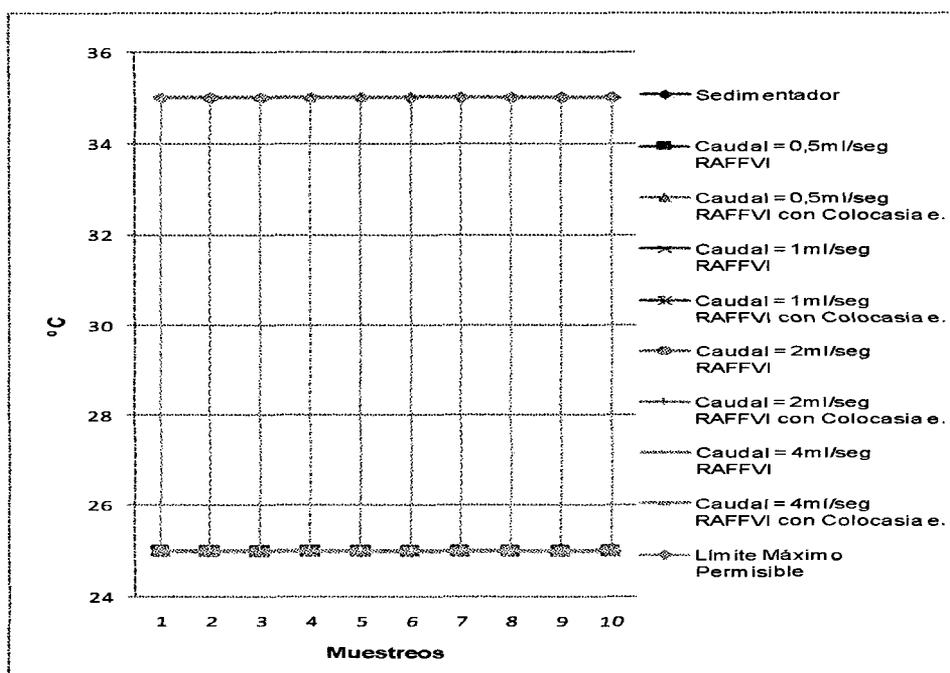


Figura 5. Verificación del cumplimiento del LMP para la temperatura.

#### 4.2. Potencial de hidrogeno (pH)

En el cuadro 20 se presentan los datos registrados del pH promedio, tomados en el afluente (Sedimentador) y efluente del RAFFVI para cuatro caudales de prueba y dos tipos de filtro (Filtro con y sin *Colocasia e.*), estos datos fueron tomados en un horario promedio de las 8 a.m.; las figuras 6, 7 y 8 muestran la variación porcentual del pH en el modelo RAFFVI con y sin *Colocasia e.* respectivamente y la figura 9 muestra la verificación del cumplimiento del LMP para el pH.

Cuadro 20. Resultados de pH promedio tomados en el afluente (Sedimentador) y efluente del modelo RAFFVI.

Caudales de prueba (mL/s)	Sedimentador (Afluente) (pH promedio)	RAFFVI (Efluente) (pH promedio)	Variación promedio (%)	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i> (Efluente) (pH promedio)	Variación promedio (%)
0.5	7.17	7.40	3.27	7.65	6.70
1	7.17	7.44	3.75	7.56	5.55
2	7.17	7.44	3.84	7.54	5.18
4	7.17	7.46	4.07	7.54	5.21

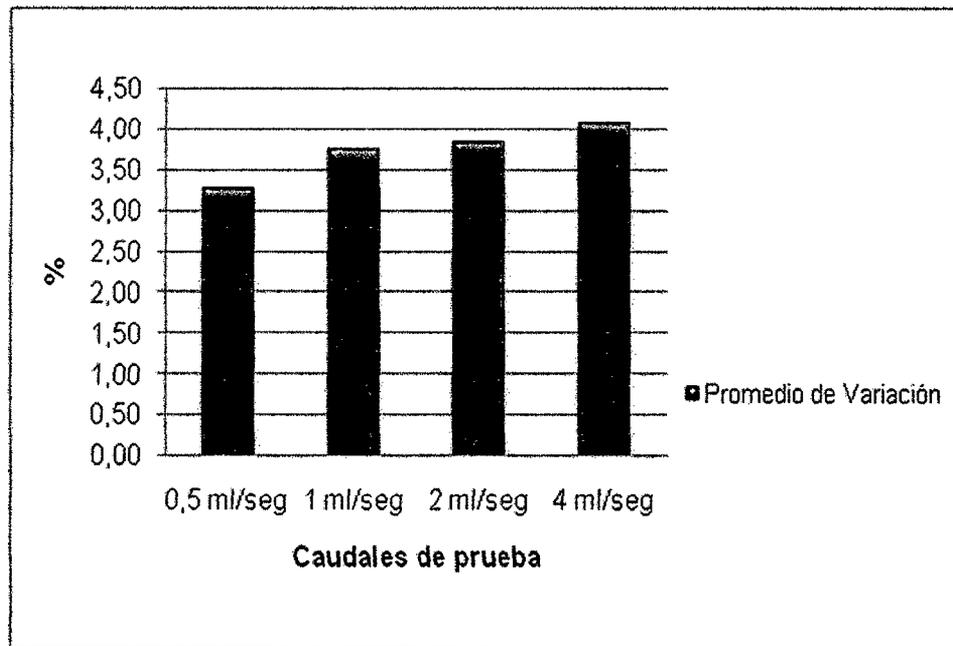


Figura 6. Variación del pH, según el caudal del modelo RAFFVI.

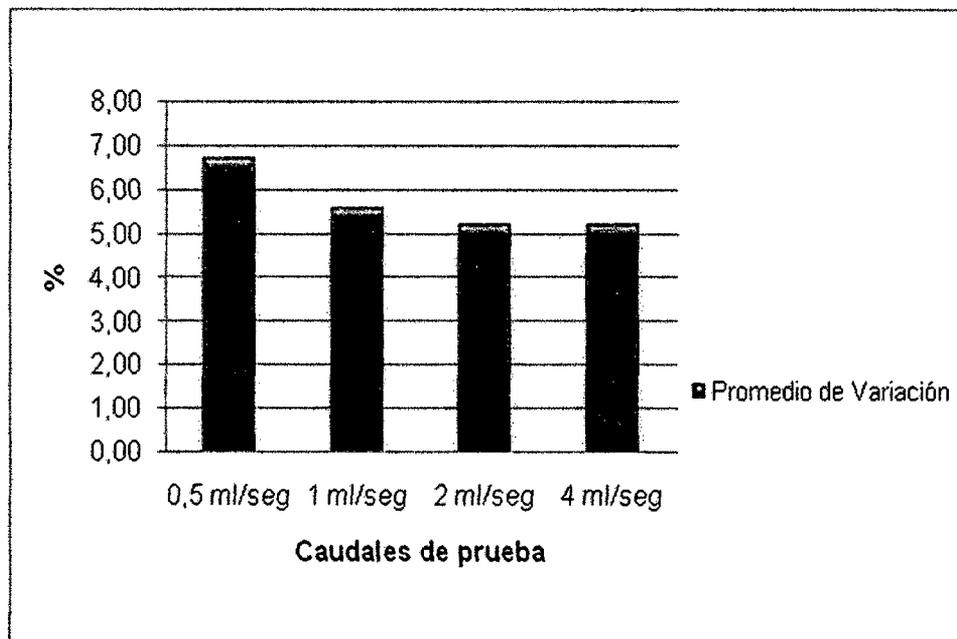


Figura 7. Variación del pH, según el caudal del modelo RAFFVI con *Colocasia e.*

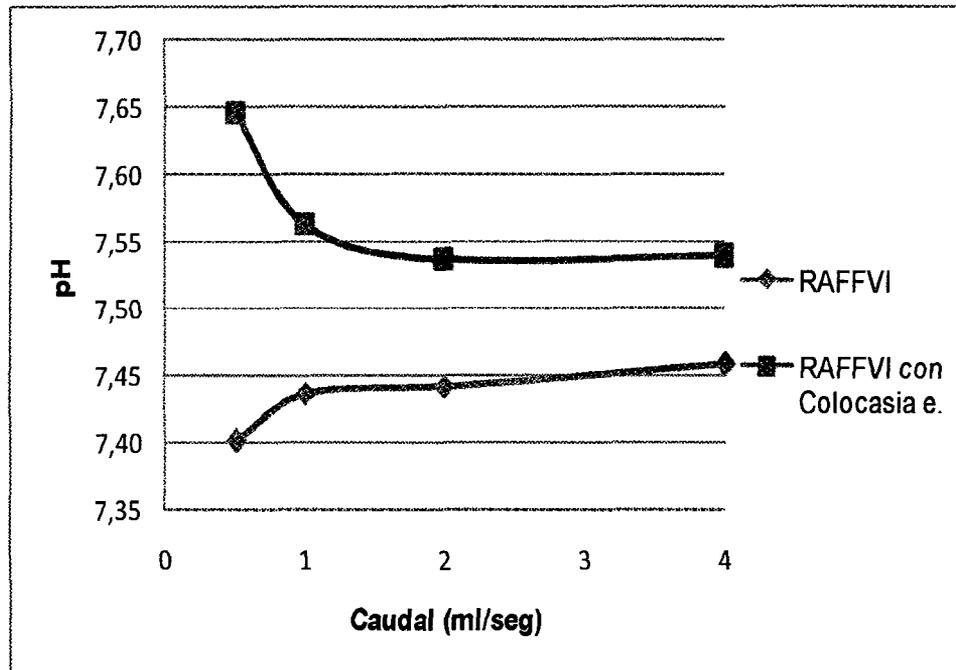


Figura 8. Influencia del modelo y el caudal de prueba en la variación del pH.

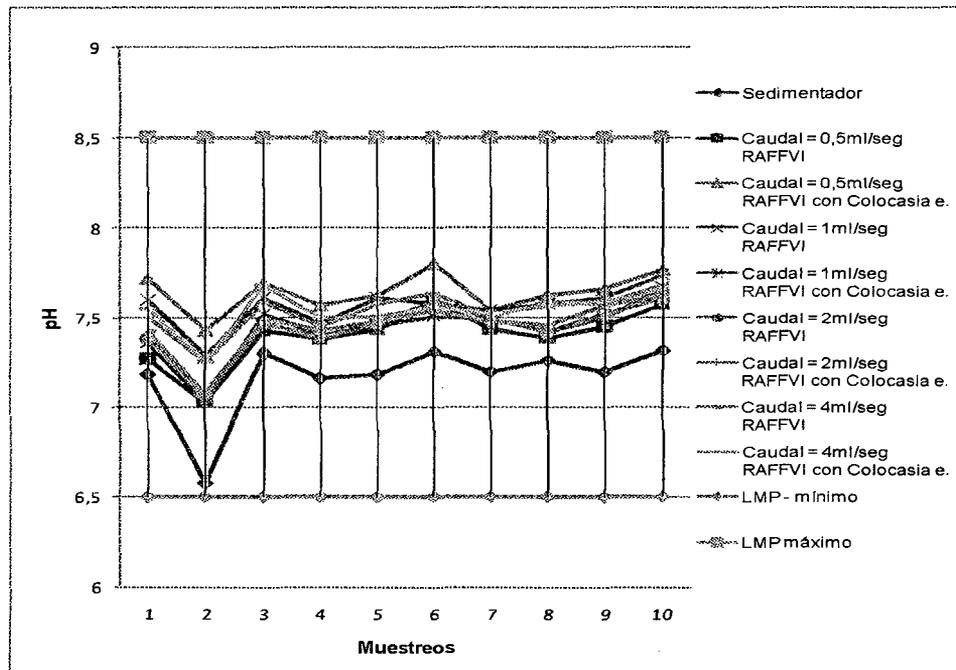


Figura 9. Verificación del cumplimiento del LMP para el pH.

Cuadro 21. Pruebas de múltiple rangos para pH respecto del uso de *Colocasia e.* en el modelo RAFFVI.

Método:	A. Tratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Tukey HSD					
95,0	Sedimentador	1	7.170	0.020	X
porcentaje	Filtro	4	7.435	0.020	X
	Filtro con colocasia	4	7.573	0.020	X
	<b>Contraste</b>			<b>Sig.</b>	<b>Diferencia</b>
	Filtro con <i>Colocasia e.</i> - Filtro			*	0.138
	Filtro con <i>Colocasia e.</i> - Sedimentador			*	0.403
	Filtro – Sedimentador			*	0.265
					<b>+/- Límites</b>
					0.085
					0.085
					0.085

\* indica una diferencia significativa.

Cuadro 22. Pruebas de múltiple rangos para pH respecto del caudal.

Método:	Caudal	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Tukey HSD					
95,0	2	2	7.49	0.038	X
porcentaje	1	2	7.50	0.038	X
	4	2	7.50	0.038	X
	0.5	2	7.53	0.038	X
	<b>Contraste</b>			<b>Sig.</b>	<b>Diferencia</b>
	0.5 – 1				0.025
	0.5 – 2				0.035
	0.5 – 4				0.025
	1 – 2				0.010
	1 – 4				0.000
	2 – 4				-0.010
					<b>+/- Límites</b>
					0.262
					0.262
					0.262
					0.262
					0.262
					0.262

\* indica una diferencia significativa.

### 4.3. Sólidos totales en suspensión (STS)

En el cuadro 23 se presentan los datos promedio registrados de STS, tomados en el afluente (sedimentador) y efluente del RAFFVI para cuatro caudales de prueba y dos tipos de filtro (filtro con y sin *Colocasia e.*), estos datos fueron tomados en un horario promedio de las 8 a.m.; las figuras 10, 11 y

12 muestran la eficiencia de remoción de STS y la figura 13 muestra la verificación del cumplimiento del LMP para STS.

Cuadro 23. Resultados de STS tomados en el afluente (sedimentador) y efluente del modelo RAFFVI.

Caudales de prueba (mL/s)	Sedimentador (Afluente) (mg/L)	RAFFVI (Efluente) (mg/L)	Eficiencia promedio (%)	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i> (Efluente) (mg/L)	Eficiencia promedio (%)
0.5	308	180	40.40	88	70.30
1	308	172	42.04	104	63.88
2	308	156	49.35	116	60.31
4	308	148	51.30	132	54.36

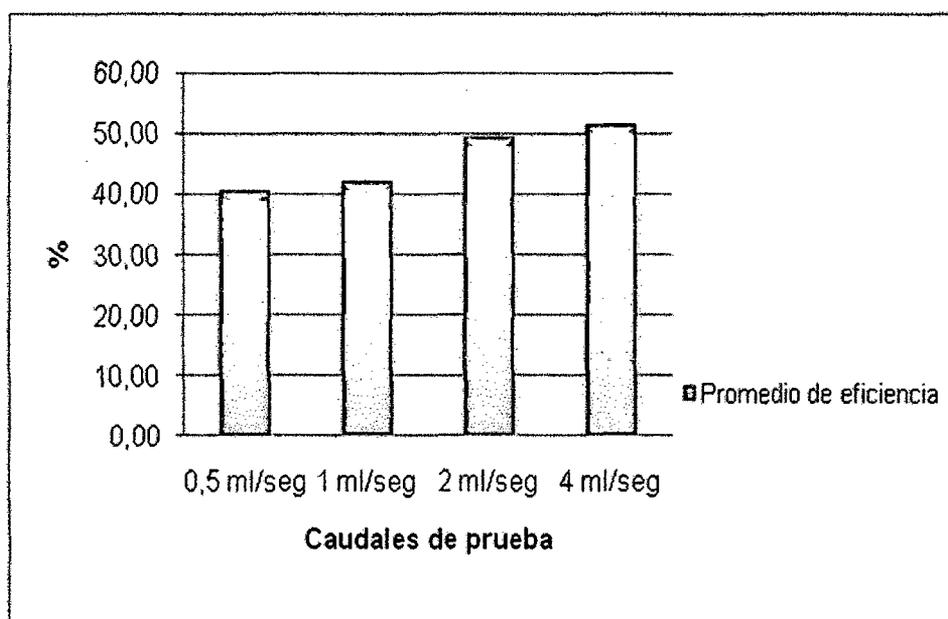


Figura 10. Eficiencia de remoción de STS, según el caudal para el modelo RAFFVI.

