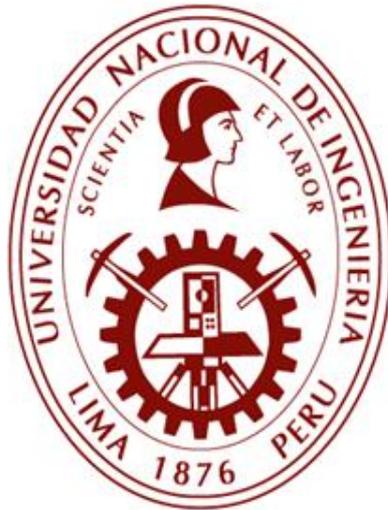


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**TESIS**

**“CONTROL DEL BULKING FILAMENTOSO DEBIDO A UNA  
BAJA RELACIÓN F/M DE UN SISTEMA DE LODOS  
ACTIVADOS DE MEZCLA COMPLETA POR MEDIO DE UN  
SELECTOR AEROBIO.”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO SANITARIO**

ELABORADO POR:

**CHRISTIAN DARÍO SALINAS VARGAS**

ASESOR:

DRA. ROSA ELENA YAYA BEAS

LIMA – PERÚ

2022

**DEDICATORIA**

A nuestro amoroso creador Jehová, por su bondad inmerecida, a mi papá Darío y mi mamá Magali, por su amor y apoyo incondicional, a mis hermanas Magali, Fiorella, Marianella, Verónica y a mi pequeño sobrino Daniel.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres Darío y Magali, mis hermanas Magali, Fiorella, Marianella, Verónica y mi sobrinito Daniel que siempre me brindaron el amor y apoyo para poder concluir con esta meta, y mi prima Sandra que me brindó su apoyo

A la Dra. Rosa Yaya Beas, mi asesora, quien me dirigió y brindó grandes consejos para llevar exitosamente la presente investigación.

A mis amigos, el Ing. Arturo Zapata Payco y el ing Otto Rosasco Gerkes, por sus consejos, incentivos y guía; así como al señor Oscar Pacari, la señora Margarita y Raúl por su apoyo en el LIA-FIA-UNI,

A la familia de CITRAR-FIA-UNI:, Laleska, Manuel, Ramsés, la señorita Luz Marina, los tesistas y brigadistas por la amistad, la paciencia, la colaboración y los grandes momentos compartidos. A mis amigos Brian Berrio, Nilton Rios, Mirella Trujillo, César Colos, Luis Lazo, Grace Chahua.

## RESUMEN

La investigación evalúa la implementación de un selector aerobio, ubicado en la cabecera del tanque de aireación principal, y su efecto en la reducción de la cantidad de filamentos del lodo y la calidad de sedimentación. Se instalaron 02 sistemas de lodos activados de mezcla completa a escala de laboratorio, en los cuales, un sistema contó con el selector instalado en la cabecera del reactor y el otro no; ambos sistemas contaron con una línea de recirculación y sedimentadores secundarios, fueron operados en paralelo y bajo las mismas condiciones de aireación y caudal (259.2 L/d).

La investigación se desarrolló en 6 etapas, la primera etapa consistió en el arranque de los reactores, en esta etapa únicamente se operaron los reactores de lodos activados, durante la segunda etapa los sistemas operaron con los sedimentadores secundarios y también se recirculó el lodo, en la tercera etapa se instaló el selector en el sistema N°1; y durante la cuarta, quinta y sexta etapa se variaron las tasas de recirculación al 50%, 60% y 70% respectivamente.

Los parámetros evaluados fueron la  $DBO_5$  (total y soluble), el IVL, la carga másica (F/M), los SST, SSV, el oxígeno disuelto, el pH, la turbiedad, la temperatura y la conductividad,

Después de la instalación del selector se redujo el IVL del sistema N°1 en un 39.66% con respecto al sistema N°2 (el cual no conto con el selector), no obstante, no se consiguió obtener un valor inferior a 150 ml/g, salvo durante la etapa 6 (R=70%). Así mismo se observó que la cantidad de bacterias filamentosas también se redujo a una cantidad ocasional después de la instalación del selector, mientras que, sin esta unidad, la cantidad de filamentos fue abundante. También se observó que a una mayor tasa de recirculación se pudo reducir tanto los valores de IVL como la cantidad de microorganismos filamentosos en el lodo. Por otro lado, también se encontró que, después de la instalación del selector aerobio en la cabecera del reactor R1, en el sedimentador se observan microburbujas.

## ABSTRACT

The research evaluates the implementation of an aerobic selector, located at the head of the main aeration tank, and its effect on reducing the number of sludge filaments and the quality of sedimentation. 02 complete mixing activated sludge systems were installed on a laboratory scale, in which one system had the selector installed at the head of the reactor and the other did not; Both systems had a recirculation line and secondary settlers, they were operated in parallel and under the same aeration and flow conditions (259.2 L/d).

The investigation was developed in 6 stages, the first stage consisted of the start-up of the reactors, in this stage only the activated sludge reactors were operated, during the second stage the systems operated with the secondary settlers and the sludge was also recirculated, in the third stage, the selector was installed in system No. 1; and during the fourth, fifth and sixth stages the recirculation rates were varied to 50%, 60% and 70% respectively.

The parameters evaluated were BOD<sub>5</sub> (total and soluble), SVI, mass load (F/M), SST, SSV, dissolved oxygen, pH, turbidity, temperature and conductivity.

After the installation of the selector, the SVI of system N ° 1 was reduced by 39.66% with respect to system N ° 2 (which did not have the selector), however, it was not possible to obtain a value lower than 150 ml/g, except during stage 6 (R = 70%). Likewise, it was observed that the amount of filamentous bacteria was also reduced to an occasional quantity after the installation of the selector, while, without this unit, the amount of filaments was abundant. It was also observed that at a higher recirculation rate, SVI values and the amount of filamentous microorganisms in the sludge could be reduced. On the other hand, it was also found that, after the installation of the aerobic selector at the head of the R1 reactor, microbubbles are observed in the settler.

## PRÓLOGO

La presente tesis de investigación presenta una alternativa para corregir los problemas de sedimentación causados por el bulking filamentoso, para esto se planteó la instalación de un selector biológico ubicado aguas arriba del reactor de lodos activados con el fin de elevar la carga másica (F/M).

Se eligió este tema porque el bulking filamentoso es el principal problema operativo de las plantas de lodos activados de mezcla completa, y los selectores biológicos reducen significativamente el bulking sin necesidad de identificar a los microorganismos filamentosos que lo causan.

Para esta investigación se insertó un selector con el fin de elevar la carga másica (F/M) inicial. La tesis investiga si con la instalación del selector se consigue  $IVL < 150$  ml/g (buena sedimentación).

Al revisar la bibliografía para realizar la presente investigación, se encontró muy poca información sobre el diseño de los selectores biológicos. En nuestro país no tiene uso, pero sí en países como Holanda, Irán, Austria, Estados Unidos, entre otros. Revisando la bibliografía se decidió elegir un sistema de lodos activados de mezcla completa, ya que esta tecnología es susceptible al bulking, y precisamente es este el problema que se busca investigar.

En la presente investigación se compararon dos sistemas de lodos activados (uno con selector y el otro sin selector); en esta comparación se evaluaron los IVL de los reactores de lodos activados como parámetro indicador de la calidad de sedimentación de los lodos y la presencia de casos de bulking filamentoso, también se realizó una observación cualitativa de los organismos filamentosos que para complementar el análisis.

Estoy plenamente convencido que la presente investigación generará discusiones y conclusiones que incentivarán a futuros investigadores a evaluar sus diferentes procesos operativos que permitan alcanzar realmente las eficiencias esperadas de las tecnologías de tratamiento.

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>5</b>
<b>PRÓLOGO.....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS.....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>12</b>
<b>ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....</b>	<b>15</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>16</b>
<b>1. CAPITULO I.....</b>	<b>17</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>17</b>
1.1 ANTECEDENTES REFERENCIALES.....	18
1.2 PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	24
1.2.1 Identificación del problema.....	24
1.2.2 Formulación de la realidad problemática.....	24
1.2.3 Justificación e importancia.....	24
1.3 OBJETIVOS.....	25
1.3.1 Objetivo general.....	25
1.3.2 Objetivos específicos.....	25
1.4 HIPÓTESIS.....	26
<b>2. CAPITULO II.....</b>	<b>27</b>
<b>MARCO TEÓRICO Y LEGAL.....</b>	<b>27</b>
2.1 MARCO TEÓRICO.....	27
2.1.1 PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	27
2.1.2 SELECTOR.....	29
2.1.3 SELECCIÓN BIOLÓGICA.....	33

## VIII

2.1.4	PROCESO DE LODOS ACTIVADOS .....	38
2.1.5	CONTROL DE PROCESOS EN LODOS ACTIVADOS .....	40
2.1.6	CONTROL DE LA CARGA MÁSCICA (F/M) .....	41
2.1.7	SEDIMENTACIÓN.....	41
2.1.8	TIPOS DE PROBLEMAS DE SEDIMENTACIÓN .....	43
2.1.9	CAUSAS Y CONTROL DEL BULKING.....	46
2.1.10	ECOSISTEMA MICROBIANO .....	48
2.2	MARCO LEGAL.....	49
<b>3.</b>	<b>CAPITULO III .....</b>	<b>50</b>
	<b>METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>50</b>
3.1	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	50
3.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN .....	50
3.2.1	Desagüe tratado.....	50
3.2.2	Puntos de monitoreo.....	51
3.3	COMPONENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	53
3.3.1	Componentes del Sistema N°1 .....	54
3.3.2	Componentes del sistema N°2 .....	55
3.3.3	Descripción de los componentes de la investigación .....	56
3.4	CRONOGRAMA DE INVESTIGACIÓN.....	61
3.5	EQUIPOS Y MATERIALES .....	65
3.5.1	Equipos instalados en la investigación.....	65
3.5.2	Materiales utilizados en laboratorio.....	65
3.5.3	Equipos de laboratorio.....	66
3.6	PRUEBAS Y ENSAYOS REALIZADOS.....	66
3.6.1	Pruebas iniciales de calibración.....	66
3.6.2	Ensayos de laboratorio .....	70
3.6.3	Observación microscópica.....	72
3.7	DIMENSIONAMIENTO DEL SELECTOR .....	74

<b>4. CAPITULO IV</b> .....	<b>75</b>
<b>OBTENCIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>75</b>
4.1 DETERMINACIÓN DEL PERIODO DE PUESTA EN MARCHA .....	75
4.2 DETERMINACIÓN DEL $K_{La}$ Y CAPACIDAD DE OXIGENACIÓN.....	76
4.2.1 Determinación de $K_{La}$ en agua potable .....	77
4.2.2 Determinación de la capacidad de oxigenación en el agua potable ( $CO_{H_2O}$ )	79
4.3 RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES.....	82
4.4 MEDICIONES DE LA TURBIEDAD .....	87
4.5 MEDICIONES DEL PH .....	90
4.6 MEDICIONES DEL OXIGENO DISUELTO .....	93
4.7 MEDICIONES DE LA $DBO_5$ .....	96
4.8 MEDICIONES DE SÓLIDOS .....	100
4.9 MEDICIONES DE LA CARGA MÁSICA (F/M) .....	104
4.10 MEDICIONES DE ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODOS (IVL) .....	105
4.11 RESULTADOS CUALITATIVOS.....	107
4.11.1 Conteo subjetivo y observación en el microscopio de los filamentos. 107	
4.11.2 Observación de los microorganismos .....	112
<b>5. CAPITULO V</b> .....	<b>118</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS, DISCUSIONES Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS</b> .....	<b>118</b>
5.1 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	118
5.2 TURBIEDAD.....	118
5.3 pH.....	125
5.4 OXIGENO DISUELTO .....	127
5.5 $DBO_5$ .....	131
5.5.1 $DBO_5$ Soluble .....	131
5.5.2 $DBO_5$ Total .....	133
5.6 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.....	135

5.7	CARGA MÁSCICA (F/M).....	139
5.8	INDICE VOLUMETRICO DE LODOS (IVL).....	142
5.9	ABUNDANCIA DE FILAMENTOS Y CALIDAD DE SEDIMENTACIÓN 145	
5.10	EVALUACIÓN DE BIOINDICADORES .....	147
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>148</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>151</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>153</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>156</b>
	ANEXO N°1. DISEÑO DEL SELECTOR .....	157
	5.10.1 Criterios de diseño del selector.....	157
	ANEXO N°2. REGISTRO PROMEDIO SEMANAL DE LOS PARÁMETROS DE RUTINA.....	161
	ANEXO N°3. REGISTRO SEMANAL DE SÓLIDOS.....	163
	ANEXO N°4. REGISTRO SEMANAL DE LA DBO <sub>5</sub> TOTAL,SOLUBLE Y EFICIENCIAS DE REMOCIÓN .....	174
	ANEXO N°5. REGISTRO DE CARGA MÁSCICA F/M y IVL SEMANALES.....	176

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Configuración del sistema para la selección con compartimentos en un sistema de flujo pistón.....	30
Figura 2.2. Configuración del sistema con selectores dispuestos en serie	30
Figura 2.3. Selección biológica según la interacción de las diversas causales .....	33
Figura 2.4. Relación entre la tasa de crecimiento específico ( $\mu$ ) y concentración de sustrato (S) para las bacterias filamentosas y formadoras de flóculos, de acuerdo con la ecuación de Monod.....	34
Figura 2.5. Curva de crecimiento y el OD.....	37
Figura 2.6. Relación del IVL con la carga másica (F/M) .....	45
Figura 2.7. Esquema del gradiente de sustrato en un sistema de lodos activados de mezcla completa mediante un selector en la cabecera .....	47
Figura 2.8. Ecología y cantidad microbiana vs calidad del lodo .....	48
Figura 3.1. Diagrama de flujo del pretratamiento previo del agua residual en las unidades de CITRAR-FIA-UNI .....	50
Figura 3.2. Esquema general del sistema N°1 con sus puntos de monitoreo .....	51
Figura 3.3. Esquema general del sistema N°2 .....	52
Figura 3.4. Vista en planta del módulo de investigación .....	53
Figura 3.5. Vista lateral del sistema N°1 del módulo de investigación .....	54
Figura 3.6. Vista lateral del sistema N°2 del módulo de investigación .....	55
Figura 3.7. Disposición de los volúmenes de los compartimentos del selector .....	74
Figura 9.1. Esquema del sistema N°1 para el diseño del selector.....	157

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Determinación gráfica de $KL_a$ .....	78
Gráfico 4.2. C-Co vs Tiempo, se observa la campana de Gauss del ensayo de trazadores .....	86

<b>Gráfico 5.1. Comparativo de la variación de turbiedad total del afluente y efluente del Sistema N°01 y el Sistema N°02 y sus respectivas eficiencias de remoción .....</b>	<b>120</b>
<b>Gráfico 5.2. Comparativo de la variación del IVL de los reactores R1 y R2 con influencia de la turbiedad de los efluentes de los sedimentadores S1 yS2 .....</b>	<b>122</b>
<b>Gráfico 5.3. Comparativo de las eficiencias de remoción de turbiedad entre los sedimentadores S1 y S2.....</b>	<b>124</b>
<b>Gráfico 5.4. Comparativo del IVL de los reactores R1 y R2 con la influencia del pH de los reactores R1 y R2.....</b>	<b>126</b>

### ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1. Resumen de los valores de IVL y la calidad de sedimentación según los antecedentes de la investigación.....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 2.1. Materia orgánica biodegradable y no biodegradable.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 2.2. Comparación de las ventajas y desventajas entre los tipos de selector según sus requerimientos de oxígeno .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de la configuración de un reactor de lodos activados según el régimen hidráulico .....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 2.4. Rango de valores del índice volumétrico de lodos, según la calidad de sedimentación .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 2.5. Resumen de las causas del bulking filamentoso, filamentos relacionados y alternativas de solución .....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 3.1. Cronograma y lineamientos de las etapas de la investigación ...</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 3.2. Frecuencia de medición de los análisis de laboratorio y parámetros de rutina por cada punto de monitoreo .....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 3.3. Criterios para determinar el tipo de flujo por medio del ensayo de trazadores .....</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 3.4. Constantes de la Ley de Henry a diferentes temperaturas.....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 3.5. Pruebas de laboratorio desarrolladas en la investigación .....</b>	<b>71</b>
<b>Tabla 3.6. Puntaje subjetivo de la abundancia de filamentos.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 4.1. Datos de entrada para calcular la constante de saturación en agua potable.....</b>	<b>76</b>

Tabla 4.2. Registro de las concentraciones de O.D durante la prueba de la capacidad de oxigenación del reactor .....	77
Tabla 4.3. Datos de entrada para elaborar el ensayo de trazadores .....	82
Tabla 4.4. Resultados del ensayo de trazadores del reactor de lodos activados convencional de mezcla completa .....	83
Tabla 4.5. Detalles de la prueba de trazadores realizados a los reactores de lodos activados R1 y R2.....	87
Tabla 4.6. Análisis del tipo de flujo de los reactores de lodos activados ....	87
Tabla 4.7. Valores promedios, mínimos y máximos de la turbiedad en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°1 .....	88
Tabla 4.8. Valores promedios, mínimos y máximos de la turbiedad en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°2 .....	89
Tabla 4.9. Valores promedio de turbiedad de los reactores R1 y R2, eficiencias promedio de remoción de la turbiedad en los sistemas N°1 y N°2 considerando un tamaño de muestreo poblacional.....	90
Tabla 4.10. Valores promedios, mínimos y máximos del pH en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°1.....	91
Tabla 4.11. Valores promedios, mínimos y máximos del pH en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°2.....	92
Tabla 4.12. pH promedio de los reactores y sedimentadores en los sistemas N°1 y N°2 considerando un tamaño de muestreo poblacional .....	93
Tabla 4.13. Valores promedios, mínimos y máximos de O.D. en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°1.....	94
Tabla 4.14. Valores promedios, mínimos y máximos de O.D. en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°2.....	95
Tabla 4.15. OD promedio de los en los sistemas N°1 y N°2 considerando un tamaño de muestreo poblacional .....	96
Tabla 4.16. Valores promedios DBO5 total y/o soluble. en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°1, así como de sus respectivas eficiencias de remoción .....	97
Tabla 4.17 Valores promedios de la DBO5 total y/o soluble. en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°2, así como de sus respectivas eficiencias de remoción .....	98

Tabla 4.18. Valores promedio de DBO <sub>5</sub> soluble en los sistemas N°1 y N°2 y eficiencia promedio de la remoción de DBO <sub>5</sub> soluble del selector considerando un tamaño de muestreo poblacional.....	99
Tabla 4.19. Valores promedio, mínimo y máximo de DBO <sub>5</sub> total del afluente, los reactores con sus respectivas eficiencias de remoción, y de los efluentes de los sedimentadores considerando un tamaño de muestreo poblacional .....	100
Tabla 4.20. Valores promedio, mínimo y máximo de los SST en las líneas de recirculación de lodos y las eficiencias de remoción en los sedimentadores S1 y S2 y los SST de los reactores R1 y R2, considerando un tamaño de muestreo poblacional.....	101
Tabla 4.21 Valores promedios de los SST del reactor, la línea de recirculación y el sedimentador del sistema N°1 y eficiencias de remoción del sedimentador S1.....	102
Tabla 4.22 Valores promedios de los SST del reactor, la línea de recirculación y el sedimentador del sistema N°2 y eficiencias de remoción del sedimentador S2.....	103
Tabla 4.23. Valores promedios de la carga másica (F/M) y del IVL semanal los reactores R1, R2 y el selector .....	104
Tabla 4.24. Valores promedio, mínimo y máximo de la carga másica (F/M) en los reactores y el selector, y del IVL semanal, considerando un tamaño de muestreo poblacional.....	105
Tabla 4.25. Valores promedios, mínimos y máximos del IVL diario a nivel muestral (por cada etapa) de los reactores R1 y R2 .....	106
Tabla 4.26. Valores promedio, mínimo y máximo del IVL diario en los reactores R1 y R2, considerando un tamaño de muestreo poblacional ....	107
Tabla 4.27. Calidad de lodos y estimación de filamentos del reactor R1 ...	108
Tabla 4.28. Calidad de lodos y estimación de filamentos del reactor R2 ..	109
Tabla 4.29 Calidad de lodos y estimación de filamentos del selector del sistema N°1 .....	110
Tabla 4.30. Registro de incidencias durante el ensayo del IVL .....	111
Tabla 4.31. Identificación probable de los microorganismos encontrados en los reactores R1, R2 y en el selector.....	113

Tabla 9.2. Registro semanal del promedio de monitoreos diarios de temperatura, pH, conductividad, turbiedad y oxígeno disuelto del Sistema N°1 .....	161
Tabla 9.3. Registro semanal del promedio de monitoreos diarios de temperatura, pH, conductividad, turbiedad y oxígeno disuelto del Sistema N°2 .....	162
Tabla 9.4. Mediciones semanales de los sólidos en el sistema N°1 .....	163
Tabla 9.5. Mediciones semanales de los sólidos en el sistema N°2 .....	169
Tabla 9.6. Mediciones semanales de la DBO <sub>5</sub> total y soluble en el sistema N°1 .....	174
Tabla 9.7. Mediciones semanales de la DBO <sub>5</sub> total y soluble en el sistema N°2 .....	175
Tabla 9.8. Parámetros operativos (carga másica F/M) y valores de IVL semanales de los sistemas N°1 y N°2 .....	176

#### ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3.1. Partes constructivas del selector .....	58
Fotografía 3.2. Selector instalado en el sistema N°1 .....	58
Fotografía 3.3. Equipo de aireación de los reactores R1 y R2 (izquierda), manifold del PVC(derecha), difusores de burbuja fina (abajo).....	59
Fotografía 3.4. Bomba peristáltica (izquierda), cabezal doble (derecha), esquema de recirculación (abajo) .....	61
Fotografía 3.5. Sensor LDO10105 con cubierta de protección (izquierda) y sensor LDO 10101 sin cubierta de protección (derecha).....	72
Fotografía 4.1 . Formación de lodo antes y después de la inoculación de lodos.....	75
Fotografía 5.1. Saturación del selector debido a la formación y acumulación de lodos de gran tamaño.....	139

**ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>ANEXO N°1. DISEÑO DEL SELECTOR .....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO N°2. REGISTRO PROMEDIO SEMANAL DE LOS PARÁMETROS DE RUTINA .....</b>	<b>161</b>
<b>ANEXO N°3. REGISTRO SEMANAL DE SÓLIDOS .....</b>	<b>163</b>
<b>ANEXO N°4. REGISTRO SEMANAL DE LA DBO<sub>5</sub> TOTAL, SOLUBLE Y EFICIENCIAS DE REMOCIÓN.....</b>	<b>174</b>
<b>ANEXO N°5. REGISTRO DE CARGA MÁSCICA F/M y IVL SEMANALES .....</b>	<b>176</b>

## 1. CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

La operación exitosa de una planta de lodos activados puede perjudicarse en caso se presente bulking, el cual causa una pobre capacidad de sedimentación, haciendo que el flóculo biológico flote disminuyendo su densidad; este fenómeno es producido debido al mayor crecimiento de las bacterias filamentosas con respecto a las bacterias formadoras de flóculos (Amy et al., 2008).

Según Rosseti et al., 2017, hasta hace poco, este fenómeno estaba controlado solo a nivel operativo, tanto como con la manipulación de lodos de retorno, suministro de la cantidad necesaria de oxígeno, adición de productos químicos y cloración. Sin embargo, el avance reciente en la comprensión de la dinámica de las poblaciones microbianas en el reactor biológico ha permitido, en la etapa de diseño, la incorporación de medidas preventivas, contra la acumulación de lodos. La esencia de este mecanismo radica en la creación de condiciones ambientales, que favorezcan el predominio de bacterias formadoras de flóculos sobre bacterias filamentosas. Los microorganismos más deseables en el reactor son seleccionados por la incorporación de reactores especiales, denominados selectores, en el diseño de los reactores biológicos.

La presente investigación realiza el estudio de los selectores biológicos como una solución al bulking filamentoso en reactores de lodos activados.

## 1.1 ANTECEDENTES REFERENCIALES

Daigger, Robbins y Marshall (1985) investigaron el efecto de un tanque denominado selector para controlar el bulking filamentoso por una baja carga másica (F/M). Se implementó un reactor de lodos activados con selector y otro sin selector. Se diseñaron selectores aerobios de flujo pistón (para promover una alta eficiencia de transferencia de oxígeno) con una relación de longitud a anchura de 5,5 a 1 y un TRH de 15 minutos; se observó que la presencia del selector eliminaba el bulking a una temperatura de 10°C. El IVL promedio del módulo con selector fue de 82 ml/g y del módulo sin selector fue de 264.67ml/g.

Dilek y Gülerman (1990) estudiaron los efectos de la temperatura y el pH en la sedimentación de los lodos mediante la velocidad de sedimentación de la zona y el índice de volumen de lodos (IVL). Se usaron reactores de tipo semicontinuo con dos litros de volumen. Para investigar la influencia de la temperatura sobre la sedimentación del lodo activado, se controlaron los reactores a 5 diferentes temperaturas (15, 20, 25, 30 y 35°C), mediante baño maría; durante esta etapa se ajustó el pH a un valor de 7.2 para evitar interferencias. En otra etapa, también se investigó la influencia del pH del reactor sobre la capacidad de sedimentación del lodo activado; los reactores operaron a 4 valores de pH distintos (5.7, 7.2, 8.2 y 9.0) manteniendo una temperatura de 15°C, a la cual el lodo mostró la mayor capacidad de sedimentación durante los estudios de temperatura anteriores. A partir de los resultados se observó que a medida que aumentaban las temperaturas de funcionamiento de los reactores, disminuían las ZSV y aumentaba el IVL; a 35°C, el IVL fue de aproximadamente 120 ml/g y mostró la tendencia del lodo al bulking. A medida que aumentaban las ZSV, los valores de IVL disminuyeron. Con respecto al pH, los resultados mostraron que las ZSV y el IVL disminuyó a medida que se aumentaba el pH operativo de los reactores. El reactor que funcionó a pH 5.7 tuvo la velocidad de sedimentación más baja y el IVL más alto, además de tener una turbiedad alta, la cual respalda la baja capacidad de sedimentación.

Ghanizadeh y Sarrafpour (2001) desarrollaron un estudio en Israel, para analizar los efectos que tienen la temperatura y el pH en la sedimentación de los flóculos

en los lodos activados. Se evaluó la capacidad de sedimentación mediante el IVL, y también el alcance indirecto que tenían el pH y la temperatura sobre las eficiencias de remoción de DQO y los SST del efluente. En la investigación se observó que a medida que la temperatura aumenta de 15 ° C a 35 ° C, la eficiencia de la reducción de DQO disminuyó de 93% a 87 % y la concentración de sólidos en suspensión en el efluente aumentó de  $43 \pm 3$  a  $67 \pm 6$  mg/L. Además, los hallazgos indicaron que al aumentar el pH de 5.7 a 9.0, la eficiencia para la reducción de DQO aumentó de 87% a 96% y la cantidad de SST en el efluente disminuyó de  $87 \pm 6$  mg/L a  $49 \pm 4$  mg/L. El efecto de la temperatura sobre el IVL reveló que, con el aumento de la temperatura de 15 ° C a 35 ° C, el IVL aumentó de 40 ml/gr a 130 ml/gr perjudicando la sedimentación del lodo. Además, con el aumento del pH de 5.7 a 9.0, el IVL disminuyó de 96 ml/gr a 44 ml/gr, mejorando la sedimentación del lodo, y los SST en el efluente se reduce de 88 mg/L a 40 mg/L. Se concluyó que el aumento de la temperatura y la disminución del pH, provocaron la reducción de la DQO, el aumento de IVL y de los SST efluentes y por lo tanto, la sedimentación empeora.

Martins, Heijnen y van Loosdrecht (2003), investigaron los efectos de la concentración del oxígeno disuelto en la sedimentación del lodo activado. Para ello, se analizó la capacidad de sedimentación según la clasificación del IVL, considerando como buena ( $IVL \leq 120$  ml/g), ligera ( $120 < IVL \leq 150$  ml/g) y mala sedimentación ( $IVL > 150$  ml/g). Los experimentos se realizaron en 11 SBR con una edad de lodos de 10 días, donde los reactores con periodo corto de alimentación (SBR 1-7), simulaban a un sistema con un selector de flujo de pistón con eliminación total del sustrato, seguido de un tanque completamente mezclado. Se alimentó al sistema con un sustrato fácilmente biodegradable de un agua residual sintética. Las concentraciones de OD variaron entre 0.2 y 3.0 mg/L, la tasa de carga orgánica volumétrica varió de 1.2 y 2.4 g DQO /L.d. Se redujo el IVL, aumentando la concentración de OD a más de 2.5 mg O<sub>2</sub> /L en los sistemas con lodo filamentoso. Se concluyó que una combinación de bajas concentraciones de OD y de sustrato orgánico es menos dañina para el IVL que las condiciones en las que solo la concentración de OD o de sustrato orgánico es baja. De los experimentos se recomendó una concentración de oxígeno disuelto superior a 1.0 mg O<sub>2</sub> / L en el selector aeróbico compartimentado siempre que la tasa de carga

de flóculos sea superior a 10-13 kg DQO /kg MLVSS.d, con el fin de evitar el bulking. Además, el estudio determinó que un selector aeróbico pequeño y compartimentado (flujo pistón), diseñado para garantizar un fuerte gradiente de concentración de sustrato, podría no tener una aireación adecuada. Consecuentemente, no se tendría una buena sedimentación, y se debe garantizar que, el consumo de oxígeno sea como mínimo del 30% de la demanda total de oxígeno en el sistema para controlar el bulking.

Chudoba, Cech, Farkac y Grau (1985) publicaron una investigación donde se buscaba controlar el bulking filamentoso de los lodos activados. Se instalaron 2 sistemas a escala de laboratorio, uno completamente mezclado y otro de tipo selector. Los sistemas se mantuvieron a una temperatura de 20°C y se alimentaron de forma continua con un desagüe sintético, en el cual se suprimió totalmente la nitrificación con la adición de inhibidores. El sistema de tipo selector consistió en tres pequeños tubos de 0.25 L, y fue capaz de suprimir el crecimiento de microorganismos filamentosos. Por otro lado, el reactor completamente mezclado era de 6L. Luego de haber aireado hasta llegar a una concentración de OD de 6-8 mg/L se midió el IVL, consiguiendo valores promedio inferiores a 100 mg/L en el sistema selector y valores de 130 a 1000 ml/g en el sistema de mezcla completa. La única diferencia entre ambos sistemas fue una alta concentración de sustrato en el selector. Para el sistema con el selector, se realizó un gráfico que relacionaba el IVL del reactor y la DQO soluble biodegradable del primer compartimento del selector, observándose que para un DQO soluble de 30 mg/L, se garantizaba valores de IVL por debajo de 100 ml/g; además se notó que la sedimentación mejoraba en términos de IVL (cada vez valores más bajos) cuando la mayor parte de la DQO soluble se eliminaba en el selector. Se concluyó que se debe tener en cuenta como parámetro la DQO soluble y no la DQO total.

Méndez, Miyashiro, Rojas; Cotrado y Carrasco (2004) publicaron una investigación sobre el tratamiento de las aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio, se instaló un módulo compuesto por 6 reactores. El experimento se llevó a cabo en dos etapas. Se buscó demostrar en la primera etapa que se podía calibrar el sistema controlando las condiciones iniciales mediante el tratamiento de aguas residuales con sustrato sintético y conocido;

mientras que, en la segunda etapa, el objetivo era determinar las constantes cinéticas a partir de un tratamiento de agua residual cruda proveniente de la planta piloto de leche de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Se utilizó un flujo continuo y sin recirculación en ambas etapas, para poder controlar fácilmente las condiciones experimentales. Dos reactores operaron bajo un sistema convencional de lodos activados con tiempos de retención hidráulico de 6h y 8h, mientras que los otros 4 restantes operaron bajo una aireación prolongada con tiempos de retención hidráulicos en un rango de 12 a 36h. Se obtuvo una relación inversa entre los valores de IVL y la carga másica (F/M) para las dos etapas del experimento. Se usaron dos sustratos, el sustrato N°1 con una DBO menor a 100 mg/L y el sustrato N°2 con una DBO promedio de 146 mg/L. Cuando se trabajó con el sustrato N°1 se observó una formación continua de flóculos de lodo en el sedimentador y la concentración de SSVLM no se incrementó como se tenía esperado; por otro lado, cuando se trabajó con el sustrato N°2, el pH decrecía en la primera etapa llegando a valores de 5.8 y crecía en la segunda etapa alcanzando valores de 8.25. Se obtuvieron valores de F/M dentro del rango propuesto por Ramalho (2009). Además, los valores de IVL con el sistema de agua residual sintética fluctuó entre 58.6 y 336 ml/g, mientras que para el agua residual cruda varió entre 95.7ml/ y 339.7ml/g. Se concluyó que el sistema alimentado con agua residual sintética de baja carga (146mg/l DBO5) tiene una mejor sedimentación que el que fue alimentado con aguas crudas (226mg/l DBO5), por ello la tendencia al bulking de las aguas residuales crudas es mayor a causa del crecimiento excesivo de filamentos.

Arango y López (2011) realizaron un estudio a escala de laboratorio sobre los efectos que tenían la forma de alimentación sobre el bulking en los reactores aerobios de mezcla completa durante la etapa de arranque. Se evaluaron los valores de IVL según la comunidad microscópica encontrada en los reactores aerobios de mezcla completa que operaban en paralelo bajo regímenes de flujo diferentes. La investigación se desarrolló durante la etapa de arranque de la biomasa. Se usaron dos reactores, uno de ellos se alimentó en régimen continuo (R1) y el otro en flujo intermitente (R2). Primero se alimentó y controló la biomasa de un tanque de aireación de forma diaria por 45 días, después de alcanzar una concentración se 5225 mg/L de SSLM y 4180 mg/L de SSVLM, se procedió a

dividir dicho tanque de aireación en 2 reactores de volúmenes iguales (R1 y R2). En las gráficas de IVL vs tiempo, se observó que hubo una gran desmejora del IVL para R1 y un leve deterioro del IVL para R2. En la observación microscópica se evidenció que la biomasa de R1 perdió significativamente flóculo de buen tamaño y los filamentos crecieron muy rápido, se perdieron organismos como vorticelas, protozoos ciliados sésiles al principio, y luego aparecieron como algunos protozoos flagelados y amebas, indicadores de una F/M alta, asociado al lavado de la biomasa y a la cantidad de comida disponible para los microorganismos; mientras que en R2 continuó habiendo una buena cantidad de flóculos y microorganismos formadores de flóculos pese a notarse un crecimiento de filamentos; se encontraron vorticelas y gran cantidad de rotíferos, metazoos indicadores de ausencia de tóxicos en el afluente, buena cantidad de OD.

Di Marzio, Sáenz, Tortorelli y Alberdi (2001) realizaron una investigación sobre el control de organismos filamentosos mediante selección cinética y metabólica en sistemas de lodos activados. Se evaluó la presencia de filamentos de dos muestras de plantas de lodos activados de aguas industriales determinando su patología, ambas muestras presentaron bulking. En la industria 1 se identificó *Thiothrix* I y en la industria 2 el Tipo 021N. Se eliminaron ambos microorganismos mediante selectores y control de procesos. La *Thiothrix* sp fue eliminada mediante la combinación de selectores aeróbicos y anóxicos y el Tipo 021N con selectores anóxicos. Para la observación microscópica se realizaron tinciones y test específicos como tinciones Gram, Neisser, cristal violeta y los test de azufre y de la tinta china para realizar una mejor identificación de los microorganismos. Para la caracterización cuantitativa se usaron dos métodos. El primer método fue el de Madoni e Davoli (1992) y consistió en determinar el índice de bacterias filamentosas (F) expresado como un número de filamentos por unidad de volumen ( $N^{\circ}F/\mu L$ ) y por peso de MLSS ( $N^{\circ}F/\mu g$ ); este método consistía en contar las intersecciones de los filamentos a través de una transecta que se encontraba marcada en el ocular del microscopio o en el cubreobjeto. El segundo método fue el de Richard (1989) y consistía en determinar de forma subjetiva el índice de abundancia relativa de microorganismos filamentosos, teniendo 6 niveles de los cuales los valores 0,1,2,3,4,5 y 6 indican que no existen filamentos en los flóculos, hay filamentos de forma ocasional, hay filamentos frecuentes pero no en todos los

flóculos, hay filamentos en todos los flóculos en número de 1 a 5, hay entre 5 y 20 filamentos por flóculo, hay más de 20 filamentos por flóculo, hay más filamentos que flóculos inclusive creciendo sólo en el líquido respectivamente. Las industrias N°1 y N°2 presentaron valores de IVL de 500 ml/g y 390ml/g respectivamente. Por otro lado, se construyeron histogramas de densidad óptica y se observó una relación entre la estructura de los flóculos y su estado patológico, lodos con bulking presentaban menores densidades ópticas y menor abundancia óptica por píxel. Se concluyó que el primer método era más eficaz que el segundo método, para evaluar y relacionar el estado del lodo con el índice volumétrico (IVL).

De los antecedentes realizados, se realizó la tabla 1.1, en la cual se muestra la influencia de los valores del IVL con respecto a la calidad del lodo. A medida que los valores de IVL se aproximan a 120 ml/g, el lodo tiende al bulking, pero cuando aumentan a valores superiores a 150 ml/g, ya se presenta claramente el bulking, y la sedimentación del lodo se ve perjudicada. Por tal motivo, resulta conveniente tratar de reducir el IVL a valores menores a 150 ml/g, ya que la presente tesis busca controlar los casos de presencia de bulking.

**Tabla 1.1.** Resumen de los valores de IVL y la calidad de sedimentación según los antecedentes de la investigación

<b>Antecedente</b>	<b>Rango de IVL</b>	<b>Calidad de sedimentación</b>
Dilek y Gülerman (1990)	120 ml/g	Tendencia al bulking
Ghanizadeh y Sarrafpour (2001)	Aumentó de 40 ml/g a 130 ml/g	La sedimentación empeoró
	Disminuyó de 88 ml/g a 40 ml/g	La sedimentación mejoró
Martins, Heijnen y van Loosdrecht (2003)	IVL ≤ 120 ml/g	buena
	120 < IVL ≤ 150 ml/g	ligera
	IVL > 150 ml/g	mala (bulking)
Chudoba, Cech, Farkac y Grau (1985)	IVL < 100 ml/g	buena
	130 < IVL ≤ 1000 ml/g	Mala (bulking)
Méndez, Miyashiro, Rojas; Cotrado y Carrasco (2004)	58.6 ml/g -336 ml/g (agua residual sintética) 95.7 ml/g -339.7 ml/g (agua residual cruda)	La sedimentación del agua residual sintética fue mejor que la del agua residual cruda

**Fuente:** Elaboración propia

**Nota 1:** Todos los antecedentes concuerdan en que la calidad de sedimentación mejora a medida que se reducen los valores del IVL.

Según Richard (1989) la suspensión microbiana floculenta está compuesta por una mixtura de varios grupos de microorganismos que en gran parte no son controlados, dentro de la población microbiana presente conviven las bacterias formadoras de flóculos y la filamentosas, el crecimiento excesivo de estas últimas generan problemas de sedimentación como el bulking filamentoso y no permiten que se obtenga un sobrenadante clarificado y un retorno de lodo espesado que garantice una adecuada concentración de SSLM en el reactor principal (tal como se mencionó en Al-Mutairi, 2009), perjudicando de esta manera a las eficiencias esperadas de los parámetros físicos, químicos y biológicos; que se tuvieron en consideración durante la etapa de diseño (Jenkins, Wanner y Tadoi, 2006).

## **1.2 PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

### **1.2.1 Identificación del problema**

A nivel nacional, los lodos activados de mezcla completa aún son utilizados en muchos lugares, sin embargo, dicha configuración presenta la desventaja de ser susceptible al crecimiento excesivo de organismos filamentosos. Conforme a los antecedentes presentados no se conoce el efecto de un tanque selector aerobio en la operación de un sistema de lodos activados de mezcla completa con recirculación, que trate aguas residuales domésticas con flujo continuo bajo condiciones reales.

### **1.2.2 Formulación de la realidad problemática**

¿De qué manera, la instalación de un selector aerobio ubicado en la cabecera de un reactor de lodos activados de mezcla completa de aguas residuales domésticas puede contribuir como una medida preventiva adecuada para controlar el bulking filamentoso y lograr una buena sedimentación de los lodos en el clarificador secundario?

### **1.2.3 Justificación e importancia**

En la práctica, los proyectos de tratamiento de lodos activados muchas veces no llegan a las eficiencias de remoción esperadas, principalmente debido problemas

de sedimentación, causados por una mala operación del sistema, ya que muchas veces es difícil controlar la gran cantidad de factores que intervienen en la operación.

La presente investigación generará información con el fin de determinar si es conveniente la presencia de un selector biológico para solucionar el bulking filamentoso.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar a escala de laboratorio el desempeño de un selector biológico aerobio colocado a la entrada de un sistema de lodos activados de mezcla completa que trata las aguas residuales domésticas de CITRAR-FIA-UNI, aumentando la concentración del sustrato en el ingreso, para fomentar el desarrollo de los organismos formadores de flóculos, a fin de controlar el bulking filamentoso.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar, evaluar y comparar el pH, la temperatura, la turbiedad, el oxígeno disuelto, el DBO5 y los SST entre el afluente (agua residual proveniente del pretratamiento de CITRAR-FIA-UNI) y efluente del sistema de lodos activados.
- Determinar la relación que guardan los parámetros de rutina como el OD, la turbiedad, el pH con la calidad de sedimentación de los lodos en los sedimentadores secundarios de los sistemas, evaluándolos con los índices volumétricos de lodos (IVL) de los reactores principales.
- Comprobar si el tiempo de retención hidráulico del selector, sugerido por las referencias teóricas, es el apropiado para controlar el bulking filamentoso.
- Comprobar si la carga másica (F/M) en el selector se eleva respecto a la carga másica del reactor principal.

- Determinar la relación que existe entre el aumento de la carga másica a la entrada del sistema de lodos activados y la selección microbiana de los organismos formadores de flóculos y los filamentosos.
- Determinar, evaluar y comparar el índice volumétrico de lodos, como parámetro de calidad de sedimentación, de dos reactores aerobios de mezcla completa a escala de laboratorio que operan en paralelo, de los cuales uno cuenta con un selector aerobio aguas arriba y el otro no.
- Evaluar el impacto que tiene sedimentación de los lodos en los sedimentadores secundarios sobre la recirculación de los lodos y la carga másica.
- Observar una relación entre la tasa de recirculación (R) y los microorganismos formadores de flóculos y los filamentosos.
- Evaluar los parámetros cualitativos y cuantitativos a nivel microscópico que determinen la proliferación de bulking filamentoso en los reactores de lodos activados a nivel de laboratorio.
- Determinar la remoción de DBO5 soluble que se logra en el selector biológico y evaluar el impacto que tiene en la selección microbiana.

#### **1.4 HIPÓTESIS**

Con la implementación de un selector biológico aerobio ubicado en la cabecera de un reactor de lodos activados de mezcla completa, que trata aguas residuales domésticas a escala de laboratorio, se logra controlar los casos de bulking filamentoso consiguiendo valores de IVL menores a 150 ml/g

## 2. CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO Y LEGAL

#### 2.1 MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1 PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES

###### 2.1.1.1 Materia orgánica o sustrato (S)

La DBO5 medida al quinto día es el parámetro de contaminación orgánica más empleado en el tratamiento de aguas residuales y será el sustrato en la presente investigación por su relativo bajo costo (Metcalf & Eddy, 2013).

La tabla 2.1 describe los tipos de materia orgánica según su complejidad metabólica.

**Tabla 2.1.** Materia orgánica biodegradable y no biodegradable

Materia Orgánica no biodegradable	Soluble	Es la materia orgánica disuelta que no pasa por transformaciones y mantiene la misma concentración en el ingreso y en la salida.
	Particulada	Es la materia orgánica suspendida que se elimina únicamente con la sedimentación del lodo ya que tampoco es transformada por los organismos vivos.
Materia Orgánica biodegradable	Rápidamente Biodegradable (soluble)	Se refiere a la materia orgánica que es metabolizada por los organismos vivos y se encuentra en forma soluble y están compuestas por moléculas no complejas
	Lentamente biodegradable (particulada)	Es la materia orgánica que es metabolizada por los organismos vivos y se encuentra en forma de partículas y están compuestas por moléculas complejas

Fuente: Adaptado de Von Sperling (2007b)

### 2.1.1.2 Gradientes de sustrato y oxígeno disuelto

Los gradientes de sustrato son las variaciones de concentración que pasan de una concentración alta en el líquido a granel ( $C_s$ ) a una concentración más baja en el interior del flóculo. Se definen mejor como gradiente de concentración del sustrato.

Von Sperling (2007b) expone que la concentración del OD y de DBO disminuye dentro del flóculo en dirección a su centro en función a la distancia. El tamaño del flóculo posibilita que exista un gradiente tanto de concentraciones de DBO (sustrato) como de OD, desde el líquido a granel o superficie del flóculo (mayores valores de DBO y OD) hasta su centro (valores bajos de DBO y OD). Estos gradientes de concentraciones se rigen a las necesidades nutritivas de los microorganismos a través de la estructura del flóculo en dirección hacia el centro.

Según se mantenga la concentración de OD en el líquido a granel, y se vayan incrementando las tasas de crecimiento de los microorganismos y su consumo de OD, se pueden desarrollar micro regiones anóxicas dentro del flóculo, y las reacciones bioquímicas tienen lugar en ausencia de oxígeno (A.C. van Haandel y J.G.M. van der Lubbe, 2012).

El bulking filamentoso se puede evitar, si se logra controlar el crecimiento de las bacterias filamentosas (selección biológica). Los organismos filamentosos tienen la ventaja sobre los formadores de flóculos (cuando se dan las condiciones de limitación de sustrato) de acceder al sustrato fácilmente biodegradable o soluble y al OD gracias a su morfología y capacidad de crecer fuera del flóculo. Por tal razón, se evitaría el bulking si se mantiene un gradiente de concentración de sustrato soluble entre el licor mezclado y el flóculo, de modo que se prevenga la limitación de difusión del sustrato. “Una alta limitación de difusión está relacionada con un gran tamaño de flóculo y bajas concentraciones de  $DBO_5$  soluble, nutrientes y oxígeno dentro del flóculo causados por el metabolismo bacteriano” (Lever, 2013).

## 2.1.2 SELECTOR

El selector es un tanque pequeño tamaño ubicado previo al reactor principal. En este tanque se pueden maniobrar la carga másica (F/M) para instaurar la presión cinética, y así lograr que predomine el crecimiento de bacterias floculantes sobre las bacterias filamentosas. (Bitton, 2005; Rosseti et al., 2017). En este selector se mezcla el afluente con la recirculación del lodo proveniente del sedimentador; dicho lodo provee la biomasa que elimina el sustrato ( $DBO_5$ ) y da como resultado una concentración de material biodegradable mayor ( $S_0$ ), ya que gracias a que el volumen del tanque selector es muy pequeño y cuenta con un tiempo de contacto sustrato-biomasa muy corto, no se permite que la concentración de  $DBO_5$  alcance valores menores a  $S_0$ . Este tiempo corto es ideal para que ocurra la selección biológica, ya que se presume que los formadores de flóculos pueden prevalecer sobre los organismos filamentosos a través de una rápida absorción y posterior crecimiento del material fácilmente biodegradable. En el reactor principal, la concentración de sustrato fácilmente biodegradable será baja, pero la pequeña cantidad de  $DBO_5$  soluble residual que otorga el efluente del selector al reactor, no permite que se compense la ventaja que los formadores de flóculos que ya han tenido en el selector. No se elimina por completo a los organismos filamentosos, pero sí se controla su presencia, de tal forma que los filamentos, solo funcionan como una espina dorsal para la formación de flóculos. En resumen, el selector estimula el crecimiento selectivo de los formadores de flóculos, de ahí su nombre (A.C. van Haandel y J.G.M. van der Lubbe, 2012; Rosseti et al., 2017). Según Von Sperling (2007a) los selectores se clasifican en:

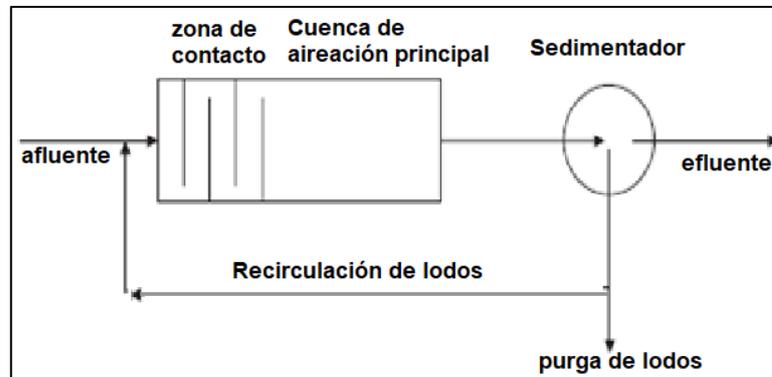
### 2.1.2.1 Clasificación relativa a la configuración física

Para dar una ventaja selectiva a las bacterias floculantes, a través de absorción mayoritaria del sustrato soluble y lograr una gradiente de sustrato.

#### 2.1.2.1.1 *Rectores de flujo pistón con compartimentos secuenciales*

Se crea un gradiente de sustrato mediante una compartimentalización al inicio del reactor simulando un flujo pistón en un tiempo corto y de esa forma se eleva el

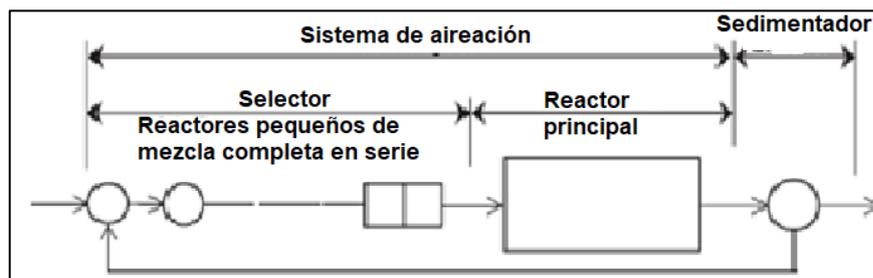
F/M. Al crear este gradiente de sustrato se genera un efecto selector el cual se esquematiza en la figura 2.1. este efecto selector ocurre dentro del mismo reactor.



**Figura 2.1.** Configuración del sistema para la selección con compartimentos en un sistema de flujo pistón  
Fuente: (Jenkins y Wanner, 2014)

#### 2.1.2.1.2 Tanque selector separado aguas arriba del reactor de mezcla completas

En la figura 2.2 el selector está conformado por reactores en serie separados a la cabecera del tanque de aireación. Esta ubicación, crea un gradiente de sustrato al inicio del reactor y eleva el F/M en un tiempo corto mediante la separación en serie de pequeños reactores mezclados



**Figura 2.2.** Configuración del sistema con selectores dispuestos en serie  
Fuente: (Jenkins y Wanner, 2014)

### 2.1.2.2 Clasificación relativa a la disponibilidad de oxígeno

#### 2.1.2.2.1 Selectores aeróbicos

De acuerdo con Bitton (2005), el principio básico de un selector aeróbico consta en crear un gradiente de concentración de sustrato (gradiente F/M) a través del biorreactor. Dicho gradiente se intensifica incorporando varios reactores pequeños

en serie o estableciendo un gradiente de sustrato dentro del mismo tanque de aireación principal.

#### 2.1.2.2.2 *Selector anóxico*

De acuerdo con Bitton (2005), la condición anóxica se genera por la ausencia de oxígeno y la presencia del nitrato como aceptor de electrones. El nitrato se obtiene mediante el reciclado de RAS y licor mezclado. La selección anóxica consiste en incorporar un reactor anóxico seguido de uno aeróbico. En el reactor anóxico las bacterias formadoras de flóculos prevalecen sobre las filamentosas, debido a que absorben el sustrato orgánico, usando el nitrato como aceptor de electrones. La posterior disminución de la concentración del sustrato orgánico ocurre en el reactor aeróbico.

#### 2.1.2.2.3 *Selector anaeróbico*

De acuerdo con Bitton (2005), la condición anaeróbica se genera por la ausencia de oxígeno y nitratos como aceptores de electrones. La selección anaeróbica consiste en lo capaces que resultan las bacterias formadoras de flóculos para almacenar polifosfatos en condiciones aeróbicas y utilizarlos como una reserva de energía para la absorción del sustrato orgánico soluble en condiciones anaeróbicas.

La tabla 2.2 presenta las ventajas y desventajas que existen entre los selectores aeróbicos, anóxicos y anaeróbicos.

**Tabla 2.2.** Comparación de las ventajas y desventajas entre los tipos de selector según sus requerimientos de oxígeno

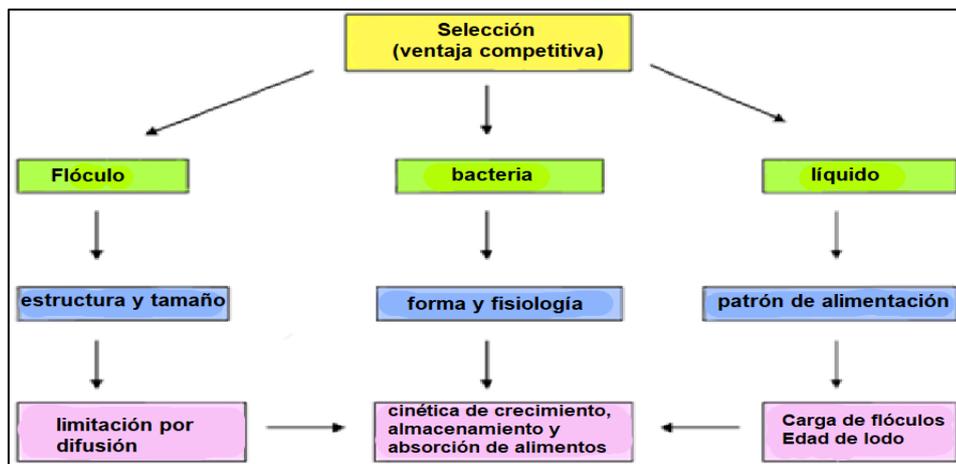
Tipo de Selector	Ventaja	Desventaja
Aeróbico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proceso simple</li> <li>- No necesita recirculaciones internas, además de la devolución de lodos.</li> <li>- Depende de la geometría del tanque, y no de la nitrificación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No reduce los requerimientos de oxígeno.</li> <li>- Requiere un sistema de aireación complejo para suministrar la demanda máxima de oxígeno en la zona inicial de alta relación F/M</li> </ul>
Anóxico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite ahorrar en los requerimientos de oxígeno.</li> <li>- Permite ahorros en el consumo de alcalinidad (aumenta la resistencia a la reducción del pH)</li> <li>- Reduce las posibilidades de desnitrificación en el tanque de sedimentación secundario y la aparición de lodos crecientes</li> <li>- La zona inicial de alta relación F/M se produce en la zona anóxica (la alta demanda de oxígeno es suministrada por nitrato, en lugar de oxígeno)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se puede utilizar en un proceso no nitrificante</li> <li>- Requiere una línea de recirculación interna adicional.</li> <li>- Requiere cuidado en el diseño y la operación, para reducir la introducción de oxígeno en la zona anóxica</li> <li>- Un diseño deficiente puede provocar la acumulación de lodos debido a los bajos niveles de OD</li> <li>- Los problemas operacionales pueden generar malos olores.</li> </ul>
Anaeróbico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseño simple</li> <li>- No necesita recirculaciones internas, además de la devolución de lodos.</li> <li>- Selector de funcionamiento más sencillo.</li> <li>- Puede ser utilizado para la eliminación del fósforo biológico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No reduce los requerimientos de oxígeno.</li> <li>- Puede que no sea compatible con altas edades de lodos.</li> <li>- Requiere cuidado en el diseño y la operación, para reducir la introducción de oxígeno en la zona anaeróbica</li> <li>- Un diseño deficiente puede provocar la acumulación de lodos debido a los bajos niveles de OD</li> </ul>

*Fuente: Partly adapted from WEF/ASCE (1992) (como se mencionó en Von Sperling, 2007a)*

### 2.1.3 SELECCIÓN BIOLÓGICA

Según Lever (2013), la selección bacteriana busca encontrar un equilibrio analizando el crecimiento de estos dos grupos de bacterias (filamentosas y formadoras de flóculos) relacionando “la tasa de crecimiento específica (competidor más rápido) y la capacidad de resistir las condiciones de inanición (supervivencia del más apto)”

En la figura 2.3 se esquematizan las causales que dan lugar a que se lleve a cabo la selección biológica:



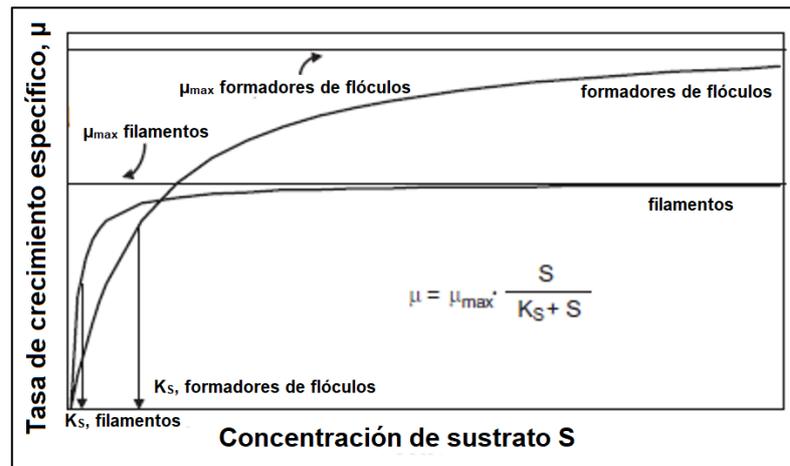
**Figura 2.3.** Selección biológica según la interacción de las diversas causales

*Fuente: (Lever et al, 2013)*

#### 2.1.3.1 Teoría de selección cinética

La teoría de selección cinética explica el crecimiento selectivo microbiano y está basada en la ecuación de Monod, por ello tiene como fundamento el sustrato limitante (fácilmente biodegradable o soluble), el cual limitará el crecimiento microbiano mientras es consumido por las bacterias formadoras de flóculos y las filamentosas según sus tasas de crecimiento específicos (Lever, 2013).

La figura 2.4 muestra la dependencia de la tasa de crecimiento de las bacterias formadoras de flóculos y las filamentosas con respecto a la concentración del sustrato y la afinidad hacia el sustrato que cada tipo de bacterias presentan.



**Figura 2.4.** Relación entre la tasa de crecimiento específico ( $\mu$ ) y concentración de sustrato ( $S$ ) para las bacterias filamentosas y formadoras de flóculos, de acuerdo con la ecuación de Monod  
*Fuente: (Jenkins y Wanner, 2014)*

Para entender mejor los principios de selección biológica (teoría cinética y teoría de limitación de difusión del sustrato), es preciso señalar que Romero (2013) explica que  $\mu$  tiende a ser máximo cuando  $S$  es mucho mayor que  $K_s$  (constante de saturación media), y el crecimiento está limitado por la biomasa. Por otro lado, si  $S$  es mucho menor que  $K_s$ , el sistema está limitado por el sustrato.

Las bacterias formadoras de flóculos tienen una alta tasa de crecimiento específico, cuentan con una matriz gelatinosa que facilita la incorporación de nuevos microorganismos y una forma esférica que facilita el almacenamiento y crecimiento de alimentos en tres dimensiones. Esto proporciona una ventaja competitiva cuando el sustrato soluble no está limitado (estrategas " $\mu$ "). A altas concentraciones ( $\mu_{\max}$ ), se espera que las bacterias floculentas ganen la competencia de sustrato, ya que tienen mayor tasa de crecimiento que las filamentosas (Amy et al., Lever, 2013; Von Sperling, 2007a).

Los microorganismos filamentosos (estrategas " $K$ ") tienen una tasa de crecimiento lento con una velocidad máxima de crecimiento ( $\mu_{\max}$ ) y una constante de afinidad ( $K_S$ ) más bajas que las bacterias que forman los flóculos (estrategas " $\mu$ "), por tal motivo, a bajas concentraciones (típicamente  $C_S < K_S$ ), las bacterias

filamentosas tienen una mayor tasa de crecimiento específica que las bacterias floculentas.

### **2.1.3.2 Teoría de limitación de difusión de sustrato y de oxígeno**

Las bacterias necesitan aprovechar el sustrato orgánico, nutrientes y oxígeno disuelto presentes en el líquido a granel del agua residual, para ello se requiere que exista una transferencia de masa para transportarlos a sus células, la cual se genera mediante una difusión a través del flóculo, dicha transferencia de masa se logra cuando existe una gradiente de sustrato y/o oxígeno disuelto favoreciendo a los organismos formadores de flóculos (Lever, 2013).

Por otro lado, los microorganismos filamentosos son organismos de morfología alargada y cilíndrica con una mayor relación de superficie a volumen (S/V), por ello son responsable de la estructura del flóculo. Esta condición, les permite que cuando exista una limitación (concentraciones bajas) de sustrato y/o oxígeno disuelto dentro del flóculo, puedan acceder al sustrato y el OD del licor mezcla extendiéndose linealmente fuera del flóculo, otorgándoles una ventaja competitiva de "recolector" sobre los organismos formadores de flóculos. (Amy et al., 2008, Lever, 2013; Von Sperling, 2007a). Por lo tanto, en condiciones de limitación de sustrato y OD, la población de filamentosos puede tener mayor velocidad de crecimiento que la de formadores de flóculos ya que teniendo acceso al sustrato del licor mezcla, en estas condiciones de limitación tienen una mayor tasa de crecimiento ( $\mu$ ) y mejor afinidad al sustrato (bajo  $C_s$ ) (Amy et al., 2008; Trillo y García., 1996)

Según Trillo y García (1996) es conveniente elevar la concentración del sustrato, para fomentar el desarrollo de los organismos formadores de flóculos. Básicamente, en este principio se basan los selectores, ya que si se trata de conseguir que la concentración de sustrato disponible sea alta (cosa que podría pensarse en obtener manteniendo una alta relación F/M en la totalidad del tanque, pero que en la práctica no es posible porque en estas condiciones no se puede obtener un efluente de buena calidad), la solución es crear una zona de contacto

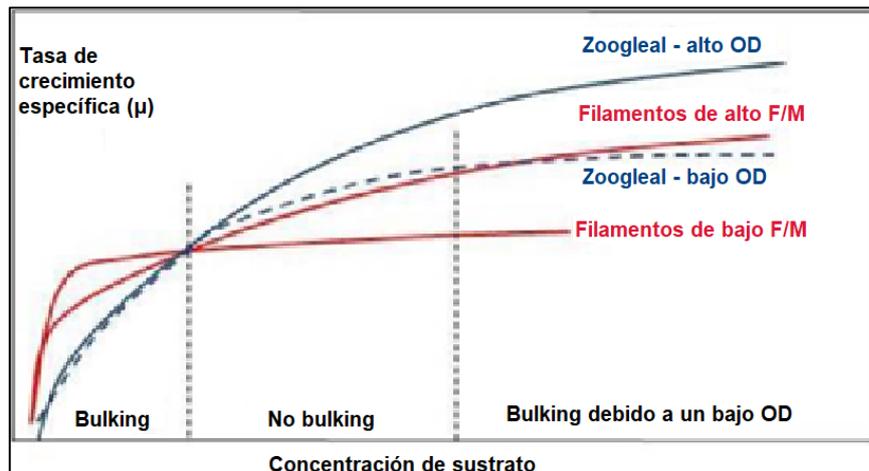
en la entrada al sistema, en donde haya una gran concentración de sustrato, la cual se traduce en una alta relación F/M.

Pero una alta relación F/M, implica una alta tasa de remoción de oxígeno, la cual requiere una mayor concentración de oxígeno disuelto para mantener las condiciones aerobias (Rodríguez y Molina, 2018). Según Lever (2013); la carencia de oxígeno al interior del flóculo no afecta a las bacterias filamentosas, porque estas pueden acceder al OD del líquido a granel gracias a su relación (S/V). Eikelboom (2000) recomienda una concentración de OD de 2mg/L como mínimo para asegurar un flóculo aerobio y así reducir la probabilidad de un aumento de volumen (bulking) (como se citó en Lever, 2013).

Existen 3 grupos generales de microorganismos (como se citó en Bitton, 2005; Lever, 2013):

1. **Microorganismo zooglear (formador de flóculo) de rápido crecimiento (alto F/M):** Favorecido por altas concentraciones de sustrato, pero es necesario que exista suficientes concentraciones de oxígeno disuelto, de caso contrario, su tasa de crecimiento ( $\mu$ ) se reduce (líneas punteadas de la gráfica)
2. **Organismos filamentosos de lento crecimiento con alta afinidad por el sustrato (bajo  $K_s$ ):** Favorecido por las bajas concentraciones de sustrato (por debajo de una concentración crítica S). Bajos F/M provocan un aumento de volumen de lodos por bacterias filamentosas tolerantes al hambre.
3. **Organismos filamentosos de rápido crecimiento (alto F/M) con una alta afinidad por el oxígeno disuelto (bajo  $K_{od}$ ):** Prevalece en condiciones de bajo oxígeno disuelto.

La figura 2.5 muestra la relación que guarda la concentración del OD con la tasa de crecimiento de los organismos formadores de flóculo, y la relación que existe entre la carga másica (F/M) y la tasa de crecimiento de los diferentes tipos de organismos filamentosos.



**Figura 2.5.** Curva de crecimiento y el OD  
*Fuente: (Lever, 2013)*

### 2.1.3.3 Teoría de selección de almacenamiento

Lever (2013) menciona que a diferencia del sustrato soluble (fácilmente biodegradable), el material particulado y coloidal (lentamente biodegradable) pueden incorporarse rápidamente al interior de los flocúlos en un corto lapso (10 a 15 minutos) durante la floculación. El sustrato soluble debería ser adsorbido rápidamente del líquido a granel por las bacterias formadoras de flocúlos. para evitar así. bajas concentraciones en el licor mixto, que según las teorías de selección cinética y de limitación de la difusión de sustrato anteriormente explicadas, causarían aumento de volumen de lodos o “bulking”.