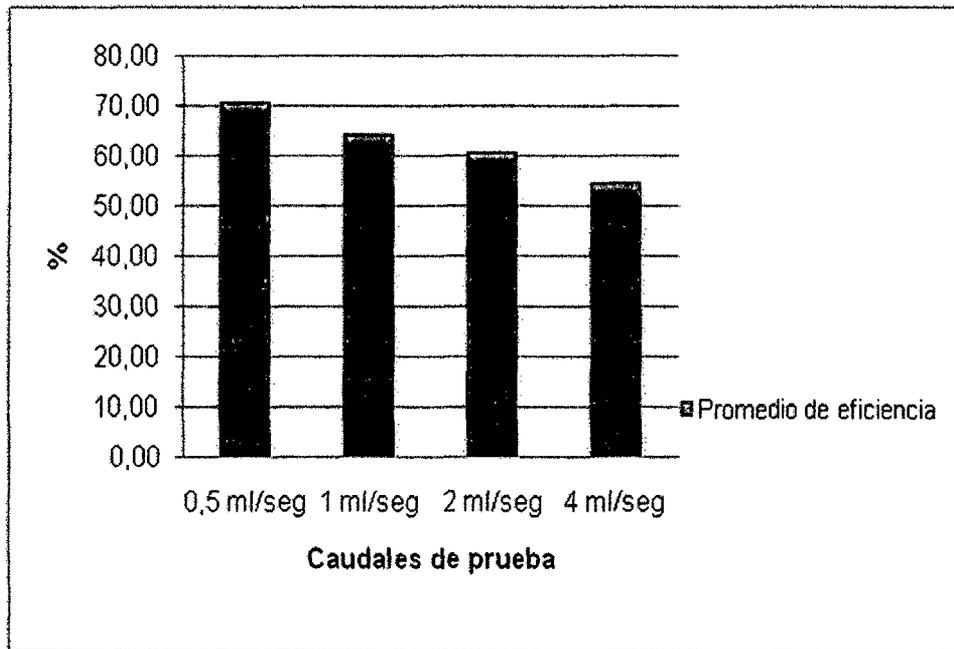


Figura 11. Eficiencia de remoción de los STS, según el caudal para el modelo RAFFVI con *Colocasia e.*

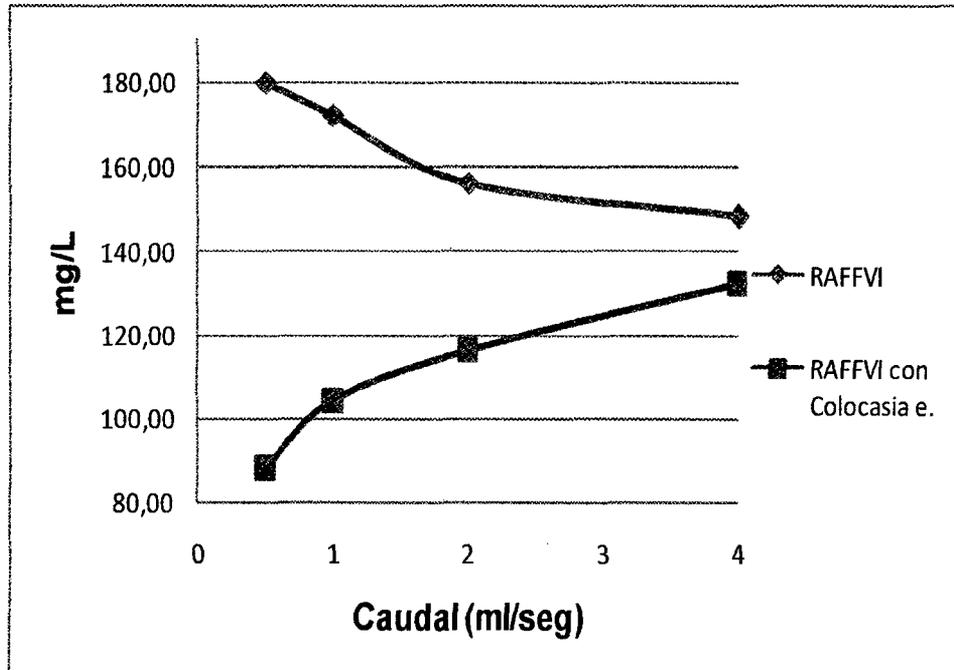


Figura 12. Influencia del modelo y el caudal en la variación de STS.

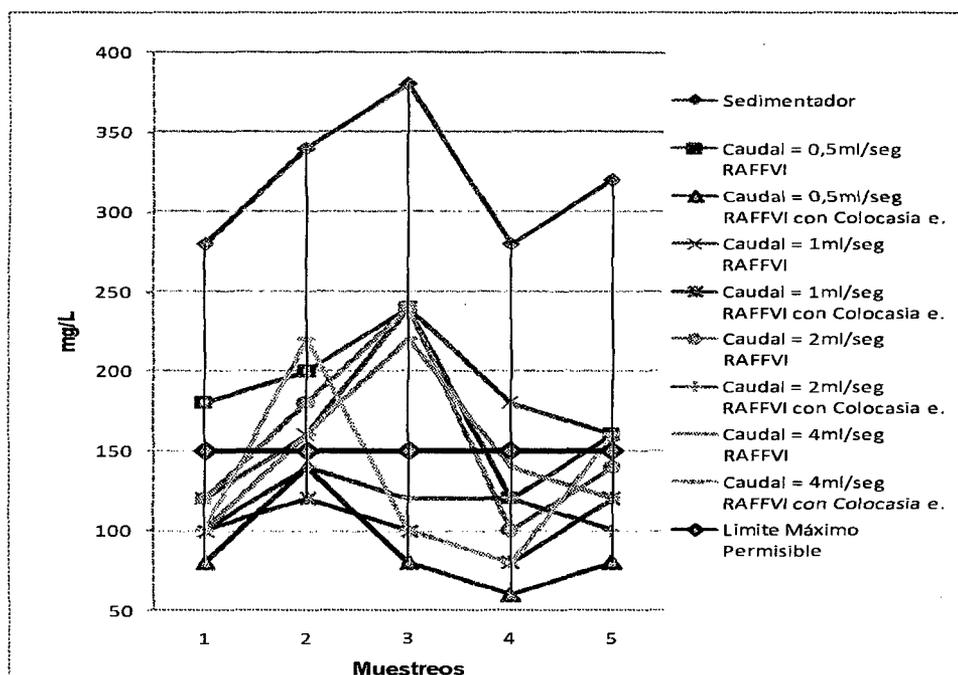


Figura 13. Verificación del cumplimiento del LMP para los STS.

Cuadro 24. Pruebas de múltiple rangos para STS respecto del uso de *Colocasia e.* en el modelo RAFFVI.

Método:	B. Tratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Tukey HSD					
95,0	Filtro con <i>Colocasia e.</i>	4	108.0	9.304	X
porcentaje	Filtro	4	163.0	9.304	X
	Sedimentador	1	320.0	9.304	X
	Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites
	Filtro con <i>Colocasia e.</i> - Filtro		*	-55.0	40.370
	Filtro con <i>Colocasia e.</i> - Sedimentador		*	-212.0	40.370
	Filtro - Sedimentador		*	-157.0	40.370

\*Indica una diferencia significativa.

Cuadro 25. Pruebas de múltiple rangos para STS respecto del caudal.

Método:	B. Caudal	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Tukey HSD					
95,0	0.5	2	134.0	16.533	X
porcentaje	2	2	136.0	16.533	X
	1	2	138.0	16.533	X
	4	2	140.0	16.533	X
	Contraste		Sig.	Diferencia	+/- Límites

0.5 – 1	-4.0	112.804
0.5 – 2	-2.0	112.804
0.5 – 4	-6.0	112.804
1 – 2	2.0	112.804
1 – 4	-2.0	112.804
2 – 4	-4.0	112.804

\* indica una diferencia significativa.

#### 4.4. Oxígeno disuelto (OD)

En los cuadros 26 se presentan los datos registrados de OD, tomados en el afluente (sedimentador) y efluente del RAFFVI para cuatro caudales de prueba y dos tipos de filtro (Filtro con y sin *Colocasia e.*), estos datos fueron tomados en un horario promedio de las 8 a.m.; las figuras 14, 15 y 16 muestran la variación porcentual de OD en el modelo RAFFVI con y sin *Colocasia e.* respectivamente y la figura 17 muestra la verificación del cumplimiento del ECA-Agua para el OD.

Cuadro 26. Resultados de OD tomados en el afluente (sedimentador) y efluente del modelo RAFFVI.

Caudales de prueba (mL/s)	Sedimentador (Afluente) (mg/L)	RAFFVI (Efluente) (mg/L)	Variación promedio (%)	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i> (Efluente) (mg/L)	Variación promedio (%)
0.5	5.27	5.16	2.05	5.04	4.40
1	5.27	5.16	2.01	5.05	4.06
2	5.27	5.17	1.94	5.06	4.02
4	5.27	5.17	1.89	5.06	4.02

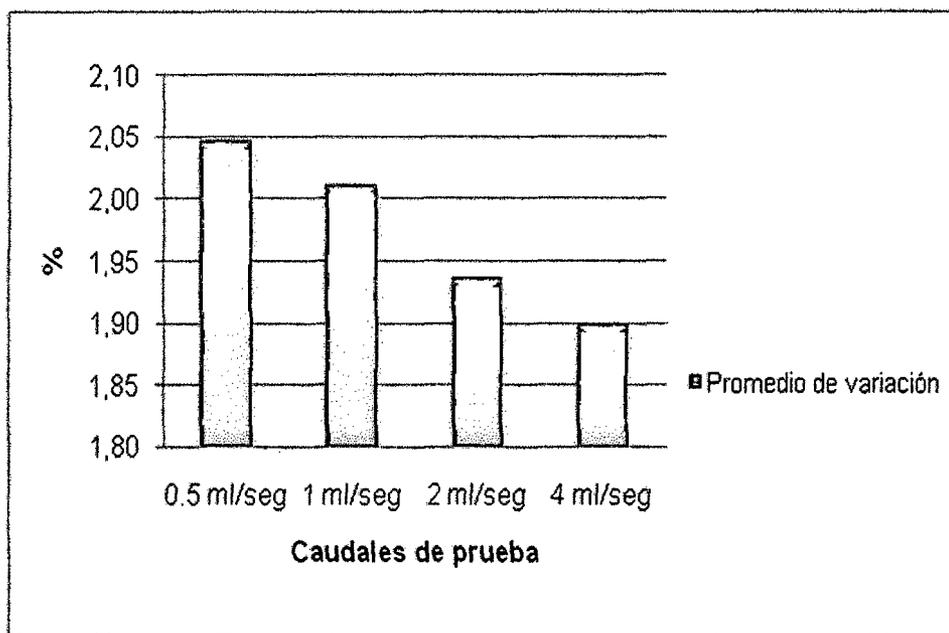


Figura 14. Variación de OD, según el caudal para el modelo RAFFVI.

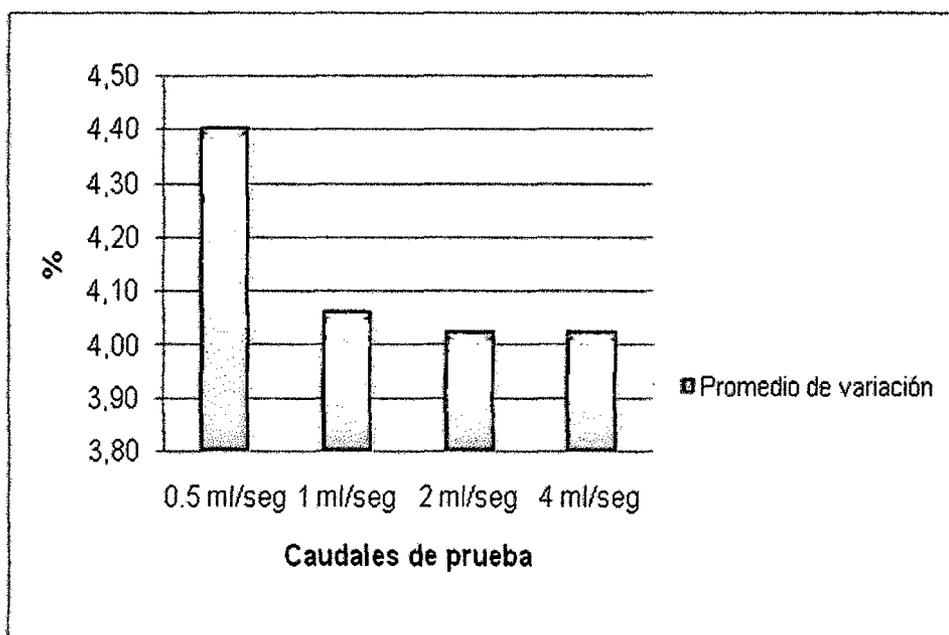


Figura 15. Variación de OD, según el caudal para el modelo RAFFVI con *Colocasia e.*

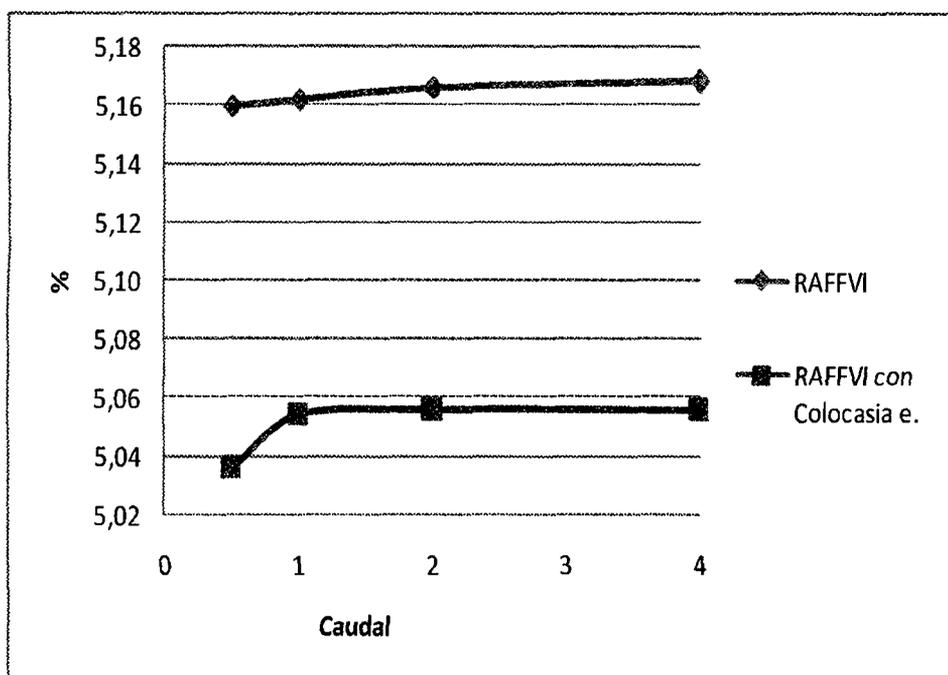


Figura 16. Influencia del modelo y el caudal en la variación del OD.