Se pretende tener la menor cantidad de sustrato soluble en el líquido a granel para controlar en aumento de volumen o “bulking”. Por tal razón, se debe buscar que la operación del sistema de aireación sea con una carga de flocúlo ( $C_s/X$ ) inicial muy alta para que de esta manera se genere un entorno de adsorción de sustrato alto que favorezca el crecimiento de las bacterias formadoras de flocúlos; bajo estas condiciones “la absorción del sustrato soluble es de dos a tres veces más rápida que en condiciones normales de aireación”. Se logra tal medida en sistemas con compartimento de flujo pistón o con selectores biológicos (Lever, 2013).

De acuerdo con lo señalado por Lever (2013), durante las condiciones de inanición o hambruna que se presentan en las zonas posteriores de aireación aguas abajo, luego de haber agotado los alimentos en el licor mezclado a granel; los

microorganismos formadores de flóculos pueden almacenar productos energéticos (como la materia carbonosa adsorbida y los fosfatos principalmente) para sobrevivir. Sin embargo, si la DQO y/o DBO fácilmente biodegradable (soluble) no es adsorbida eficientemente por los microorganismos formadores de flóculos, entonces el crecimiento de los organismos filamentosos debido a su extensión lineal al exterior del flóculo para acceder al sustrato soluble en el licor de mezcla a granel y la alta afinidad de sustrato les brindarán una ventaja competitiva de selección según la teoría cinética y de difusión anteriormente desarrolladas.

Jenkins (2004) refiere que, para evitar el bulking, por lo menos el 80% de la DQO soluble debe ser rápidamente adsorbida por las bacterias formadoras de flóculos, para que en el licor mezclado a granel esté presente una concentración de 50 a 70 mg/L (como se citó en Lever, 2013).

## **2.1.4 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS**

### **2.1.4.1 Sistema convencional de lodos activados**

De acuerdo con A.C. van Haandel y J.G.M. van der Lubbe (2012) Estos sistemas tienen un régimen de flujo continuo y agitado y están conformados por un tanque de aireación, en donde el lodo se encuentra en suspensión; y también cuentan con un sedimentador secundario donde se separa el lodo activado. Así mismo, los sistemas convencionales pueden dividirse, según el régimen hidráulico en los tanques de aireación, en sistemas de mezcla completa o de flujo pistón, para la presente investigación se evaluará el sistema de mezcla completa.

#### *2.1.4.1.1 Carga Másica (F/M)*

Von Sperling (2007a) lo establece como la carga de alimento o sustrato (DBO<sub>5</sub>) suministrado por día por unidad de biomasa en el reactor (se representa mediante MLVSS - sólidos suspendidos volátiles de licor mezclado), y expresados como kgDBO/kgMLVSS-d. La relación F/M se determina matemáticamente de la siguiente manera:

$$F/M = \left( \frac{ALIMENTO}{MICROORGANISMO} \right) = \frac{DBO\ 5_{agregada/día}}{SSV_{reactor}} = \left( \frac{Q * S_0}{V * X} \right) = \left( \frac{S_0}{\theta * X} \right)$$

Donde:

F/M= Relación de alimento / microorganismos, gDBO por día/ g SSVLM, (d-1)

Q= Caudal de las aguas residuales crudas, (m<sup>3</sup>/d)

S<sub>0</sub>= DBO<sub>5</sub> del agua residual cruda, (mg/L)

V= Volumen del líquido en el tanque de aireación, (m<sup>3</sup>)

X= Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor, SSVLM (mg/L)

θ= Tiempo de retención hidráulico, (d)

#### 2.1.4.1.2 Mezcla completa

La aireación es uniforme y la mezcla es inmediata y completa, la carga orgánica y la demanda de oxígeno disuelto son uniformes en toda cualquier parte a lo largo del tanque, por tal motivo no existe un macro gradiente de sustrato ni de OD y por la teoría basada en la difusión, se favorecen los microorganismos filamentosos (A.C. van Haandel y J.G.M. van der Lubbe, 2012)

Se presentan las ventajas y desventajas según el tipo de flujo del tanque de aireación en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Ventajas y desventajas de la configuración de un reactor de lodos activados según el régimen hidráulico

Régimen hidráulico	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Mezcla completa</b>	<p>La demanda de oxígeno en el reactor es uniforme, facilitando así, el control de la concentración de oxígeno y permitiendo ubicar homogéneamente los aireadores.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resiste sobrecargas hidráulicas y de carga orgánica, ya que el contaminante se diluye instantáneamente, al distribuirse por todo el volumen del reactor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es susceptible al crecimiento de organismos filamentosos.</li> </ul>
<b>Flujo pistón</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Existe un gradiente de concentración de sustrato a lo largo del reactor y es resistente a cortocircuitos del afluente al efluente.</li> <li>- Produce un lodo con mejores características de sedimentabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es susceptible a cargas de choque</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Adaptado de A.C. van Haandel y J.G.M. van der Lubbe (2012)

## **2.1.5 CONTROL DE PROCESOS EN LODOS ACTIVADOS**

### **2.1.5.1 Control de oxígeno disuelto**

La cantidad de oxígeno en el tanque de aireación no debe limitar el crecimiento microbiano, porque si lo hace, el crecimiento de microorganismos filamentosos se ve favorecido, originando problemas de sedimentación. Se recomienda mantener una concentración de oxígeno disuelto en el tanque de aireación entre 1.5 y 4 mg/L.

### **2.1.5.2 Control de sólidos (MLSS)**

Se busca obtener un valor constante de la concentración de sólidos suspendidos en el licor de mezcla (MLSS). Este objetivo se puede lograr mediante la purga de lodos y la recirculación de lodos (Von Sperling, 2007a)

### **2.1.5.3 Recirculación de lodos ( $Q_r$ )**

Lohmann y Schlegel (1981) indican que, si se mantiene  $Q_r$  constante como estrategia de control, se debe recircular un gran flujo para amortiguar las variaciones de caudal y de concentración de sólidos (MLSS) que ingresan al sedimentador (como se citó en Von Sperling, 2007a).

Otra manera de controlar la recirculación es mediante la calidad de la sedimentación por medio de la evaluación del IVL, la cual es variable. Valores elevados de IVL necesitan una mayor recirculación, ya que indica una pobre sedimentabilidad del lodo (Von Sperling, 2007a).

### **2.1.5.4 Purga del exceso de flujo de lodos ( $Q_{ex}$ )**

Según Metcalf & Eddy (2013), los métodos clásicos, tradicionalmente utilizados para el control de sólidos en sistemas de lodos activados, son:

- Control de MLSS constante
- Control de la carga de lodos (relación F/M constante)
- Control de la edad del lodo (constante  $\theta_c$ )

### 2.1.6 CONTROL DE LA CARGA MÁSCICA (F/M)

Si se utiliza como parámetro de control la carga másica, se tiene que ajustar la concentración de sólidos, manipulando el caudal de purga ( $Q_{ex}$ ) o el caudal de recirculación ( $Q_r$ ), de acuerdo con concentración de sustrato del afluente intentando mantener constante la relación F/M (Von Sperling, 2007a)

Si se adopta el método de control basado en la relación F/M, el caudal de purga desde la línea de recirculación se puede determinar empleando la siguiente expresión (Metcalf & Eddy, 2013):

$$P_x = Q_w \cdot X_r$$

Donde:

$P_x$ = Lodo activado purgado, kg/d

$Q_w$ = Caudal de purga de lodo, m<sup>3</sup>/d

$X_r$ = Concentración de sólidos en la línea de recirculación kg/m<sup>3</sup>

### 2.1.7 SEDIMENTACIÓN

#### 2.1.7.1 Índice volumétrico de lodos (IVL o SVI<sup>1</sup>)

Viene a ser el volumen en mililitros ocupado por 1g de sólidos en suspensión de licor mezclado ( $X_{SST}$ ), después de sedimentar 30 minutos en una probeta graduada de 1000 ml<sup>1</sup> (Ramalho, 2009).

Matemáticamente, el IVL se define mediante la siguiente ecuación:

$$IVL = \frac{V_{30}}{X_{SST}} \times 10^3 = \frac{H_{30}}{H_0 \cdot X_{SST}} \times 10^6$$

Dónde:

IVL: Índice volumétrico de lodo (ml/g)

$V_{30}$ : Volumen ocupado, después de 30 minutos de sedimentación (mL/L)

$X_{SST}$ : Concentración de sólidos suspendidos totales (mg/L).

$H_{30}$  = altura de la interfaz después de 30 minutos (m)

---

<sup>1</sup> SVI: Son las siglas en inglés del IVL, "Sludge Volumetric Index)

$H_0$  = altura de la interfaz en el momento 0 (altura del nivel del agua en el cilindro de sedimentación) (m)

$10^6$  = conversión de mg a g, y de mL a L

### 2.1.7.2 Interpretación del IVL

El IVL es el parámetro que indica la calidad del proceso de sedimentación del lodo. A mayor IVL, la calidad de sedimentación empeora (Orozco, 2014).

En la tabla 2.4 se muestra el rango de valores del índice volumétrico de lodos que nos indica la calidad de la sedimentación.

**Tabla 2.4.** Rango de valores del índice volumétrico de lodos, según la calidad de sedimentación

Calidad de sedimentación	SVI	DSVI	SSVI	SSVI <sub>3,5</sub>
Excelente	0-50	0-45	0-50	0-40
Buena	50-100	45-95	50-80	40-80
Justa	100-200	95-165	80-140	80-100
Pobre	200-300	165-215	140-200	100-120
Muy pobre	>300	>215	>200	>120

Fuente: (Von Sperling, 2007b)

SVI: Índice volumétrico de lodos, sin agitar

DSVI: Índice volumétrico de lodos diluidos

SSVI: Índice volumétrico de lodos agitados

SSVI<sub>3,5</sub>: Índice volumétrico de lodos agitados con una concentración estándar de 3.5 g/L

### 2.1.7.3 Problemas en la interpretación del IVL

El ensayo de IVL presenta dos limitaciones importantes para interpretar las características de la sedimentación, que se detallan a continuación:

- a) El ensayo de IVL tradicional depende de la concentración inicial de sólidos (denominador en la ecuación). Si se tiene dos muestras de lodo muy concentrados que no asientan (IVL máximo), y cada muestra con una concentración diferente a la otra; el volumen del lodo asentado (numerador de la ecuación) para ambas muestras será de 1000ml, el cual es el

volumen de la probeta de ensayo.; dando así un volumen de sedimentación erróneo, Por lo tanto, el valor del IVL dependerá únicamente de la concentración inicial de sólidos suspendidos. Mientras mayor sea dicha concentración, será menor el valor del IVL; llevándonos a concluir de manera incorrecta que existe una buena sedimentación aparente (valores bajos de IVL). (Orozco, 2014; Von Sperling, 2007b).

- b) Otra limitación del IVL radica en que este índice mide un único punto de la curva de sedimentación, después de 30 minutos. (Ramalho, 2009). No nos dan indicación de la velocidad de sedimentación. Por lo tanto, dos muestras con características de sedimentación completamente diferentes podrían tener el mismo IVL (Von Sperling,2007b).

## **2.1.8 TIPOS DE PROBLEMAS DE SEDIMENTACIÓN**

Los principales problemas de sedimentación se resumen como se expondrá a continuación (Jenkins et al., 2006, Jenkins y Wanner, 2014):

### **2.1.8.1 Pobre microestructura del flóculo.**

#### *2.1.8.1.1 Crecimiento disperso*

Conformado por microorganismos pequeños ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ) que se encuentran dispersados en el líquido a granel. Provocan un efluente turbio (escapan del sedimentador) y una dilución de la concentración del lodo recirculado, ya que no pueden sedimentar en el clarificador ni en la probeta durante el ensayo de IVL, debido a su baja velocidad de sedimentación, tampoco producen un asentamiento por zonas. Una causa muy común de este tipo de flóculo es una carga orgánica muy alta (alto F/M)

#### *2.1.8.1.2 Pin flocc o Pinpoint Flocc:*

El lodo activado contiene partículas inestables más grandes que el de crecimiento disperso (50–100  $\mu\text{m}$  aprox.) y son de forma esférica y compacta. El efluente del sedimentador secundario es turbio y difuminado, y tiene un alto valor de SST y el IVL del reactor es muy bajo ( $< 75 \text{ ml/g}$ ). “Estos micro flóculos resultan de la desintegración de flóculos firmes y sólidos”. La ausencia de microorganismos

filamentosos y una cantidad insuficiente de material exocelular generan este tipo de flóculos.

#### 2.1.8.1.3 *Abultamiento viscoso (Bulking viscoso o no filamentoso)*

Existe una gran cantidad de biopolímeros extracelulares en el lodo activado que le otorgan una consistencia gelatinosa y viscosa al lodo, “Debido a que estos polímeros son hidrófilos, el lodo activado se vuelve altamente retenedor del agua (incluso viscoso) y tiene bajas velocidades de sedimentación y compactación”.

### **2.1.8.2 Pobre macroestructura del flóculo**

#### 2.1.8.2.1 *Abultamiento filamentoso (bulking filamentoso)*

Es causada por una excesiva cantidad de microorganismos filamentosos que perjudican la sedimentación y compactación del lodo ocasiona el abultamiento filamentoso. Pueden hacerlo de dos maneras:

- Los flóculos llegan a tener una estructura abierta y difusa que permiten que haya espacios dentro de ellos para retener agua, esto se debe a que los microorganismos filamentosos pueden crecer dentro del floc.
- Estos filamentos que crecen dentro del flóculo, en un número bajo pueden formar la columna vertebral de flóculos firmes, pero en grandes cantidades pueden perjudicar la compactación de flóculos individuales.

Según J. Romero Rojas (2013), los lodos filamentosos se manifiestan con un índice volumétrico de lodo (IVL) alto, generalmente con valores mayores a 150 mg/L.”.

#### 2.1.8.2.2 *Espuma o “Foaming”*

Es un proceso de flotación causado por un excesivo crecimiento de microorganismos filamentosos que producen materiales extracelulares con propiedades tensioactivas (biosurfactantes) y tienen paredes celulares hidrófobas que les permiten elevar el lodo a la superficie uniéndose a las burbujas de aire.

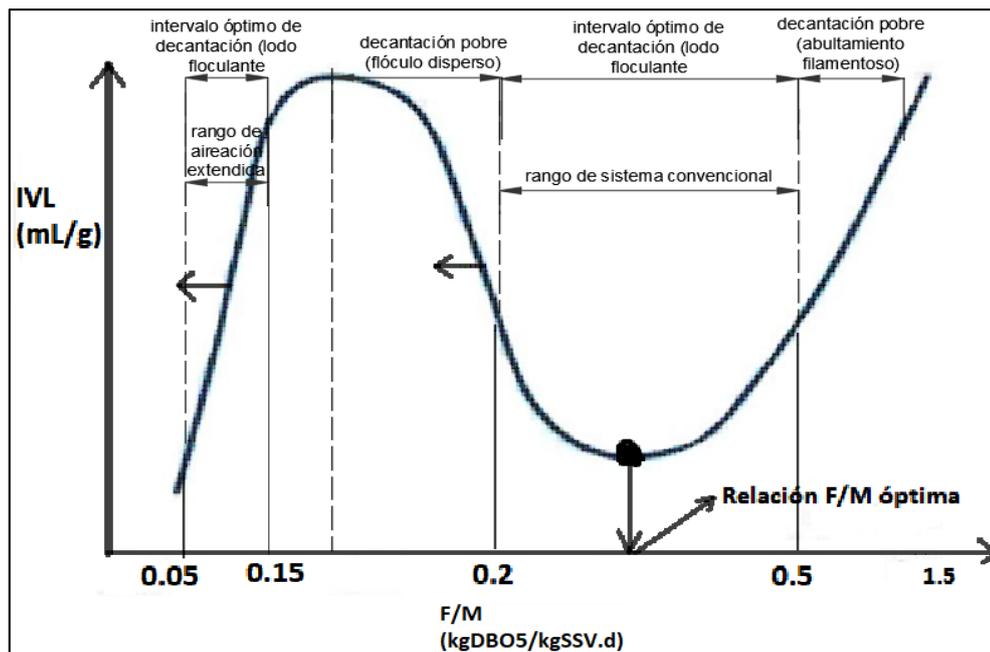
### 2.1.8.2.3 Lodo ascendente

El lodo sedimentado flota debido a que se adhiere a burbujas de gas  $N_2$  (poco soluble) generadas en la desnitrificación, que tiene lugar debido a la alta concentración de biomasa del lodo compactado y al agotamiento rápido del OD que esta implica, originando condiciones anóxicas que favorecen la desnitrificación.

Jenkins (2006) menciona que, este fenómeno puede ser observado durante el ensayo de IVL y se desarrolla de la siguiente manera: “El lodo activado se asienta rápidamente y se forma una capa inferior bastante compacta de lodo sedimentado y un sobrenadante transparente. Después de un cierto período de tiempo, una parte o todos los lodos sedimentados y engrosados comienzan a flotar y ascender a la superficie del agua. (Si esto ocurre dentro de los 30 minutos, puede interferir con la medición de SVI)”.

### 2.1.8.3 Relación del IVL con la carga másica (F/M)

La figura 2.6 muestra la dependencia que existe entre la calidad del lodo y el valor de la carga másica (F/M), la cual está condicionada directamente con el tipo de tecnología de lodos activados que se esté operando.



**Figura 2.6.** Relación del IVL con la carga másica (F/M)

Fuente: (Lever, 2013; Ramalho, 2009)

## 2.1.9 CAUSAS Y CONTROL DEL BULKING

### 2.1.9.1 Causas del bulking

Trillo y García. (1996) y A.C. van Haandel y J.G.M. van der Lubbe (2012) establecen que las principales causas operacionales de ocurrencia del bulking filamentoso son las siguientes:

- Baja concentración de sustrato (valores bajos de carga másica, F/M)
- Baja concentración de oxígeno disuelto en el tanque de aireación.
- Desnitrificación incompleta (bulking aeróbico – anóxico)
- Condiciones de septicidad en las aguas residuales.
- Deficiencia de nutrientes
- Valores bajos de PH (<6.5)
- Alto contenido de sulfuros y sacáridos

### 2.1.9.2 Control del bulking

Los métodos específicos buscan erradicar la causa de la sobrepoblación de los filamentos, por tal motivo suele ser el método más deseable; mientras que los métodos no específicos buscan darle solución al problema en forma general, independientes del tipo de filamento. (Valter Tandoi, David Jenkins y Jiri Wanner, 2006)

#### 2.1.9.2.1 *Métodos no específicos*

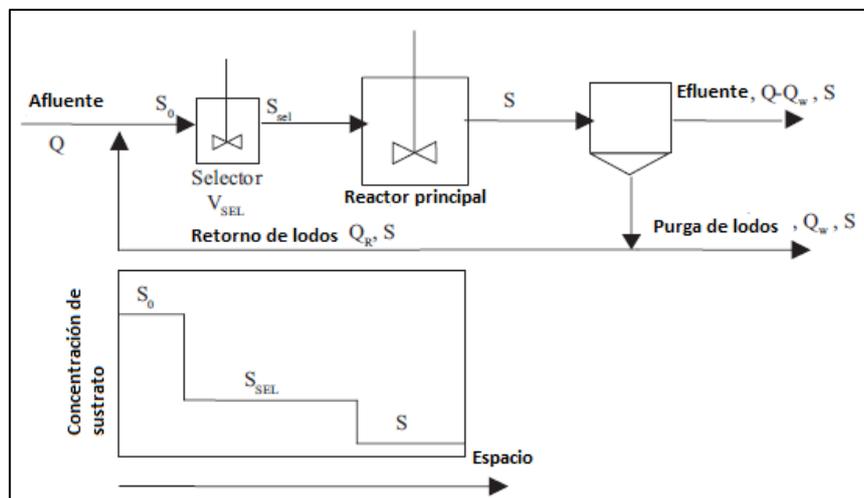
- Modificación del caudal de recirculación y de los puntos de entrada del agua residual en el tanque de aireación
- Adición de agentes oxidantes (cloro, ozono, peróxido de hidrógeno)
- Adición de agentes de ponderación y floculación (sales de hierro y aluminio, cal, polímeros y talco).

#### 2.1.9.2.2 *Métodos específicos*

En el proceso de lodos activados de bajo F/M, una forma de evitar el bulking sin afectar el rendimiento de la eliminación del sustrato, es crear un gradiente de

concentración de sustrato en el sistema. Este objetivo se puede lograr modificando la configuración del proceso de lodos activados.

Rossetti et al. (2017) explica que el sistema de lodos activados de mezcla completa con una zona de contacto en la entrada del reactor busca eliminar la mayor parte del sustrato al inicio de la operación, tal como se esquematizan en la figura 2.7. Cuando la concentración es alta (alto F/M) para favorecer cinéticamente a los microorganismos formadores de flóculos y tener una buena sedimentación (bajos valores de IVL); en la zona baja se elimina una fracción baja de sustrato, creando un gradiente de sustrato.



**Figura 2.7.** Esquema del gradiente de sustrato en un sistema de lodos activados de mezcla completa mediante un selector en la cabecera  
Fuente: (Rossetti, Tandoi y Wanner, 2017)

La tabla 2.5 resume el estado actual de experiencias y conocimiento de los diferentes factores que se han indicado como causas del bulking filamentoso.

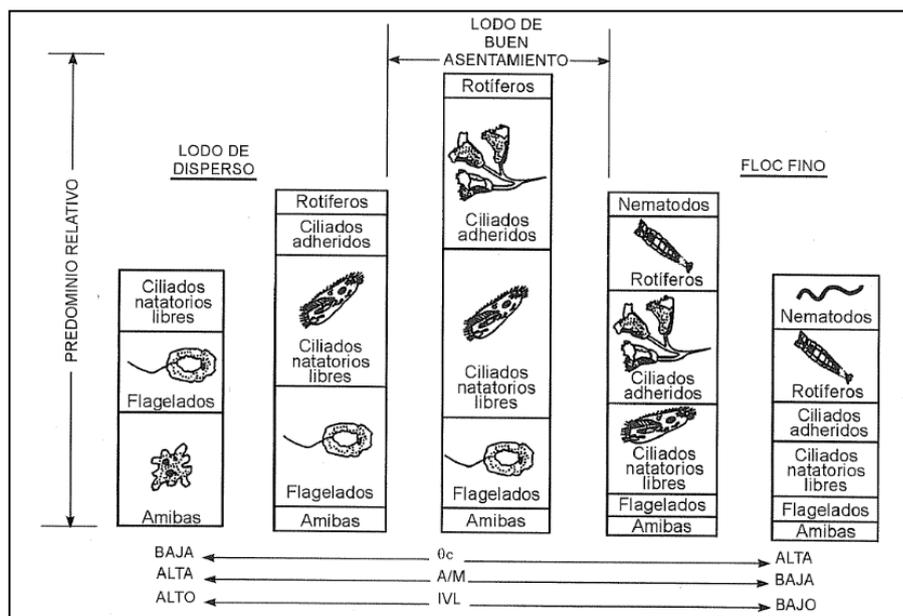
**Tabla 2.5.** Resumen de las causas del bulking filamentoso, filamentos relacionados y alternativas de solución

Causa del bulking filamentoso	Filamentos más comunes	Método de solución sugerido
Baja carga másica (F/M)	M. parvicella, Nocardia spp, H hydrossis, tipos 021N, 0041,0675, 0092, 0581, 0961, 0914, 1851 y 0803	Usar plantas con un gradiente de sustrato (SBR, sistemas de flujo pistón o selectores)
Bajo oxígeno disuelto	Tipo 1701, S. Natans, H hydrossis	Incrementar el nivel de oxígeno disuelto en la planta.
Deficiencia de nutriente	Thiothrix spp, Type 021N, 0041 (en residuos industriales solamente), N. limícola II y 0675	Adición del nutriente en carencia
Ácidos grasos en aguas residuales, temperaturas bajas	M. parvicella	Uso de selectores anóxicos o anaeróbicos
pH bajo (pH<6.0)	Hongos	Utilizar fungicidas

Fuente: (Rosseti, Tandoi y Wanner, 2017; Romero, 2013)

### 2.1.10 ECOSISTEMA MICROBIANO

La figura 2.8 muestra que la mejor calidad del lodo se presenta cuando hay un equilibrio ecológico y una simbiosis correcta entre los rotíferos y flagelados, así como de los ciliados libre y adheridos.



**Figura 2.8.** Ecología y cantidad microbiana vs calidad del lodo

Fuente: (Romero et al., 2013)

## **2.2 MARCO LEGAL**

A continuación, se menciona la normativa vigente en el Estado Peruano que será tomado en cuenta para la evaluación de las respectivas eficiencias obtenidas de los sistemas de lodos activados.

- Norma de plantas de tratamiento de aguas residuales: RNE-OS.090.
- Límites máximos permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales: D.S. N°003-2010-MINAM

### 3. CAPITULO III

#### METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

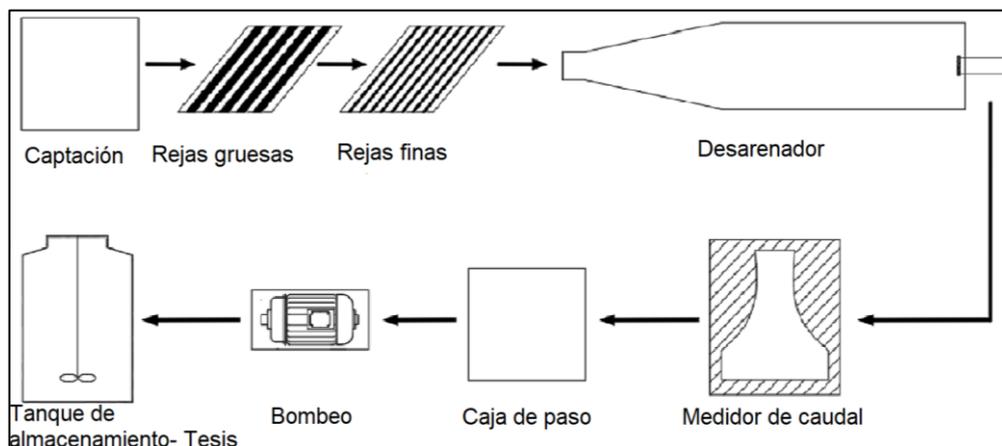
##### 3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se realizó en la zona de investigación N° 1 del Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR-FIA-UNI), ubicado en el sector "T" de la zona norte del campus universitario, de la Universidad Nacional de Ingeniería.

##### 3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

###### 3.2.1 Desagüe tratado

El afluente que se utilizó fue el proveniente del pretratamiento de CITRAR-FIA-UNI. El caudal afluente fue impulsado por una bomba desde la caja de paso del pretratamiento hacia el tanque de almacenamiento. En la figura 3.1 se muestran las unidades existentes del pretratamiento de la planta de CITRAR-FIA-UNI.



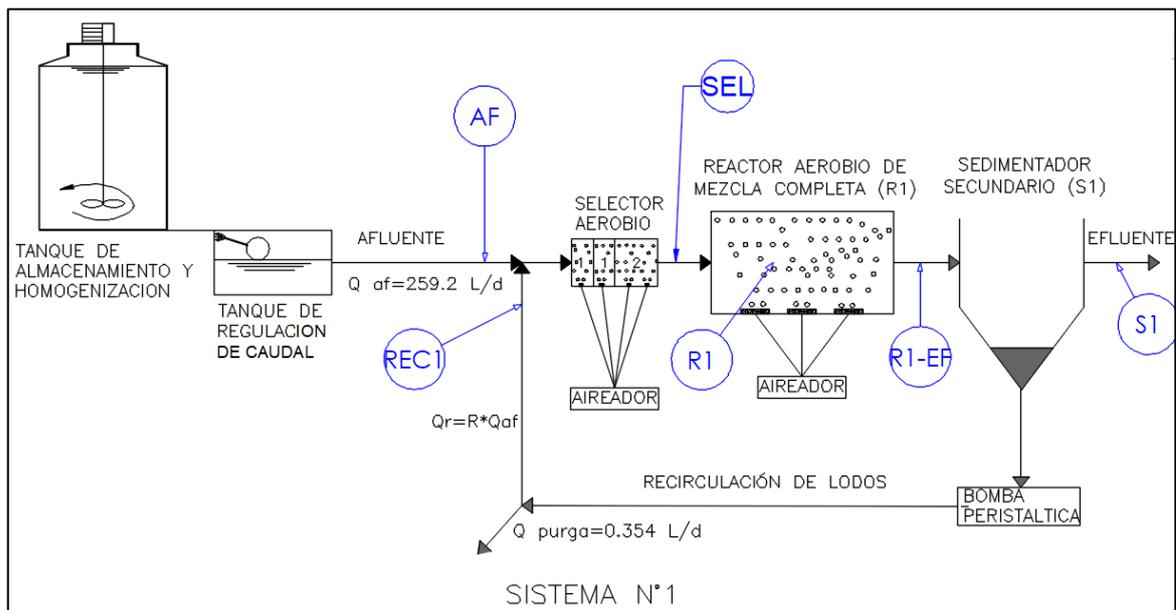
**Figura 3.1.** Diagrama de flujo del pretratamiento previo del agua residual en las unidades de CITRAR-FIA-UNI

*Fuente: elaboración propia*

### 3.2.2 Puntos de monitoreo

La investigación estuvo conformada por dos sistemas de lodos activados:

- a. El sistema N°1 estuvo conformado por un selector aerobio seguido de un tanque de aireación de lodos activados de mezcla completa convencional (R1). También contó con un sedimentador secundario (S1) y una línea de recirculación de lodos (REC 1), el cual retorna los lodos del sedimentador hacia el selector mediante una bomba peristáltica de dos cabezales. En la figura 3.2 se indican los puntos de monitoreo del sistema N°1.



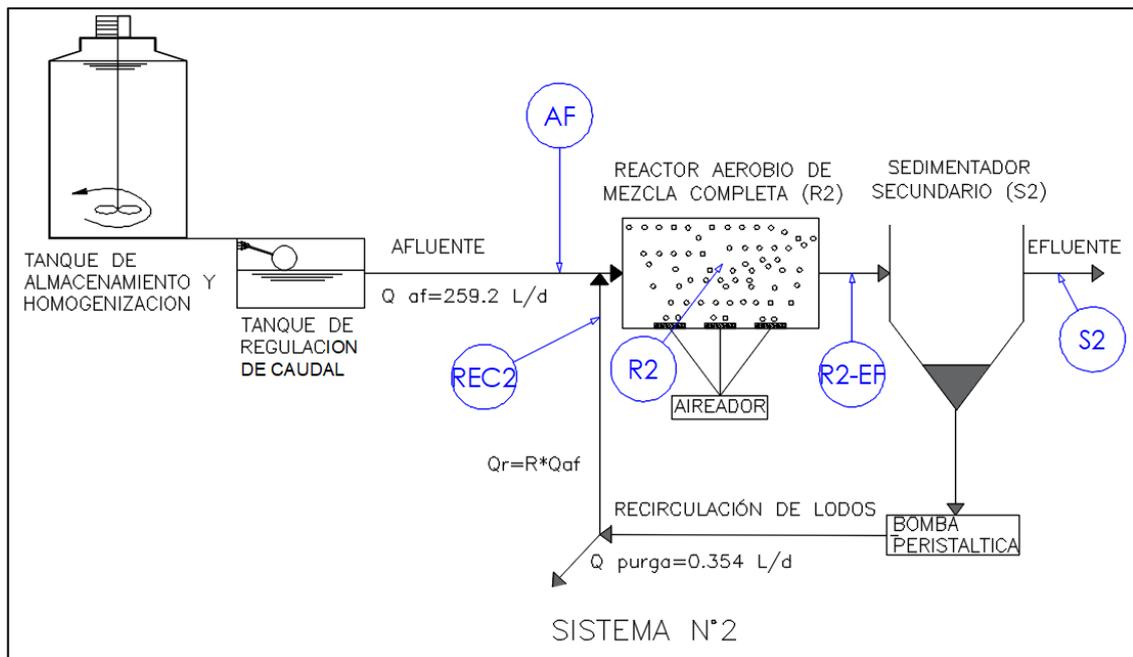
**Figura 3.2.** Esquema general del sistema N°1 con sus puntos de monitoreo

*Fuente: Elaboración propia*

#### Legenda de los puntos de monitoreo de la figura 3.2 :

- AF: Afluente de los sistemas N°1 y N°2
- SEL: Afluente del tanque selector
- R1: Interior del reactor de lodos activados N°1
- R1-EF: Efluente del reactor de lodos activados R1
- S1: Efluente del sedimentador N°1
- REC1: Línea de recirculación de lodos del sedimentador S1

- b. El sistema N°2 estuvo conformado de la misma forma que el sistema N°1, con la excepción de que no contó con un selector, y la línea de recirculación (REC 2) retornó los lodos del sedimentador (S2) directamente hacia el tanque de aireación (R2). En la figura 3.3 se indican los puntos de monitoreo del sistema N°2.