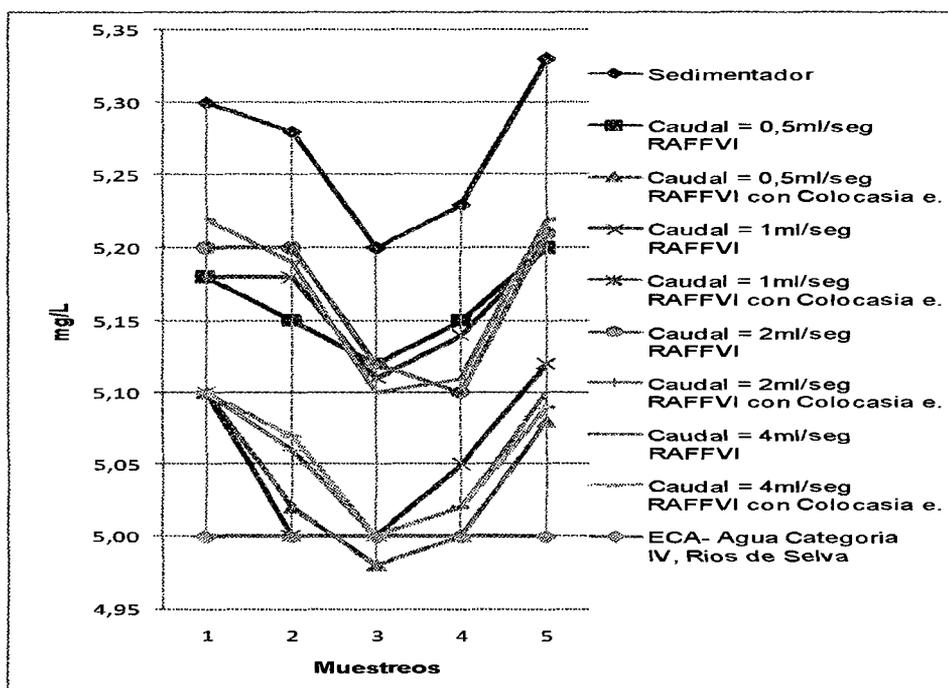


Figura 17. Verificación del ECA – Agua categoría IV, concentración de OD en los ríos de la selva.

Cuadro 27. Pruebas de múltiple rangos para OD respecto del uso de *Colocasia e.* en el modelo RAFFVI.

Método:	C. Tratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Tukey HSD					
95,0	Filtro con <i>Colocasia e.</i>	4	5.053	0.003	X
porcentaje	Filtro	4	5.165	0.003	X
	Sedimentador	1	5.270	0.003	X
	Contraste			Sig.	Diferencia +/- Límites
	Filtro con <i>Colocasia e.</i> - Filtro			*	-0.113 0.010
	Filtro con <i>Colocasia e.</i> - Sedimentador			*	-0.218 0.010
	Filtro – Sedimentador			*	-0.105 0.010

\* indica una diferencia significativa.

Cuadro 28. Pruebas de múltiple rangos para OD respecto del caudal.

Método:	C. Caudal	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Tukey HSD					
95,0	0.5	2	5.100	2.5	X
porcentaje	1	2	5.105	2.5	X
	2	2	5.115	2.5	X
	4	2	5.115	2.5	X
	Contraste			Sig.	Diferencia +/- Límites
	0.5 – 1				-0.005 0.017
	0.5 – 2				-0.015 0.017
	0.5 – 4				-0.015 0.017
	1 – 2				-0.010 0.017
	1 – 4				-0.010 0.017
	2 – 4				0.000 0.017

\* indica una diferencia significativa.

#### 4.5. Coliformes termotolerantes

En el cuadro 29 se presentan los resultados promedio de coliformes termotolerantes, encontrados en las muestras tomadas en el afluente (sedimentador) y efluente del RAFFVI, para cuatro caudales de prueba y dos tipos de filtro (Filtro con y sin *Colocasia e.*), estos datos fueron tomados en un horario promedio de las 8 a.m.; las figuras 18, 19 y 20 muestran la

eficiencia de remoción de los coliformes termotolerantes en el modelo reactor anaerobio y filtro de flujo vertical con y sin *Colocasia e.* respectivamente y la figura 21 muestra la verificación del cumplimiento del LMP para los coliformes termotolerantes.

Cuadro 29. Resultados de coliformes termotolerantes encontrados en el afluente (sedimentador) y efluente del modelo RAFFVI.

Caudales de prueba (mL/s)	Sedimentador (Afluente) (NMP/100mL)	RAFFVI (Efluente) (NMP/100mL)	Eficiencia promedio (%)	RAFFVI con <i>Colocasia e.</i> (Efluente) (NMP/100mL)	Eficiencia promedio (%)
0.5	460	25	94.67	18	96.14
1	460	95	79.29	37	92.01
2	460	122	73.59	80	82.72
4	460	233	49.46	240	47.82

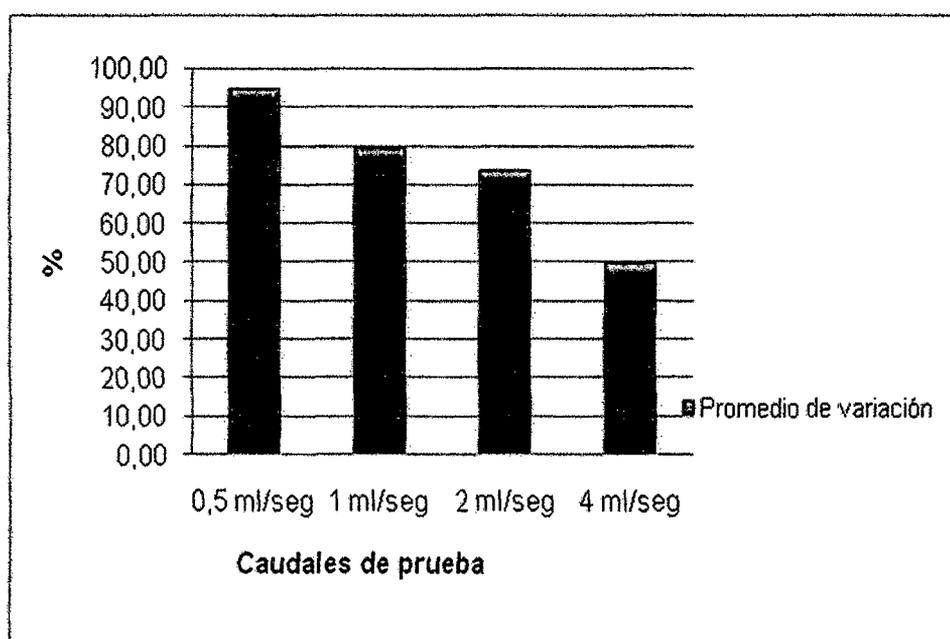


Figura 18. Eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes, según el caudal para el modelo RAFFVI.

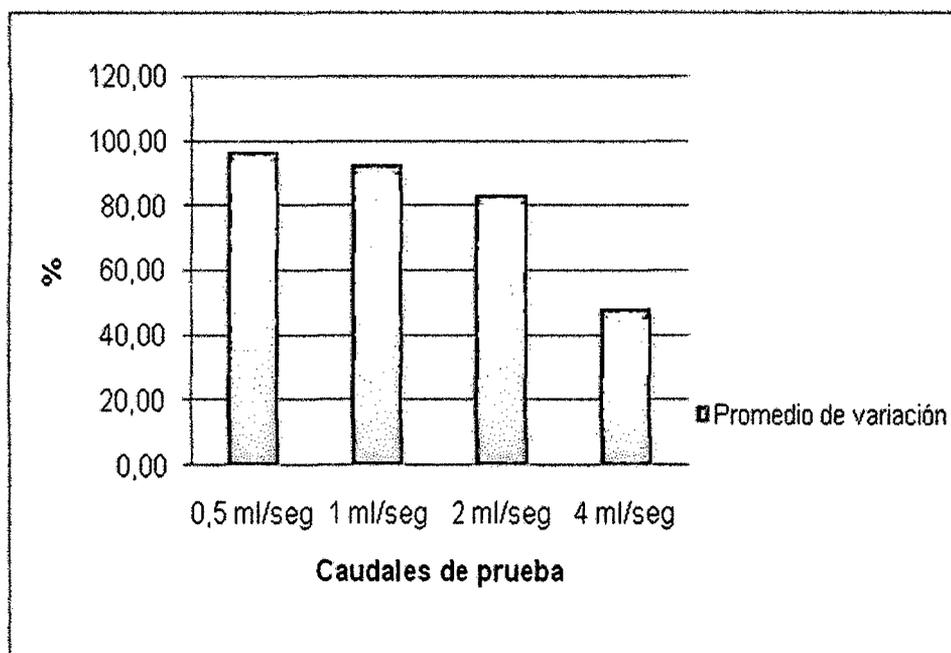


Figura 19. Eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes, según el caudal para el modelo RAFFVI con *Colocasia e.*

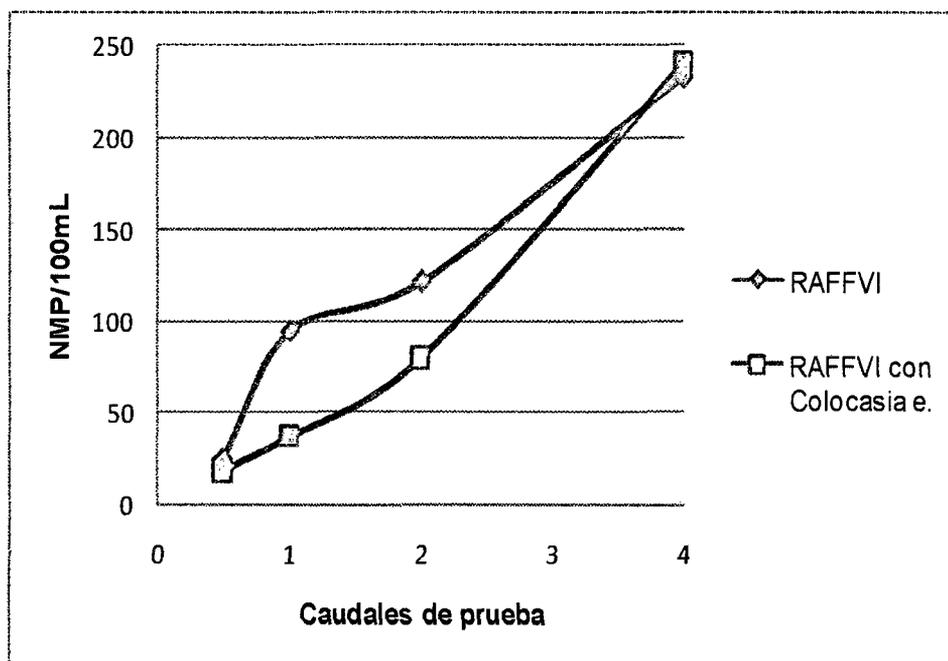


Figura 20. Influencia del sistema de tratamiento y el caudal en la variación de coliformes termotolerantes.

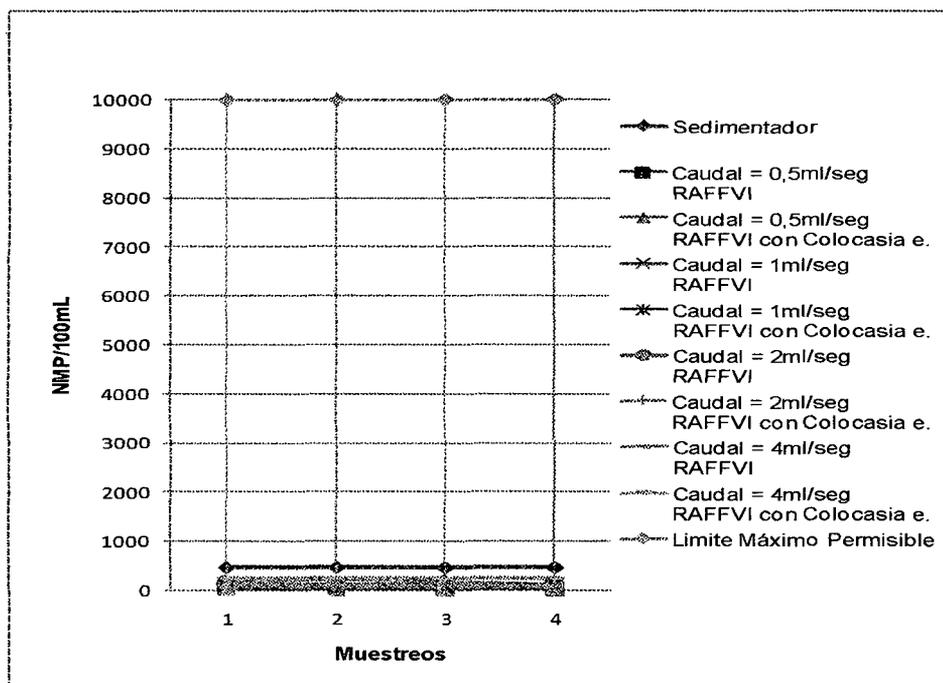


Figura 21. Verificación del cumplimiento del LMP para coliformes termotolerantes.

Cuadro 30. Pruebas de múltiple rangos para coliformes termotolerantes respecto del uso de *Colocasia e.* en el modelo RAFFVI.

Método:	D. Tratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Tukey HSD					
95,0	Filtro con <i>Colocasia e.</i>	4	93.75	27.809	X
porcentaje	Filtro	4	118.75	27.809	X
	Sedimentador	1	460.00	27.809	X
	Contraste			Sig.	Diferencia +/- Límites
	Filtro con <i>Colocasia e.</i> - Filtro				-25.00 120.668
	Filtro con <i>Colocasia e.</i> - Sedimentador			*	-366.25 120.668
	Filtro - Sedimentador			*	-341.25 120.668

\* indica una diferencia significativa.

Cuadro 31. Pruebas de múltiple rangos para coliformes termotolerantes respecto del caudal.

Método:	D. Caudal	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Tukey HSD	0.5	2	21.5	15.072	X

95,0	1	2	66.0	15.072	X
porcentaje	2	2	101.0	15.072	X
	4	2	236.5	15.072	X
	<b>Contraste</b>		<b>Sig.</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>
	0.5 – 1			-44.5	102.837
	0.5 – 2			-79.5	102.837
	0.5 – 4		*	-215.0	102.837
	1 – 2			-35.0	102.837
	1 – 4		*	-170.5	102.837
	2 – 4		*	-135.5	102.837

\* indica una diferencia significativa.

#### 4.6. Propuesta de diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales para el internado de varones “Callao y Sheraton”

Cuadro 32 .Periodos de diseño recomendables.

Elemento	Periodo de diseño (años)
Fuente Planta de tratamiento	De 5 a 10

Fuente. Valdez, (1991).

Cuadro 33. Vida útil de los elementos del sistema de tratamiento

Elemento	Vida útil (años)
Planta de tratamiento Obra civil	40

Fuente. Valdez, (1991).

Cuadro 34. Población de diseño.

Internado	Población
Callao	40
Sheraton	80
Nuevo	120
<b>Total</b>	<b>240</b>

Fuente. Oficina de Planificación - UNAS, (2012).

Cuadro 35. Clasificación de la dotación del agua en el Perú

Categoría de las ciudades	Tamaño de la población (miles de habitantes)	Dotación de agua potable L/hab/día
Muy pequeña	De 2 a 10	260
Pequeña	De 10 a 100	200
Intermedia	De 100 a 1000	150
Grande	Mayor de 1000	180

Fuente: INEI, (1998).

Cuadro 36. Datos básicos para la determinación del tamaño de planta.

Variables de Cálculo	
Coficiente de variación de Consumo Máximo Diario (K1)	1.3
Coficiente de variación de Consumo Máximo Horario (K2)	2.5
Dotación (L/hab/d)	260

Cuadro 37. Cálculo del caudal de tratamiento.

Ingreso de datos	Signo	Criterio	Valor	Unidad
Población futura	P		240	hab
Dotación	D		260	L/hab/día
Consumo de promedio diario anual de agua potable	Qm	$Qm = P * D / 86400$	0.72	L/s
Constante de producción de aguas residuales	C		0.80	%
Caudal de aguas residuales	Q	$Q = Qm * C$	0.58	L/s
Producción máximo diario de aguas residuales	Qmd	$Qmd = Q * K1$	0.75	L/s
Producción máximo horario de aguas residuales	Qmh	$Qmh = Q * K2$	1.44	L/s
Longitud de red	Lr		60	m
Buzones	Bz		1	und
Caudal de infiltración	Qi		0.02	L/s
Caudal total de aguas residuales	Qt	$Qt = Qmh + Qi$	1.46	L/s

Cuadro 38. Características de las aguas residuales del efluente del SS.HH del internado de varones de la UNAS.

Parámetros	Unidad	Indicador
Temperatura	°C	25
pH	pH	7.8

Sólidos totales en suspensión	mg/L	400
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	1100

Cuadro 39. Dimensionamiento de la caja de distribución

Ingreso de datos	Signo	Criterio	Valor	Unidad
Ancho	A		50	cm
Profundidad	P		40	cm
Caudal de ingreso	Qi		0.00146	m <sup>3</sup> /s
Velocidad del fluido	V		0.20	m/s
Área de la tubería	At	$At=Qi/V$	0.01	m <sup>2</sup>
Diámetro de tubería de ingreso requerido	Dr	$Dt=(4At/3.1416)^{(1/2)}$	9.60	cm
Diámetro final de tubería de ingreso a la caja	Dt		15.30	cm
Numero Reactores a distribuir	N		5	
Distribución del caudal de salida a reactores	Dc	$Dc=Qi/N$	0.00029	m <sup>3</sup> /s
Área de la tubería de distribución	Ad	$Ad=Dc*(N/(N-1))*10000/V$	18.30	cm <sup>2</sup>
Diámetro de tubería de distribución requerido	Dd	$Dd=(4Ad/3.1416)^{(1/2)}$	4.80	cm
Diámetro final de tubería de distribución a reactores	Df		7.70	cm
Separación mínima entre tuberías de distribución	S		10	cm
Longitud requerida para la caja de distribución	L	$L=Df*N+S*N$	88.50	cm

Cuadro 40. Dimensionamiento del reactor anaerobio

Ingreso de datos	Signo	Valor	Unidad
Caudal de ingreso	Qi	0.00029	m <sup>3</sup> /s
Número de unidades	N	5	
Separación entre placas y pared en el plano horizontal	e'	60	cm
Espesor de las placas	e	5	cm
Longitud del módulo de placas	l	160	cm
Caudal de diseño de reactor	Qd	0.00029	m <sup>3</sup> /s
Tasa de decantación real*	qr	27	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día
Módulo de eficiencia de las placas	S	1	
Ancho del módulo de placas	b	70	cm
Ancho total neto de la zona de decantación	B	70	cm
Viscosidad a 25 C°	n	0.00893	cm <sup>2</sup> /s
Angulo de inclinación de las placas	°	60	Grados

Ancho de la canaleta de recolección de agua decantada	w	1.0 0.1	Radian m
---	---	------------	-------------

Cuadro 41. Zona de decantación.

Cálculo	Signo	Criterio	Resultado	Unidad
Espaciamiento entre placas	d	$d=e^{-\text{sen}q-e}$	47	cm
Longitud útil dentro de las placas	lu	$lu=l-e^{-\text{Cos}q}$	130	cm
Longitud relativa del módulo de placas	L	$L=lu/d$	2.80	m
Coefficiente de forma del modulo	f	$f=\text{sen}q*(\text{sen}q+L*\text{cos}q)/S$	1.95	
Área superficial de la unidad	As	$As = Qd/(f*Vs)$	0.48	m <sup>2</sup>
Numero de separaciones formados entre las placas	N	$N = As*\text{Sen}q/(B*d)$	1	
Longitud total del reactor	Lt	$Lt = l*\text{Cos}q+(N*d+(N+1)*e)/\text{Sen}q$	1.62	m
Velocidad media del flujo	Vo	$Vo=Qd*100/(As*\text{Sen}q)$	0.07	cm/s
Radio hidráulico del modulo	Rh	$Rh= b*d/(2*(b+d))$	14.05	cm
Numero de Reynolds Nr<500	Nr	$Nr = 4Rh*Vo/n$	443	
Velocidad longitudinal máxima	V'o	$V'o = (Nr/8)^{0.5}*Vs*100$	0.23	cm/s
Velocidad de sedimentación de las partículas	Vs	$Vs = qr/86400$	0.000313	m/s
Tasa de decantación aparente	qa	$qa = V'o*\text{sen}q*86.4$	52.61	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día

Cuadro 42. Zona de salida (Canal de recolección).

Cálculo	Signo	Criterio	Resultado	Unidad
Caudal de agua por canaleta	q	$q = Qd$	0.29	L/s
Longitud total de recolección	Lr		0.70	m
Altura máxima de agua de la canaleta	Ho	$(Qd/(1376*w))^{(2/3)}$	0.02	m
Altura de lámina de acero en vertedero	hlámina		0.08	m
Altura total de canaleta	Htc	$Hct = Ho + \text{hlámina}$	0.10	m
Velocidad ascensional del	Vas	$Vas=Qd/(b/100*Lr)*86400$	51.58	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día

agua				
Área ocupada por el flujo	Ao	$Ao=Qd*(N/(N-1))*10000/V'o$	15.73	cm <sup>2</sup>
Diámetro requerido para la tubería del efluente	Dt	$Dt=(4Ao/3,1416)^{(1/2)}$	4.50	cm
Diámetro final para la tubería del efluente	Df		7.70	cm

Cuadro 43. Zona de lodos (Colector).

Datos	Signo	Criterio	Resultado	Unidad
Longitud del decantador	Lt		1.62	m
Angulo de inclinación de la base (x)	°		20	Grados
Área para lodos	Al	$Al=(Lt*(Lt*tagx))/2$	0.35	Radian
Capacidad volumétrica para lodos	Cv	$Cv=Al*B$	0.48	m <sup>2</sup>
Ancho total del decantador	B		0.33	m <sup>3</sup>
Tasa de producción de lodo	qL		0.7	m
Volumen de lodos diario	VI	$VL= qL*86.4$	0.000244	L/L/s
Frecuencia de descarga	qL	$F=Cv/VL$	0.02	m <sup>3</sup>
Diámetro final para la tubería de descarga de lodos	DI		16	días
			15.30	cm

Cuadro 44. Profundidad del reactor.

Datos	Signo	Criterio	Resultado	Unidad
Longitud de las placas	Lp		60	cm
Angulo de inclinación de las placas	°		60	Grados
Altura de las placas inclinadas	Ap	$Ap=Senq*Lp$	1.047	Radian
Espacio entre placas y base	Epb		0.52	m
Altura de la base	Ab	$Ab=Lt*tgx$	0.20	m
Altura para gases	Ag		0.59	m
Altura total del prototipo	At	$At=Ap+Epb+Ab+Ag$	0.10	m
			1.41	m

Cuadro 45. Dimensionamiento del lecho de secado de lodos.

Datos	Signo	Criterio	Resultado	Unidad
Volumen de producción de lodos cada 16 días por cada reactor	Vpl	$Vpl=VI*qL$	0.33	m <sup>3</sup>
Volumen producción de total en 16 días	Vpt	$Vpt=Vpl*N$	1.67	m <sup>3</sup>
Frecuencia de producción mensual	Fm	$Fm=30/qL$	2	
Tiempo de permanencia de lodo en lecho	T		3	meses
Capacidad del lecho	Cl	$Cl=Vpt*Fm*T$	9.50	m <sup>3</sup>

Altura mínima	Hm		0.15	m
Altura del lecho	HI		0.30	m
Área del lecho	AI	$AI=CI/hm$	63.30	m <sup>2</sup>
Longitud 1	L1		8	m
Longitud 2	L2	$L2=AI/L1$	790	m

Cuadro 46. Escalas de las dimensiones del reactor anaerobio

Dimensiones	Reactor anaerobio		Escala
	Modelo	Prototipo	
Largo (m)	0.25	1.62	1 :6.5
Ancho (m)	0.20	0.70	1 :3.5
Profundidad (m)	0.10	1.41	1 :13.5
Área (m <sup>2</sup> )	0.05	1.13	1 :22.7
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.004	1.26	1 :308
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0000005	0.00029	1 :580
Tiempo (s)	8200	4360	1 :0.5
Fuerza (Reynolds)	17	443	1 :26

Cuadro 47. Dimensionamiento del filtro de flujo vertical inverso

Ingreso de datos	Signo	Valor	Unidad
Caudal de ingreso		0.00029	m <sup>3</sup> /s
Número de unidades		2	
Caudal de diseño	Qo	0.00015	m <sup>3</sup> /s
Conductividad hidráulica K5	K5	13	m <sup>3</sup> /día
Angulo de inclinación	Grados	800	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día
	Radian	6	
Pendiente del fondo del lecho (decimal)	m=senx	0.10	%
Profundidad del agua en el filtro	y	0.90	m
Longitud de la celda	L	5	m
Diámetro de los vacíos del medio	D	0.0012	m
Viscosidad cinemática 25 C°	Vi	0.000000893	m <sup>2</sup> /s

Cuadro 48. Resultados de dimensionamiento del filtro de flujo vertical inverso

Cálculo	Signo	Criterio	Resultado	Unidad
Área de la sección transversal perpendicular al flujo	A6	$A6=Q/(k5*S)$	0.84	m <sup>2</sup>
Ancho de la celda del filtro	W	$W=A6/y$	0.93	m
Área superficial del filtro	A5	$A5=LW$	4.66	m
Gradiente hidráulico	s	$s=m*y/L$	0.02	m/m

Velocidad de "Darcy"	v	$v=Q/Wy$ v	15.10	m/día
Numero de Reynolds $Nr < 1$	Nr	$Nr=(v*D)/Vi$	0.000174	m/s
			0.23	

Cuadro 49. Escalas de las dimensiones del filtro de flujo vertical inverso

Dimensiones	Filtro de flujo vertical inverso		Escala
	Modelo	Prototipo	
Largo (m)	0.25	5	1 :20
Ancho (m)	0.20	1.9	1 :9.5
Profundidad (m)	0.08	0.9	1 :11.25
Área (m <sup>2</sup> )	0.05	9.5	1 :190
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.004	8.55	1 :2137
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0000005	0.00029	1 :580
Tiempo (s)	8000	29483	1 :3
Fuerza (Reynolds)	0.04	0.23	1 :5.7

Los planos de diseño del prototipo se adjuntan en (Figuras 39, 40, 41 y 42 del Anexo), y, de acuerdo a la norma S.090 sobre Plantas de tratamiento en el artículo 5 sobre disposiciones específicas para diseños definitivos, ítem 5.1.5 manifiesta que el área deberá estar lo más alejada posible de los centros poblados, recomendándose para tratamientos anaerobios la distancia de 500 m. sin embargo dentro de los terrenos de la UNAS no existe un área que cumpla con el mencionado requisito por ello se propone utilizar el espacio contiguo al internado Sheraton, debido a que existe más de 300 m<sup>2</sup> área requerida para la construcción del prototipo, asimismo la norma S.090 también menciona que el proyectista podrá justificar distancias menores a las recomendadas si se incluye en el diseño procesos de control de olores y de otras contingencias perjudiciales por ello como medida paliativa para evitar los olores se propone la instalación de tubería de escape de 12 m de altura, el plano se muestra en (Figura 43 del Anexo).

Cuadro 50. Presupuesto del prototipo RAFFVI para tratamiento de aguas residuales del internado de varones Callao y Sheraton de la UNAS.

	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
1	Obras provisionales y trabajos preliminares				2288.35
1.01	Obras provisionales				1410.14
1.01.01	Cartel de identificación de obra de 3.60 x 2.40 m.	Und	1.00	751.66	751.66
1.01.02	Campamento provisional de la obra	Glb	1.00	658.48	658.48
1.02	Trabajos preliminares				878.21
1.02.01	Movilización y desmovilización de equipos	Glb	1.00	255.00	255.00
1.02.02	Transporte de materiales de obra	Glb	1.00	623.21	623.21
2	Caja de distribución 1				1732.05
2.01	Trabajos preliminares				5.68
2.01.01	Limpieza de terreno manual	m <sup>2</sup>	1.27	2.70	3.43
2.01.02	Trazo nivelación y replanteo inicial	m <sup>2</sup>	1.27	1.77	2.25
2.02	Movimiento de tierras				48.61
2.02.01	Excavación de terreno	m <sup>3</sup>	1.33	15.18	20.19
2.02.02	Relleno con material propio seleccionado	m <sup>3</sup>	0.63	16.40	10.33
2.02.03	Acarreo material excedente a zona de eliminación	m <sup>3</sup>	1.33	13.60	18.09
2.03	Obras de concreto simple				2.82
2.03.01	Concreto fc=140 kg/cm2, 1:10 para solados y/o bases	m <sup>3</sup>	0.14	19.72	2.82
2.04	Obras de concreto armado				1024.25
2.04.01	Concreto fc=245 kg/cm2	m <sup>3</sup>	0.35	427.29	149.55
2.04.02	Acero fy=4200 kg/cm2 grado 60	kg	154.00	4.51	694.54
2.04.03	Encofrado y desencofrado	m <sup>2</sup>	3.38	53.30	180.15
2.05	Instalaciones hidráulicas				650.70
2.05.01	Tubería pvc 3 pulg.	m	8.25	35.00	288.75
2.05.02	Codo 90° 3pulg:	Und.	8.00	5.00	40.00
2.05.03	Válvula	Und.	5.00	40.67	203.35
2.05.04	Unión	Und.	10.00	11.86	118.60
3	Reactor anaerobio				30630.54
3.01	Trabajos preliminares				52.57
3.01.01	Limpieza de terreno manual	m <sup>2</sup>	11.76	2.70	31.75
3.01.02	Trazo nivelación y replanteo inicial	m <sup>2</sup>	11.76	1.77	20.82
3.02	Movimiento de tierras				646.17
3.02.01	Excavación de terreno	m <sup>3</sup>	20.07	15.18	304.66
3.02.02	Relleno con material propio seleccionado	m <sup>3</sup>	4.18	16.40	68.55
3.02.03	Acarreo material excedente a zona de eliminación	m <sup>3</sup>	20.07	13.60	272.95
3.03	Obras de concreto simple				24.85
3.03.01	Concreto fc=140 kg/cm2, 1:10 para solados y/o bases	m <sup>3</sup>	1.26	19.72	24.85
3.04	Obras de concreto armado				28548.36
3.04.01	Concreto fc=245 kg/cm2	m <sup>3</sup>	8.87	427.29	3790.06
3.04.02	Acero fy=4200 kg/cm2 grado 60	Kg	4632.00	4.51	20890.32
3.04.03	Encofrado y desencofrado	m <sup>2</sup>	72.57	53.30	3867.98
3.05	Instalaciones hidráulicas				1358.60