**Figura 3.3.** Esquema general del sistema N°2

*Fuente: Elaboración propia*

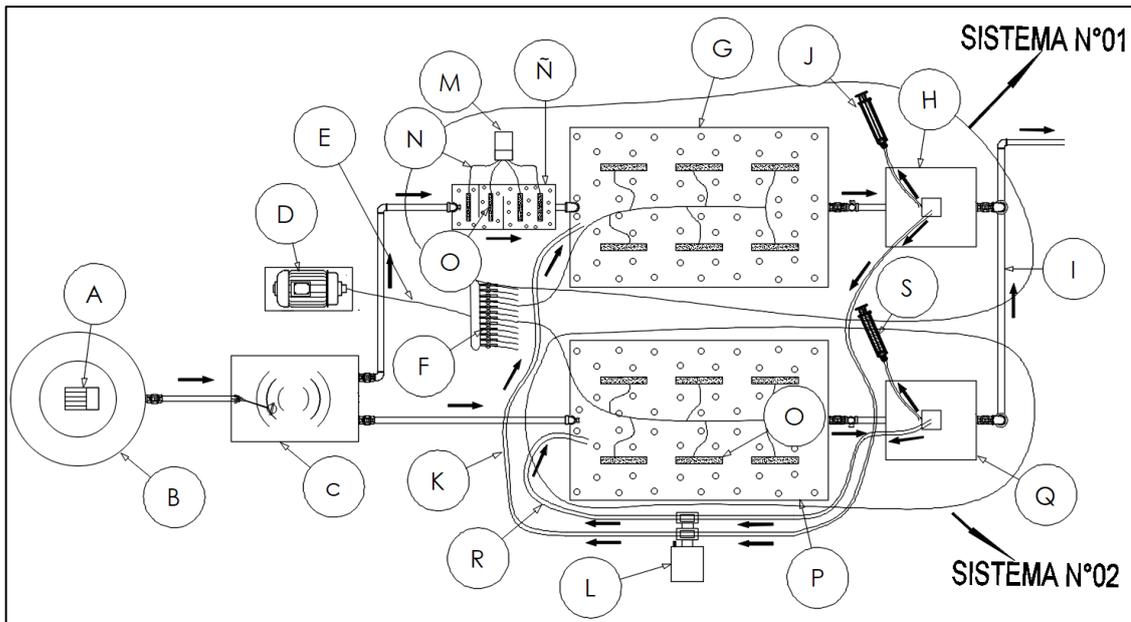
**Leyenda de los puntos de monitoreo de la figura 3.3:**

- AF: Afluyente de los sistemas N°1 y N°2
- R2: Interior del reactor de lodos activados N°2
- R2-EF: Efluente del reactor de lodos activados R2
- S2: Efluente del sedimentador N°2
- REC2: Línea de recirculación de lodos del sedimentador S2

Ambos sistemas operaron bajo las mismas condiciones, tales como: caudal de recirculación continua, tasa de aireación, alimentación continua del afluyente.

### 3.3 COMPONENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La figura 3.4 esquematiza los sistemas N°1 y N°2 de acuerdo con una vista en planta y muestra los componentes utilizados en la investigación.



**Figura 3.4.** Vista en planta del módulo de investigación

*Fuente: Elaboración propia*

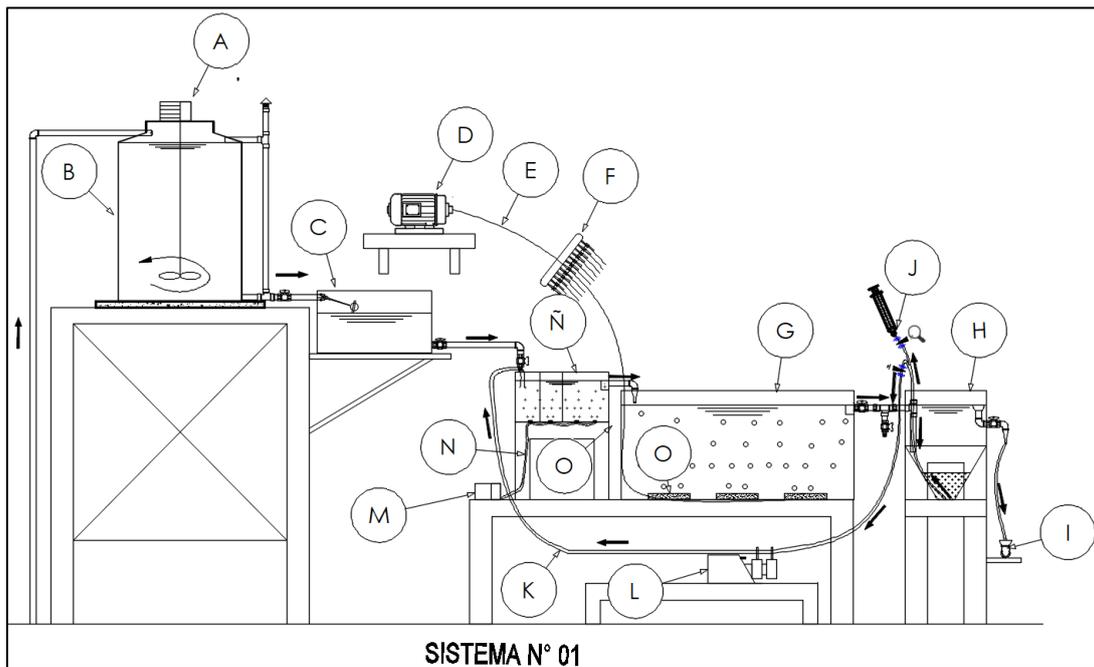
#### Leyenda de la figura 3.4:

- A: Motor reductor y hélice de homogenización
- B: Tanque de almacenamiento de 600 L
- C: Tanque de regulación de caudal
- D: Aireador de los reactores principales (compresora de aire)
- E: Línea de aireación a los reactores principales
- F: Manifold de válvulas reguladoras de aire
- G: Reactor de lodos activados (R1)
- H: Sedimentador secundario (S1)
- I: Línea de desagüe de los efluentes
- J: Línea de purga del sistema N°1
- K: Línea de recirculación del sistema N°1
- L: Bomba peristáltica con doble cabezal
- M: Aireador del selector (aireador de pecera)

- N: Línea de aireación al selector
- Ñ: Selector biológico con compartimentos
- O: Difusor de piedras porosas de burbuja fina
- P: Reactor de lodos activados (R2)
- Q: Sedimentador secundario (S2)
- R: Línea de recirculación del sistema N°2
- S: Línea de purga del sistema N°2

### 3.3.1 Componentes del Sistema N°1

La figura 3.5 esquematiza el sistema N°1 de acuerdo con una vista en perfil y muestra los componentes utilizados.



**Figura 3.5.** Vista lateral del sistema N°1 del módulo de investigación  
Fuente: *Elaboración propia*

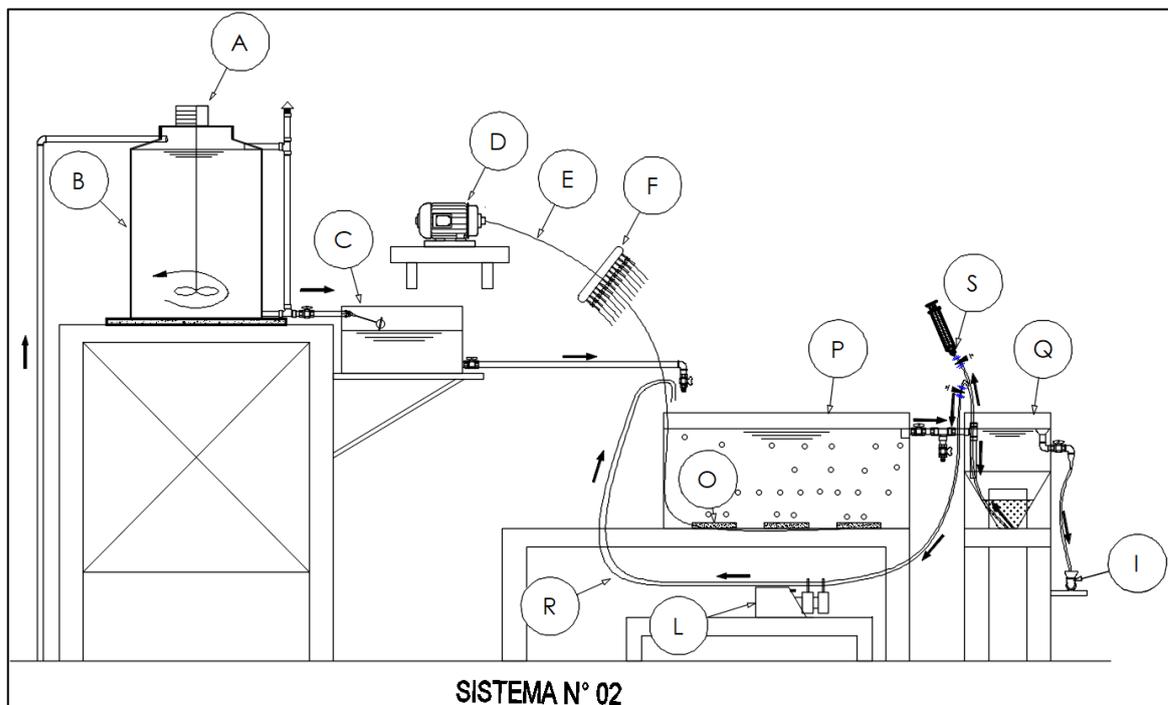
#### Leyenda de la figura 3.5:

- A: Motor reductor y hélice de homogenización
- B: Tanque de almacenamiento de 600 L
- C: Tanque de regulación de caudal
- D: Aireador de los reactores principales (compresora de aire)

- E: Línea de aireación a los reactores principales
- F: Manifold de válvulas reguladoras de aire
- G: Reactor de lodos activados (R1)
- H: Sedimentador secundario (S1)
- I: Línea de desagüe de los efluentes
- J: Línea de purga del sistema N°1
- K: Línea de recirculación del sistema N°1
- L: Bomba peristáltica con doble cabezal
- M: Aireador del selector (aireador de pecera)
- N: Línea de aireación al selector
- Ñ: Selector biológico con compartimentos
- O: Difusor de piedras porosas de burbuja fina

### 3.3.2 Componentes del sistema N°2

La figura 3.6 esquematiza el sistema N°1 de acuerdo con una vista en perfil y muestra los componentes utilizados.



**Figura 3.6** Vista lateral del sistema N°2 del módulo de investigación

*Fuente: Elaboración propia*

**Leyenda de la figura 3.6:**

- A: Motor reductor y hélice de homogenización
- B: Tanque de almacenamiento de 600 L
- C: Tanque de regulación de caudal
- D: Aireador de los reactores principales (compresora de aire)
- E: Línea de aireación a los reactores principales
- F: Manifold de válvulas reguladoras de aire
- I: Línea de desagüe de los efluentes
- L: Bomba peristáltica con doble cabezal
- O: Difusor de piedras porosas de burbuja fina
- P: Reactor de lodos activados (R2)
- Q: Sedimentador secundario (S2)
- R: Línea de recirculación del sistema N°2
- S: Línea de purga del sistema N°2

**3.3.3 Descripción de los componentes de la investigación****3.3.3.1 Tanque de almacenamiento y homogenización**

El tanque de almacenamiento era de polietileno de marca ETERNIT y tenía la capacidad de 600 L para abastecer por gravedad al sistema. En la parte superior del tanque se instaló un motor reductor que hacía girar en su eje a una paleta en el fondo del tanque a 30 RPM durante 15 minutos y descansaba por 30 minutos. Este funcionamiento alternado se realizó de manera diaria y durante 24 horas, fue posible porque el motor se encontraba conectado a un timer.

**3.3.3.2 Tanque regulador de caudal**

Los reactores R1 y R2 trabajaron a lo largo de toda la investigación con un caudal afluente constante de 259.2 L/d, cada uno respectivamente. Estos caudales se regularon mediante el uso de un tanque homogeneizador, el cual se construyó con una galonera de plástico de 40 L, en cuya entrada se instaló un tubo de abasto de ½" de diámetro, para facilitar su movilidad. El objetivo de este tanque fue mantener una carga hidráulica disponible constante, esto se logró instalando una válvula

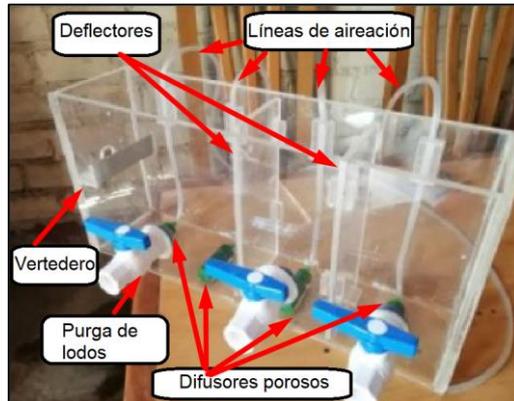
flotadora de plástico de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro; de esta forma se consiguió mantener caudales de ingreso constantes a cada sistema y de manera independiente. No obstante, se tuvo que calibrar diariamente las válvulas de regulación y purgar y limpiar la galonera para evitar que los sedimentos se retengan en las válvulas y reduzcan significativamente los caudales.

### **3.3.3.3 Reactores de lodos activados**

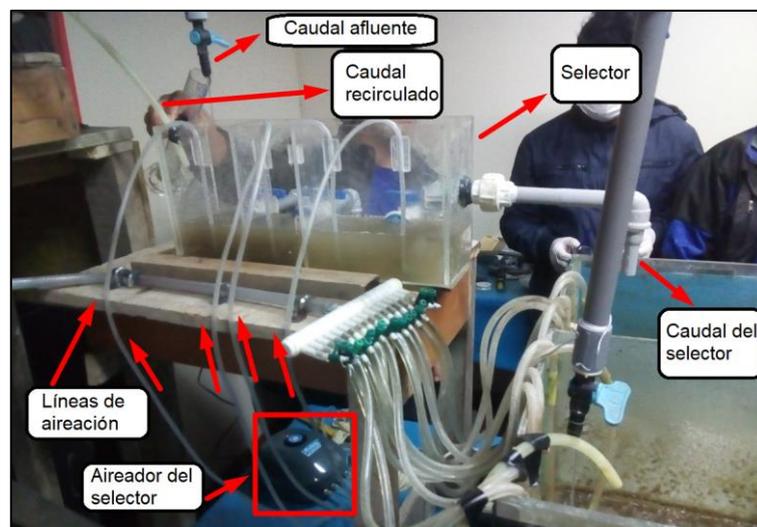
Los reactores biológicos principales R1 y R2 se construyeron con vidrio de 6mm de espesor, para mayor seguridad se reforzaron las juntas con perfiles de aluminio. Ambos reactores prismáticos y rectangulares fueron separados mediante una plancha central de vidrio de 4mm de espesor. Las dimensiones de cada reactor fueron de 0.3m de ancho, 0.7m de largo y 0.3 m de altura. El volumen de cada reactor fue de 0.5184 m<sup>3</sup> con un tiempo de retención hidráulico de 5.75 h. Se cubrieron con plástico negro las áreas laterales de los reactores para evitar la proliferación de algas debido al ingreso de los rayos solares, En la base interior de cada tanque se instalaron piedras porosas rectangulares distribuidas homogéneamente que proporcionaron la aireación de los tanques a través de burbujas finas.

### **3.3.3.4 Selector aerobio**

El selector fue un tanque de sección rectangular con tres compartimentos en serie, que permitían crear un gradiente de sustrato, en donde el agua residual afluyente se mezclaba continuamente con el lodo recirculado en el ingreso y la salida del efluente de esta unidad se efectuaba mediante un vertedero formado por una lámina de aluminio .Se construyó con material acrílico de 5 mm y se utilizaron dos deflectores del mismo material para dividir los compartimentos, instalados de forma alternada con una separación de 2 cm de la cara lateral, para otorgar un comportamiento zigzagueante al flujo. En la cara lateral izquierda del selector se instaló una válvula esférica de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro en la parte inferior de cada compartimento, para realizar la purga de lodos. En la cara lateral derecha del selector se adosaron mangueras de aireación del selector. Las fotografías 3.1 y 3.2 muestran las fotografías del selector en donde se registran los detalles anteriormente mencionados.



**Fotografía 3.1.** Partes constructivas del selector  
Fuente: *Elaboración propia*



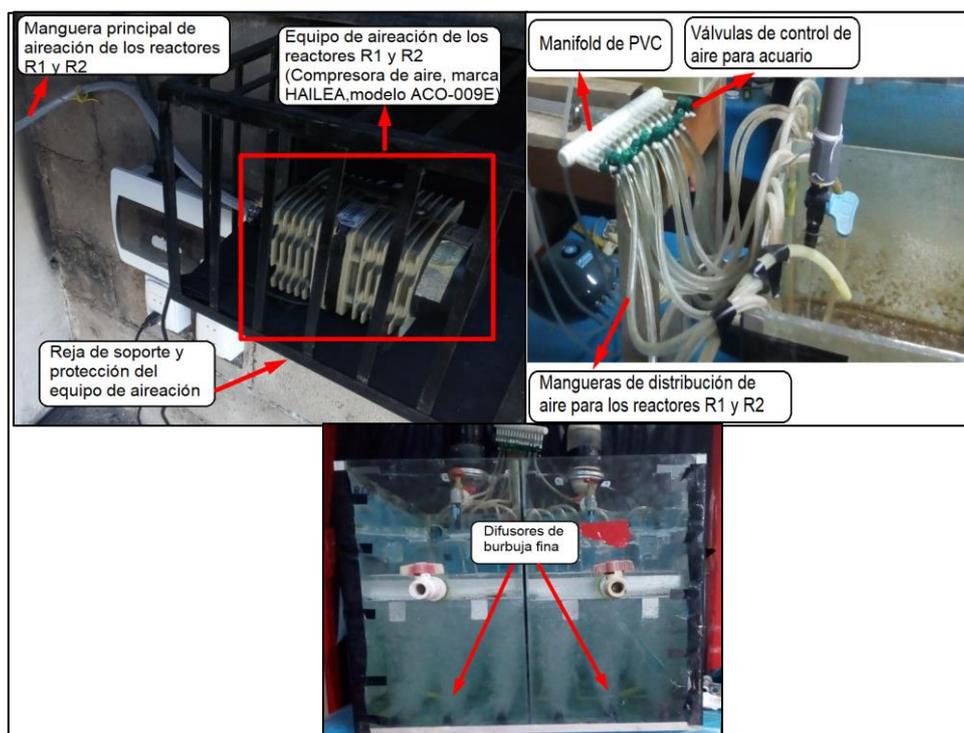
**Fotografía 3.2.** Selector instalado en el sistema N°1  
Fuente: *Elaboración propia*

EL selector tuvo dimensiones pequeñas para asegurar que el tiempo de retención hidráulico no sea mayor a 15 minutos. En este caso, el selector tenía 0.1 m de ancho, 0.4 m de largo y 0.225 m de altura.

### 3.3.3.5 Sistemas de aireación

El sistema de aireación principal, el cual abastecía a los reactores R1 y R2, estaba compuesto por una compresora de aire electromagnética (marca HAILEA, modelo ACO-009E), una línea matriz de 3/8" de diámetro que se conectaba a un manifold de distribución de 16 salidas (de las cuales se anularon 4 porque se contaba únicamente con 12 difusores), una válvula plástica de regulación de aire para cada línea de distribución y 6 difusores de piedra porosa de burbuja fina de sección

trapezoidal y 30 cm de largo dispuestos en la base interior de cada reactor; los componentes descritos se muestran en la fotografía 3.3. Las líneas de distribución de aire eran mangueras de silicona de 1/8" de diámetro. Se reguló cada válvula para suministrar 4 L/min de aire por cada difusor, siendo el requerimiento total de aire de 48 L/min para ambos reactores.



**Fotografía 3.3.** Equipo de aireación de los reactores R1 y R2 (izquierda), manifold del PVC (derecha), difusores de burbuja fina (abajo)  
*Fuente: Elaboración propia*

El sistema de aireación del selector estuvo compuesto por mangueras de silicona de 1/8" de diámetro como las líneas de aireación que provenían de una bomba de aire Rs 9801 para pecera de 4 salidas de 0.012 Mpa de presión y 12 W de potencia. El aireador otorgaba 12 L/min en total, y se conectaba con los 4 difusores de piedras porosas circulares de burbuja fina instalados en la base interior del selector (2 difusores para el primer compartimento y 1 difusor para cada compartimento restante). Se utilizó la máxima capacidad de flujo del aireador.

### **3.3.3.6 Sedimentadores secundarios**

Los sedimentadores secundarios S1 y S2 operaron en paralelo y se construyeron con vidrio de 5mm de espesor. Ambos sedimentadores tenían las mismas características; los cuerpos de las unidades eran prismáticas y las bases piramidales. La base piramidal permitió concentrar y compactar los lodos sedimentados en el fondo. para facilitar su posterior recirculación al selector, en el caso del sistema N°1, y hacia el tanque de aireación principal, en el caso del sistema N°2.

El área superficial de cada sedimentador fue de 0.04 m<sup>2</sup> (0.2m x 0.2m). La altura del volumen útil prismático fue de 0.2m y la altura del volumen piramidal fue de 0.152m, también se consideró un borde libre de 0.05m.

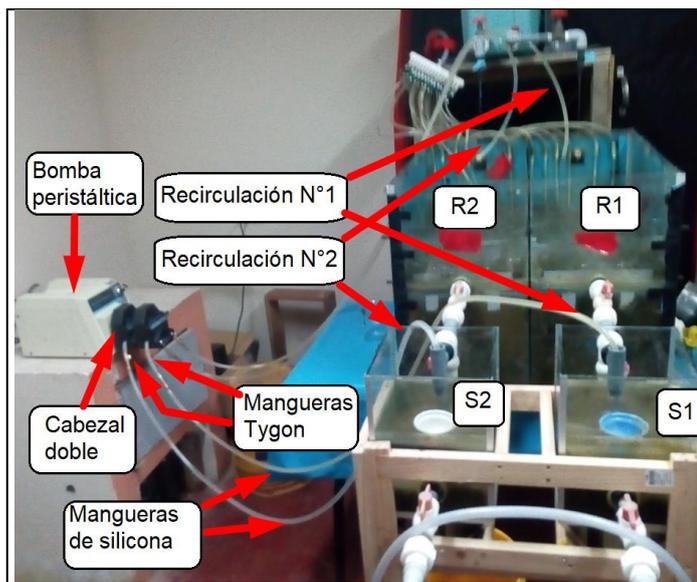
### **3.3.3.7 Purga de lodos**

Diariamente se purgaron 350 ml de lodos por cada sedimentar, la purga se realizó por sifonaje, insertando una manguera de 3/8" de diámetro hasta el fondo del sedimentador, se generó una presión de vacío efectuando la aspiración del lodo colocando una jeringa de 0.5L en el extremo superior.

### **3.3.3.8 Recirculación de lodos**

Los caudales de recirculación de los sistemas N°1 y N°2 operaron en paralelo de manera continua a lo largo del día y fueron los mismos uno respecto al otro, Sin embargo, las tasas de recirculación cambiaron de acuerdo con las etapas desarrolladas. Se calibraron los caudales de recirculación por medio de una bomba peristáltica de accionamiento por consola Masterflex (modelo 77521-57); se pudo calibrar simultáneamente ambos caudales debido a que se utilizaron dos cabezales Masterflex L/S Easy Load II (modelo 77200-60). Las líneas de recirculación de lodos estaban conformadas por mangueras de silicona de 1/4" de diámetro, no obstante, la calibración de los caudales está sujeta al tipo de manguera utilizada en los cabezales de estrangulación; en este caso se utilizaron porciones, de 0.5m de longitud, de manguera Tygon E-LFL de tamaño L/S 18. La fotografía 3.4 muestra los elementos de la recirculación antes mencionados.

En cuanto al mantenimiento de las líneas de recirculación, semanalmente se cambiaban los pedazos de manguera Tygon, pues se suelen desgastar rápidamente y descalibrar el caudal; y se limpiaban las mangueras de silicona insertando un alambre delgado para retirar el biofilm adherido al interior de su diámetro.



**Fotografía 3.4.** Bomba peristáltica (izquierda), cabezal doble (derecha), esquema de recirculación (abajo)

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.4 CRONOGRAMA DE INVESTIGACIÓN

En la presente tesis se desarrollaron 6 etapas de investigación:

**Etapas N°1:** Corresponde a la puesta en marcha de los reactores de lodos activados R1 y R2 y estabilización microbiana. Durante esta etapa aún no se instalaron los sedimentadores y por lo tanto tampoco las líneas de recirculación; en esta etapa tampoco se contaba con el selector en el sistema N°1. Únicamente se realizaron mediciones de los parámetros de rutina como turbiedad, concentración de OD, temperatura, conductividad y pH.

**Etapa N°2:** En esta etapa se instalaron los sedimentadores y las líneas de recirculación. Ambos reactores comenzaron a operar con una tasa de recirculación del 70%, sin embargo, durante esta etapa tampoco se instaló el selector en el sistema N°1, ya que se buscaba igualar las condiciones de operación de los sistemas N°1 y N°2 antes de diferenciarlas con la instalación del tanque selector en la cabecera de R1.

**Etapa N°3:** A partir de esta etapa en adelante se empezó a operar con el selector en el sistema N°1 ubicado en la cabecera de R1. Esta fue la única diferencia operativa entre los sistemas N°1 y N°2. Se mantuvo la tasa de recirculación de lodos de la etapa anterior. Cabe mencionar que, durante esta etapa, la mayor parte del tiempo no se tuvo disponible el Laboratorio de Investigación del Agua (LIA-FIA-UNI) y no se pudo obtener una cantidad representativa de resultados.

**Etapa N°4:** A partir de esta etapa en adelante se comenzó a variar las tasas de recirculación tal como se indica en la tabla 3.1. Se disminuyó la tasa de recirculación respecto a la etapa anterior

**Etapa N°5:** Se disminuyó la tasa de recirculación respecto a la etapa anterior.

**Etapa N°6:** Se disminuyó la tasa de recirculación respecto a la etapa anterior.

En la tabla 3.1 se detalla el cronograma cada una de las etapas de la presente tesis indicando su inicio y final, también se detalla las respectivas variaciones que existieron entre ellas.

**Tabla 3.1.** Cronograma y lineamientos de las etapas de la investigación

Etapa	Inicio de etapa			Fin de etapa			Sistema	Con Selector	R
	Fecha	N° día	N° sem.	Fecha	N° día	N° sem.			
1	12/08/2019	1	1	24/09/2019	32	7	Sist.N°01	NO	0%
							Sist.N°02	NO	0%
2	25/09/2019	33	7	07/11/2019	64	13	Sist.N°01	NO	70%
							Sist.N°02	NO	70%
3*	08/11/2019	65	13	13/12/2019	90	18	Sist.N°01	SI	70%
							Sist.N°02	NO	70%
4	16/12/2020	91	19	10/01/2019	110	22	Sist.N°01	SI	50%
							Sist.N°02	NO	50%
5	13/01/2020	111	23	14/02/2019	135	135	Sist.N°01	SI	60%
							Sist.N°02	NO	60%
6	17/02/2020	136	28	06/03/2020	150	30	Sist.N°01	SI	70%
							Sist.N°02	NO	70%

Fuente: Elaboración propia

R: tasa de recirculación de lodos, expresada en porcentaje

En la tabla 3.2 se detallan las frecuencias de medición de los análisis de laboratorio (DBO5 total y soluble, SSF, SSV, SDF, SDV, SST y el IVL, observación microscópica) y de los parámetros de rutina in-situ (pH, temperatura, conductividad, turbiedad y OD) de cada uno de los puntos de monitoreo evaluados.

**Tabla 3.2.** Frecuencia de medición de los análisis de laboratorio y parámetros de rutina por cada punto de monitoreo

Lugar donde se realizó el análisis	Análisis y/o medición	Puntos de monitoreo									
		AF <sup>c</sup>	SEL <sup>c</sup>	R1 <sup>c</sup>	R2 <sup>c</sup>	R1-EF <sup>c</sup>	R2-EF <sup>c</sup>	S1 <sup>c</sup>	S2 <sup>c</sup>	REC1 <sup>c</sup>	REC2 <sup>c</sup>
CITRAR-FIA-UNI	Caudal (L/d)	D	-	-	-	-	-	-	-	D	D
	Temperatura (°C)	D	D	D	D	D	D	D	D	-	-
	pH	D	D	D	D	D	D	D	D	-	-
	Conductividad (mS/cm)	D	D	D	D	D	D	D	D	-	-
	Turbiedad (NTU)	D	D	D	D	D	D	D	D	-	-
	Oxígeno disuelto (mg/L)	D	D	D	D	D	D	D	D	-	-
	Observación microscópica	-	E	E	E	-	-	-	-	-	-
LIA-FIA-UNI	DBO <sub>5</sub> Total (mg/L)	S	-	-	-	S	S	S	S	-	-
	DBO <sub>5</sub> Soluble (mg/L)	S	S	-	-	S	S	-	-	-	-
	Sólidos (mg/L) <sup>a</sup>	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	IVL (ml/g) <sup>b</sup>	-	-	D	D	-	-	-	-	-	-
		-	-	S	S	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Nota:

D: Frecuencia diaria de monitoreo, S: Frecuencia semanal de monitoreo, E: monitoreo de 1 vez por etapa como mínimo

<sup>a</sup> Se muestrearon todos los sólidos (ST, SST, SDT, STV, SSV, SDV, STF, SSF, SDF).<sup>b</sup> Los muestreos de IVL se consideraron de forma diaria para un mejor control y semanal para poder evaluarlos según la carga másica<sup>c</sup> AF, SEL, R1, R2, R1-EF, R2-EF, S1, S2, REC1, REC2 (Ver nomenclatura en las figuras 3.2y 3.3)<sup>d</sup> "-": significa que no se midió

### 3.5 EQUIPOS Y MATERIALES

#### 3.5.1 Equipos instalados en la investigación

- 01 bomba centrífuga de ½ HP Marca Pedrollo
- 01 motor reductor de 30 RPM.
- 01 transformador de 12 V
- 01 timer analógico TB-45, marca CAMSCO
- 01 contactor modelo NC1-0910-240 V, marca CHINT
- 01 interruptor termomagnético, modelo 9MCB 2x 16A, marca Schneider.
- 01 compresor de aire, modelo ACO-009E, marca HAILEA, potencia 135W, presión 0.035Mpa, flujo de 140 L/min. Incluye manifold de 16 salidas.
- 01 bomba de aire para pecera de 4 salidas, modelo Rs 9801, marca RS Electrical, presión 0.012 Mpa, potencia 12W, flujo de 12L/min.
- 01 bomba peristáltica analógica multicabezal, modelo 77521-57, marca MASTERFLEX.
- 02 cabezales, modelo 77200-60, tipo L/S Easy Load II, marca MASTERFLEX.

#### 3.5.2 Materiales utilizados en laboratorio

- Matraz Kitasato de 1L
- 02 probetas de vidrio graduadas de 1L.
- 34 frascos winkler
- 10 crisoles y 10 cápsulas de porcelana
- 01 piceta de 250ml
- 01 vaso precipitado de 500ml
- 01 probeta de vidrio graduada de 100ml
- 01 desecador de pyrex y sílica
- 10 pipetas de 10 ml
- 02 paquetes de 100 filtros de fibra de vidrio, marca PALL, diámetro de disco 47mm, diámetro de poro 1 µm.
- 01 paquete de 200 filtros de disco de membrana estéril Metrice GN-6, diámetro de disco 47mm, diámetro de poro 0.45 µm, marca PALL.

- Soporte de filtro aséptico de polisulfona, de volumen de 500 ml, con embudo y base de 47mm de diámetro, marca ADVANTEC.

### **3.5.3 Equipos de laboratorio**

- 01 pH metro multiparámetro, marca HACH, modelo HQ 30D (CITRAR-FIA-UNI)
- 01 turbidímetro, marca HACH, modelo 2100Q (CITRAR-FIA-UNI)
- 02 oxímetro, marca HACH, modelo HQ40D (CITRAR-FIA-UNI)
- 02 sensores luminiscentes de OD, marca HACH, modelo LDO 10101
- 01 sensor luminiscentes de OD, marca HACH, modelo LDO 10105
- 01 conductímetro, marca OAKTON, modelo PC2700 (CITRAR-FIA-UNI)
- 01 microscopio marca Carl Zeiss, modelo Primo Star (CITRAR-FIA-UNI)
- 01 bomba de vacío perteneciente al LIA-FIA-UNI, incluye línea de vacío
- 01 balanza electrónica de precisión, marca BEL, modelo LW 303D
- 01 horno a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- 01 horno a  $180^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- 01 mufla a  $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

## **3.6 PRUEBAS Y ENSAYOS REALIZADOS**

### **3.6.1 Pruebas iniciales de calibración**

#### **3.6.1.1 Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno**

Se sigue el método propuesto por Romero (2013). La prueba se realizó en un solo reactor (R1). Se procedió a llenar el reactor con agua potable y posteriormente se desoxigenó con sulfato de sodio (12mg/l) y un catalizador de cloruro de cobalto (no mayor a 0.05 mg/L). Posteriormente se abrieron las válvulas de las 6 vías del manifold a 1.4 L/min de aire c/u, para aumentar el oxígeno disuelto del agua potable hasta llegar a la concentración de saturación, registrando los diversos intervalos de tiempo y las concentraciones de OD correspondientes.

Se determinó el coeficiente de transferencia de oxígeno ( $K_{La}$ ) del agua residual y la constante de saturación de oxígeno ( $C_s$ ) del agua residual

mediante los factores  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente, donde  $\alpha$  corresponde al factor que relaciona los coeficientes de transferencia de oxígeno del agua residual y el agua potable y  $\beta$  corresponde al factor que relaciona las concentraciones de saturación del agua residual y el agua potable

### **3.6.1.2 Calibración del caudal de aireación**

Dos veces por semana se verificaba que las válvulas de regulación de aire estén trabajando de forma óptima con el flujo de aire constante de 4 L/min por cada línea de distribución, para esto se utilizó un rotámetro Visi-Float, serie VFB4", rango No.65: 0.2-4 LPM, marca Dywer Instruments. En caso de encontrar fugas o un caudal distinto al indicado, se procedió a realizar el cambio de la válvula correspondiente y a calibrar todas las válvulas de cada línea de distribución a dicho caudal de forma reiterativa hasta que no se encuentre ninguna variación de caudal y la distribución de caudales sea uniforme en todo el manifold. Se siguió la metodología expuesta por Palomino y Ballón (2007).

### **3.6.1.3 Ensayo de trazadores**

Se determinó el comportamiento hidráulico del reactor, evaluando los resultados obtenidos por medio de un ensayo de trazadores mediante una aplicación instantánea con los criterios de la tabla 3.3. Para este ensayo se utilizó el método de la curva de tendencia siguiendo los procedimientos sugeridos por Pérez (2004). El objetivo de esta prueba fue analizar el tipo de flujo desarrollado en los reactores, los cortocircuitos y los espacios muertos desarrollados en los reactores.

**Tabla 3.3.** Criterios para determinar el tipo de flujo por medio del ensayo de trazadores

FACTOR	CRITERIO
ti/to	Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo pistón y 0 para flujo mezclado. Si el valor (<0.3), puede significar que existe cortocircuito hidráulico
tm/to	si es menor que 1, existen cortocircuito hidráulico, pero si es mayor, puede haber errores experimentales o presenta espacios muertos
tp/to	Cuando es igual a 1, únicamente existe flujo pistón, cuando es 0, existe flujo mezclado.
tc/to	Está relacionado con la difusión debido a la turbulencia. Para un flujo estable ideal y aproximadamente de 0.7, para un flujo mezclado (según Villamonte)
tb/to	Está relacionado con las características de inercia turbulentas y de recirculación grande. Para el flujo estable e ideal y del orden de 2.3 para flujo mezclado ideal.
$e = ((t_f - t_p) - (t_p - t_i)) / t_o$	Expresa la excentricidad de la curva, es función de la recirculación. Es igual a 0 para flujo pistón y mayor a 2.3 para flujo mezclado ideal

Fuente: Elaboración propia

Leyenda:

ti: tiempo inicial

tp: tiempo modal

to: tiempo de retención teórico

tc: tiempo correspondiente a Cp /2

tb: tiempo correspondiente a Cp /10

tf: tiempo final

Cp: Conductividad máxima

### 3.6.1.3.1 Determinación de la constante de saturación en agua potable

Se determinó la concentración de saturación según la ecuación de la ley de Henry, la cual se muestra a continuación:

$$P = H * X$$

$$X = \frac{n_g}{n_g + n_w}$$

Dónde:

$P$  = presión parcial de gas en atm

$H$  = constante de la ley de Henry para el gas a la temperatura de cálculo

$X$  = fracción molar de equilibrio del gas disuelto

$n_g$  = moles del gas

$n_w$  = moles del agua

En la tabla 3.4 se muestran las constantes de la ley de Henry para las diferentes temperaturas.

**Tabla 3.4.** Constantes de la Ley de Henry a diferentes temperaturas

T (°C)	H * 10 <sup>4</sup> atm/fracción mol
0	2.55
10	3.27
20	4.01
30	4.75
40	5.35
50	5.88
60	6.29

Fuente: (Palomino y Ballón, 2007)

El ensayo de trazadores se llevó a cabo con agua potable y se realizó a un solo reactor (R1), pues ambos reactores, R1 y R2, trabajaron bajo el mismo caudal de ingreso y las mismas condiciones de mezcla. La prueba se llevó a cabo durante la etapa inicial de la investigación, por tal motivo no se tuvo en cuenta el caudal de recirculación. En este caso, el trazador fue la concentración de cloruros disueltos en el agua luego de agregar cloruro de sodio al reactor R1, se midió dicha concentración de manera indirecta por medio de la conductividad. Para ello se preparó una solución madre con una conductividad conocida, esta solución ingresó por el punto del afluente durante un intervalo de tiempo menor a 1/30 del tiempo de retención teórico del reactor R1. Previamente se midió la conductividad del agua dentro del reactor antes de ingresar la solución madre. A medida que dicha solución ingresaba, se fue tomando registro del tiempo y de la conductividad en el punto del efluente, la prueba se detuvo cuando se registraron valores de conductividad iguales a las que tenía el agua dentro del reactor antes de la inyección de la solución madre.

#### **3.6.1.4 Inoculación biológica de los reactores**

La etapa N°1 corresponde a la puesta en marcha de los reactores R1 y R2, dicha etapa duró un mes con dos semanas. Durante el primer mes, los reactores operaron sin ninguna inoculación de lodos y no se logró conseguir un lodo adecuado, ya que el volumen del lodo producido fue muy pobre. Por tal motivo se inocularon los reactores con 20L del lodo proveniente del tanque de aireación de la PTAR de lodos activados de San Antonio de Carapongo.

#### **3.6.1.5 Calibración del caudal afluente**

Se trabajó con un único caudal de ingreso de 259 L/d a cada reactor durante toda la investigación. Se fueron midiendo los caudales afluentes tomando el tiempo de aforo de una probeta graduada de 100 ml mediante un cronómetro de forma manual; paralelamente se manipularon diariamente las válvulas de regulación de los afluentes, hasta conseguir el tiempo correspondiente al caudal requerido.

#### **3.6.1.6 Calibración del caudal de recirculación**

Los caudales de recirculación cambiaron según las diversas etapas de la investigación, las tasas de recirculación se detallan en la tabla 3.1. La recirculación se realizó mediante la manipulación de una bomba peristáltica de accionamiento analógico, aforando los caudales de recirculación de forma manual.

### **3.6.2 Ensayos de laboratorio**

La tabla 3.5 muestra los ensayos realizados para llevar a cabo la presente investigación.

**Tabla 3.5.** Pruebas de laboratorio desarrolladas en la investigación

<b>Ensayo</b>	<b>Método (***SMEWW)</b>	<b>Descripción</b>
*Temperatura (°C)	Sección 2550 B	Se midió con el termómetro incorporado en la sonda del oxímetro
*pH	Sección 4500-H+ B.	Método Electrométrico
*Conductividad (mS)	Sección 2510 B.	Medición con electrodo
*Turbiedad (NTU)	Sección 2130 B	Método Nefelométrico
*Oxígeno disuelto (mg/L)	Sección 4500-O G	Método de electrodo de membrana
** DBO <sub>5</sub> Total (mg/L)	Sección 5210 B	Se midieron los resultados al quinto día de incubación.
** DBO <sub>5</sub> Soluble (mg/L)	Sección 5210 B	Previamente se filtra la muestra mediante un filtro de disco de membrana de 0.45 µm. Luego se aplicó el método de la sección 5210 B y se midieron los resultados al quinto día de incubación.
** SDT (mg/L)	Sección 2540 C	Secados a 180 °C
** SST (mg/L)	Sección 2540 D	Secados a 103.105°C
** SDF (mg/L)	Sección 2540 E	Incinerados a 550°C
** SSF (mg/L)	Sección 2540 E	Incinerados a 550°C
I.V.L. (ml/g)	Sección 2710 D	

Fuente: Relaboración propia

\*Nota: Ensayos correspondientes a los parámetros diarios de rutina realizados en el laboratorio de CITRAR-UNI

\*\*Nota: Ensayos realizados en el LIA-FIA-UNI

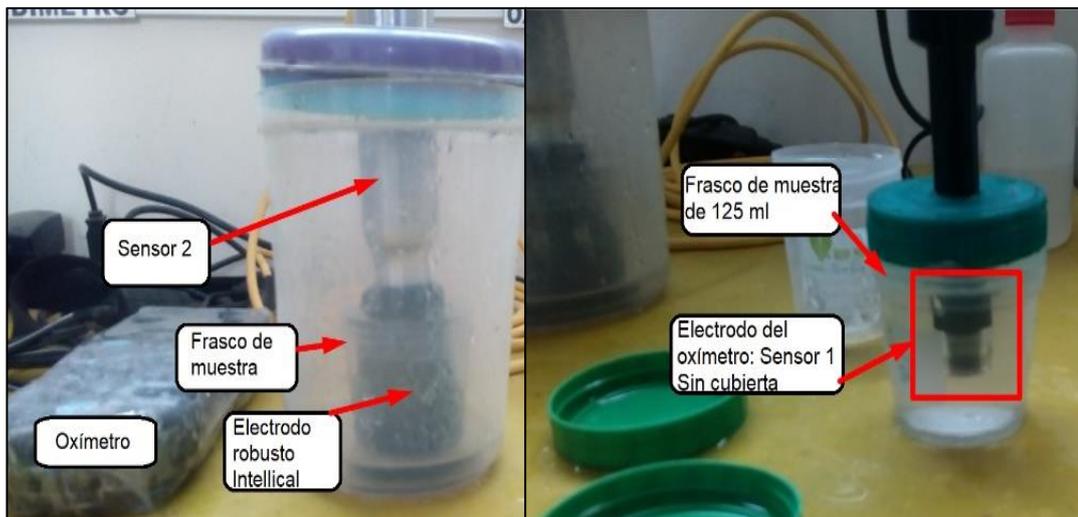
\*\*\*SMEWW= Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd Ed. 2017. APHA-AWWA-WEF.

a Reactivos usados en la DBO<sub>5</sub>: Solución buffer, cloruro férrico, cloruro de cobalto y sulfato de magnesio

Nota: La presente tabla detalla la determinación de los sólidos hallados directamente del análisis, los demás sólidos se hallan por diferencia.

En la fotografía 3.5 se muestran los frascos de 100 ml que se usaron al recolectar las muestras para realizar los análisis de los parámetros diarios en CITRAR-FIA-

UNI, así como los sensores que se usaron para medir el OD. Se tuvo una consideración particular para medir el OD en las muestras del selector, de los reactores R1 y R2, y de los efluentes de R1 y R2; ya que dichas muestras presentaban lodo. Inicialmente se utilizó el sensor 2 (modelo LDO 10105), el cual tenía un cuerpo grueso y una cubierta protectora; posteriormente se utilizó el sensor 1 (modelo LDO 10101), el cual tenía un cuerpo delgado y no contaba con ninguna cubierta. Ambos sensores eran luminiscentes y eran sensibles a interferencias debido a la presencia de gran cantidad sólidos sedimentables en las muestras. Por tal motivo, fue conveniente esperar que sedimente el lodo en el frasco de muestra para después medir el OD únicamente en el sobrenadante claro. Esto fue posible realizarlo con el sensor de modelo 10101, pues era de cuerpo delgado y no contaba con cubierta protectora que obligue colocar al sensor hasta el fondo del frasco donde estaba el lodo sedimentado



**Fotografía 3.5.** Sensor LDO10105 con cubierta de protección (izquierda) y sensor LDO 10101 sin cubierta de protección (derecha)

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.6.3 Observación microscópica

Las muestras fueron del selector, R1 y R2; la frecuencia de esta observación microscópica, se procuró realizarla antes de culminar cada etapa. Para la prueba se utilizó un microscopio modelo Primo Star, marca Carl Zeiss objetivos (4x, 110x, 40x, 100x). Se observaron los microorganismos utilizando los objetivos de 10x y/o 40x. Se tomó registro fotográfico y se evaluaron las fotografías comparándolas

con los criterios de la guía de análisis de Rodríguez, Isac, Fernández, Salas y Jiménez (2002).

### 3.6.3.1 Escala para la determinación de la abundancia de filamentos

Se utilizó el método desarrollado por Jenkins et al. (1986), el cual se mide cualitativamente bajo los criterios mostrados en la tabla 3.6 (tal como se mencionó en Jenkins et al., 2006).

**Tabla 3.6.** Puntaje subjetivo de la abundancia de filamentos

<b>Grado</b>	<b>Abundancia</b>	<b>Descripción según la microscopía</b>
0	Ninguno	
1	Pocos	Filamentos presentes, pero solo observados en un flóculo ocasional
2	Algunos	Es común observar los filamentos, pero no están presentes en todos los flóculos-
3	Común	Se observan los filamentos en todos los flóculos, pero con una baja densidad (e.g., 1-5 filamentos por flóculo)
4	Muy común	Se observan los filamentos en todos los flóculos, con una densidad media (e.g., 5-10 filamentos por flóculo)
5	Abundante	Se observan los filamentos en todos los flóculos, con una alta densidad (e.g., >20 filamentos por flóculo)
6	Excesivo	filamentos presentes en todos los flóculos. Aparecen más filamentos que flóculos incluso en la solución a granel.

Fuente: (Jenkins, Tandoi y Wanner, 2006)

### 3.7 DIMENSIONAMIENTO DEL SELECTOR

Los cálculos del diseño del tanque selector se encuentran en el ANEXO N°2 (ver CAPITULO IX).

La división del selector se realizó con tres compartimentos, los dos primeros compartimentos de igual volumen y el último compartimento del doble de volumen de los anteriores. Se colocan compartimentos en el selector de tal manera que se asegure un gradiente de sustrato. La figura 3.7 muestra la forma en que se disponen los compartimentos del selector, donde  $L=0.1\text{m}$ ,  $H=0.125\text{m}$  y Borde libre=0.1m



**Figura 3.7.** Disposición de los volúmenes de los compartimentos del selector

Se calculó el TRH del primer compartimento ( $TRH_1$ ):

$$TRH_1 = \frac{TRH}{4} = \frac{15.5 \text{ min}}{4} = 0.00269097d$$

Se cálculo la carga másica ( $F/M$ ) inicial del primer compartimento del selector de la siguiente manera:

$$\left(\frac{F}{M}\right)_1 = \frac{S_o}{X_{mix} * TRH_{1er \text{ compartimento}}}$$

Donde

$(F/M)_1$ : Carga másica del primer compartimento del selector ( $d^{-1}$ )

$S_o$ : Concentración de  $DBO_5$  soluble del afluente ( $mg/L$ )

$X_{mix}$ : Concentración de biomasa de la mezcla del afluente con la recirculación ( $mgSSV/L$ )

$TRH_1$ : Tiempo de retención hidráulico del primer compartimento ( $d$ )

$$\left(\frac{F}{M}\right)_1 = \frac{220 \frac{mgDBO}{L}}{3299.65 \frac{mgSSV}{L} * 0.00269097d} = 24.77d$$

#### 4. CAPITULO IV

##### OBTENCIÓN DE RESULTADOS

##### 4.1 DETERMINACIÓN DEL PERIODO DE PUESTA EN MARCHA

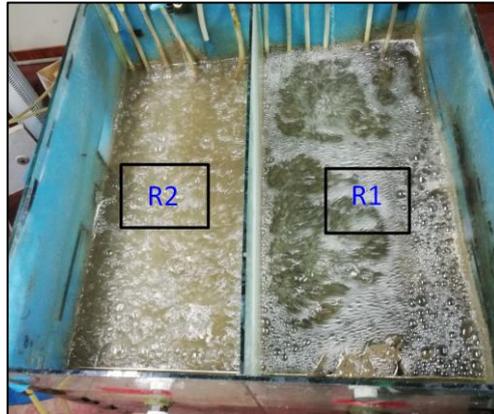
Durante la puesta en marcha se buscó generar una buena calidad de lodos en los reactores R1 y R2 sin ninguna inoculación, no obstante, el  $V_{30}$  era menor al 100 ml/l (lodo activado en proceso de formación) en ambos reactores, por tal motivo, se tuvo que realizar una inoculación de lodos en los reactores provenientes de una PTAR de lodos activados. Luego de realizar la inoculación de lodos, inmediatamente se obtuvo una formación de lodo óptima ( $V_{30}$  igual a 300 ml/l), tal como se muestra en la fotografía 4.1 . También se puede observar que, antes de realizar la inoculación el color del lodo era amarillento, lo cual confirma que se trata de un lodo joven y con baja actividad microbiana. Pero después de inocular los reactores, el color del lodo cambió drásticamente a un color marrón oscuro, lo cual indica que se tiene un lodo estable y con una buena actividad microbiana.



**Fotografía 4.1** . Formación de lodo antes y después de la inoculación de lodos

*Fuente: Elaboración propia*

Durante la etapa de puesta en marcha también se observó que mientras no se realizaba la inoculación de los lodos, se formaban espumas en los reactores, tal como se muestra en la fotografía 4.1. La espuma indicaba presuntamente que los lodos activados aún están en proceso de formación.



**Fotografía 4.1.** Formación de espumas en los reactores de lodos activados R1 y R2

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.2 DETERMINACIÓN DEL $K_L a$ Y CAPACIDAD DE OXIGENACIÓN

En la tabla 4.1 se muestran los datos de entrada a tener en consideración para calcular la concentración de saturación.

**Tabla 4.1.** Datos de entrada para calcular la constante de saturación en agua potable

AGUA POTABLE			
Cálculo de la Concentración de saturación ( $C_s$ )			
DATOS DE ENTRADA	Altitud de CITRAR-FIA-UNI	105	msnm
	Temperatura del agua potable	18	°C
	Presión atmosférica	750.55	mm Hg
		0.988	Atm
	Peso molecular del O <sub>2</sub>	32	g/mol
	Peso molecular del H <sub>2</sub> O	18	g/mol
	% O <sub>2</sub>	21	%

Fuente: Elaboración propia

- a) Como no se encontró la temperatura exacta detallada en la tabla 3.4, se interpolaron los valores de H para una temperatura de 18°C

$$H_{18} = \frac{(18 - 10) * (4.01 - 3.27)}{(20 - 10)} + 3.27$$

$$H_{18} = 3.862$$

$$H_{18} * 10^4 = 38620$$

- b) Cálculo de la fracción molar de equilibrio del oxígeno disuelto:

$$X = \frac{P_{O_2}}{H} = \frac{0.988 * 21\%}{38620} = 5.37 * 10^{-6}$$

c) Cálculo de los moles de O<sub>2</sub> por litro (n<sub>g</sub>)

$$n_w = \frac{\rho_{H_2O}}{\text{mol}_{H_2O}} = \frac{1000\text{g/L}}{18\text{g/mol}} = 55.56\text{mol/L}$$

$$n_g = \frac{n_w * X}{1 - X} = \frac{55.56 * 5.37 * 10^{-6}}{1 - 5.37 * 10^{-6}} = 2.9833 * 10^{-4}\text{mol/L}$$

d) Cálculo de la concentración de saturación de oxígeno disuelto en el agua potable.

$$C_{S\ H_2O} = n_g * \overline{O_2} = 2.9833 * 10^{-4} * 32 * 10^3 = 9.55\text{mgO}_2/\text{L}$$

#### 4.2.1 Determinación de KLa en agua potable

Se tabularon las concentraciones de OD y se calculó el déficit con respecto a la concentración de saturación (ver tabla 4.2)

**Tabla 4.2.** Registro de las concentraciones de O.D durante la prueba de la capacidad de oxigenación del reactor

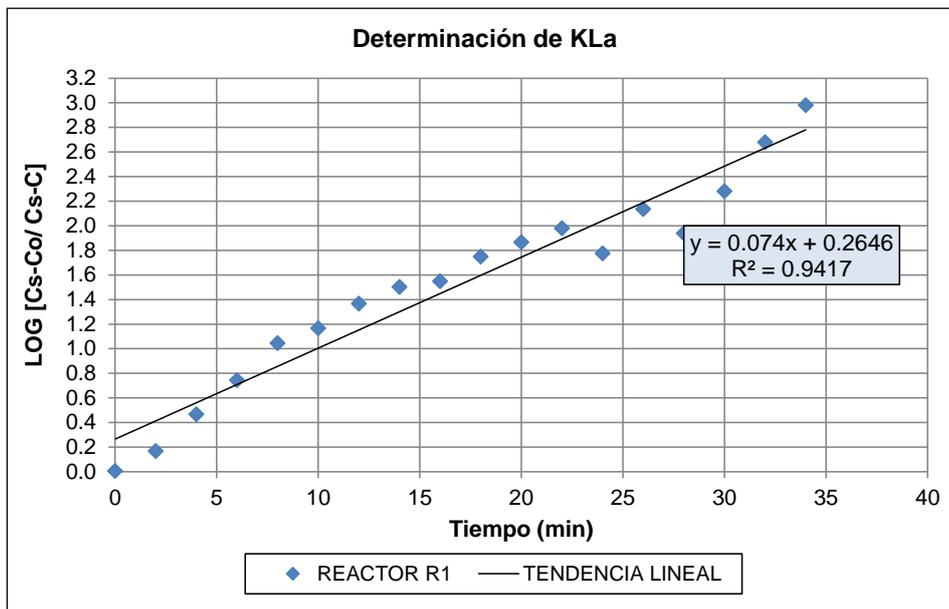
t (min)	Ct= OD (mg/L)	Cs-Ct (mg/L)	[Cs-Co/ Cs-Ct]	LOG [Cs-Co/ Cs-C]	2.3 LOG [Cs-Co/ Cs-Ct] / t
0	0.13	9.42	1.01	0.0060	
2	3.05	6.50	1.47	0.1671	0.1922
4	6.29	3.26	2.93	0.4668	0.2684
6	7.83	1.72	5.55	0.7445	0.2854
8	8.69	0.86	11.10	1.0455	0.3006
10	8.90	0.65	14.69	1.1671	0.2684
12	9.14	0.41	23.29	1.3672	0.2621
14	9.25	0.30	31.83	1.5029	0.2469
16	9.28	0.27	35.37	1.5486	0.2226
18	9.38	0.17	56.18	1.7496	0.2236
20	9.42	0.13	73.46	1.8661	0.2146
22	9.45	0.10	95.50	1.9800	0.2070
24	9.39	0.16	59.69	1.7759	0.1702
26	9.48	0.07	136.43	2.1349	0.1889
28	9.44	0.11	86.82	1.9386	0.1592
30	9.50	0.05	191.00	2.2810	0.1749
32	9.53	0.02	477.50	2.6790	0.1926
34	9.54	0.01	955.00	2.9800	0.2016

Fuente: Elaboración propia

Cs: Concentración de saturación en el agua potable igual a 9.55 mg O<sub>2</sub>/L

Ct: Concentración de OD a distintos intervalos de tiempo (mg O<sub>2</sub>/L)

Se representaron los resultados de las pruebas realizadas la gráfica 4.1 y se determinó el coeficiente de transferencia de oxígeno (KLa) como 2.3 veces la pendiente de la recta de la regresión lineal, determinada por el método de mínimos cuadrados.



**Gráfico 4.1.** Determinación gráfica de KLa

Fuente: Elaboración propia

De la gráfica 4.1 se obtiene que  $m=0.074$ , por lo tanto, se obtiene que  $KLa = 2.3 \cdot 0.074 = 0.1702 \text{ min}^{-1}$ .

Haciendo una conversión de unidades tenemos que el coeficiente de transferencia de oxígeno, a los 18°C que se realizó la prueba, resulta:

$$KLa = 10.212 \text{ h}^{-1}$$

Se halló el coeficiente de transferencia para condiciones estándar (a 20°C), mediante la siguiente fórmula (Romero, 2013):

$$KLa_{(T)} = KLa_{(20)} \cdot \Theta^{T-20}$$

Donde:

$\Theta = 1.020$  para sistemas de burbuja

$KLa(T)$ =Coeficiente de transferencia del gas a T°C

$KLa_{(20)}$ = Coeficiente de transferencia del gas a 20°C

Por lo tanto, a condiciones estándar, tenemos que el coeficiente de transferencia de oxígeno en el agua potable sería:

$$KLa_{(20),H2O} = \frac{10.212 h^{-1}}{1.020^{(18-20)}} = 10.625 h^{-1}$$

Según Metcalf & Eddy (2013), se asume un factor de corrección más desfavorable ( $\alpha=0.4$ ) al coeficiente de transferencia de oxígeno en agua potable, para obtener el coeficiente de transferencia de O<sub>2</sub> en agua residual pretratada

$$KLa_{(20),Agua\ residual} = \alpha * KLa_{(20),H2O}$$

$$KLa_{(20),Agua\ residual} = 0.4 * 10.625 h^{-1} = 4.25 h^{-1}$$

Después de realizar la prueba con agua potable, se procedió a llenar el tanque de agua residual y saturarlo, obteniendo una  $Cs_{\text{agua residual}} = 8.92 \text{mg/L}$ .

#### **4.2.2 Determinación de la capacidad de oxigenación en el agua potable (CO<sub>H2O</sub>)**

##### **4.2.2.1 Corrección de KLa con respecto a la temperatura en condiciones estándar**

Se puede utilizar el mismo procedimiento de la Ley de Henry para hallar la concentración de saturación de oxígeno a condiciones estándar (presión de 1 atmósfera y temperatura de 20°C), tal como indica Romero (2013), nos da un valor de  $C_{S,20} = 9.3 \text{mgO}_2/\text{L}$ .

Se calcula la capacidad nominal de oxigenación del equipo por medio de la siguiente ecuación (Romero, 2013):

$$\frac{dC}{dt} = KLa (C_s - C)$$

En condiciones estándar:  $C_{S,20^{\circ}\text{C}} = 9.3 \text{ mg/L}$ ,  $C=0 \text{ mg/l}$

Se halla el coeficiente de relación de la concentración de saturación de OD en el agua residual a la red de agua potable ( $\beta$ ):

$$\beta = \frac{8.92 \text{ mg/L}}{9.55 \text{ mg/L}} = 0.934$$

Cálculo de la concentración de saturación en el agua residual pretratado a condiciones estándar ( $20^{\circ}\text{C}$ ):

$$C_{S(20),\text{agua residual}} = \beta * C_{S(20),\text{H}_2\text{O}} = 0.934 * 9.3 = 8.686 \text{ mg/L}$$

$$\frac{dC}{dt} = KLa_{\text{agua residual}} * C_{S,20^{\circ}\text{C}} = 4.25 * 8.686 = 36.916 \text{ g/h.m}^3$$

Siendo el volumen del reactor de  $62.139 \text{ L}$ , tenemos que:

$$V = 0.062139\text{m}^3$$

#### 4.2.2.2 Determinación de la capacidad de oxigenación por reactor:

Sea la capacidad nominal de oxigenación del equipo de aireación (N):

$$N = V \frac{dC}{dt} = KLa (C_S - C)$$

$$N = 0.062139 * 36.916 = 2.294 \text{ gO}_2/\text{h}$$

Se tiene que, para un reactor, la capacidad de oxigenación a condiciones estándar del aireador para la difusión por burbuja fina es de  $2.294 \text{ gO}_2/\text{h}$ .

Cálculo de la capacidad nominal de transferencia de oxígeno del equipo de aireación en términos de su potencia:

$$N = \frac{2.294}{8 * 0.746} = 0.38 \text{ gO}_2/\text{KWh}$$

Teniendo en cuenta que la densidad del aire es de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  y que la prueba en el reactor de 6 vías se realizó inyectando  $1.4 \text{ l/min}$  de aire en cada vía, se tiene que:

$$\text{Cantidad de aire de la prueba} = 0.0014 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 6 * 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.01029 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Dado que la cantidad de oxígeno en el aire corresponde a un 21%, se tiene que:

$$\text{Cantidad de } O_2 \text{ de la prueba} = 0.21 * 0.01029 \frac{\text{kg}}{\text{min}} = 0.00216 \frac{\text{kg}}{\text{min}} = 129.654 \frac{\text{g}O_2}{\text{h}}$$

Se determinó la eficiencia de oxígeno del soplador en condiciones estándar (SOTE, por sus siglas en inglés) de la siguiente manera:

$$SOTE = \frac{2.294 \text{ g}O_2/\text{h}}{129.65 \text{ g}O_2/\text{h}} * 100 = 1.769\%$$

#### **4.2.2.3 Determinación de la capacidad total de oxigenación de la compresora:**

Como tenemos dos reactores con las mismas características de aireación, se requiere el doble de la capacidad de oxigenación de la compresora de aire:

$$N_{total} = 2 * 2.294 \text{ g}O_2/\text{h} = 4.588 \text{ g}O_2/\text{h}$$

Cálculo de la capacidad nominal de transferencia de oxígeno del equipo de aireación en términos de su potencia:

$$N_{total} = 2 * 0.38 \text{ g}O_2/\text{KWh} = 0.76 \text{ g}O_2/\text{KWh}$$

Cada reactor contó con 6 líneas de distribución de aire, habiendo determinado la capacidad de oxigenación del equipo de aireación, se calculó que cada línea de distribución de aire debía abastecer  $4 \text{ L/min}$  (estas unidades corresponden a las que se utilizó en el rotámetro).

### 4.3 RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES

El caudal del afluente es constante de 259.2 L/d y el volumen del reactor es de 62.139 L; por lo tanto, el tiempo de retención teórico ( $t_0$ ) es de 345.24 min. La metodología indica que el tiempo de dosificación instantánea debe ser menor o igual al  $t_0/30$ . El volumen que se utilizó para preparar la solución madre de trazador fue de 1.3 L, se procede a calcular el tiempo de dosificación instantánea ( $t_i$ ). Se tiene que  $t_i \leq t_0/30$ , por lo tanto, se acepta como válido el volumen utilizado de la solución madre para desarrollar el ensayo de trazadores. La tabla 4.3 muestra los datos de entrada que se debe tener en cuenta para realizar el ensayo de trazadores.

**Tabla 4.3.** Datos de entrada para elaborar el ensayo de trazadores

Descripción	Datos
Fecha de prueba	27/07/2019
Temperatura del agua (°C)	17.1
Conductividad del agua, $C_0$ (mS)	1.4
Volumen de la solución madre (L)	1.3
Peso de la sal dosificada (g)	248.556
Caudal afluente (mL/min)	180
Volumen del reactor (L)	62.139
Tiempo de retención teórico ( $t_0$ ), en min	345.24
$T_0/30$ (min)	11.508
Caudal de aireación (L/min)	24
Tiempo de dosificación instantánea del trazador o tiempo inicial ( $t_i$ ), en min	7.22
Conductividad pico esperada en el reactor (mS)	9.196

Fuente: Elaboración propia

Por medio de una tabulación de los datos de la tabla 4.4, y teniendo en cuenta los datos de la tabla 4.3 se construyó la gráfica 4.2, correspondiente a la tendencia del trazador con respecto al tiempo.