3.05.01	Tubería pvc 6 pulg.	m	6.00	95.00	570.00
3.05.02	Válvula	Und.	5.00	120.00	600.00
3.05.03	Unión	Und.	10.00	18.86	188.60
3.05.04	Tubería pvc 3 pulg.	m	10.00	35.00	350.00
4	Caja de distribución 2				2100.75
4.01	Trabajos preliminares				5.68
4.01.01	Limpieza de terreno manual	m <sup>2</sup>	1,27	2.70	3.43
4.01.02	Trazo nivelación y replanteo inicial	m <sup>2</sup>	1.27	1.77	2.25
4.02	Movimiento de tierras				48.61
4.02.01	Excavación de terreno	m <sup>3</sup>	1.33	15.18	20.19
4.02.02	Relleno con material propio seleccionado	m <sup>3</sup>	0.63	16.40	10.33
4.02.03	Acarreo material excedente a zona de eliminación	m <sup>3</sup>	1.33	13.60	18.09
4.03	Obras de concreto simple				2.82
4.03.01	Concreto fc=140 kg/cm2, 1:10 para solados y/o bases	m <sup>3</sup>	0.14	19.72	2.82
4.04	Obras de concreto armado				1024.25
4.04.01	Concreto fc=245 kg/cm2	m <sup>3</sup>	0.35	427.29	149.55
4.04.02	Acero fy=4200 kg/cm2 grado 60	Kg	154.00	4.51	694.54
4.04.03	Encofrado y desencofrado	m <sup>2</sup>	3.38	53.30	180.15
4.05	instalaciones hidráulicas				1019.40
4.05.01	Tubería pvc 3 pulg.	m	26.84	35.00	939.40
4.05.02	Codo 90° 3pulg:	Und.	16.00	5.00	80.00
5	Biofiltro de flujo vertical inverso				48500.67
5.01	Trabajos preliminares				282.59
5.01.01	Limpieza de terreno manual	m <sup>2</sup>	63.22	2.70	170.69
5.01.02	Trazo nivelación y replanteo inicial	m <sup>2</sup>	63.22	1.77	111.90
5.02	Movimiento de tierras				3069.53
5.02.01	Excavación de terreno	m <sup>3</sup>	90.95	15.18	1380.62
5.02.02	Relleno con material propio seleccionado	m <sup>3</sup>	27.56	16.40	451.98
5.02.03	Acarreo material excedente a zona de eliminación	m <sup>3</sup>	90.95	13.60	1236.92
5.03	Obras de concreto simple				163.08
5.03.01	Concreto fc=140 kg/cm2, 1:10 para solados y/o bases	m <sup>3</sup>	8.27	19.72	163.08
5.04	Obras de concreto armado				44229.27
5.04.01	Concreto fc=245 kg/cm2	m <sup>3</sup>	17.35	427.29	7413.48
5.04.02	Acero fy=4200 kg/cm2 grado 60	Kg	8123.20	4.51	36635.63
5.04.03	Encofrado y desencofrado	m <sup>2</sup>	3.38	53.30	180.15
5.05	Instalaciones hidráulicas				190.00
5.05.01	Tubería pvc 6 pulg.	m	2.00	95.00	190.00
5.06	Componentes del filtro				452.20
5.06.01	Piedra	m <sup>3</sup>	0.95	39.50	37.53
5.06.02	Arena gruesa	m <sup>3</sup>	5.70	50.85	289.85
5.06.03	Limo	m <sup>3</sup>	1.90	65.70	124.83
5.07	Vegetación				114.00
5.07.01	<i>Colocasia esculenta</i>	m <sup>2</sup>	9.50	12.00	114.00
6	Lecho de secado de lodos				13656.08
6.01	Trabajos preliminares				304.23
6.01.01	Limpieza de terreno manual	m <sup>2</sup>	68.06	2.70	183.76
6.01.02	Trazo nivelación y replanteo inicial	m <sup>2</sup>	68.06	1.77	120.47
6.02	Movimiento de tierras				2419.01
6.02.01	Excavación de terreno	m <sup>3</sup>	64.66	15.18	981.54
6.02.02	Relleno con material propio	m <sup>3</sup>	34.03	16.40	558.09

	seleccionado				
6.02.03	Acarreo material excedente a zona de eliminación	m <sup>3</sup>	64.66	13.60	879.38
6.03	Obras de concreto simple				201.34
6.03.01	Concreto fc=140 kg/cm <sup>2</sup> , 1:10 para solados y/o bases	m <sup>3</sup>	10.21	19.72	201.34
6.04	Obras de concreto armado				10731.50
6.04.01	Concreto fc=245 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	11.70	427.29	4999.29
6.04.02	Acero fy=4200 kg/cm <sup>2</sup> grado 60	Kg	1154.00	4.51	5204.54
6.04.03	Encofrado y desencofrado	m <sup>2</sup>	9.90	53.30	527.67
7	Plan de manejo ambiental				55248.15
7.01	Consideraciones generales				2360.00
7.01.01	Aplicación de normas ambientales	Glb.	2.00	1180.00	2360.00
7.02	Programa de compensación y reforestación				4853.00
7.02.01	Protección y manejo de áreas verdes	m <sup>2</sup>	100.00	48.53	4853.00
7.03	Programa de manejo del desmonte				435.15
7.03.01	Manejo de desmonte	m <sup>3</sup>	178.34	2.44	435.15
7.04	Programa de educación ambiental				4960.00
7.04.01	Charlas de educación ambiental (20 personas)	Und.	8.00	620.00	4960.00
7.05	Programa de manejo y disposición final segura de residuos sólidos				110000
7.05.01	Instalación de tachos de rr.ss.	Und.	7.00	85.00	595.00
7.05.02	Reciclaje y rehúso de rr.ss.	Glb.	1.00	55.00	55.00
7.05.03	Microrelleno de rr.ss.	Und.	1.00	450.00	450.00
7.06	Plan de seguridad				37690.00
7.06.01	Plan de seguridad	Und.	1.00	3000.00	3000.00
7.06.02	Inducción y capacitación	Und.	20.00	220.00	4400.00
7.06.03	Simulacros de primeros auxilios	Und.	2.00	550.00	1100.00
7.06.04	Evaluaciones medicas	Und.	20.00	800.00	16000.00
7.06.05	Seguro contra trabajo de riesgo sctr	Und.	20.00	300.00	6000.00
7.06.06	Kid contra derrames	Und.	2.00	120.00	240.00
7.06.07	Kid de primeros auxilios	Und.	2.00	400.00	800.00
7.06.08	Kid contra incendios	Und.	2.00	350.00	700.00
7.06.09	Equipos de protección personal	Glb.	20.00	250.00	5000.00
7.06.10	Mayas de protección	Und.	2.00	65.00	130.00
7.06.11	Cinta plástica señalizadora para limite de seguridad de obra	Und.	2.00	35.00	70.00
7.06.12	Letreros de códigos de seguridad	Und.	10.00	25.00	250.00
7.07	Plan de contingencia				400.00
7.07.01	Manual de procedimientos en caso de incidentes	Und.	1.00	250.00	250.00
7.07.02	Brigada de primeros auxilios	Und.	1.00	150.00	150.00
7.08	Programa de monitoreo				3000.00
7.08.01	Monitoreo de la calidad del agua	Und.	2.00	500.00	1000.00
7.08.02	Monitoreo de la calidad del aire	Und.	2.00	500.00	1000.00
7.08.03	Monitoreo de la calidad del ruido	Und.	2.00	500.00	1000.00
7.09	Programa de abandono				450.00
7.09.01	Desmantelamiento y limpieza del área	Glb.	1.00	450.00	450.00
	Total costo directo				154156.60
	Gastos generales		10%		15415.66
	Utilidades		10%		15415.66
	Sub total				

IGV (18%)	18%	33297.83
Costo de ejecución de obra		218285.75
Expediente técnico	3.00%	6548.57
Supervisión	3.50%	7640.00
Saneamiento físico legal del terreno	1.00%	2182.86
Presupuesto total		234657.18

Cuadro 51. Evaluación de impactos ambientales realizado con la matriz de Leopold.

Componentes Ambientales	Actividades de construcción:	Diseño y prueba		Construcción				Operación y mantenimiento		Cierre y Abandono		Suma	Factor de importancia	Total	
		Desbroce	Movimiento de tierras	Construcción de modelo in situ	Tratamiento y disposición final del efluente	Desbroce	Trazo y replanteo	Movimiento de tierras	Acopio de arena, cemento, fierros y tubería	Obras de Concreto y/o arte en General	Tratamiento y disposición final de efluentes				Tratamiento y disposición final de lodos
Calidad del Aire	Material Particulado (PM10)						-1	-2				-1	-4	3	-12
	SO <sub>2</sub> , CO y NO <sub>x</sub>								-1	-1			-2	3	-6
Suelos y Morfología	Alteración de suelos					-2	-1	-1		2		1	-1	3	-3
	Alteración de laderas					-2							-2	2	-4
Hidrología, Hidrogeología y Calidad de Agua	Alteración del régimen hidrológico			-1		-1			-1				-3	3	-9
	Alteración de la calidad del agua superficial					-1							-1	5	-5



g. Muy negativos -3

Factor de ponderación de acuerdo a la Importancia de cada componente Ambiental.

1. No Importante
2. Poco importante
3. Importante
4. Muy importante
5. Importantísimo

De acuerdo a la evaluación realizada dentro de lo más importante, se obtiene que el componente que podría resultar más afectado negativamente sea la "Salud de la población", y el componente que podría resultar más afectado positivamente sea la "Generación de empleo y servicios".

De la misma forma, la actividad que podría afectar más negativamente al ambiente es el "Movimiento de tierras", y la actividad que podría afectar más positivamente al ambiente es el "Tratamiento y disposición final de lodos".

Cuadro 52. Medidas de prevención y mitigación ambiental

Componentes ambientales afectados negativamente	Actividades que afectan al componente ambiental	Medidas de prevención y mitigación ambiental
Salud de la población	Tratamiento y disposición final de efluentes	Realizar la disposición periódica de lodos. Verificar fugas o roturas de las unidades de tratamiento Realizar la limpieza de natas Fumigar periódicamente para evitar presencia de

		vectores
		Agregar cal en forma periódica
	Tratamiento y disposición final de lodos	Realizar el tratamiento de lodo para obtención de abono Realizar la disposición periódica de lodo tratado. Fumigar periódicamente para evitar presencia de vectores Implementar programas de lombricultura Uso de lodo abono para abonamiento de áreas verdes
Salud ocupacional y de seguridad	Acopio de arena, cemento, fierros y tubería	Uso de equipos de protección personal Implementación de códigos y señales de seguridad Implementación de cursos de capacitación Implementación de kit de primeros auxilios Implementación de brigada ante las emergencias Implementación de evaluaciones medicas y seguros contra trabajo de riesgo
	Movimiento de tierras	Uso de equipos de protección personal Implementación de códigos y señales de seguridad Implementación de cursos de capacitación
	Obras de Concreto y/o arte en General	Uso de equipos de protección personal Implementación de códigos y señales de seguridad Implementación de cursos de capacitación

## V. DISCUSIÓN

### 5.1. Temperatura

Según LETTINGA *et al.*, (1995), existen tres rangos definidos de temperatura que pueden ser distinguidos en el tratamiento anaerobio, los límites de estos rangos están definidos por la temperatura. Si se tiene un agua residual normal, el tratamiento termofílico podría consumir demasiada energía y el psicofílico podría consumir mucho espacio.

- Una digestión fría psicofílica, entre los 0° C y 20° C.
- Una digestión mesofílica, entre 20° C y 42° C.
- Una digestión termofílica, por encima de los 42° C hasta los 75° C.

En nuestro caso la temperatura del agua se mantuvo constante en 25 ° C, propiciando una digestión termofílica para las condiciones anaerobias presentes en nuestro modelo de prueba.

Asímismo según el MINAM (2010), manifiesta que el Límite Máximo Permisible para efluentes de plantas de tratamientos de aguas residuales es 35 ° C. De acuerdo a nuestro resultado la temperatura en el efluente de cada uno de los modelos de prueba fue de 25 ° C, encontrándose por debajo del LMP establecido en el (MINAM, 2010).

## 5.2. Potencial de hidrogeno (pH)

Según YÁNEZ (1992), se considera que el pH de las aguas tanto crudas como tratadas debería estar entre 5.0 y 9.0. Por lo general, este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua, las guías canadienses han establecido el rango de pH 6.5 a 8.5 para el agua potable. De acuerdo a lo observado el pH promedio para el sedimentador fue de 7.17; para el efluente del modelo RAFFVI, el pH promedio por tipo de caudal fue de 7.40 para un caudal de 0.5 mL/s, 7.44 para un caudal de 1 mL/s, 7.44 para un caudal de 2 mL/s y 7.46 para un caudal de 4 mL/s, donde la variación porcentual promedio por tipo de caudal fue de 3.27% para un caudal de 0.5 mL/s, 3.75% para un caudal de 1 mL/s, 3.84% para un caudal de 2 mL/s y 4.07% para un caudal de 4 mL/s; para el efluente del modelo RAFFVI con *Colocasia e.*, el pH promedio por tipo de caudal fue de 7.65 para un caudal de 0.5 mL/s, 7.56 para un caudal de 1 mL/s, 7.54 para un caudal de 2 mL/s y 7.54 para un caudal de 4 mL/s, donde la variación porcentual promedio por tipo de caudal fue de 6.70% para un caudal de 0.5 mL/s, 5.55% para un caudal de 1 mL/s, 5.18% para un caudal de 2 mL/s y 5.21% para un caudal de 4 mL/s; observando que hubo mayor variación del pH en el modelo RAFFVI con *Colocasia e.*, esto se comprobó con las pruebas de medias según Tukey, donde se observó que hubo mayor diferencia entre la relación sedimentador - RAFFVI con *Colocasia e.* con respecto a la relación sedimentador - RAFFVI. Todos los datos registrados en ambos modelos se

encontraron en el rango que permite controlar los constituyentes de las aguas residuales.

Según el MINAM (2010), manifiesta que el LMP para el pH en los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales debe encontrarse en el rango de 6.5 a 8.5. En nuestro resultado, el pH se encontró dentro del rango del LMP establecido por el MINAM (2010), donde el mínimo fue de 6.58 hallado en el sedimentador y el máximo fue 7.77 encontrado en el modelo RAFFVI con *Colocasia e.*

### **5.3. Sólidos totales en suspensión (STS)**

Según YÁNEZ (1992), los filtros percoladores con tratamiento secundario tienen una capacidad de reducción de STS de 70% a 90%. En nuestro caso se pudo apreciar que la eficiencia promedio de remoción de STS en el modelo RAFFVI varió de 40.40% para un caudal de 0.5 mL/s, 42.04% para un caudal de 1 mL/s, 49.34% para un caudal de 2 mL/s y 51.30% para un caudal de 4 mL/s y para el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* la eficiencia promedio de remoción varió de 70.30% para un caudal de 0.5 mL/s, 63.87% para un caudal de 1 mL/s, 60.31% para un caudal de 2 mL/s y 54.36% para un caudal de 4 mL/s, observando mayor capacidad de remoción en el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* También se pudo apreciar claramente que hay diferencias con respecto al parámetro de STS entre el sedimentador, el modelo RAFFVI y el modelo RAFFVI con *Colocasia e.*, esto se comprobó con las pruebas de medias según Tukey, donde se observó que la mayor diferencia estuvo entre el sedimentador y el modelo RAFFVI con *Colocasia e.*, donde a su

vez se observó la mayor capacidad de remoción de STS. Sin embargo solo el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* para un caudal de prueba de 0.5 mL/s se acercó a lo estipulado por YÁNEZ (1992), con respecto a porcentajes de remoción de STS en filtros.

Según el MINAM (2010), manifiesta que el LMP para STS en los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales es 150 mg/L. De acuerdo a lo observado la concentración de STS varió de acuerdo al tipo de modelo de tratamiento utilizado, donde se observó que la cantidad de STS encontrados en el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* para caudales de prueba de 0.5 mL/s, 1 mL/s y 2 mL/s cumplieron con el LMP establecido por el (MINAM, 2010).

#### **5.4. Oxígeno disuelto (OD)**

Según el CEPIS (2004), a niveles bajos o ausencia de oxígeno en el agua puede indicar contaminación elevada, condiciones sépticas de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa; por ello se le puede considerar como un indicador de contaminación. En la práctica, se puede comprobar que a temperaturas de 20 °C o mayores, es el metabolismo del conjunto de los organismos vivos presentes el que determina la distribución de oxígeno disuelto en el agua. En nuestro caso se observó que la disminución del promedio porcentual del OD en el modelo RAFFVI varió en 2.05% para un caudal de prueba de 0.5 mL/s, 2.01% para un caudal de prueba de 1 mL/s, 1.94% para un caudal de prueba de 2 mL/s y 1.90% para un caudal de prueba de 4 mL/s y para el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* la disminución del

promedio porcentual del OD varió en 4.40% para un caudal de 0.5 mL/s, 4.06% para un caudal de prueba de 1 mL/s, 4.02% para un caudal de 2 mL/s y 4.02% para un caudal de 4 mL/s, con ello se demostró que en ambos modelos se consumió OD, siendo el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* quien tuvo mayor capacidad de consumo de OD, esto se comprobó con las pruebas de medias según Tukey, donde se observó mayor diferencia entre el sedimentador y el modelo RAFFVI con *Colocasia e.*, donde a su vez se observó mayor consumo de OD, con ello se demostró que ambos modelos no tienen capacidad para devolver oxígeno a las aguas residuales que atraviesan dichos modelos.