**Tabla 4.4.** Resultados del ensayo de trazadores del reactor de lodos activados convencional de mezcla completa

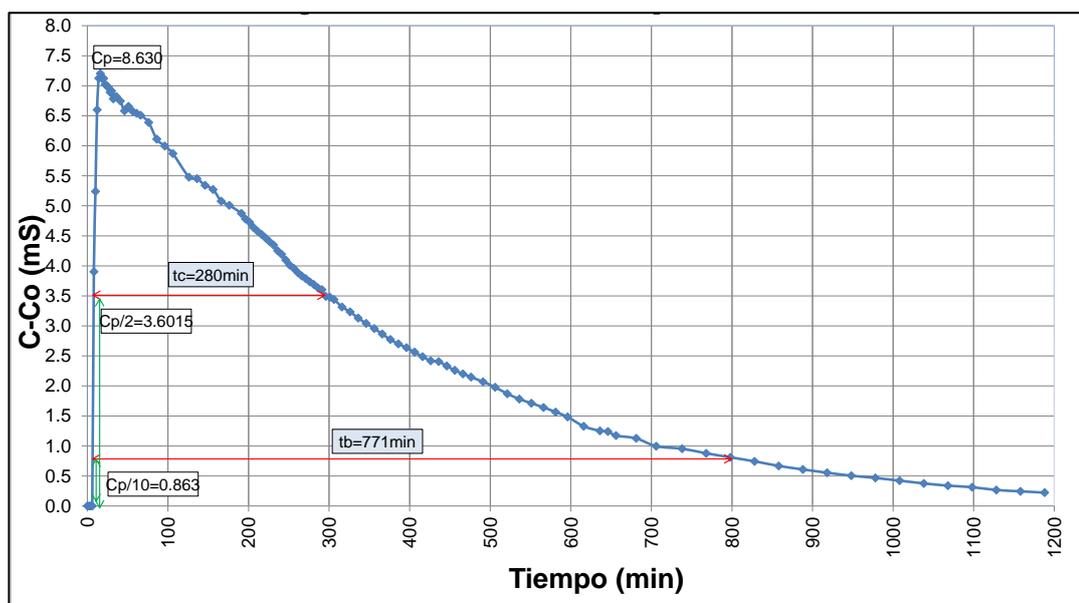
Muestra-efluente	T(°C)	t (min)	t/to	C (mS)	C-Co	$\Sigma (C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0	17.3	0	0.000	1.427	0.000	0.000	0.00	100.00
1	17.3	2	0.000	1.427	0.000	0.000	0.00	100.00
2	17.3	4	0.000	1.427	0.000	0.000	0.00	100.00
3	17.5	6	0.000	1.427	0.000	0.000	0.00	100.00
4	17.5	8	0.023	5.329	3.902	3.902	1.06	98.94
5	17.6	10	0.029	6.666	5.239	9.141	2.48	97.52
6	17.4	12	0.035	8.026	6.599	15.740	4.27	95.73
7	17.5	14	0.041	8.551	7.124	22.864	6.20	93.80
8	17.6	16	0.046	8.630	7.203	30.067	8.16	91.84
9	17.6	18	0.052	8.549	7.122	37.189	10.09	89.91
10	17.7	20	0.058	8.550	7.123	44.312	12.02	87.98
11	17.8	22	0.064	8.449	7.022	51.334	13.93	86.07
12	17.9	24	0.070	8.423	6.996	58.330	15.83	84.17
13	17.9	26	0.075	8.399	6.972	65.302	17.72	82.28
14	18.0	28	0.081	8.321	6.894	72.196	19.59	80.41
15	18.1	30	0.087	8.340	6.913	79.109	21.46	78.54
16	18.2	32	0.093	8.209	6.782	85.891	23.30	76.70
17	18.2	34	0.098	8.239	6.812	92.703	25.15	74.85
18	18.0	36	0.104	8.247	6.820	99.523	27.00	73.00
19	17.9	41	0.119	8.173	6.746	106.269	28.83	71.17
20	17.8	46	0.133	8.007	6.580	112.849	30.62	69.38
21	17.6	51	0.148	8.084	6.657	119.506	32.42	67.58
22	17.6	56	0.162	8.002	6.575	126.081	34.21	65.79
23	17.4	61	0.177	7.969	6.542	132.623	35.98	64.02
24	17.4	66	0.191	7.937	6.510	139.133	37.75	62.25
25	16.3	76	0.220	7.816	6.389	145.522	39.48	60.52
26	16.9	86	0.249	7.537	6.110	151.632	41.14	58.86
27	16.5	96	0.278	7.423	5.996	157.628	42.77	57.23
28	16.6	106	0.307	7.297	5.870	163.498	44.36	55.64

Muestra-efluente	T(°C)	t (min)	t/to	C (mS)	C-Co	$\Sigma$ (C-Co)	F(t)	1-F(t)
29	17.4	126	0.365	6.905	5.478	168.976	45.85	54.15
30	16.7	136	0.394	6.879	5.452	174.428	47.32	52.68
31	17.0	146	0.423	6.767	5.340	179.768	48.77	51.23
32	16.4	156	0.452	6.699	5.272	185.040	50.20	49.80
33	17.2	166	0.481	6.504	5.077	190.117	51.58	48.42
34	16.8	176	0.510	6.436	5.009	195.126	52.94	47.06
35	16.7	191	0.553	6.300	4.873	199.999	54.26	45.74
36	16.6	196	0.568	6.208	4.781	204.780	55.56	44.44
37	16.5	201	0.582	6.155	4.728	209.508	56.84	43.16
38	16.7	206	0.597	6.067	4.640	214.148	58.10	41.90
39	16.5	211	0.611	6.005	4.578	218.726	59.34	40.66
40	16.4	216	0.626	5.952	4.525	223.251	60.57	39.43
41	16.3	221	0.640	5.891	4.464	227.715	61.78	38.22
42	16.3	226	0.655	5.832	4.405	232.120	62.98	37.02
43	17.0	231	0.669	5.774	4.347	236.467	64.16	35.84
44	17.1	236	0.684	5.678	4.251	240.718	65.31	34.69
45	17.2	241	0.698	5.619	4.192	244.910	66.45	33.55
46	17.5	246	0.713	5.524	4.097	249.007	67.56	32.44
47	17.6	251	0.727	5.441	4.014	253.021	68.65	31.35
48	17.4	256	0.742	5.387	3.960	256.981	69.72	30.28
49	17.5	261	0.756	5.315	3.888	260.869	70.78	29.22
50	17.5	266	0.770	5.257	3.830	264.699	71.82	28.18
51	17.5	271	0.785	5.213	3.786	268.485	72.84	27.16
52	17.4	276	0.799	5.161	3.734	272.219	73.86	26.14
53	17.3	281	0.814	5.117	3.690	275.909	74.86	25.14
54	17.2	286	0.828	5.061	3.634	279.543	75.84	24.16
55	17.0	291	0.843	5.030	3.603	283.146	76.82	23.18
56	17.5	296	0.857	4.917	3.490	286.636	77.77	22.23
57	17.3	301	0.872	4.904	3.477	290.113	78.71	21.29
58	17.0	306	0.886	4.867	3.440	293.553	79.64	20.36
59	17.2	316	0.915	4.742	3.315	296.868	80.54	19.46

Muestra- efluente	T(°C)	t (min)	t/to	C (mS)	C-Co	$\Sigma$ (C-Co)	F(t)	1-F(t)
60	17.1	326	0.944	4.661	3.234	300.102	81.42	18.58
61	17.0	336	0.973	4.557	3.130	303.232	82.27	17.73
62	17.2	346	1.002	4.468	3.041	306.273	83.10	16.90
63	17.0	356	1.031	4.383	2.956	309.229	83.90	16.10
64	17.1	366	1.060	4.290	2.863	312.092	84.67	15.33
65	17.3	376	1.089	4.200	2.773	314.865	85.43	14.57
66	17.0	386	1.118	4.126	2.699	317.564	86.16	13.84
67	16.8	396	1.147	4.063	2.636	320.200	86.87	13.13
68	16.9	406	1.176	3.989	2.562	322.762	87.57	12.43
69	16.7	416	1.205	3.914	2.487	325.249	88.24	11.76
70	16.7	426	1.234	3.845	2.418	327.667	88.90	11.10
71	16.6	436	1.263	3.832	2.405	330.072	89.55	10.45
72	16.4	446	1.292	3.758	2.331	332.403	90.18	9.82
73	16.3	456	1.321	3.686	2.259	334.662	90.80	9.20
74	16.2	466	1.350	3.628	2.201	336.863	91.39	8.61
75	16.1	476	1.379	3.574	2.147	339.010	91.98	8.02
76	16.0	491	1.422	3.495	2.068	341.078	92.54	7.46
77	16.1	506	1.466	3.404	1.977	343.055	93.07	6.93
78	16.2	521	1.509	3.297	1.870	344.925	93.58	6.42
79	16.2	536	1.553	3.209	1.782	346.707	94.07	5.93
80	16.1	551	1.596	3.138	1.711	348.418	94.53	5.47
81	16.1	566	1.639	3.068	1.641	350.059	94.98	5.02
82	16.0	581	1.683	2.992	1.565	351.624	95.40	4.60
83	16.2	596	1.726	2.909	1.482	353.106	95.80	4.20
84	17.4	616	1.784	2.754	1.327	354.433	96.16	3.84
85	17.6	636	1.842	2.678	1.251	355.684	96.50	3.50
86	17.4	646	1.871	2.667	1.240	356.924	96.84	3.16
87	18.1	656	1.900	2.599	1.172	358.096	97.16	2.84
88	17.3	681	1.973	2.553	1.126	359.222	97.46	2.54
89	19.0	706	2.045	2.422	0.995	360.217	97.73	2.27
90	17.5	738	2.138	2.380	0.953	361.170	97.99	2.01

Muestra-efluente	T(°C)	t (min)	t/to	C (mS)	C-Co	$\Sigma (C-Co)$	F(t)	1-F(t)
91	17.5	768	2.225	2.304	0.877	362.047	98.23	1.77
92	17.0	798	2.311	2.237	0.810	362.857	98.45	1.55
93	17.0	828	2.398	2.170	0.743	363.600	98.65	1.35
94	16.8	858	2.485	2.094	0.667	364.267	98.83	1.17
95	16.8	888	2.572	2.035	0.608	364.875	98.99	1.01
96	16.6	918	2.659	1.981	0.554	365.429	99.15	0.85
97	16.7	948	2.746	1.931	0.504	365.933	99.28	0.72
98	17.3	978	2.833	1.894	0.467	366.400	99.41	0.59
99	17.0	1008	2.920	1.848	0.421	366.821	99.52	0.48
100	16.7	1038	3.007	1.803	0.376	367.197	99.62	0.38
101	16.4	1068	3.094	1.765	0.338	367.535	99.72	0.28
102	17.0	1098	3.180	1.740	0.313	367.848	99.80	0.20
103	17.0	1128	3.267	1.693	0.266	368.114	99.87	0.13
104	17.8	1158	3.354	1.671	0.244	368.358	99.94	0.06
105	17.8	1188	3.441	1.649	0.222	368.580	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 4.2.** C-Co vs Tiempo, se observa la campana de Gauss del ensayo de trazadores

Fuente: Elaboración propia

Se calcularon los parámetros que servirán de base para interpretar el comportamiento del trazador, dichos parámetros se detallan en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5.** Detalles de la prueba de trazadores realizados a los reactores de lodos activados R1 y R2

<b>Detalles</b>	<b>Datos</b>
Tiempo de dosificación instantánea del trazador o tiempo inicial (Ti), en min	7.22
Tiempo modal (Tp), en min	16
Conductividad máxima (Cp), en mS	8.63
Conductividad inicial del agua (Co), en mS	1.427
Tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad de trazador (Tm), en min	154.601
Tiempo de retención teórico (To), en min	345.24
Tb (min)	771
Tc (min)	280

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.6 se detallan los criterios de análisis que nos describen el comportamiento hidráulico del reactor.

**Tabla 4.6.** Análisis del tipo de flujo de los reactores de lodos activados

<b>FACTOR</b>	<b>VALOR</b>	<b>ANALISIS</b>
ti/to	0.021	Flujo mezclado con cortocircuito hidráulico
tm/to	0.448	Cortocircuito hidráulico
tp/to	0.046	Predominio de flujo mezclado
tc/to	0.811	Flujo mezclado
tb/to	2.233	Se aproxima a un flujo mezclado ideal
$e = ((t_f - t_p) - (t_p - t_i)) / t_o$	3.369	Se aproxima a un flujo mezclado ideal

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 MEDICIONES DE LA TURBIEDAD

En las tablas 4.7 y 4.8 se muestran los valores mínimos, máximos y promedios de la turbiedad en cada uno de los puntos de monitoreos de los sistemas N°1 y N°2 respectivamente, así como de las eficiencias de remoción de la turbiedad que

logra cada sistema y las que logran particular los sedimentadores S1 y S2 respectivamente. Además, en estas tablas se muestran las desviaciones estándar en cada una de las etapas de investigación.

**Tabla 4.7.** Valores promedios, mínimos y máximos de la turbiedad en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°1

TURBIEDAD (UNT)									
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS Y TAMAÑO DE MUESTRA	SISTEMA N°1						REMOCIÓN DE TURBIEDAD	
		AFLUENTE-PROMEDIOS (UNT)	SELECTOR-PROMEDIOS (UNT)	R1 (UNT)	R1-EF (UNT)	S1 (UNT)	EF.SISTEMA 1 (%)	EF. SEDIMENTADOR S1 (%)	
PROMEDIO (UNT)	<b>Etapa 1</b>	176.99 ± 37.39	S/M	102.59 ± 82.20	102.82 ± 129.78	10.9 ± 2.90	94.29 ± 1.17	S/M	
	Tamaño de muestra (n)	28	0	28	28	2	2	2	
	<b>Etapa 2</b>	205.63 ± 45.82	S/M	S/M	81.31 ± 120.92	16.58 ± 9.24	91.69 ± 4.60	49.08 ± 32.12	
	Tamaño de muestra (n)	29	0	0	29	29	29	29	
	<b>Etapa 3</b>	173.94 ± 72.38	300.57 ± 198.25	303.16 ± 218.75	335.33 ± 261.04	20.26 ± 17.65	87.16 ± 13.93	87.83 ± 17.36	
	Tamaño de muestra (n)	23	14	19	23	23	23	23	
	<b>Etapa 4</b>	213.6 ± 103.80	315.05 ± 224.31	337.49 ± 217.36	170.71 ± 104.86	18.77 ± 9.86	89.92 ± 6.43	82.46 ± 16.99	
	Tamaño de muestra (n)	18	18	18	18	18	18	18	
	<b>Etapa 5</b>	216.63 ± 98.88	426.01 ± 272.74	342.45 ± 291.46	300.6 ± 224.63	22.35 ± 28.79	88.49 ± 14.29	85.69 ± 25.07	
	Tamaño de muestra (n)	19	19	19	19	19	19	19	
<b>Etapa 6</b>	176.90 ± 90.79	328.48 ± 212.72	429.53 ± 304.67	237.16 ± 185.94	7.87 ± 4.71	94.01 ± 4.91	95.53 ± 2.24		
Tamaño de muestra (n)	15	15	15	15	15	15	15		
VALOR MÍNIMO (UNT)	1	112.50	S/M	19.60	18.55	8.85	93.46	S/M	
	2	129.35	S/M	S/M	13.20	7.47	72.41	-34.55	
	3	119.50	48.70	23.70	18.30	5.60	32.64	14.75	
	4	90.80	60.90	21.10	32.80	4.38	75.00	36.59	
	5	81.70	130.60	46.95	59.20	2.84	48.75	-10.37	
	6	79.60	82.15	21.90	31.30	2.35	81.66	91.23	
VALOR MÁXIMO (UNT)	1	287.00	S/M	439.90	731.00	12.95	95.11	S/M	
	2	307.00	S/M	S/M	420.00	53.25	96.66	96.39	
	3	466.00	531.95	818.00	985.00	80.50	96.22	99.04	
	4	486.00	1000.00	732.50	441.00	35.75	98.46	97.16	
	5	428.00	980.00	1000.00	691.00	98.60	97.75	99.39	
	6	354.50	722.50	992.50	693.50	18.24	99.10	98.72	

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

**Tabla 4.8.** Valores promedios, mínimos y máximos de la turbiedad en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°2

TURBIEDAD (UNT)							
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS Y TAMAÑO DE MUESTRA	SISTEMA N°2					
		AFLUENTE-PROMEDIOS (UNT)	R2 (UNT)	R2-EF (UNT)	S2 (UNT)	REMOCIÓN DE TURBIEDAD	
						EF.SISTEMA. 2 (%)	EF. SEDIMENTADO R S2 (%)
PROMEDIO (UNT)	<b>Etapa 1</b>	176.99 ± 37.39	95.44 ± 58.35	91.01 ± 95.18	18.30 ± 1.27	90.3 ± 1.29	S/M
	Tamaño de muestra (n)	28	28	28	2	2	2
	<b>Etapa 2</b>	205.63 ± 45.82	S/M	47.24 ± 57.40	17.64 ± 7.01	91.00 ± 4.23	36.5 ± 29.50
	Tamaño de muestra (n)	29	0	29	29	29	29
	<b>Etapa 3</b>	173.94 ± 72.38	285.78 ± 158.09	241.98 ± 153.89	21.97 ± 11.07	86.57 ± 6.89	87.53 ± 8.85
	Tamaño de muestra (n)	23	18	23	23	23	23
	<b>Etapa 4</b>	213.6 ± 103.80	283.04 ± 235.03	151.77 ± 116.81	25.52 ± 9.04	85.97 ± 8.99	69.30 ± 34.48
	Tamaño de muestra (n)	18	18	18	18	18	18
	<b>Etapa 5</b>	216.63 ± 98.88	401.04 ± 211.89	136.93 ± 66.61	23.77 ± 14.03	87.28 ± 8.36	80.18 ± 12.18
	Tamaño de muestra (n)	19	18	19	19	19	19
	<b>Etapa 6</b>	176.90 ± 90.79	592.3 ± 208.90	190.11 ± 116.32	18.78 ± 10.57	85.31 ± 12.83	84.02 ± 15.96
	Tamaño de muestra (n)	15	15	15	15	15	15
VALOR MÍNIMO (UNT)	1	112.50	12.95	14.20	17.40	89.39	S/M
	2	129.35	S/M	13.30	8.63	79.09	-10.50
	3	119.50	86.20	35.80	8.46	66.03	59.92
	4	90.80	23.30	30.60	13.70	54.30	-35.62
	5	81.70	92.65	57.90	6.05	63.75	55.61
	6	79.60	300.00	59.75	6.70	57.81	43.33
VALOR MÁXIMO (UNT)	1	287.00	265.00	522.00	19.20	91.21	S/M
	2	307.00	S/M	263.50	39.10	96.99	96.69
	3	466.00	583.00	625.00	57.40	95.00	95.89
	4	486.00	900.50	546.50	43.45	95.24	96.18
	5	428.00	737.50	303.75	52.90	97.54	95.98
	6	354.50	1000.00	437.00	40.55	97.43	97.30

Fuente: Elaboración propia  
S/M: Sin medir

La tabla 4.9 muestra las eficiencias promedio de remoción de turbiedad, tanto de los sistemas N°1 y N°2 como de los sedimentadores S1 y S2 en particular. Estos promedios y desviaciones estándar se calcularon con la cantidad de datos muestreados durante todas las etapas a lo largo de la investigación.

**Tabla 4.9.** Valores promedio de turbiedad de los reactores R1 y R2, eficiencias promedio de remoción de la turbiedad en los sistemas N°1 y N°2 considerando un tamaño de muestreo poblacional

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	TURBIEDAD DENTRO DE REACTORES		REMOCIÓN DE LA TURBIEDAD			
	R1 (UNT)	R2 (UNT)	SISTEMA N°1		SISTEMA N°2	
			Eficiencia del sistema N°1 (%)	Eficiencia del sedimentador S1 (%)	Eficiencia del sistema N°2 (%)	Eficiencia del sedimentador S2 (%)
Promedio	279.36 ± 246.92	299.12 ± 237.60	90.21 ± 9.79	76.64 ± 28.26	87.70 ± 8.12	67.93 ± 30.34
Valor Mínimo	19.60	12.95	32.64	-34.55	-35.62	54.30
Valor Máximo	1000.00	1000.00	99.10	99.39	97.30	97.54
Tamaño poblacional (N)	98	98	106	106	106	106

Fuente: Elaboración propia

N: es el tamaño poblacional, el cual abarca la cantidad de todos los datos muestreados en todas las etapas a lo largo de la investigación

#### 4.5 MEDICIONES DEL PH

En las tablas 4.10 y 4.11 se muestran los valores mínimos, máximos y promedios del pH en cada uno de los puntos de monitoreos de los sistemas N°1 y N°2 respectivamente.

**Tabla 4.10.** Valores promedios, mínimos y máximos del pH en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°1

pH						
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS Y TAMAÑO DE MUESTRA	SISTEMA N°1				
		AFLUENTE	SELECTOR	R1	R1-EF	S1
PROMEDIO	Etapa 1	7.35	S/M	7.77	7.83	7.55
	Tamaño de la muestra (n)	28	0	28	28	2
	Etapa 2	7.07	S/M	7.15	7.21	7.30
	Tamaño de la muestra (n)	29	0	29	29	29
	Etapa 3	7.12	7.43	7.33	7.30	7.37
	Tamaño de la muestra (n)	23	23	23	23	23
	Etapa 4	7.31	7.65	7.54	7.57	7.58
	Tamaño de la muestra (n)	18	18	18	18	18
	Etapa 5	7.09	7.36	7.33	7.28	7.28
	Tamaño de la muestra (n)	19	19	19	19	19
	Etapa 6	7.05	7.40	7.31	7.32	7.28
	Tamaño de la muestra (n)	15	15	15	15	15
VALOR MÍNIMO	1	6.77	S/M	7.04	6.89	7.37
	2	6.72	S/M	6.63	6.51	6.66
	3	6.72	7.17	6.52	6.49	6.70
	4	6.97	7.46	7.17	7.27	7.26
	5	24.55	24.55	24.55	24.55	7.03
	6	6.68	7.20	7.08	7.01	6.82
VALOR MÁXIMO	1	7.96	S/M	8.38	8.14	7.72
	2	7.34	S/M	7.57	7.55	7.66
	3	7.61	7.70	7.88	7.83	7.75
	4	7.95	7.96	7.84	7.87	7.87
	5	7.54	7.70	7.75	7.72	7.59
	6	7.41	7.61	7.54	7.73	7.54

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

**Tabla 4.11.** Valores promedios, mínimos y máximos del pH en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°2

pH					
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS Y TAMAÑO DE MUESTRA	SISTEMA N°2			
		AFLUENTE	R2	R2-EF	S2
PROMEDIO	Etapa 1	7.35	7.78	7.80	7.63
	Tamaño de la muestra (n)	28	28	28	2
	Etapa 2	7.07	7.37	7.45	7.49
	Tamaño de la muestra (n)	29	29	29	29
	Etapa 3	7.12	7.20	7.20	7.26
	Tamaño de la muestra (n)	23	23	23	23
	Etapa 4	7.31	7.55	7.58	7.51
	Tamaño de la muestra (n)	18	18	18	18
	Etapa 5	7.09	7.21	7.22	7.19
	Tamaño de la muestra (n)	19	19	19	19
	Etapa 6	7.05	7.27	7.23	7.14
	Tamaño de la muestra (n)	15	15	15	15
VALOR MÍNIMO	1	6.77	7.36	6.88	7.56
	2	6.72	6.66	6.81	6.97
	3	6.72	6.56	6.53	6.69
	4	6.97	7.07	7.11	7.14
	5	6.79	6.59	6.87	6.93
	6	6.68	6.89	6.92	6.73
VALOR MÁXIMO	1	7.96	8.40	8.13	7.70
	2	7.34	7.58	7.69	7.73
	3	7.61	7.64	7.67	7.70
	4	7.95	7.93	7.82	7.85
	5	7.54	7.74	7.75	7.66
	6	7.41	7.68	7.48	7.57

Fuente: Elaboración propia  
S/M: Sin medir

La tabla 4.12 muestra el pH promedio de los reactores y sedimentadores de los sistemas N°1 y N°2. Estos promedios se calcularon con la cantidad de datos muestreados durante todas las etapas a lo largo de la investigación.

En la tabla 4.12 se puede apreciar que los valores de pH promedio total del afluente, de R1 y R2 de 7.17, 7.41 y 7.42 respectivamente. Se tiene una reducción promedio del pH entre el afluente y los efluentes de S1 y S2 del 0.94% y 1.34% respectivamente.

**Tabla 4.12.** pH promedio de los reactores y sedimentadores en los sistemas N°1 y N°2 considerando un tamaño de muestreo poblacional

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	pH					
	SISTEMA N°1			SISTEMA N°2		
	Afluente	R1	S1	Afluente	R2	S2
Promedio	7.17	7.41	7.36	7.17	7.42	7.34
Valor mínimo	6.68	6.52	6.66	6.68	6.56	6.69
Valor máximo	7.96	8.38	7.87	7.96	8.40	7.85
Tamaño de muestra poblacional (N)	132	132	106	132	132	106

Fuente: Elaboración propia

N: es el tamaño poblacional, el cual abarca la cantidad de todos los datos muestreados en todas las etapas a lo largo de la investigación

#### 4.6 MEDICIONES DEL OXIGENO DISUELTO

En las tablas 4.13 y 4.14 se muestran los valores mínimos, máximos y promedios del OD en cada uno de los puntos de monitoreos de los sistemas N°1 y N°2 respectivamente. Además, en estas tablas se muestran las desviaciones estándar en cada una de las etapas de investigación.

En la tabla 4.13 se observa que se consiguió un OD promedio en el selector de  $0.24 \pm 0.46$  mg/L.

**Tabla 4.13.** Valores promedios, mínimos y máximos de O.D. en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°1

Oxígeno Disuelto						
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS	SISTEMA N°1				
		AFLUENTE (mg/L)	SELECTOR (mg/L)	R1 (mg/L)	R1-EF (mg/L)	S1 (mg/L)
PROMEDIO (mg/L)	Etapa 1	0.25 ± 0.28	S/M	2.27 ± 1.87	3.49 ± 1.84	6.81 ± 0.78
	Tamaño de la muestra (n)	28	0	28	28	2
	Etapa 2	0.16 ± 0.04	S/M	0.77 ± 0.76	2.1 ± 1.39	4.06 ± 1.20
	Tamaño de la muestra (n)	29	0	29	29	29
	Etapa 3	0.15 ± 0.12	0.45 ± 0.75	4.2 ± 1.67	3.99 ± 1.80	5.20 ± 1.29
	Tamaño de la muestra (n)	23	23	23	23	23
	Etapa 4	0.12 ± 0.02	0.16 ± 0.29	3.73 ± 1.32	3.95 ± 1.13	3.58 ± 1.17
	Tamaño de la muestra (n)	18	18	18	18	18
	Etapa 5	0.16 ± 0.12	0.17 ± 0.22	3.95 ± 1.14	4.10 ± 0.90	3.80 ± 1.09
	Tamaño de la muestra (n)	19	19	19	19	19
	Etapa 6	0.14 ± 0.03	0.1 ± 0.02	3.04 ± 0.58	4.05 ± 0.43	3.43 ± 0.98
	Tamaño de la muestra (n)	15	15	15	15	15
VALOR MÍNIMO (mg/L)	1	0.07	S/M	0.13	0.16	6.26
	2	0.08	S/M	0.08	0.08	1.03
	3	0.09	0.07	0.20	0.11	1.47
	4	0.09	0.07	2.11	1.87	0.63
	5	0.11	0.06	2.18	2.53	1.34
	6	0.11	0.08	2.06	3.10	1.53
VALOR MÁXIMO (mg/L)	1	1.32	S/M	7.41	6.86	7.36
	2	0.30	S/M	2.90	4.60	6.40
	3	0.69	3.19	6.22	6.30	7.09
	4	0.16	1.32	6.90	6.54	5.34
	5	0.64	1.02	7.29	5.94	5.50
	6	0.21	0.13	4.31	4.57	4.51

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

**Tabla 4.14.** Valores promedios, mínimos y máximos de O.D. en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°2

Oxígeno Disuelto					
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS	SISTEMA N°2			
		AFLUENTE (mg/L)	R2 (mg/L)	R2-EF (mg/L)	S2 (mg/L)
PROMEDIO (mg/L)	Etapa 1	0.25 ± 0.28	2.52 ± 2.00	3.00 ± 1.51	6.05 ± 0.36
	Tamaño de la muestra (n)	28	28	28	2
	Etapa 2	0.16 ± 0.04	1.40 ± 0.99	3.20 ± 1.43	3.93 ± 1.26
	Tamaño de la muestra (n)	29	29	29	29
	Etapa 3	0.15 ± 0.12	3.49 ± 1.31	3.53 ± 1.60	5.26 ± 1.15
	Tamaño de la muestra (n)	23	23	23	23
	Etapa 4	0.12 ± 0.02	3.38 ± 0.99	3.80 ± 1.14	3.15 ± 1.26
	Tamaño de la muestra (n)	18	18	18	18
	Etapa 5	0.16 ± 0.12	4.05 ± 0.58	4.52 ± 0.83	3.43 ± 1.44
	Tamaño de la muestra (n)	19	19	19	19
	Etapa 6	0.14 ± 0.03	2.23 ± 1.25	3.63 ± 0.52	3.14 ± 0.51
	Tamaño de la muestra (n)	15	15	15	15
VALOR MÍNIMO (mg/L)	1	0.07	0.23	0.27	5.80
	2	0.08	0.09	0.28	0.54
	3	0.09	0.34	0.20	1.69
	4	0.09	1.46	0.30	0.38
	5	0.11	3.20	2.05	0.54
	6	0.11	0.21	2.65	2.15
VALOR MÁXIMO (mg/L)	1	1.32	8.13	5.56	6.30
	2	0.30	3.37	5.29	5.97
	3	0.69	5.47	6.11	7.28
	4	0.16	5.47	5.70	5.08
	5	0.64	5.21	5.56	5.61
	6	0.21	3.85	4.25	3.81

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.15 muestra el OD promedio en los sistemas N°1 y N°2. Estos promedios se calcularon con la cantidad de datos muestreados durante todas las etapas a lo largo de la investigación. Se puede apreciar que los valores promedio totales de niveles de oxígeno disuelto de R1 y R2, R1.EF y R2.EF, S1 y S2 a lo largo de la investigación fueron de  $2.81 \pm 1.83$  mg/L,  $2.75 \pm 1.58$  mg/L,  $3.49 \pm 1.59$  mg/L,  $3.54 \pm 1.36$  mg/L,  $4.14 \pm 1.34$  mg/L y  $3.93 \pm 1.43$  mg/L respectivamente.

**Tabla 4.15.** OD promedio de los en los sistemas N°1 y N°2 considerando un tamaño de muestreo poblacional

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	Oxígeno disuelto						
	SISTEMA N°1				SISTEMA N°2		
	SEL.	R1	R1-EF	S1	R2	R2-EF	S2
OD Promedio (mg/L)	0.24 ± 0.46	2.81 ± 1.83	3.49 ± 1.59	4.14 ± 1.34	2.75 ± 1.58	3.54 ± 1.36	3.93 ± 1.43
Valor Mínimo	0.06	0.08	0.08	0.63	0.09	0.20	0.38
Valor Máximo	3.19	7.41	6.86	7.36	8.13	6.11	7.28
Tamaño de muestra poblacional (N)	75	132	132	106	132	132	106

Fuente: Elaboración propia

N: es el tamaño poblacional, el cual abarca la cantidad de todos los datos muestreados en todas las etapas a lo largo de la investigación

#### 4.7 MEDICIONES DE LA DBO<sub>5</sub>

En las tablas 4.16 y 4.17 se muestran los valores promedios de la DBO<sub>5</sub> (soluble y/o total) en cada uno de los puntos de monitoreos de los sistemas N°1 y N°2 respectivamente; también se muestran las respectivas eficiencias de remoción y el porcentaje de solubilidad del afluente. Además, en estas tablas se muestran las desviaciones estándar en cada una de las etapas de investigación.

**Tabla 4.16.** Valores promedios DBO5 total y/o soluble. en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°1, así como de sus respectivas eficiencias de remoción

DBO 5											
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS	SISTEMA N°1									
		AFLUENTE			SELECTOR		R1			S1	
		DBO5 TOTAL (mg/L)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	SOLUBILIDAD (%)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 SOLUBLE (%)	DBO5 TOTAL (mg/L)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 TOTAL (%)	DBO5 TOTAL (mg/L)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 TOTAL (%)
PROMEDIO (mg/L)	Etapa 1	202.16 ± 12.04	111.65 ± 13.47	55.18 ± 5.14	S/M	S/M	19.95 ± 7.26	4.41 ± 1.03	90.14 ± 3.44	S/M	S/M
	Tamaño de muestra (n)	3	3	3	0	0	3	3	3	0	0
	Etapa 2	186.98 ± 46.91	78.77 ± 17.60	43.26 ± 10.76	46.6 ± 0.00	-0.45 ± 0.00	16.38 ± 3.23	4.74 ± 1.57	90.58 ± 3.55	16.86 ± 10.32	-11.74 ± 89.77
	Tamaño de muestra (n)	6	6	6	1	1	6	6	6	6	6
	Etapa 3	221.85 ± 18.97	93.67 ± 4.36	42.46 ± 5.60	44.96 ± 1.74	51.99 ± 0.38	14.38 ± 1.57	4.00 ± 0.48	93.47 ± 1.27	12.52 ± 1.70	13.06 ± 2.31
	Tamaño de muestra (n)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Etapa 4	228.62 ± 67.65	88.41 ± 22.64	39.17 ± 5.81	54.38 ± 27.04	28.77 ± 57.80	13.10 ± 5.44	3.47 ± 0.89	94.00 ± 2.57	11.67 ± 4.90	7.97 ± 21.20
	Tamaño de muestra (n)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Etapa 5	176.72 ± 18.27	88.70 ± 17.27	50.50 ± 10.36	49.83 ± 11.64	41.61 ± 19.83	11.62 ± 3.81	4.40 ± 0.97	93.48 ± 1.87	10.53 ± 4.70	9.55 ± 21.15
	Tamaño de muestra (n)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Etapa 6	188.81 ± 25.43	90.96 ± 6.37	48.45 ± 3.19	37.59 ± 20.12	59.32 ± 20.49	13.93 ± 4.82	2.51 ± 0.66	92.60 ± 2.57	9.92 ± 3.58	27.75 ± 12.04
	Tamaño de muestra (n)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

**Tabla 4.17** Valores promedios de la DBO5 total y/o soluble. en cada etapa de los puntos de monitoreo del Sistema N°2, así como de sus respectivas eficiencias de remoción

		DBO5							
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS	SISTEMA N°2							
		AFLUENTE			R2			S2	
		DBO5 TOTAL (mg/L)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	SOLUBILIDAD (%)	DBO5 TOTAL (mg/L)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 TOTAL (%)	DBO5 TOTAL (mg/L)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 TOTAL (%)
PROMEDIO (mg/L)	Etapa 1	202.16 ± 12.04	111.65 ± 13.47	55.18 ± 5.14	26.13 ± 2.01	8.64 ± 0.15	87.03 ± 1.52	S/M	S/M
	Tamaño de muestra (n)	3	3	3	3	3	3	0	0
	Etapa 2	186.98 ± 46.91	78.77 ± 17.60	43.26 ± 10.76	15.96 ± 3.44	4.92 ± 1.42	91.35 ± 1.13	16.08 ± 4.61	-1.61 ± 21.79
	Tamaño de muestra (n)	6	6	6	6	6	6	6	6
	Etapa 3	221.85 ± 18.97	93.67 ± 4.36	42.46 ± 5.60	18.05 ± 2.09	5.82 ± 0.42	91.88 ± 0.25	14.54 ± 1.75	18.34 ± 19.18
	Tamaño de muestra (n)	2	2	2	2	2	2	2	2
	Etapa 4	228.62 ± 67.65	88.41 ± 22.64	39.17 ± 5.81	15.83 ± 4.06	4.82 ± 2.17	92.52 ± 2.73	15.39 ± 4.40	2.65 ± 12.09
	Tamaño de muestra (n)	4	4	4	4	4	4	4	4
	Etapa 5	176.72 ± 18.27	88.70 ± 17.27	50.50 ± 10.36	10.42 ± 1.85	3.83 ± 0.13	94.06 ± 1.22	11.52 ± 3.67	-10.9 ± 31.15
	Tamaño de muestra (n)	4	4	4	4	4	4	4	4
	Etapa 6	188.81 ± 25.43	90.96 ± 6.37	48.45 ± 3.19	8.32 ± 1.31	2.38 ± 0.50	95.50 ± 1.09	7.23 ± 1.19	13.22 ± 3.95
	Tamaño de muestra (n)	3	3	3	3	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

La tabla 4.18 y 4.19 muestran los valores promedio, mínimo y máximo de la DBO<sub>5</sub> soluble y de la DBO<sub>5</sub> total de los reactores R1, R2 y del selector. Además, la tabla 4.18 muestra la eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> soluble del selector, mientras que la tabla 4.19 indica las eficiencias de remoción de la DBO<sub>5</sub> total de los reactores R1 y R2 y las concentraciones de la DBO<sub>5</sub> total de los efluentes de los sedimentadores.