Según el MINAM (2008), menciona que el ECA – Agua de la Categoría IV para la concentración de OD en los ríos de la selva debe ser mayor o igual a 5 mg/L. De acuerdo a nuestro resultado la concentración de OD varió de acuerdo al tipo de sistema de tratamiento utilizado pero no varió en función de los caudales de prueba utilizados en los modelos de prueba, es así que la concentración de OD encontrado en el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* para un caudal de prueba de 0.5 mL/s, estuvo por debajo del ECA para ríos de la selva, sin embargo es preciso recalcar que para realizar la verificación del estándar, la muestra debe ser tomada en un cuerpo de agua, quebrada y/o río y no en el efluente de un sistema de tratamiento, en este caso se debería comparar con el LMP, si éste lo contemplara.

### **5.5 Coliformes termotolerantes**

Según el CEPIS (2004), los filtros percoladores con tratamiento secundario tienen una capacidad de reducción de bacterias entre 90% a 95%.

En la práctica se pudo apreciar que la eficiencia promedio de remoción de coliformes termotolerantes en el modelo RAFFVI varió de 94.67% para un caudal de 0.5mL/s, 79.29% para un caudal de 1mL/s, 73.59% para un caudal de 2 mL/s y 49.46% para un caudal de 4 mL/s y para el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* la eficiencia promedio de remoción varió en 96.14% para un caudal de 0.5 mL/s, 92.01% para un caudal de 1 mL/s, 82.72% para un caudal de 2 mL/s y 47.83% para un caudal de 4 mL/s, observando una capacidad de remoción similar entre el modelo RAFFVI y el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* Sin embargo se pudo apreciar claramente que hay diferencias con respecto a la concentración de coliformes termotolerantes entre el sedimentador y los modelos de tratamiento RAFFVI y RAFFVI con *Colocasia e.*, esto se comprobó con las pruebas de medias según Tukey, donde se observó que no existe diferencias marcadas entre los dos sistemas de tratamiento, asimismo se corroboró la capacidad de remoción de ambos sistemas con relación al sedimentador y la concentración de coliformes termotolerantes encontrados en el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* para caudales de 0.5 mL/s y 1 mL/s y en el modelo RAFFVI para un caudal de 0.5 mL/s cumplió con lo estipulado por el CEPIS (2004), para filtros percoladores con tratamiento secundario.

Según el CEPIS (2004), los filtros lentos tienen una capacidad de reducción de bacterias entre 95% a 98%, mientras que los filtros rápidos en efluente secundario tienen una capacidad de reducción de bacterias entre 90% a 99%. En nuestro caso se apreció que en el caudal equivalente a 4 mL/s para ambos sistemas de tratamiento, se encontró menor capacidad de remoción de

coliformes termotolerantes (49.46% y 47.83%) con respecto a caudales equivalentes a 0.5 mL/s, 1 mL/s y 2 mL/s, asimismo la variación entre las concentraciones de coliformes termotolerantes encontrados en ambos modelos para caudales de 0.5 mL/s, 1 mL/s y 2 mL/s no fueron significativos entre ellos, esto fue corroborado por la prueba de medias según Tukey, cabe recalcar que el modelo RAFFVI para un caudal de 0.5 mL/s y el modelo reactor – Filtro de flujo vertical inverso con *Colocasia e.* para caudales de 0.5 mL/s y 1 mL/s tuvo la capacidad de remoción que indica el CEPIS (2004) para filtros rápidos; sin embargo solo el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* para un caudal de 0.5 mL/s, tuvo la capacidad de remoción que indica el CEPIS (2004) para filtros lentos.

Según el MINAM (2010), manifiesta que el LMP para coliformes termotolerantes en los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales debe ser menor a 10,000 NMP/100mL. En nuestro caso se observó que la presencia de coliformes termotolerantes en ambos modelos y para todos los caudales de prueba cumplió con el LMP establecido por el (MINAM, 2010).

## **5.6 Propuesta del prototipo RAFFVI**

Según FAIR *et al.* (1992), los tanques sépticos poseen una serie de fallas, tanto como unidades de sedimentación como de digestión, principalmente porque la septicidad no se puede confinar únicamente a los lodos. Según GARCIA (2009), el nivel de eficiencia de remoción de elementos patógenos se encuentra en 80%; también afirma que para la construcción de 2 tanques sépticos de 20 m<sup>3</sup> con capacidad para 250 personas se requiere S/. 22,000.00 nuevos soles. Asimismo según la propuesta realizada para el

prototipo RAFFVI el nivel de eficiencia en remoción de STS y coliformes termotolerantes es 70.30% y 96.14% respectivamente y el costo que incluye la construcción del prototipo e implementación de planes de manejo ambiental y de seguridad es de S/.234,657.18 nuevos soles siendo el costo de la propuesta planteada mayor al costo referido por GARCIA (2009), sin embargo son mejores los niveles de eficiencia que presenta el prototipo RAFFVI con respecto al tanque.

## VI. CONCLUSIÓN

1. La mayor variación de pH fue de 6.70% alcanzado en el sistema RAFFVI con *Colocasia e.*

2. La mayor eficiencia en remoción de sólidos totales en suspensión y coliformes termotolerantes fue de 70.30% y 96.14% respectivamente alcanzado por el sistema RAFFVI con *Colocasia e.*

3. El sistema RAFFVI con *Colocasia e.* generó la disminución del oxígeno presente en el agua residual en mayor cantidad que en el sistema RAFFVI siendo la variación 4.40%.

5. La temperatura, pH y concentración de coliformes termotolerantes encontrado en el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* y en el modelo RAFFVI se encontró dentro del Límite Máximo Permisible establecido por el (MINAM, 2010).

6. La concentración de sólidos totales en suspensión encontrado en el modelo RAFFVI con *Colocasia e.* para los caudales de prueba de 0.5 mL/s, 1 mL/s y 2 mL/s, se ubicó dentro del Límite Máximo Permisible establecido por el (MINAM, 2010).

7. Los modelos evaluados presentan un nivel de eficiencia aceptable para remover sólidos totales en suspensión y coliformes termotolerantes y cumplen con los LMPs para caudales de prueba de 0.5, 1, y 2 ml/s.

8. La construcción del prototipo RAFFVI requiere de S/.234,657.18 con respecto a S/.22,000.00 que requiere un pozo séptico, sin embargo presentan mayor eficiencia con respecto a los pozos sépticos y por ello representan la mejor alternativa para tratar las aguas residuales del internado de varones Callao y Sheraton de la UNAS.

## **VII. RECOMENDACIONES**

1. Tomar en cuenta que pueden ocurrir saturaciones, para ello es importante determinar el tipo de tubería a utilizar.
2. Realizar tratamientos previos para homogenizar el agua residual y evitar saturaciones.
3. Tomar medidas de seguridad para evitar la contaminación con microorganismos patógenos que puedan encontrarse en las aguas residuales.
4. Tomar en cuenta el número de Reynolds para realizar los diseños de modelos y prototipos.

## VIII. ABSTRACT

The waste water that do not receive treatment causes negative impact in the soils and water bodies modifying the diversity of species and ecological systems.

For it the present work had as purpose develop and evaluate the functioning of the model anaerobic reactor and filtro of vertical inverse flow to treat the residual water found in the channel contaminated by the effluent one of the baths of the males' boarding school of UNAS.

Being the temperature, pH, oxygen disuelto, solid total in suspension, coliformes termotolerantes and the efficiency of removal the variables dependent on the type of treatment and flow of test used, likewise after the installation of the model there were realized the hydraulic respective tests there was realized the evaluation of a model of treatment of waste water composed by an anaerobic reactor and a filtro of vertical inverse flow with and without presence of *Colocasia e.* with four flows of test (0.5, 1, 2 and 4 mL/s), where the major efficiency of removal of solid total in suspension was 70.30 % and the major efficiency was of removal of coliformes termotolerantes was 96.14 % in both cases they were obtained by the model anaerobic reactor and filtro of vertical inverse flow with *Colocasia e.*

Also was observed that the variation of flow does not influence the variation of temperature, pH, solid total suspension and oxygen dissolved, but if in the concentration of coliformes termotolerantes since to 0.5 mL/s the capacity of removal reached by the model anaerobic reactor and filtro of vertical inverse flow with *Colocasia e.* it was 96.14 % and to 4 mL/s the capacity of removal reached by the same model was 47.83 %.

Likewise the model and the flow that there fulfills with the Limit Máximo Permissible established by the MINAM (2010), for the parameters of temperature, pH, solid total in suspension and coliformes termotolerantes is the anaerobic reactor and filtro of vertical inverse flow with *Colocasia e.* for a flow of 0.5 mL/s.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALAERTS, G. 1995. Wastewater treatment. tratamiento de aguas residuales, presentado en "Curso-Taller Internacional sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales", febrero 13–marzo 17 de 1995. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
2. ALMEIDA, Z. 2007. Tratamiento alternativo de aguas residuales domesticas mediante filtros consecutivos para poblaciones rurales. Tesis – UNI. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima Peru. 173 p.
3. APHWA/AWWA/7WAB, 1999, Métodos Estándares de Análisis de Agua, American Public Health Amociation, N.W. Washington. USA.
4. BOLLER, M. 1997. Small wastewater treatment plant. A challenge to wastewater engineers. Water Science & Technology, Vol. 35, N° 6. p 1-12.
5. CANALES, G. 1998. Evaluación del proceso de tratamiento de aguas residuales de la planta UNI – TRAR. Tesis - UNI. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Peru. 163 p.
6. CANEPA, L. 2005. Guía para la construcción de desarenadores y sedimentadores. CEPIS. Lima, Perú. 11 p.

7. CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE. 2004. Tratamiento de agua para consumo humano. Lima, Perú. 597 p.
8. DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK. 1995. Manual de tratamiento de aguas negras. 13ra. reimpresión, Editorial LIMUSA. México.
9. ESCRIBA, S. 1994. Caracterización y diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria de productos lácteos "Agraria el escorial" con fines de reúso agrícola. Tesis – UNI. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima Perú. 313 p.
10. FAIR, G. GEYER, J. y OKUN, D. 1992. Ingeniería sanitaria y de aguas residuales. 4ta. reimpresión, Volumen 4. Edit. LIMUSA, D. F. México.
11. GALINDO, Y. RUIZ, V. 2007. Evaluación, diagnóstico y mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas residuales domesticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial en el AA.HH Oasis – Villa el Salvador. Tesis – UNI. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima Peru. 126 p.
12. GARCIA, E. 2009. Manual practico de saneamiento en poblaciones rurales. Diseño de tanques sépticos. Fondo Contravalor Perú-Alemania. Lima, Perú. 50 p.
13. GARIBAY, C. Y ORELLANA, C. 2011. Estudio de la capacidad de los filtros biológicos aireados de flujo vertical inverso, como tratamiento secundario de un efluente de RAFA para aguas residuales

- provenientes de la industria del camal. Tesis – UNI. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima Perú. 238 p.
14. INCA, V. Y VARGAS, D. 2010. Tratamiento anaerobio de las vinazas provenientes de la industria pesquera mediante reactores UASB a escala piloto. Tesis – UNI. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima Peru. 156 p.
15. LETTINGA, G. 1995. Treatment on raw sewage under tropical conditions. Tecnología de reactores anaeróbicos. Presentado en “Curso-Taller Internacional sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales”, febrero 13–marzo 17 de 1995. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
16. LETTINGA, G. y HULSHOFF, P. 1995. Anaerobic wastewater treatment technology with emphasis to upflow anaerobic sludge bed (UASB). Reactor systems, tecnología de reactores anaeróbicos. Presentado en “Curso-Taller Internacional sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales”, febrero 13–marzo 17 de 1995. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
17. MADERA, C. PEÑA, M. y PEREZ, M. 1998. Selección de tecnología para tratamiento de aguas residuales, Un enfoque metodológico con participación de los usuarios. Presentado en Seminario-Taller “Saneamiento Básico y Sostenibilidad” “AGUA Y SOSTENIBILIDAD”, junio 1-12 de 1998. Santiago de Cali, Colombia.
18. MARTINEZ. 2008. Mecánica de fluidos. Análisis dimensional. 2da. Edición. Universidad de Oviedo. España. 21 p.

19. METCALF y EDDY. 2004. Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, vertido y reutilización. Volumen I-II, 3ra. Edición en español, MacGraw-Hill. Madrid, España.
20. MINAM. 2008. Estándares de calidad ambiental del agua; Categoría IV.
21. MINAM. 2010. Límite máximo permisible para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales.
22. MINISTERIO DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE. 1995. Subsecretaría del Medio Ambiente. Reglamentación de la Ley del Medio Ambiente N° 1333. Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. La Paz, Bolivia.
23. MOSCOSO, J. y LEÓN, R. 1996. Curso de tratamiento y uso de aguas residuales. OPS/CEPIS/PUB 96.20. Lima, Perú.
24. OROZCO, A. 1990. Manual sobre digestión anaerobia, Capítulo I: Generalidades. Presentado en "Seminario Internacional sobre Digestión Anaeróbica - Elementos de Diseño". Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
25. PEÑA, M. 1998. Comparación de dos tecnologías anaerobias para el tratamiento primario de aguas residuales domésticas. Conferencia internacional presentada en "Agua y Sostenibilidad", junio 1 al 3 de 1998. Santiago de Cali, Colombia.
26. PEÑA, M. Y VALENCIA, E. 1998. Rehuso en irrigación de aguas residuales domésticas tratadas: una alternativa sostenible para el manejo integral del recurso hídrico. Presentado en "Seminario-Taller

- Saneamiento Básico y Sostenibilidad”, Agua y Sostenibilidad, junio 1-12 de 1998. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
27. QUEZADA, N. 1999. Diseño y evaluación de un modelo de filtración de arena por gravedad. Tesis - UNI. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima Peru. 219 p.
28. REFAI, M. K. 1981. Manual para el Control de la Calidad de Alimentos. Edición Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
29. RHENHEIMER, G. 1999. Microbiología de las Aguas. España.
30. ROMERO, J. A. 1998. Calidad de Aguas. Editorial, NOMOS S.A. Madrid, España. 410 p.
31. SANCHEZ, J. 2010. Modelamiento de las condiciones hidráulicas de una planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis – UNC. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 75 p.
32. SEOANEZ, M. 1999. Aguas residuales. Ediciones Mundi – Prensa. Barcelona 420 p.
33. SIAC. 2008. Red nacional de jardines botánicos. *Colocasía* e. [En línea]: SIAC (<http://www.siac.net.co/sib/catalogoespecies/especie.do>., 12 Set. 2010).
34. SOUZA, M. 1997. Metodología de análisis de decisiones para seleccionar alternativas de tratamiento y uso de aguas residuales. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Brasilia. Brasilia-DF, Brasil.

35. STERLING, C. 1995. Criterios de diseño de reactores UASB. Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
36. STREETER, V. y WYLIE, E. 1988. Mecánica de los Fluidos". Octava edición. Editorial. McGraw-Hill. México, 594p.
37. VAN HAANDEL, A. y LETTINGA, G. 1998. Tratamiento anaeróbico de esgotos – Um Manual para Regioes de Clima Quente. EpGraf, Campina Grande – PB, Brasil.
38. VEENSTRA, S. ALAERTS, G. J. y BIJLSMA, M. 1998. Technology selection for pollution control. Conferencia Internacional presentada en "Agua y Sostenibilidad", junio 1-3 de 1998. Santiago de Cali, Colombia.
39. VOTCHEN, P. SCHOWANEK, D. y VERSTRAETE, W. 1988. Aerobic y anaerobic wastewater treatment. Presentado en "5to. Simposio sobre Digestión Anaeróbica. Bologña, Italia. p 91-103.
40. YÁNEZ, F. 1992. Criterios para la selección de procesos de tratamier aguas residuales. 30 p.