**Tabla 4.18.** Valores promedio de DBO<sub>5</sub> soluble en los sistemas N°1 y N°2 y eficiencia promedio de la remoción de DBO<sub>5</sub> soluble del selector considerando un tamaño de muestreo poblacional

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	DBO <sub>5</sub> soluble			Remoción de la DBO <sub>5</sub> Soluble
	SISTEMA N°1		SISTEMA N°2	SISTEMA N°1
	Selector (mg/L)	R1 (mg/L)	R2 (mg/L)	Eficiencia del Selector (%)
Promedio	47.58 ± 16.76	4.03 ± 1.23	4.95 ± 2.05	40.22 ± 33.38
Valor mínimo	14.7	1.83	1.81	-57.43
Valor máximo	94.22	7.64	8.79	82.95
Tamaño poblacional (N)	14	22	22	14

Fuente: Elaboración propia

N: es el tamaño poblacional, el cual abarca la cantidad de todos los datos muestreados en todas las etapas a lo largo de la investigación

A lo largo de la presente investigación, las eficiencias promedio de la remoción de la DBO<sub>5</sub> de ambos reactores fueron altas, 92.21 ± 2.89% para R1 y 92.08 ± 2.79 % para R2 respectivamente. Mientras que las remociones mínimas de la DBO<sub>5</sub> total fueron de 85.21% y 85.84% respectivamente.

En la tabla 4.19 se observa que los promedios de la DBO<sub>5</sub> total en los efluentes de los sedimentadores fueron de 12.88 ± 6.68mg/L y 13.42 ± 4.59 mg/L, mientras que los valores máximos fueron de 36.05 y 23.65mg/L respectivamente. También se muestra que la concentración promedio de la DBO<sub>5</sub> del afluente a lo largo de la investigación fue de 198.18 mg/L ± 40.12 mg/L, donde la desviación estándar poblacional representa un 20.24 % del promedio

**Tabla 4.19.** Valores promedio, mínimo y máximo de DBO<sub>5</sub> total del afluente, los reactores con sus respectivas eficiencias de remoción, y de los efluentes de los sedimentadores considerando un tamaño de muestreo poblacional

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	DBO <sub>5</sub> total						
	AF	R1		S1	R2		S2
	DBO <sub>5</sub> Total (mg/L)	DBO <sub>5</sub> Total (mg/L)	Eficiencia de remoción R1 (%)	DBO <sub>5</sub> Total (mg/L)	DBO <sub>5</sub> Total (mg/L)	Eficiencia de remoción R2 (%)	DBO <sub>5</sub> Total (mg/L)
Promedio	198.18 ± 40.12	14.89 ± 4.71	92.21 ± 2.89	12.88 ± 6.68	15.47 ± 5.82	92.08 ± 2.79	13.42 ± 4.59
Valor mínimo	125.09	7.82	85.21	6.65	7.04	85.84	5.91
Valor máximo	319.92	28.33	28.33	36.05	27.76	96.75	23.65
Tamaño poblacional (N)	22	22	22	19	22	22	19

Fuente: Elaboración propia

N: es el tamaño poblacional, el cual abarca la cantidad de todos los datos muestreados en todas las etapas a lo largo de la investigación

#### 4.8 MEDICIONES DE SÓLIDOS

La tabla 4.20 muestran los valores promedio, mínimo y máximo de los SST de las líneas de recirculación de ambos sistemas y de los efluentes de S1 y S2, así como las eficiencias de remoción de los SST de los sedimentadores.

La tabla 4.20 muestra que los SST promedio de las líneas de recirculación de los sistemas N°1 y N°2 a lo largo de la investigación son de  $1271.83 \pm 941.86$  mg/L y  $1436.33 \pm 1126.26$  mg/L respectivamente. Así mismo, señala que la eficiencia de remoción promedio de los SST en los sedimentadores S1 y S2 a lo largo de la investigación son de  $87.74\% \pm 9.32\%$  y  $75.38\% \pm 19.42\%$ , llegando a conseguir concentraciones promedio de SST para los efluentes de los sistemas de  $43.11 \pm 34.86$  mg/L y  $53.73 \pm 44.52$  mg/L respectivamente. También muestra que las concentraciones promedio de SSLM del reactor R1 y R2 a lo largo de la investigación fueron de  $832.84$  mg/L  $\pm$   $536.91$  mg/L y  $796.18$  mg/L  $\pm$   $474.38$  mg/L, donde las desviaciones estándar poblacionales representan 64.47% y 59.58% de los valores promedio respectivamente

**Tabla 4.20.** Valores promedio, mínimo y máximo de los SST en las líneas de recirculación de lodos y las eficiencias de remoción en los sedimentadores S1 y S2 y los SST de los reactores R1 y R2, considerando un tamaño de muestreo poblacional

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	SÓLIDOS SUSPENDIDOS							
	SISTEMA N°1				SISTEMA N°2			
	R1	REC.1	S1)	Remoción de SST en S1 (%)	R2	REC.2	S2	Remoción de SST en S2 (%)
	SST (mg/L)	SST (mg/L)	SST (mg/L)		SST (mg/L)	SST (mg/L)	SST (mg/L)	
Promedio	1038.51 ± 612.62	1271.83 ± 941.86	43.11 ± 34.86	87.74 ± 9.32	927.00 ± 552.23	1436.33 ± 1126.26	53.73 ± 44.52	75.38 ± 19.42
Valor mínimo	220.00	153.33	3.33	72.14	400.00	120.00	7.50	31.25
Valor máximo	2643.33	3340.00	130	98.97	2700.00	4570.00	183.33	97.38
Tamaño de muestra poblacional (N)	20	20	19	17	20	20	19	17

Fuente: Elaboración propia

N: es el tamaño poblacional, el cual abarca la cantidad de todos los datos muestreados en todas las etapas a lo largo de la investigación

En las tablas 4.21 y 4.22 se muestran los valores promedios, mínimos y máximos de los SST en cada de los reactores, líneas de recirculación y efluentes de los sedimentadores de los sistemas N°1 y N°2 respectivamente; también se muestran las respectivas eficiencias de remoción de los sedimentadores, así como los valores promedios de los SST al interior de los reactores R1y R2. En estas tablas, además, se muestran las desviaciones estándar en cada una de las etapas de investigación.

**Tabla 4.21** Valores promedios de los SST del reactor, la línea de recirculación y el sedimentador del sistema N°1 y eficiencias de remoción del sedimentador S1

SOLIDOS						
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS Y TAMAÑO DE MUESTRA	SISTEMA N°1				
		R1	REC.1	R1 -EF	S1	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE SST DE S1
		SSLM (mg/L)	SST (mg/L)	SST (mg/L)	SST (mg/L)	Porcentaje (%)
PROMEDIO	ETAPA 1	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
	Tamaño de la muestra (n)	0	0	0	0	0
	ETAPA 2	1348.60 ± 361.10	1973.81 ± 1028.47	685.83 ± 458.58	50.97 ± 44.81	86.15 ± 14.00
	Tamaño de la muestra (n)	7	7	4	6	4
	ETAPA 3	1108.33 ± 898.03	1813.33 ± 1088.94	970.00 ± 999.38	26.67 ± 4.71	94.67 ± 5.00
	Tamaño de la muestra (n)	2	2	2	2	2
	ETAPA 4	569.17 ± 264.55	822.50 ± 524.45	327.50 ± 97.69	41.67 ± 32.83	87.57 ± 8.70
	Tamaño de la muestra (n)	4	4	4	4	4
	ETAPA 5	722.50 ± 487.91	967.50 ± 627.68	530.00 ± 499.53	56.67 ± 46.98	82.77 ± 9.75
	Tamaño de la muestra (n)	4	4	4	4	4
	ETAPA 6	1315.56 ± 1183.10	277.78 ± 110.27	377.78 ± 245.52	22.22 ± 10.18	92.07 ± 6.75
	Tamaño de la muestra (n)	3	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

**Tabla 4.22** Valores promedios de los SST del reactor, la línea de recirculación y el sedimentador del sistema N°2 y eficiencias de remoción del sedimentador S2

SOLIDOS						
PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS Y TAMAÑO DE MUESTRA	SISTEMA N°2				
		R2	REC.2	R2 -EF	S2	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE SST DE S2
		SSLM (mg/L)	SST (mg/L)	SST (mg/L)	SST (mg/L)	Porcentaje (%)
PROMEDIO	ETAPA 1	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
	Tamaño de la muestra (n)	0	0	0	0	0
	ETAPA 2	856.67 ± 407.94	2192.86 ± 1467.31	432.50 ± 313.26	31.81 ± 21.39	87.27 ± 14.38
	Tamaño de la muestra (n)	7	7	4	6	4
	ETAPA 3	1513.33 ± 584.54	1566.67 ± 683.54	836.67 ± 329.98	31.67 ± 16.50	96.32 ± 0.52
	Tamaño de la muestra (n)	2	2	2	2	2
	ETAPA 4	621.67 ± 247.36	990.83 ± 268.93	241.67 ± 124.17	95.00 ± 68.12	60.92 ± 22.77
	Tamaño de la muestra (n)	4	4	4	4	4
	ETAPA 5	744.17 ± 158.19	766.67 ± 853.13	193.33 ± 41.01	78.33 ± 42.03	61.36 ± 13.45
	Tamaño de la muestra (n)	4	4	4	4	4
	ETAPA 6	1351.11 ± 1168.75	1071.11 ± 1130.36	195.56 ± 100.30	24.44 ± 10.18	83.54 ± 14.64
	Tamaño de la muestra (n)	3	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

#### 4.9 MEDICIONES DE LA CARGA MÁSCICA (F/M)

En la tabla 4.23 se muestran los valores promedios y desviaciones estándar de la carga másica (F/M) y el IVL semanal de los reactores R1 y R2 respectivamente; por cada etapa de la investigación, también se muestra los resultados de la carga másica del selector. Los valores del IVL semanal se determinaron los mismos días que se hicieron los ensayos de F/M. En la tabla 4.23 se puede apreciar que las cargas másicas (F/M) promedio de los reactores R1, R2 y el selector a lo largo de la investigación fueron de  $1.53 \text{ d}^{-1} \pm 1.05 \text{ d}^{-1}$ ,  $1.35 \text{ d}^{-1} \pm 0.79 \text{ d}^{-1}$  y  $23.11 \text{ d}^{-1} \pm 16.28 \text{ d}^{-1}$  respectivamente. Las desviaciones estándar poblacionales de las cargas másicas (F/M) de R1 y R2 representan un 68.52% y 58.85% de los valores promedio respectivamente, mientras que, en el selector, la desviación estándar corresponde a un 70.44%; dados estos altos porcentajes se recomienda realizar más mediciones que ayuden a encontrar valores más exactos. Se mantuvo una purga de lodos constante (350 ml según diseño) y diaria en las líneas de recirculación de ambos sistemas, para intentar que los valores de F/M no varíen.

**Tabla 4.23.** Valores promedios de la carga másica (F/M) y del IVL semanal los reactores R1, R2 y el selector

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS Y TAMAÑO DE LA MUESTRA	SISTEMA N°1			SISTEMA N°2	
		R1		SELECTOR	R2	
		F/M ( $\text{d}^{-1}$ )	IVL R1 SEMANAL (ml/g)	F/M ( $\text{d}^{-1}$ )	F/M ( $\text{d}^{-1}$ )	IVL R2 SEMANAL (ml/g)
PROMEDIO	<b>ETAPA 1</b>	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
	Tamaño de la muestra (n)	0	0	0	0	0
	<b>ETAPA 2</b>	<b><math>1.16 \pm 1.10</math></b>	<b><math>261.60 \pm 110.53</math></b>	S/M	<b><math>1.39 \pm 0.72</math></b>	<b><math>150.25 \pm 39.29</math></b>
	Tamaño de la muestra (n)	7	6	0	7	6
	<b>ETAPA 3</b>	<b><math>1.54 \pm 1.32</math></b>	<b><math>340.45 \pm 205.70</math></b>	<b><math>18.16 \pm 9.76</math></b>	<b><math>0.79 \pm 0.34</math></b>	<b><math>268.10 \pm 173.67</math></b>
	Tamaño de la muestra (n)	2	2	2	2	2
	<b>ETAPA 4</b>	<b><math>2.17 \pm 0.93</math></b>	<b><math>230.33 \pm 69.20</math></b>	<b><math>19.02 \pm 7.90</math></b>	<b><math>2.03 \pm 1.35</math></b>	<b><math>423.53 \pm 257.31</math></b>
	Tamaño de la muestra (n)	4	4	4	4	4
	<b>ETAPA 5</b>	<b><math>1.80 \pm 1.31</math></b>	<b><math>245.18 \pm 129.33</math></b>	<b><math>25.72 \pm 26.48</math></b>	<b><math>1.18 \pm 0.29</math></b>	<b><math>306.05 \pm 25.01</math></b>
	Tamaño de la muestra (n)	4	4	4	4	4
	<b>ETAPA 6</b>	<b><math>1.15 \pm 0.96</math></b>	<b><math>178.73 \pm 130.85</math></b>	<b><math>28.37 \pm 20.41</math></b>	<b><math>0.92 \pm 0.47</math></b>	<b><math>387.73 \pm 57.29</math></b>
	Tamaño de la muestra (n)	3	3	3	3	3

Elaboración propia

S/M: Sin medir, n: tamaño muestral por etapa

La tabla 4.24 muestran los valores promedio, mínimo y máximo de la carga másica (F/M) en el selector y los reactores R1 y R2, así como sus respectivos valores de IVL semanales. Estos promedios, mínimos, máximos y desviaciones estándar se calcularon con la cantidad de datos muestreados durante todas las etapas a lo largo de la investigación. A lo largo de la investigación, la carga másica (F/M) promedio del selector fue de  $23.11 \text{ d}^{-1} \pm 16.28 \text{ d}^{-1}$  y se consiguió un máximo valor de  $65.33 \text{ d}^{-1}$ , estos valores son muy altos si se comparan con los valores obtenidos para los reactores R1 y R2.

**Tabla 4.24.** Valores promedio, mínimo y máximo de la carga másica (F/M) en los reactores y el selector, y del IVL semanal, considerando un tamaño de muestreo poblacional

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	Carga másica (F/M) e IVL semanal				
	SISTEMA N°1			SISTEMA N°2	
	SELECTOR	R1		R2	
	F/M ( $\text{d}^{-1}$ )	F/M ( $\text{d}^{-1}$ )	IVL Semanal (ml/g)	F/M ( $\text{d}^{-1}$ )	IVL Semanal (ml/g)
Promedio	$23.11 \pm 16.28$	$1.53 \pm 1.05$	$246.77 \pm 111.46$	$1.35 \pm 0.79$	$290.48 \pm 166.41$
Valor mínimo	10.45	0.38	64.30	0.38	86.60
Valor máximo	65.33	3.63	485.90	4.04	800.00
Tamaño de muestra poblacional (N)	13	20	19	20	19

Fuente: Elaboración propia

N: es el tamaño poblacional, el cual abarca la cantidad de todos los datos muestreados en todas las etapas a lo largo de la investigación

#### 4.10 MEDICIONES DE ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODOS (IVL)

En la tabla 4.25 se muestran los valores promedio, las desviaciones estándar, los valores mínimos y máximos de las mediciones de los IVL diarios de R1 y R2 por cada etapa de muestro. En líneas generales, no se lograron obtener IVL menores a  $150 \text{ ml/g}$ ; pues, el sistema N°1, se lograron IVL promedios diarios de  $382.23 \pm 162.46$ ,  $226.59 \pm 79.05 \text{ ml/g}$  y  $230.00 \pm 94.93 \text{ ml/g}$  para las etapas N°3, N°4 y N°5. Solo en la etapa N°6 se consiguió un IVL promedio de  $146.60 \pm 81.61 \text{ ml/g}$  en el

sistema N°1 con la instalación del selector y una recirculación del 70%, eliminando el bulking y consiguiendo el objetivo de la presente tesis.

Al analizar la tabla 4.25 se observa que antes de la instalar el selector, el promedio de IVL del reactor R1 (IVL= 261.6 ml/g) fue mayor que el de R2 (IVL=150.25 ml/g). A partir de la instalación del selector en el sistema N°1, promediando los valores promedio de las etapas N°3,4,5 y 6, se disminuyó el IVL de R1 (IVL=246.36 ml/g), llegando a ser menor que el de R2 (IVL=318.54 ml/g).

**Tabla 4.25.** Valores promedios, mínimos y máximos del IVL diario a nivel muestral (por cada etapa) de los reactores R1 y R2

PROPIEDAD ESTADÍSTICA	ETAPAS	IVL diario-R1 (ml/g)	IVL diario-R2 (ml/g)	Tamaño de muestra (n)
PROMEDIO	ETAPA 1	S/M	S/M	0
	ETAPA 2	261.60 ± 110.53	150.25 ± 39.29	6
	ETAPA 3	382.23 ± 162.46	299.83 ± 134.54	6
	ETAPA 4	226.59 ± 79.05	381.71 ± 141.61	17
	ETAPA 5	230.00 ± 94.93	323.69 ± 69.53	20
	ETAPA 6	146.60 ± 81.61	268.92 ± 113.31	13
VALOR MINMO	ETAPA 1	S/M	S/M	0
	ETAPA 2	156.50	86.60	6
	ETAPA 3	195.00	145.30	6
	ETAPA 4	130.50	240.00	17
	ETAPA 5	116.30	205.70	20
	ETAPA 6	58.10	148.80	13
VALOR MAXIMO	ETAPA 1	S/M	S/M	0
	ETAPA 2	467.30	188.10	6
	ETAPA 3	485.90	390.90	6
	ETAPA 4	392.30	800.00	17
	ETAPA 5	380.30	503.90	20
	ETAPA 6	321.40	504.70	13

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir, N: Tamaño poblacional (de las 6 etapas), n: tamaño de muestra por etapas

La tabla 4.26 muestran los valores promedio, mínimo y máximo de los IVL diarios de R1 y R2, así como sus respectivos valores de IVL semanales. Estos valores se calcularon con la cantidad de datos muestreados durante todas las etapas a lo largo de la investigación. Se muestra que los valores promedio total de los IVL diarios de R1 y R2 son 221.60 ml/g ± 103.09 ml/g y 309.49 ml/g ± 121.49 ml/g. Las desviaciones estándar poblacionales representan un 46.52% y 39.40% del IVL promedio diario. El IVL de R1 es menos estable que el de R2.

**Tabla 4.26.** Valores promedio, mínimo y máximo del IVL diario en los reactores R1 y R2, considerando un tamaño de muestreo poblacional

<b>PROPIEDAD ESTADÍSTICA</b>	<b>IVL diario-R1 (ml/g)</b>	<b>IVL diario-R2 (ml/g)</b>
PROMEDIO	221.60 ± 103.09	309.49 ± 121.94
VALOR MINIMO	58.1	86.6
VALOR MAXIMO	485.9	800
Tamaño de muestra poblacional (N)	59	59

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

N: Tamaño poblacional (de las 6 etapas)

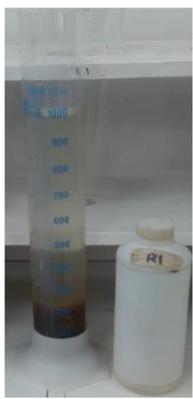
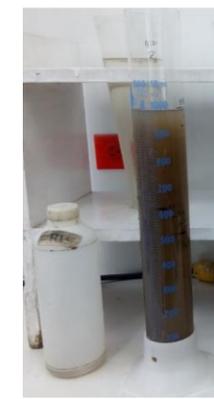
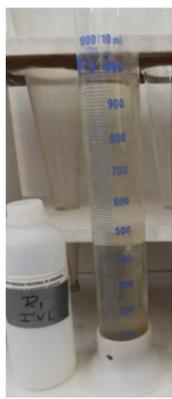
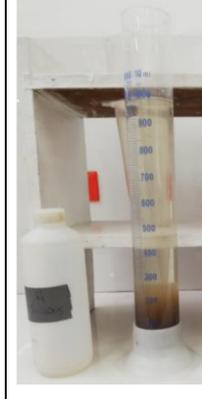
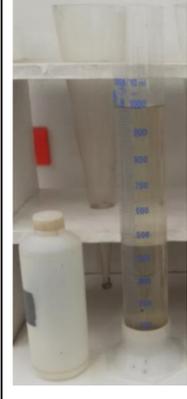
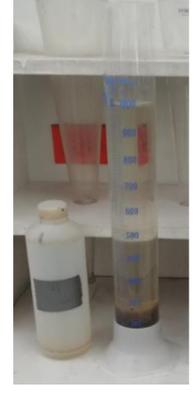
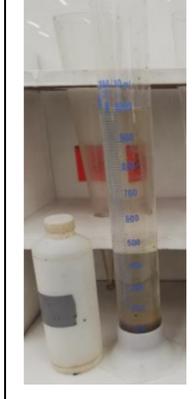
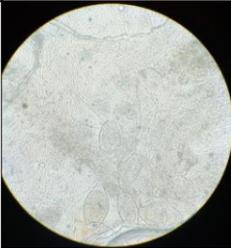
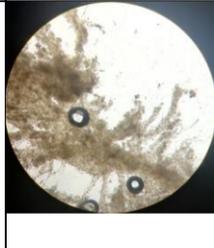
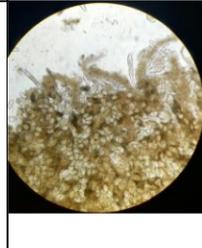
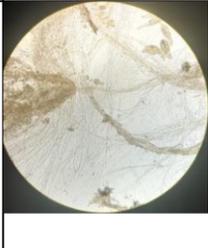
#### 4.11 RESULTADOS CUALITATIVOS

##### 4.11.1 Conteo subjetivo y observación en el microscopio de los filamentos.

Las tablas 4.27, 4.28 y 4.29 muestran la calidad del lodo en los sedimentadores, en la probeta de ensayo y los filamentos observados en el microscopio. Se tiene registro fotográfico a partir de la etapa N°2 en adelante. No se consideró la etapa N°1, pues fue la etapa de arranque y no se contaba con los sedimentadores S1 y S2, ni con el selector y tampoco con las líneas de recirculación.

En la tabla 4.27 se muestra que el puntaje subjetivo promedio correspondiente a la abundancia de filamentos en R1 a partir de la etapa N°3 (desde que se cuenta con el selector) fue de 2 (este valor indica que la abundancia de filamentos es ocasional) Por otro lado, la tabla 4.28 muestra que el puntaje subjetivo promedio correspondiente a la abundancia de filamentos en R2 fue de 5 (este valor indica que la abundancia de filamentos es abundante)

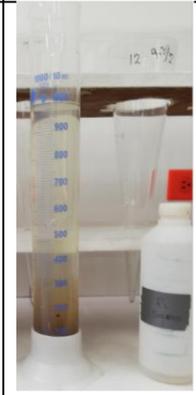
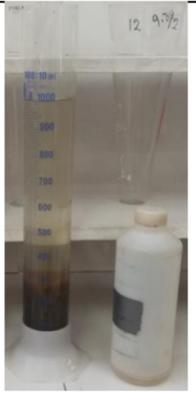
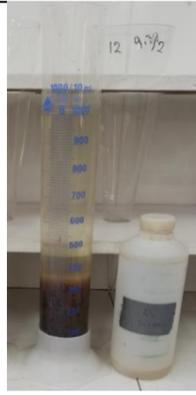
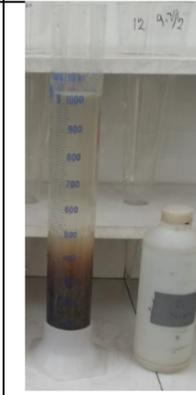
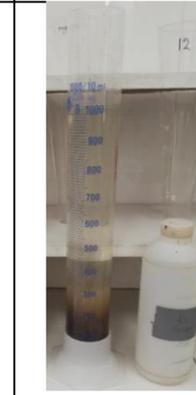
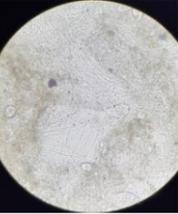
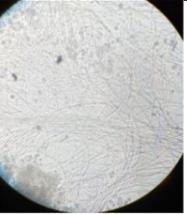
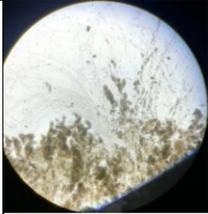
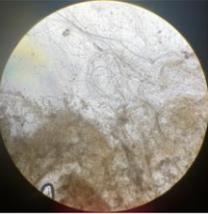
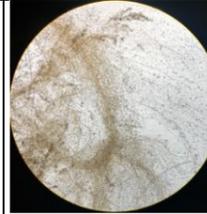
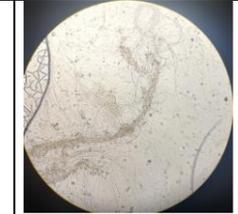
Tabla 4.27. Calidad de lodos y estimación de filamentos del reactor R1

REACTOR-R1	Etapa N°2	Etapa N°3			Etapa N°4	Etapa N°5		Etapa N°6		
	Semana10	Semana 13	Semana 14	Semana 16	Semana 19	Semana 22	Semana 26	Semana 28	Semana 29	Semana 30
Sedimentador S1										
Prueba de sedimentación			Sin registro	Sin registro						
VL semanal (ml/g)	156.50	467.30	Sin registro	Sin registro	138.40	303.60	116.30	321.40	64.30	150.50
Observación de filamentos en microscopio										
Puntaje subjetivo de la abundancia de filamentos (Jenkins, 2006).	6	6	4	2	1	1	0	5	1	2

Fuente: Elaboración propia

\*El puntaje subjetivo de la abundancia de filamentos según Jenkins lo clasifica como 0 (ninguno), 1 (pocos), 2 (algunos), 3 (común), 4 (muy común), 5(abundante) y 6 (excesivo). (Véase tabla 3.6)

Tabla 4.28. Calidad de lodos y estimación de filamentos del reactor R2

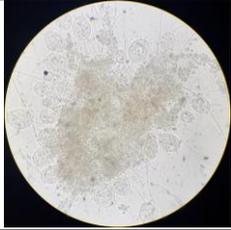
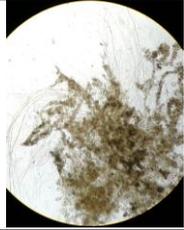
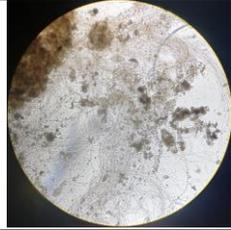
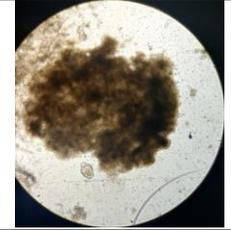
REACTOR- R2	Etapa N°2	Etapa N°3			Etapa N°4	Etapa N°5		Etapa N°6		
	Semana10	Semana 13	Semana 14	Semana 16	Semana 19	Semana 22	Semana 26	Semana 28	Semana 29	Semana 30
Sedimentador S2										
Prueba de sedimentación			Sin registro	Sin registro						
IVL semanal(ml/g)	176.60	188.10	Sin registro	Sin registro	279.10	800.00	308.40	504.70	174.10	484.40
Observación de filamentos en microscopio										
Puntaje subjetivo de la abundancia de filamentos Jenkins, 2006)..	6	6	5	3	5	4	4	5	6	6

Fuente: Elaboración propia

\*El puntaje subjetivo de la abundancia de filamentos según Jenkins lo clasifica como 0 (ninguno), 1 (pocos), 2 (algunos), 3 (común), 4 (muy común), 5(abundante) y 6 (excesivo). (Véase tabla 3.6)

La tabla 4.29 muestra el puntaje subjetivo promedio correspondiente a la abundancia de filamentos a partir de la etapa N°3 en el selector, el cual es de un valor de 3 (este valor indica que la abundancia de filamentos es común) (como se mencionó en Jenkins et al., 2006).

**Tabla 4.29** Calidad de lodos y estimación de filamentos del selector del sistema N°1

SELECTOR	Etapa N°3	Etapa N°4	Etapa N°5	Etapa N°6		
	Semana 13	Semana 19	Semana 26	Semana 28	Semana 29	Semana 30
Observación de filamentos en microscopio						
Conteo subjetivo de filamentos (Jenkins, 2006).	4	3	3	6	1	3

Fuente: Elaboración propia

\*El puntaje subjetivo de la abundancia de filamentos según Jenkins lo clasifica como 0 (ninguno), 1 (pocos), 2 (algunos), 3 (común), 4 (muy común), 5(abundante) y 6 (excesivo). (Véase tabla 3.6)

La tabla 4.30 registra las incidencias que se observaron durante el ensayo del IVL de los reactores, muchas sucedieron durante el desarrollo de la prueba, mientras que otras ocurrieron después de realizar los ensayos.

Tabla 4.30. Registro de incidencias durante el ensayo del IVL

DIA	FECHA	REACTOR N°01		REACTOR N°02	
		IVL (V30/SST) (ml/g)	OBSERVACIONES	IVL (V30/SST) (ml/g)	OBSERVACIONES
57	29/10/2019	280.9	El lodo de R1 interrumpió el ensayo de IVL, porque comenzó a flotar en la probeta antes de cumplirse los 30 minutos de la prueba. Se volvió a realizar la prueba y se obtuvo el IVL al segundo intento. Se observaron microburbujas que hacían flotar el lodo.	178.8	El lodo de R2 interrumpió el ensayo de IVL, porque comenzó a flotar en la probeta antes de cumplirse los 30 minutos de la prueba. Se volvió a realizar la prueba y se obtuvo el IVL al tercer intento. Se observó a nivel macroscópico un lodo conglomerado y filamentoso.
99	26/12/2019	152.5	Operó con normalidad	270.3	El lodo de R2 comenzó a flotar en la probeta después de realizar el ensayo de IVL. Se observó a nivel macroscópico un lodo conglomerado y filamentoso.
114	16/01/2020	154.6	El lodo de R1 comenzó a flotar en la probeta, 10 minutos después de realizar el ensayo de IVL. Se observaron microburbujas que hacían flotar el lodo.	306.5	Operó con normalidad
124	30/01/2020	337.1	El lodo de R1 comenzó a flotar en la probeta después de realizar el ensayo de IVL. Se observaron microburbujas que hacían flotar el lodo.	291.5	Operó con normalidad
140	21/02/2020	58.1	Operó con normalidad	266.4	El lodo de R2 comenzó a flotar 1 hora después de haber realizado el ensayo de IVL. No se observaron microburbujas, pero sí un lodo filamentoso a nivel macroscópico.
143	26/02/2020	64.3	Operó con normalidad	174.1	El lodo de R2 interrumpió el ensayo de IVL, porque comenzó a flotar en la probeta, antes de cumplirse los 30 minutos de la prueba. Se volvió a realizar la prueba y se obtuvo el IVL al segundo intento. Se observó a nivel macroscópico un lodo conglomerado y filamentoso.
144	27/02/2020	87.3	El lodo de R1 interrumpió el ensayo de IVL, porque comenzó a flotar en la probeta, antes de cumplirse los 30 minutos de la prueba. Se volvió a realizar la prueba y se obtuvo el IVL al segundo intento. Se observaron microburbujas que hacían flotar el lodo.	195.3	Al realizarse un segundo intento en el ensayo de IVL, por la interrupción de la prueba por parte de R1; también se pudo observar que el lodo de R2 comenzó a flotar 5 minutos después de la prueba.
145	28/02/2020	92.5	El lodo de R1 interrumpió el ensayo de IVL, porque comenzó a flotar en la probeta, antes de cumplirse los 30 minutos de la prueba. Se volvió a realizar la prueba y se obtuvo el IVL al segundo intento. Se observaron microburbujas que hacían flotar el lodo.	220.8	Operó con normalidad

Fuente: Elaboración propia

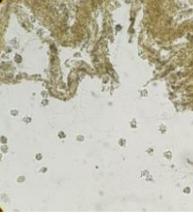
#### **4.11.2 Observación de los microorganismos**

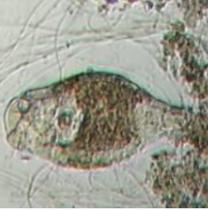
En la tabla 4.31 se mencionan posibles los microorganismos encontrados en los reactores R1, R2 y el selector, el objetivo fue identificar los organismos presentes y analizarlos como bioindicadores de la operación de los sistemas. Dado que no alcanzaba el tiempo para cuantificar los microorganismos mediante celdas de conteo, la tabla 4.31 presenta una escala subjetiva de abundancia de microorganismos (baja, media y alta) a partir de la etapa N°2 en adelante. No se tiene registro fotográfico de la etapa N°1 pues no se contaba con sedimentadores, ni selector y tampoco con la recirculación de lodos; esta etapa corresponde a la fase de arranque de los sistemas N°1 y N°2.