## **X. ANEXOS**

## Apéndice 1. Cuadros

Cuadro 53. Contaminantes en el agua residual

Contaminante	Fuente	Efectos causados por la descarga del agua residual en aguas superficiales
Sustancias que consumen oxígeno (MO* biodegradable).	ARD* y ARI* (proteínas, carbohidratos, grasas, aceites).	Agotamiento del oxígeno, condiciones sépticas.
Sólidos suspendidos	ARD y ARI; erosión del suelo.	Depósito de lodo; desarrollo de condiciones anaeróbicas.
Nutrientes:	ARD, ARI y ARA*	Crecimiento indeseable de algas y plantas acuáticas.
Nitrógeno	ARD y ARI; descarga natural.	
Fósforo		
Microorganismos patógenos	ARD	Comunicación de enfermedades.
Materia tóxica	ARI	Deterioro del ecosistema;
Metales pesados	ARA y ARI	envenenamiento de los alimentos en caso de acumulación.
Compuestos orgánicos tóxicos		
MO refractaria (Difícil de degradar biológicamente)	ARI (fenoles, surfactantes), ARD (surfactantes) y ARA (pesticidas, nutrientes); materia resultante del decaimiento de la MO.	Resisten el tratamiento convencional, pero pueden afectar el ecosistema.
Sólidos inorgánicos disueltos	Abastecimiento de agua, uso de agua	Incremento del contenido de sal.
Cloruros	Abastecimiento agua, uso	
Sulfuros	agua, infiltración	
pH	ARD y ARI	
	ARI	
Olores: H <sub>2</sub> S	Descomposición de ARD	Molestia pública

\*MO; Materia orgánica \*ARD: Aguas residuales domésticas \*ARI: Aguas residuales industriales; \*ARA: Aguas residuales agrícolas.

Fuente: ALAERTS (1995).

Cuadro 54. Composición típica del ARD

Constituyente	Concentración			
	Unidades	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales	mg/l	1200	720	350
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	850	500	250
Fijos	mg/l	525	300	145
Volátiles	mg/l	325	200	105

Sólidos Suspendidos	mg/l	350	220	105
Fijos	mg/l	75	55	20
Volátiles	mg/l	275	165	80
Sólidos Sedimentables	mL/l	20	10	5
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	400	220	110
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	1000	500	250
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	85	40	20
Orgánico	mg/l	35	15	8
Amoníaco libre	mg/l	50	25	12
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	15	8	4
Cloruros	mg/l	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	200	100	50
Grasa	mg/l	150	100	50
Sulfato	mg/l	34	22	12
Coliformes totales	Nº/100 mL	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>9</sup>	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>8</sup>	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>
Compuestos orgánicos volátiles	µg/λ	>400	100-400	<100

(1) Estos valores dependen de la cantidad presente de agua en el suministro

Fuente: METCALF Y EDDY (2004).

#### Cuadro 55. Criterios para la selección de tratamientos de aguas residuales

1. El método debe proveer una eficiencia de tratamiento en la remoción de varias categorías de contaminantes:  
Materia orgánica biodegradable (DBO), SS, amoníaco y compuestos orgánicos nitrogenados, fosfatos, patógenos.
2. La estabilidad del sistema respecto a interrupciones en la fuente de energía, picos de carga, interrupción en la alimentación y/o contaminantes tóxicos, debe ser alta.
3. La flexibilidad del proceso debe ser alta, con respecto a la escala a la cual es aplicada, posibilidades de ampliación y posibilidad de mejorar la eficiencia.
4. El sistema debe ser simple en su operación, mantenimiento y control ya que una buena operación no debe depender de la presencia de operadores e ingenieros experimentados.
5. El requerimiento de área debe ser bajo, en especial cuando no está disponible y/o el precio es alto.
6. El número de etapas de procesos (diferentes) requeridos debe ser lo más bajo posible.
7. El tiempo de vida del sistema debe ser largo.
8. La aplicación del sistema no debe sufrir ningún problema en la disposición del lodo.
9. La aplicación del sistema no debe ser acompañada con mal olor y problemas de malestar en la gente.
10. El sistema debe ofrecer buenas posibilidades para recuperar subproductos útiles en irrigación y fertilización.
11. Es recomendable disponer de experiencia suficiente en el manejo del sistema.

Fuente: LETTINGA y HULSHOFF (1995).

Cuadro 56. Factores claves para la selección de tecnología en tratamiento de aguas residuales en países desarrollados y en desarrollo

Factores	Países desarrollados		Países en desarrollo	
	Critico	Importante	Importante	Critico
Confiabilidad		X	X	
Disposición de lodos	X	X	X	
Requerimientos de área	X	X	X	
Impacto ambiental		X		X
Costos de construcción		X	X	
Costos operacionales		X		X
Facilidad de O & M*		X		X
Sostenibilidad		X		X

\*O & M: Operación y Mantenimiento.

Fuente: STERLING (1995).

Cuadro 57. ECA-Agua Categoría IV: Conservación del Ambiente Acuático

Parámetro	Unidades	Ríos	
		Costa y sierra	Selva
<b>Microbiológico</b>			
Coliformes totales	NMP/100mL	3000	3000
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	2000	2000
<b>Fisicoquímico</b>			
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	<10	<10
Temperatura	Celsius	--	--
Concentración de oxígeno disuelto	mg/L	≥5	≥5
Potencial de hidrogeno	pH	6,5-8,5	6,5-8,5
Sólidos disueltos totales	mg/L	500	500

Fuente: Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM.

Cuadro 58. Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamientos de aguas residuales.

Parámetro	Unidad	Límite de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	10000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100
Demanda química de oxígeno	mg/L	200
pH	mg/L	6.5 – 8.5

Sólidos totales en suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

MINAM: Ministerio del Ambiente.

Cuadro 59. Tabla del número más probable (NMP) por mL/g de muestra.

10	1	0.1	NMP/mL	10	1	0.1	NMP/mL
0	0	0	0	2	0	0	9
0	0	1	3	2	0	1	14
0	0	2	6	2	0	2	20
0	0	3	9	2	0	3	26
0	1	0	3	2	1	0	15
0	1	1	6.1	2	1	1	20
0	1	2	3.2	2	1	2	27
0	1	3	12	2	1	3	34
0	2	0	6.2	2	2	0	21
0	2	1	9.3	2	2	1	28
0	2	2	12	2	2	2	35
0	2	3	16	2	2	3	42
0	3	0	9.4	2	3	0	29
0	3	1	13	2	3	1	36
0	3	2	16	2	3	2	44
0	3	3	19	2	3	3	53
1	0	0	3.6	3	0	0	23
1	0	1	7.2	3	0	1	39
1	0	2	11	3	0	2	64
1	0	3	15	3	0	3	95
1	1	0	7.3	3	1	0	43
1	1	1	11	3	1	1	75
1	1	2	15	3	1	2	120
1	1	3	19	3	1	3	160
1	2	0	11	3	2	0	93
1	2	1	15	3	2	1	150
1	2	2	20	3	2	2	210
1	2	3	24	3	2	3	290
1	3	0	16	3	3	0	240
1	3	1	20	3	3	1	460
1	3	2	24	3	3	2	1100
1	3	3	29	3	3	3	>1100

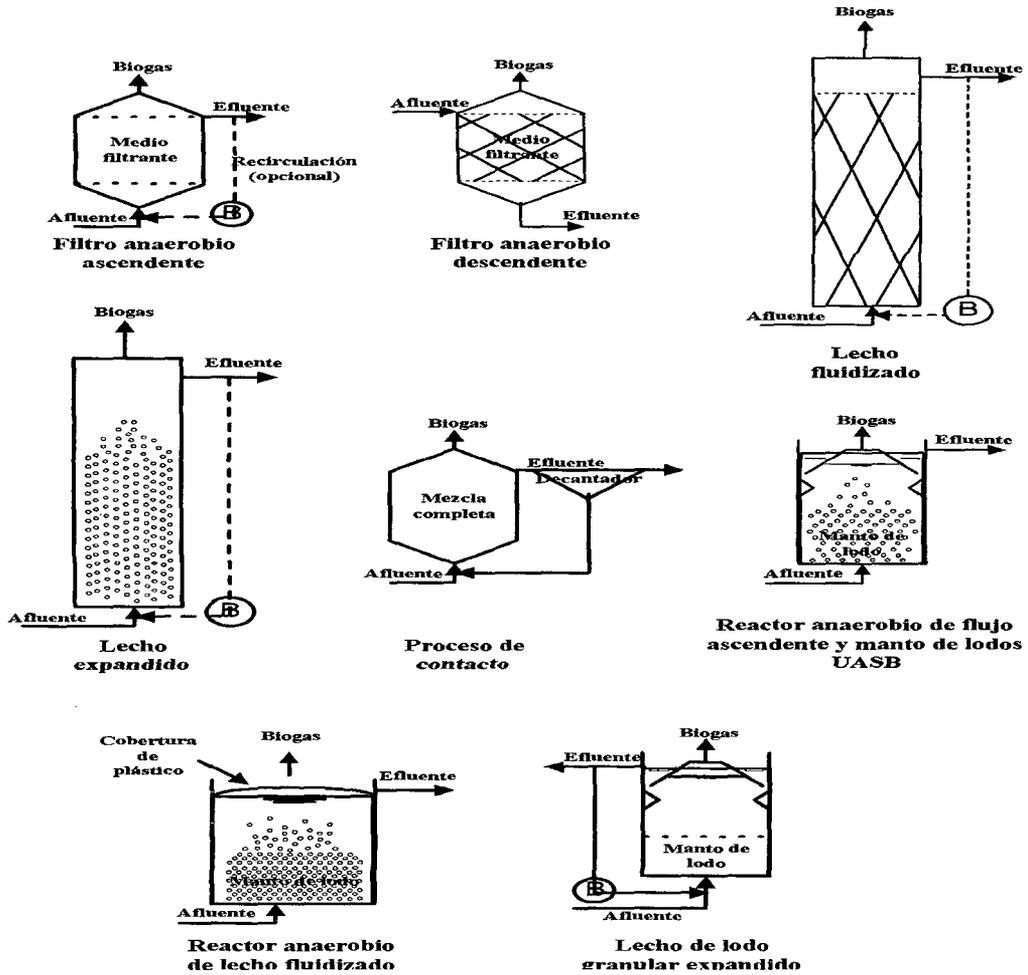
Cuadro 60. Dimensiones del tanque.

Características	Dimensión
Π	3.1416
Radio menor (cm)	20.15
Radio mayor (cm)	24.90
Radio medio (cm)	22.53
Área (cm <sup>2</sup> )	796.99
Altura Tanque (cm)	77.20
Profundidad efectiva (cm)	75.30
Volumen (cm <sup>3</sup> )	60013
Volumen (L)	60

Cuadro 61. Dimensiones del sedimentador.

Sedimentador	Dimensión
Altura (cm)	25
Profundidad efectiva (cm)	5
Largo (cm)	41.6
Ancho (cm)	31
Volumen (cm <sup>3</sup> )	6365
Volumen (L)	6.3

## Apéndice 2. Figuras



Fuente: VAN HAANDEL y LETTINGA (1998).

Figura 22. Sistemas anaerobios de alta tasa o modernos para el tratamiento de aguas residuales.

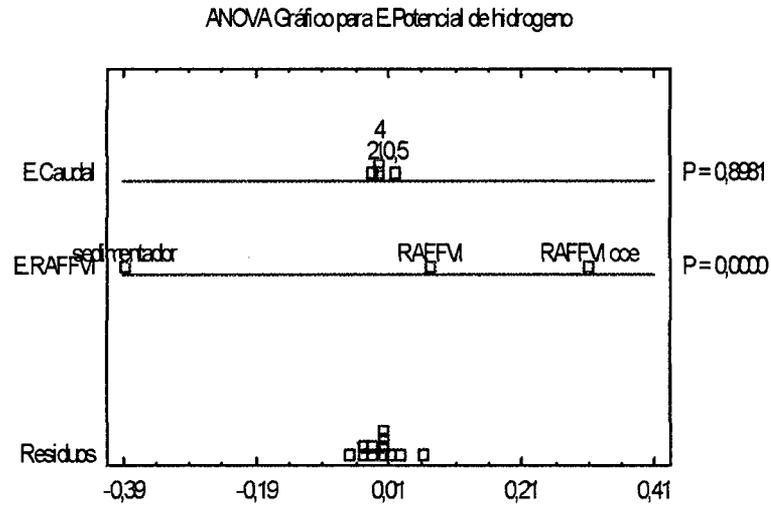


Figura 23. Análisis de varianza de la influencia de los tratamientos planteados en la variación del potencial de hidrogeno (pH).

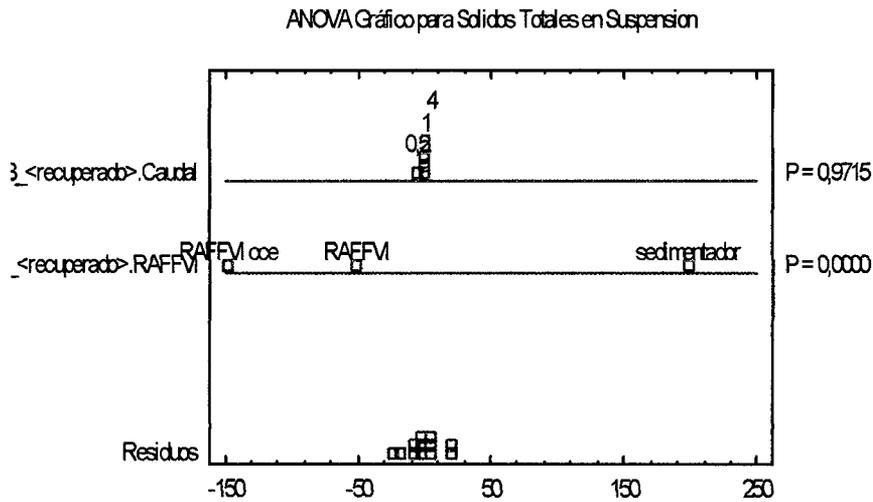


Figura 24. Análisis de varianza de la influencia de los tratamientos planteados en la remoción de sólidos totales en suspensión.

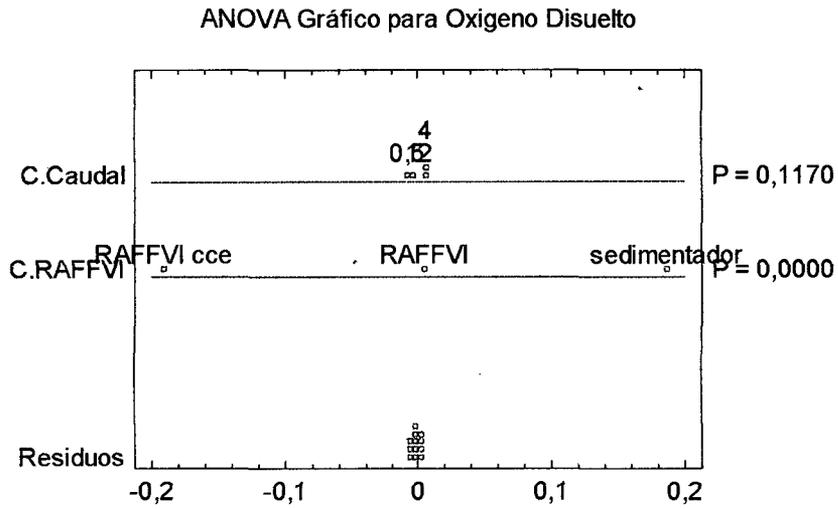


Figura 25. Análisis de varianza de la influencia de los tratamientos planteados en la variación del oxígeno disuelto.

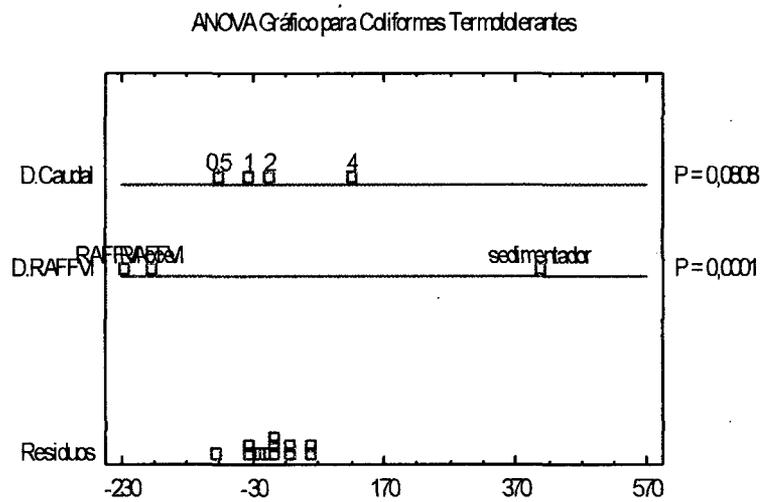


Figura 26. Análisis de varianza de la influencia de los tratamientos planteados en la remoción de coliformes termotolerantes.

### Apéndice 3. Galería de fotos

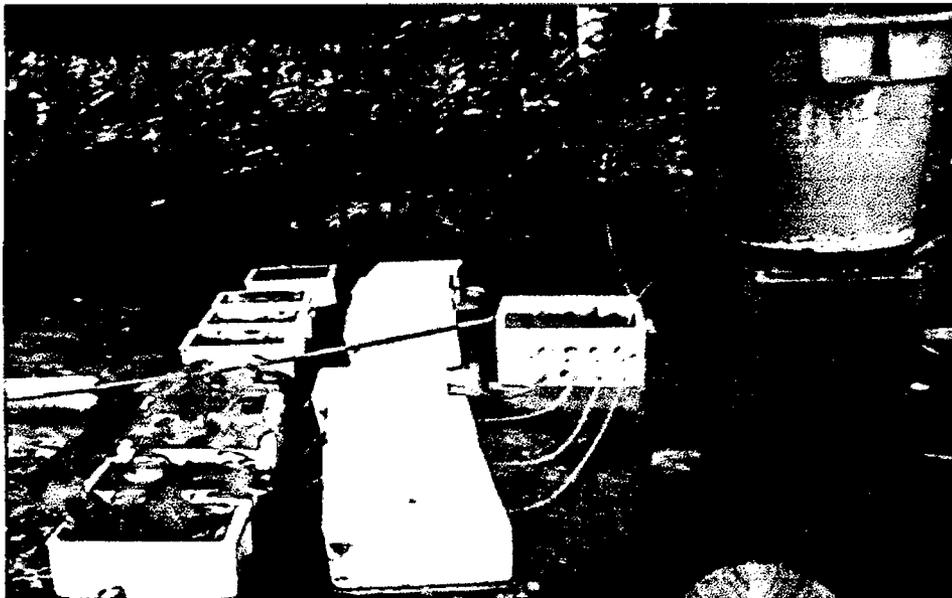


Figura 27. Vista del sistema de tratamiento de aguas residuales.

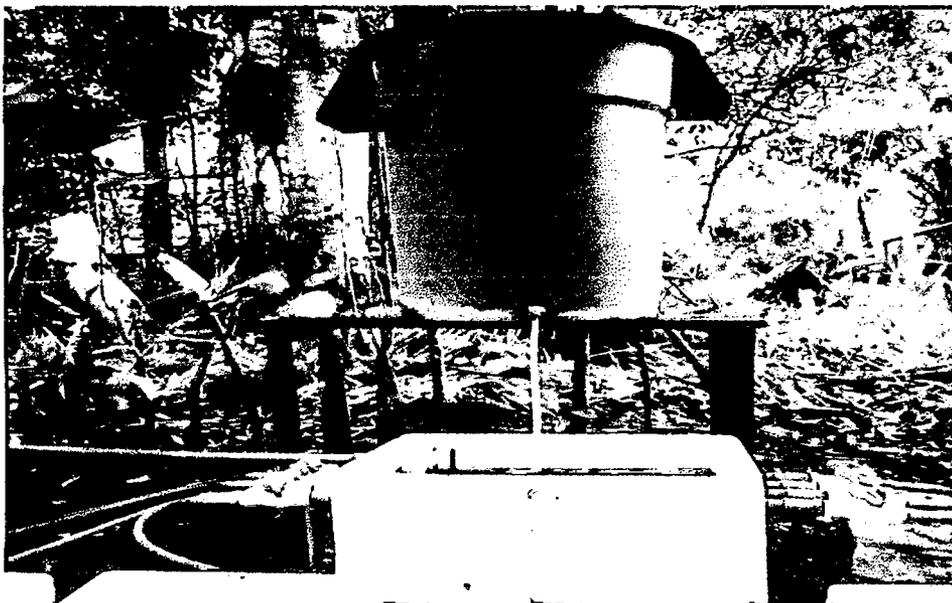


Figura 28. Vista del tanque y sedimentador.

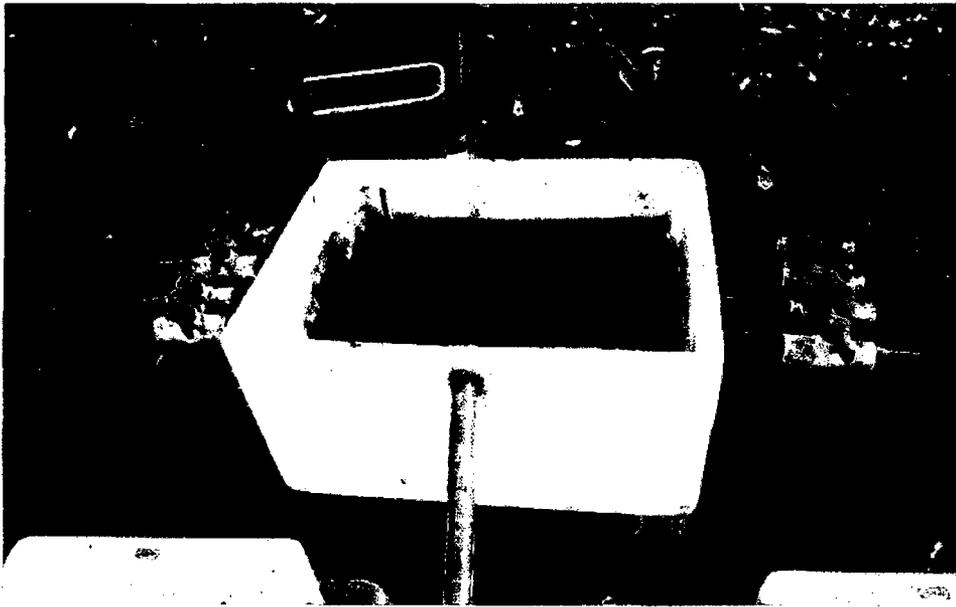


Figura 29. Vista del sedimentador.

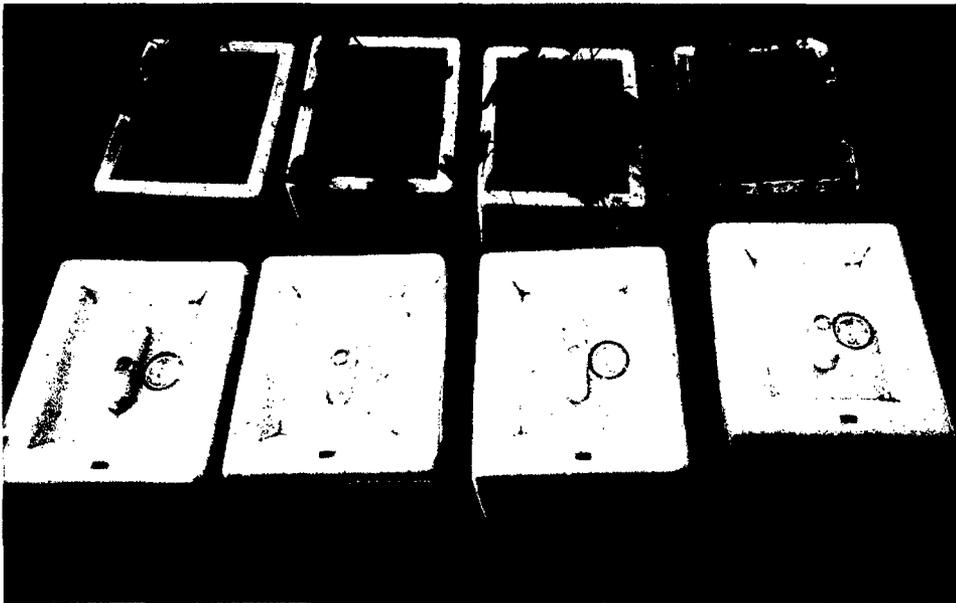


Figura 30. Vista de los modelos de RAFFVI con *Colocasia e.*

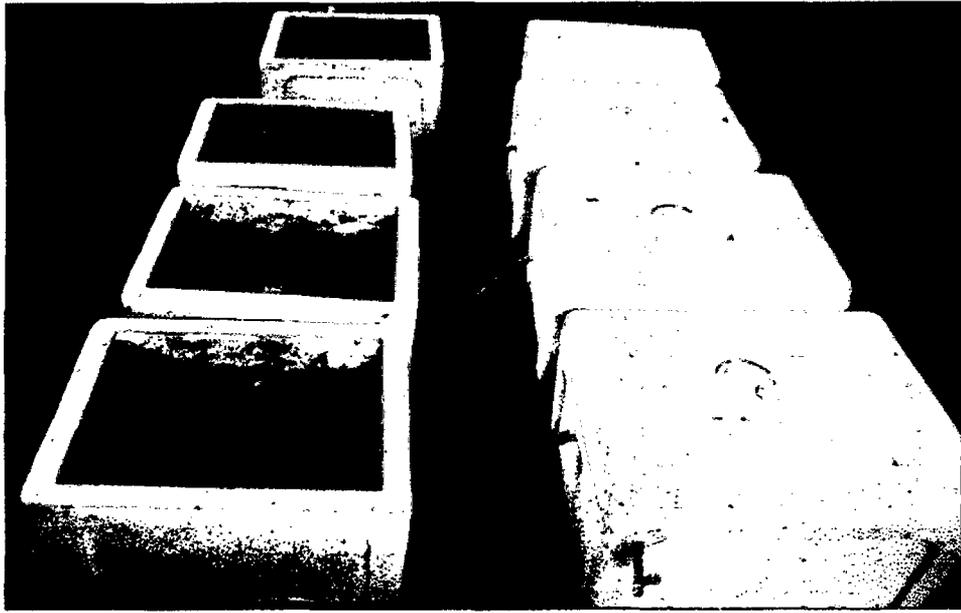


Figura 31. Vista de los modelos de RAFFVI.

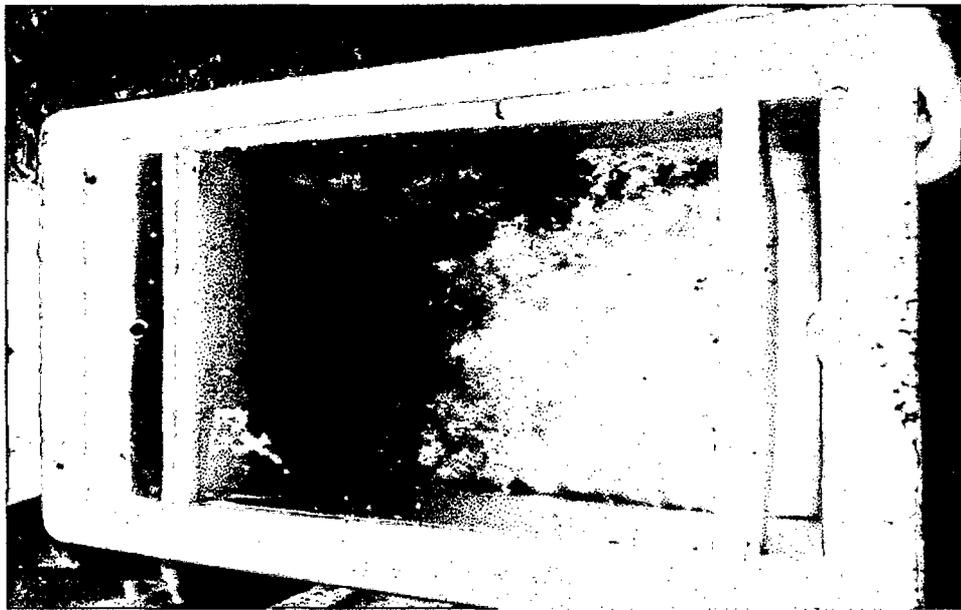


Figura 32. Vista de los sedimentos encontrados en el reactor anaerobio.



Figura 33. Vista del filtro de flujo vertical inverso con *Colocasia e.*

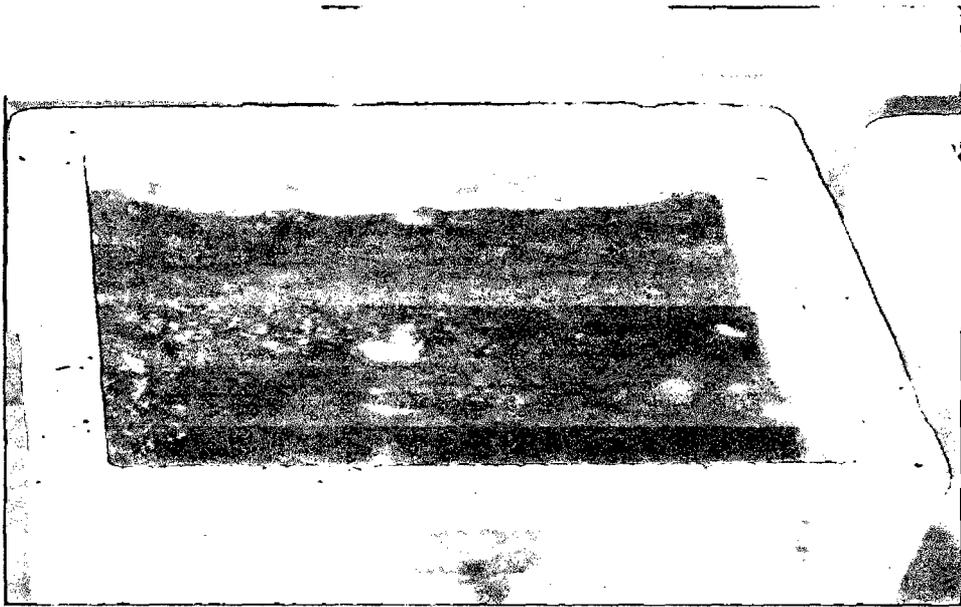


Figura 34. Filtro de flujo vertical inverso.



Figura 35. Medición del caudal de salida

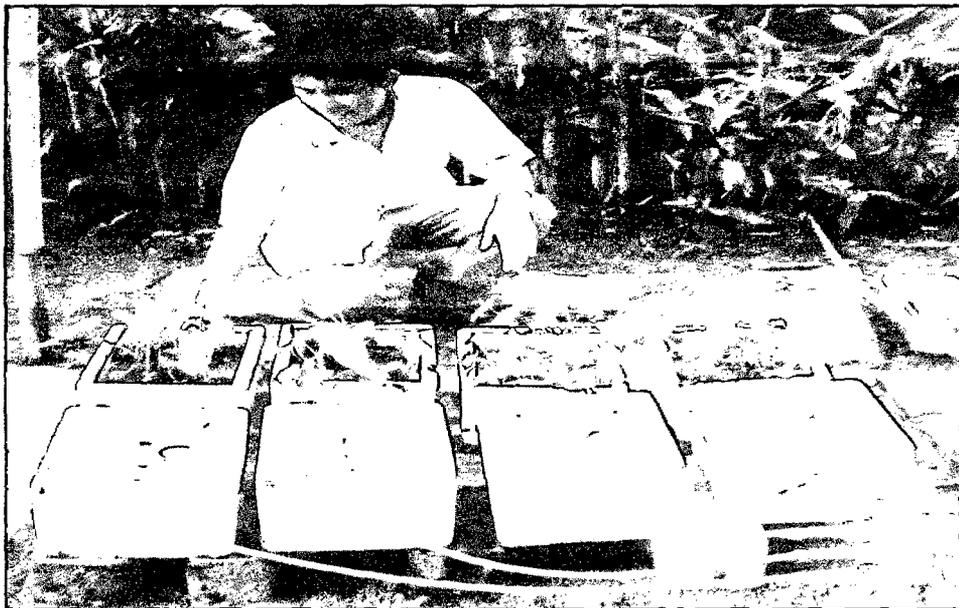


Figura 36. Toma de muestras.