Se encontraron ciliados libres (nadadores y reptantes), rotíferos, nemátodos, protozoarios flagelados, anélidos, ciliados fijos.

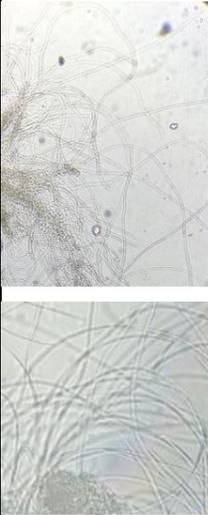
**Tabla 4.31.** Identificación probable de los microorganismos encontrados en los reactores R1, R2 y en el selector.

N°	Imagen	Organismo depurador	Descripción	Componente	Intensidad de la presencia de microorganismos por etapa					
					E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	E.6
I		<b>Possible reino:</b> Protista (Protozoarios) <b>Possible filo:</b> Ciliados libres <b>Possible microorganismo:</b> Holophyra sp	<b>Características del microorganismo:</b> Presentan una forma ovalada, casi esférica. Película celular en campos hexagonales, de cada uno de los cuales sale un cilio. Vacuola contráctil en el extremo posterior y no son típicos de las comunidades estables. <b>Parámetros bioindicadores:</b> Los ciliados libres aparecen cuando los flóculos están en proceso de formación. También pueden indicar una carga excesiva o un nivel bajo de oxigenación al lodo.	R1	S/R	media	media	S/R	S/R	S/R
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	media	S/R	S/R
				R2	S/R	media	S/R	media	S/R	S/R
II		<b>Possible reino:</b> Animal <b>Possible grupo:</b> Metazoos <b>Possible filo:</b> Nemátodo	<b>Características del microorganismo:</b> Es un gusano plano de tamaño importante y compuesto de tejidos. <b>Parámetros bioindicadores:</b> Elevada edad de lodos.	R1	S/R	baja	baja	S/R	baja	baja
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
				R2	S/R	S/R	alta	baja	baja	baja
III	 	<b>Possible reino:</b> Animal <b>Possible filo:</b> Rotífero <b>Possible microorganismo:</b> Philodina sp.	<b>Características del microorganismo:</b> El organismo se mueve por plegamiento y tiene pie con 3-4 elementos, tiene dos manchas oculares y cutícula torácica fina. <b>Parámetros bioindicadores:</b> Parámetros bioindicadores: Edades de fango altas y carga débil (condiciones características de la aireación prolongada)	R1	S/R	baja	baja	baja	alta	alta
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	media
				R2	S/R	S/R	baja	S/R	S/R	media
IV		<b>Possible reino:</b> Animal <b>Possible filo:</b> Rotífera <b>Possible microorganismo:</b> Rotaria sp.	<b>Características del microorganismo:</b> El organismo es opaco a veces de color blanquecino, tiene una forma bucal alargada y pie con 5 elementos o más <b>Parámetros bioindicadores:</b> Edades de fango altas, buena calidad del agua tratada.	R1	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	alta
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
				R2	S/R	S/R	baja	baja	S/R	alta

N°	Imagen	Organismo depurador	Descripción	Componente	Intensidad de la presencia de microorganismos por etapa					
					E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	E.6
V		<b>Posible reino:</b> Protista (Protozoarios) <b>Posible filo:</b> Pequeños Flagelados	<b>Características del microorganismo:</b> Organismos pequeños redondeados o alargados con uno o dos flagelos, tienen movimientos espamódicos <b>Parámetros bioindicadores:</b> Aparecen en las fases iniciales de la colonización de un fango activado. Si llegaran a aparecer en un fango maduro, indicaría un empeoramiento en la depuración del sistema.	R1	S/R	alta	S/R	S/R	S/R	S/R
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
				R2	S/R	S/R	S/R	alta	S/R	
VI		<b>Posible reino:</b> Animal (Anélido) <b>Posible grupo:</b> Metazoos <b>Posible filo:</b> Annelida <b>Posible microorganismo:</b> Aelosoma variegatum	<b>Características del microorganismo:</b> Presenta vacuolas de color rojo, quetas dorsales agrupadas en penachos de 3 o 4. Son muy activos y se retuercen por los flóculos <b>Parámetros bioindicadores:</b> Altas edades de lodos reflejan un buen rendimiento en la depuración	R1	S/R	S/R	baja	baja	baja	baja
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	media	S/R	media
				R2	S/R	S/R	S/R	baja	baja	baja
VII		<b>Posible reino:</b> Protista (Protozoarios) <b>Posible filo:</b> Ciliados libres (nadadores) <b>Posible microorganismo:</b> Paramecium caudatum	<b>Características del microorganismo:</b> Forma de torpedo y esbelta, la extremidad posterior un poco ahusada, que porta un penacho de largos cilios. Tiene un cuerpo de sección. Se alimenta de bacterias. Su presencia es rara en el lodo activado. <b>Parámetros bioindicadores:</b> Su presencia sugiere un fango joven sometido a cargas altas y buena oxigenación.	R1	S/R	S/R	S/R	baja	S/R	S/R
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
				R2	S/R	baja	S/R	baja	baja	baja

N°	Imagen	Organismo depurador	Descripción	Componente	Intensidad de la presencia de microorganismos por etapa					
					E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	E.6
VIII		<b>Possible reino:</b> Protista (Protozoarios) <b>Possible filo:</b> Ciliados fijos <b>Possible microorganismo:</b> Epistylis sp.	<b>Características del microorganismo:</b> Organismo colonial, pedúnculo ramificado. La colonia no es contráctil pero sí los individuos de forma independiente. Pedúnculo estriado longitudinalmente <b>Parámetros bioindicadores:</b> Parámetros bioindicadores: Se desarrolla en sistemas de lodos activados de media carga, proliferan en vertidos industriales.	R1	S/R	S/R	baja	S/R	S/R	alta
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	alta	S/R
				R2	S/R	S/R	alta	S/R	S/R	baja
IX		<b>Possible reino:</b> Protista (Protozoarios) <b>Possible filo:</b> Ciliados fijos <b>Possible microorganismo:</b> Vorticella microstoma	<b>Características del microorganismo:</b> Posee una contricción en zona anterior al peristoma de menor anchura que el cuerpo, pedúnculo fino de aproximadamente 6 veces la longitud del cuerpo. Se nutre de bacterias y flagelados <b>Parámetros bioindicadores:</b> Efluentes de baja calidad, habitual en los procesos de lodos activados, también se desarrollan en condiciones escasas de oxígeno. Es un mal indicador porque posee una versatilidad de ambientes en los que se puede desarrollar, pero se suele presentar durante la formación de fangos. También habita en aguas intensamente contaminadas.	R1	S/R	S/R	S/R	baja	S/R	S/R
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
				R2	S/R	S/R	baja	media	media	media
X		<b>Possible reino:</b> Protista (Protozoarios) <b>Possible filo:</b> Ciliados fijos <b>Possible microorganismo:</b> Opercularia sp	<b>Características del microorganismo:</b> Cuerpo alargado y más estrecho en la parte superior, tiene opérculo. <b>Parámetros bioindicadores:</b> Se desarrolla en medios con alta carga de materia orgánica y baja concentración de oxígeno disuelto, así como también puede indicar presencia de vertidos industriales. Si su aparición es masiva, indica condiciones cambiantes	R1	S/R	S/R	S/R	S/R	alta	media
				SELECTOR	S/R	S/R	media	S/R	S/R	S/R
				R2	S/R	S/R	media	alta	S/R	S/R

N°	Imagen	Organismo depurador	Descripción	Componente	Intensidad de la presencia de microorganismos por etapa					
					E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	E.6
XI		<b>Possible reino:</b> Protista (Protozoarios) <b>Possible filo:</b> Ciliados reptante <b>Possible microorganismo:</b> Aspidisca cicada	<b>Características del microorganismo:</b> Tiene costillas en el lado dorsal y cirnos en el lado ventral. Se desplazan rápidamente sobre los flóculos y nadan en los espacios libres. <b>Parámetros bioindicadores:</b> Buen rendimiento depurador en procesos de baja y media carga, es característico de un fango bien estabilizado	R1	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	alta
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
				R2	S/R	S/R	baja	S/R	S/R	S/R
XII		<b>Possible reino:</b> Animal (Rotífero) <b>Possible filo:</b> Rotífera <b>Possible microorganismo:</b> Lecane sp.	<b>Características del microorganismo:</b> Tiene aspecto globoso o redondeado con caparazón externo en dos placas, un solo elemento libre terminado en 1-2 dedos cortos. Con frecuencia se fija con los dedos y nada alrededor del punto de fijación. Se alimentan de bacterias. <b>Parámetros bioindicadores:</b> Procesos muy estabilizados, en un número controlado indican eficiencia en la depuración	R1	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	media
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	media
				R2	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
XIII		<b>Possible reino:</b> Animal (Rotífero) <b>Possible grupo:</b> Metazoos <b>Possible filo:</b> Rotífera <b>Possible microorganismo:</b> Keratella chochleris	<b>Características del microorganismo:</b> Rotífero carente de pié, con caparazón dividido en capos, abombado por el lado dorsal, aplanado o un poco curvado hacia adentro en el lado ventral. <b>Parámetros bioindicadores:</b> Parámetros bioindicadores: Los rotíferos, a baja concentración, contribuyen con la oxigenación, consolidación de los flóculos y la clarificación del efluente. Por otro lado, altas concentraciones indican un fango envejecido	R1	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
				R2	S/R	baja	S/R	S/R	S/R	S/R

N°	Imagen	Organismo depurador	Descripción	Componente	Intensidad de la presencia de microorganismos por etapa					
					E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	E.6
		<b>Possible reino:</b> Eubacteria (Bacteria) <b>Possible tipo:</b> filamentosa <b>Possible microorganismo:</b> Tipo 0092	<b>Características del microorganismo:</b> La forma de los filamentos son rectos, torcidos o ligeramente curvados, se pueden localizar tanto dentro de los flóculos como fuera de ellos. No presenta vaina, ni ramificaciones, ni movilidad. Los septos celulares no son visibles, al igual que las constricciones celulares. Presentan tricomas cortos La forma celular es rectangular. Tienen respuesta a las tinciones Gram – y Neisser +. Tiene gránulos de azufre S- y PHB-.  <b>Características del microorganismo:</b> Baja carga másica y elevada edad de lodos. Este filamento es causa de disgregación flocular.	R1	S/R	S/R	media	media	S/R	S/R
				SELECTOR	S/R	S/R	S/R	media	S/R	baja
				R2	S/R	alta	alta	S/R	S/R	alta
		<b>Possible reino:</b> Eubacteria (Bacteria) <b>Possible tipo:</b> filamentosa <b>Possible microorganismo:</b> Microthrix parvicella	<b>Características del microorganismo:</b> Forma de filamento: enrollados, largos y finos que crecen atravesando la estructura de los flóculos y pueden ser curvos. Realizan marañas de filamentos y se entrelazan. Sin movilidad, ni ramificaciones, ni vaina ni septos celulares visibles, tienen una respuesta positiva a la tinción de Gram y gránulos Neisser positivos  <b>Parámetros bioindicadores:</b> Bajas cargas másicas, bajas concentraciones de oxígeno disuelto, afluentes ricos en grasas, bajas temperaturas y ph >7	R1	S/R	baja	media	media	s/filam.	media
				SELECTOR	S/R	S/R	alta	media	alta	media
				R2	S/R	alta	alta	alta	alta	alta

Fuente: Elaboración propia/ adaptado de Rodríguez et al. (2002)

S/R significa: Sin Registro

S/filam, Sin filamentos

## **5. CAPITULO V**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS, DISCUSIONES Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS**

En el presente capítulo se analizan los resultados que se obtuvieron durante la investigación y se realizan las discusiones correspondientes comparando dichos resultados con los de las investigaciones mencionadas en los antecedentes referenciales.

#### **5.1 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS**

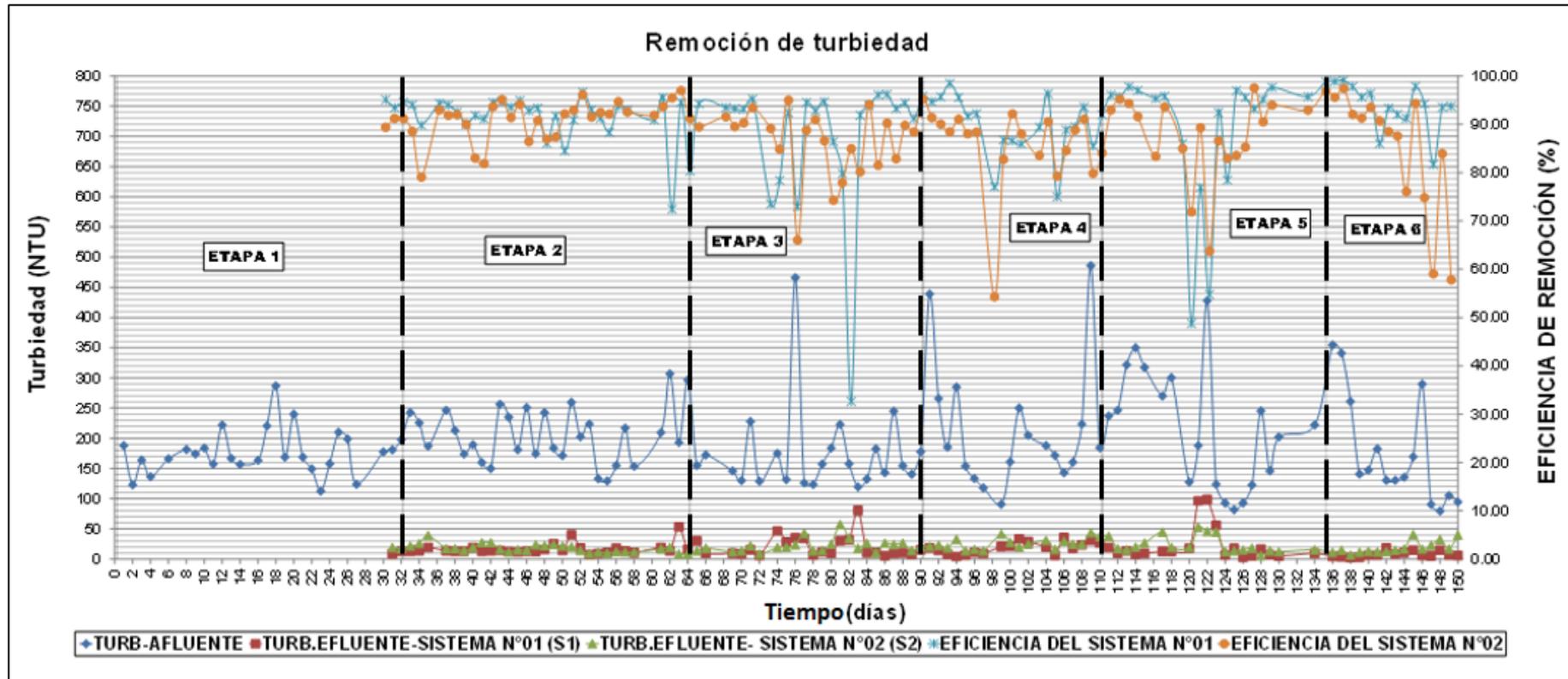
A lo largo de la investigación, los IVL promedio diario de R1 y de R2 fueron de  $221.60 \pm 103.09$  ml/g y  $309.49 \pm 121.94$  ml/g respectivamente. Dado que, de las 59 mediciones realizadas de este parámetro, solo en 18 ocasiones se obtuvo un IVL menor a 150 ml/g para R1, y para R2 esto ocurrió solo en 5 oportunidades. Por tal motivo se rechaza la hipótesis, ya que la instalación del selector aerobio no pudo reducir el IVL del reactor de lodos activados de mezcla completa R1 a valores menores a 150 ml/g.

Sin embargo, con la instalación del selector sí se redujo el IVL de R1 en comparación con R2 en un 28.4%. Demostrando que dicho selector aerobio contribuye a mejorar la calidad de sedimentación, ya que el 30.51% de las veces se pudo obtener un  $IVL < 150$  ml/g en R1, mientras que, sin selector, en R2 esta situación solo se logró conseguir el 8.47% de las veces.

#### **5.2 TURBIEDAD**

En la tabla 4.9 se puede apreciar que, a lo largo de la investigación, el sistema N°01 tiene una desviación estándar mucho menor que el sistema N°2, por lo tanto, la remoción de la turbiedad del sistema N°1 resultó más estable que la del sistema N°2, debido a que en el sistema N°1 se disminuyó, con la instalación del selector, la cantidad de veces en los cuales se presentaban problemas de sedimentación como el bulking filamentoso.

En el gráfico 5.1 se evidencia que la eficiencia de remoción de la turbiedad del sistema N°1 fue mayor que la del sistema N°2; este comportamiento se observó claramente a partir de la etapa N°3 en adelante, ya que el sistema N°1 contó con la instalación del selector, el cual mejoró la calidad de sedimentación de los lodos del efluente reduciendo el bulking e influyó en una mejor remoción de la turbiedad, pues la cantidad de sólidos suspendidos que escapaban por el efluente fue menor que en el sistema N°2. Si bien es cierto que cuando la turbiedad del afluente es alta, las eficiencias remoción de los sistemas N°1 y °N2 disminuyen; esto también sucede cuando la turbiedad del afluente es baja y a su vez las turbiedades de los efluentes S1 y/o S2 se incrementan, o en otras palabras, cuando los efluentes resultan afectados por problemas de sedimentación como el bulking filamentoso o el ascenso de lodos en los decantadores S1 y/o S2.



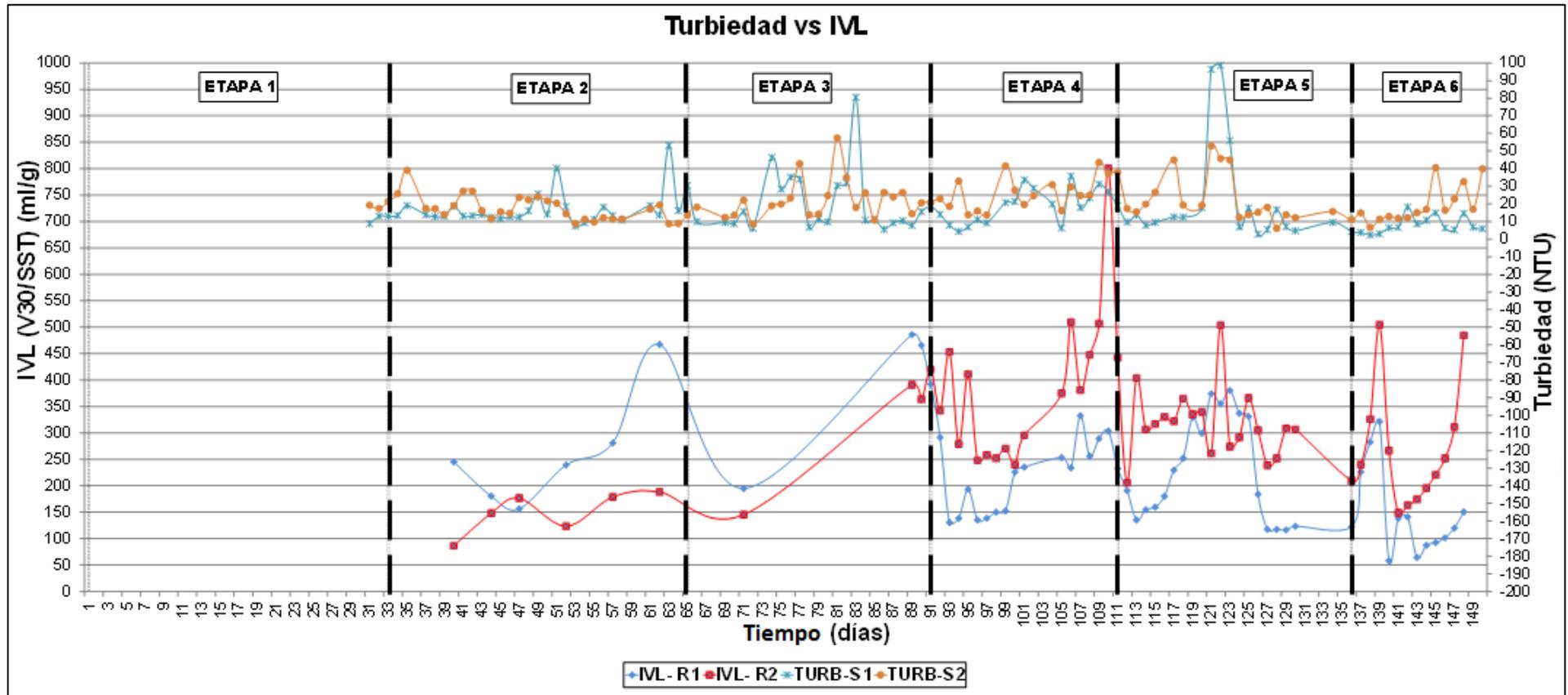
**Gráfico 5.1.** Comparativo de la variación de turbiedad total del afluente y efluente del Sistema N°01 y el Sistema N°02 y sus respectivas eficiencias de remoción

*Fuente: Elaboración propia*

\* En los días en que los valores de turbiedad del afluente son menores a 120 NTU, la paleta mezcladora del motor reductor, ubicado en el tanque de almacenamiento, se rompió

El gráfico 5.2 evalúa el comportamiento las turbiedades de los efluentes de los sedimentadores S1 y S2 según la variación del IVL diario de los reactores R1 y R2. La etapa N°1 (arranque) no contaba con los sedimentadores S1 y S2, y tampoco contaba con las recirculaciones. Durante la etapa N°2 no se había instalado el selector en el sistema N°1 y durante la etapa N°3 sólo se pudo realizar tres mediciones el IVL, debido a que no se podía disponer del Laboratorio de Investigación del Agua (LIA), por lo tanto, no es muy representativo el análisis durante esta etapa. Por el contrario, a partir de la etapa N°4, el gráfico 5.2 evidenció que, con la instalación del selector, en el sistema N°1, el IVL mejoró con respecto al sistema N°2, pues se redujo significativamente, disminuyendo los casos de bulking filamentoso y mejorando la calidad de sedimentación. Consecuentemente, la instalación del selector redujo el bulking y la turbiedad del efluente del sedimentador S1 fue menor que la de S2, pues retuvo una mayor cantidad de SST debido a una mejor calidad de sedimentación.

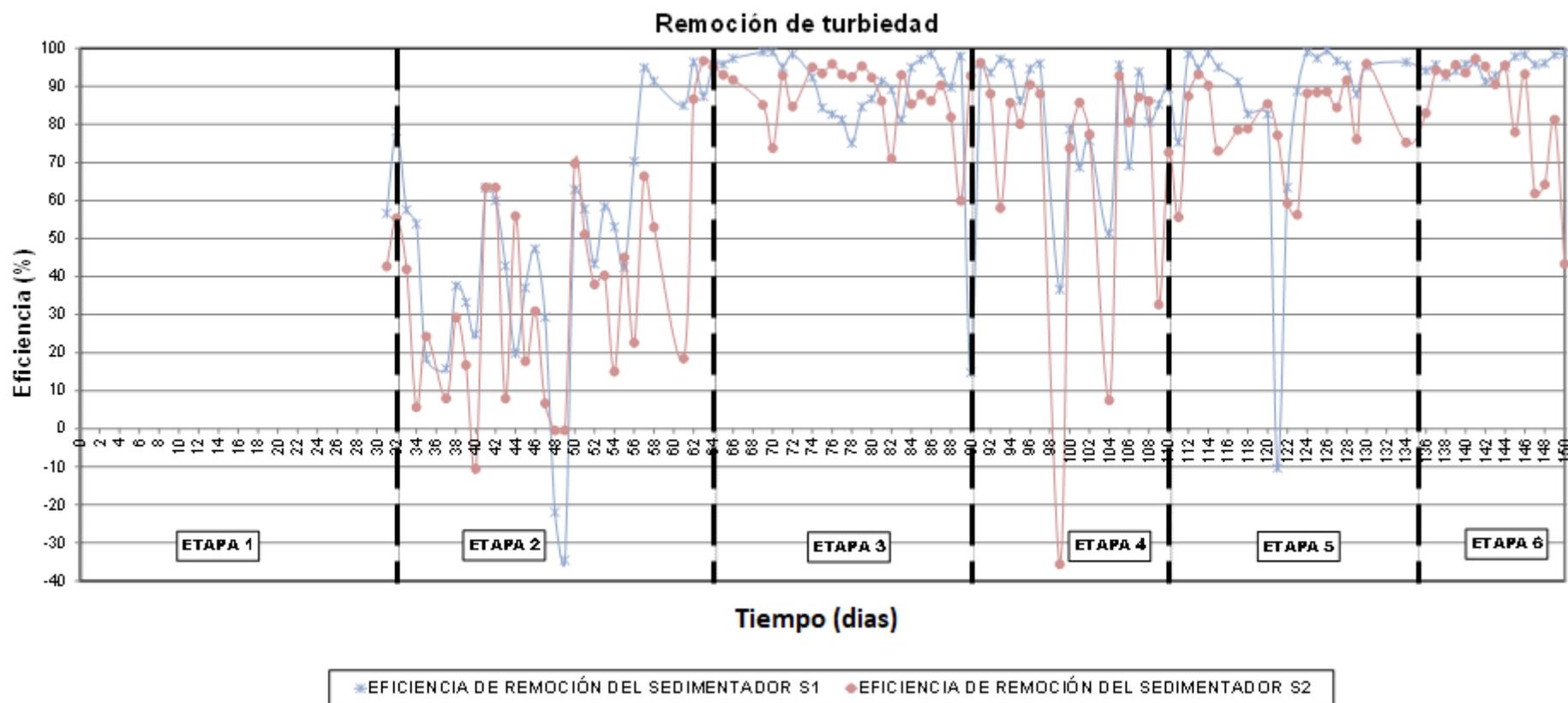
Cuando la turbiedad de los efluentes de los sedimentadores fue menor a 30 NTU, se observó un buen funcionamiento de los sedimentadores; cuando se registraban valores entre 30 NTU y 50 NTU; ya empezaba a observarse un mal funcionamiento de los sedimentadores, pues los SS empezaban a escapar en el efluente; y cuando la turbiedad era mayor a 50 NTU, los sedimentadores no funcionaban bien y se encontraban colapsados, este comportamiento pudo deberse a problemas operativos en la línea de recirculación debido al desgaste por el estrangulamiento de la manguera Tygon o a una mala sedimentación por Pin- point, bulking filamentoso o el ascenso de lodos. Solo en el sistema N°1 se observaron microburbujas ascendentes que elevaban lodos decantados en los sedimentadores secundarios



**Gráfico 5.2.** Comparativo de la variación del IVL de los reactores R1 y R2 con influencia de la turbiedad de los efluentes de los sedimentadores S1 y S2

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 5.3 y la tabla 4.9 muestran que en los sedimentadores S1 y S2, los picos más bajos de las eficiencias de remoción de turbiedad corresponden a valores negativos. Un valor negativo en la eficiencia evidencia que en ese día el efluente del sedimentador tuvo una mayor turbiedad que su afluente; este fenómeno corrobora que, en dicho pico de eficiencia negativa se presenta un problema de sedimentación, pues la única manera en que el efluente sea más turbio que el afluente del sedimentador, es si los SS se están escapando por el vertedero. Incluso, lo más probable, es que se deba al bulking o al ascenso de lodos, ya que el lodo sedimentado se eleva arrastrando los sólidos sedimentables, aumentando los SS del sobrenadante que ingresa con el afluente. Los picos bajos de la eficiencia de remoción de turbiedad indican un problema en la sedimentación debido a problemas operativos. Se puede observar en el gráfico 5.3 que, el sedimentador (S1) del sistema N°1 (el cual cuenta con el selector), tiene menor cantidad de picos bajos que el sedimentador (S2) del sistema N°2. En líneas generales, la eficiencia de remoción de turbiedad del sedimentador S1 es mejor y más estable que la de S2.



**Gráfico 5.3.** Comparativo de las eficiencias de remoción de turbiedad entre los sedimentadores S1 y S2

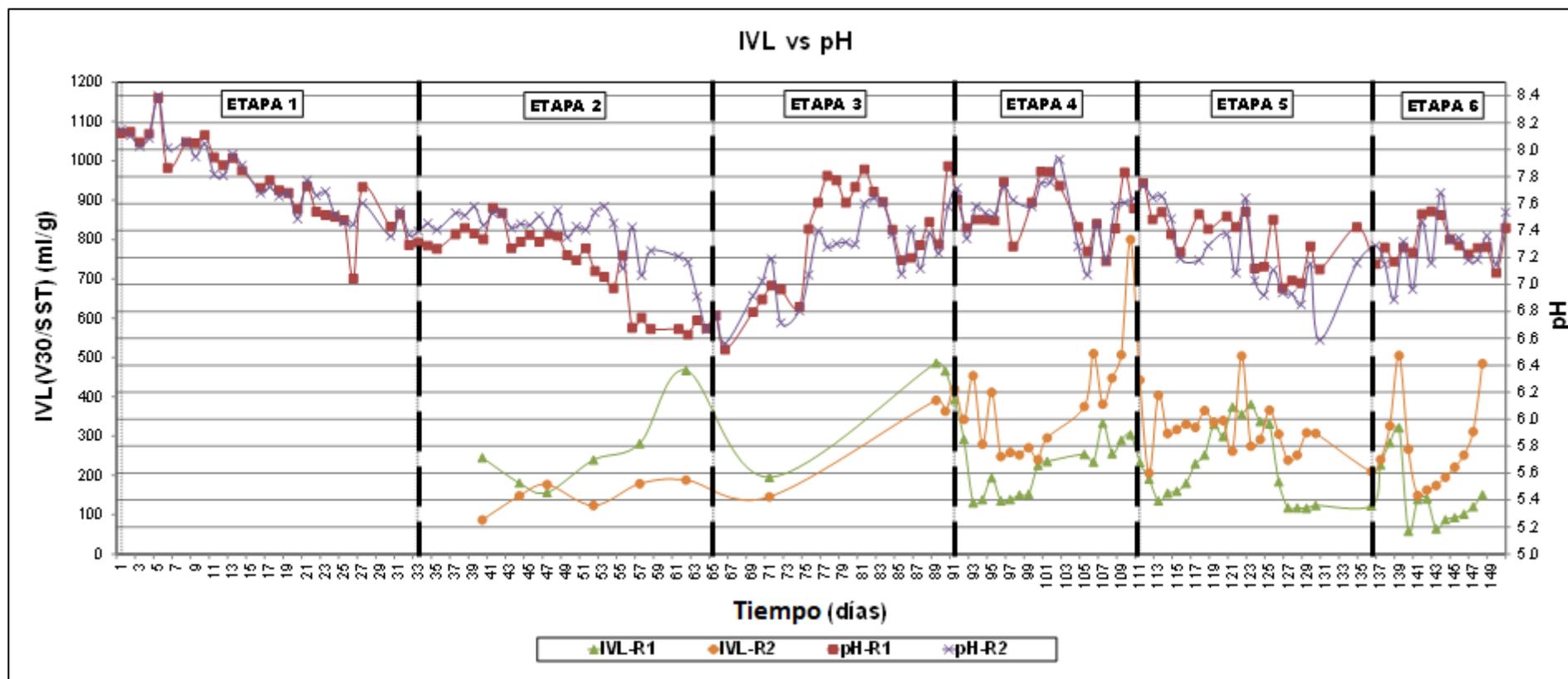
*Fuente: Elaboración propia*

\*Durante la etapa N°1 (arranque) no se registraron mediciones de turbiedad, porque no se habían instalado los sedimentadores

### 5.3 pH

En el gráfico 5.4 se observa en líneas generales que, a los valores altos de pH le corresponden IVL bajos y a los valores bajos de pH le corresponden IVL altos. Esta relación entre el pH y los valores de IVL concuerda con las investigaciones desarrolladas por Dilek & Gülerman (1990) y de Ghanizadeh & Sarrafpour (2001), ya que ellos también encontraron una relación inversa entre el pH y el IVL. Dicho comportamiento del IVL respecto al pH se debe a que la mala calidad de sedimentación (valores altos de IVL) se favorece cuando los niveles de pH disminuyen. Sin embargo, a pesar de que se observa dicho comportamiento, se deduce que los casos de bulking que se presentaron ( $IVL > 150$  ml/g) no fueron causados debido a la formación de hongos,  $pH < 6$  (Pipes, 1974) (tal como se menciona en Bitton, 2005); pues en el gráfico 5.4 y en la tabla 4.12 se evidencia que los valores mínimos del pH de R1 y R2 fueron superiores a 6.

El gráfico 5.4 y la tabla 4.12 también evidencian que a partir de la etapa N°3 en adelante, el pH promedio de R1 se tornó mayor que el de R2 debido a que el sistema N°1 contó con el selector, el cual redujo los valores del IVL promedio de R1 respecto a R2, mejorando la calidad de sedimentación en el sedimentador S1 y mejorando la recirculación de la biomasa hacia el tanque de aireación.



**Gráfico 5.4.** Comparativo del IVL de los reactores R1 y R2 con la influencia del pH de los reactores R1 y R2

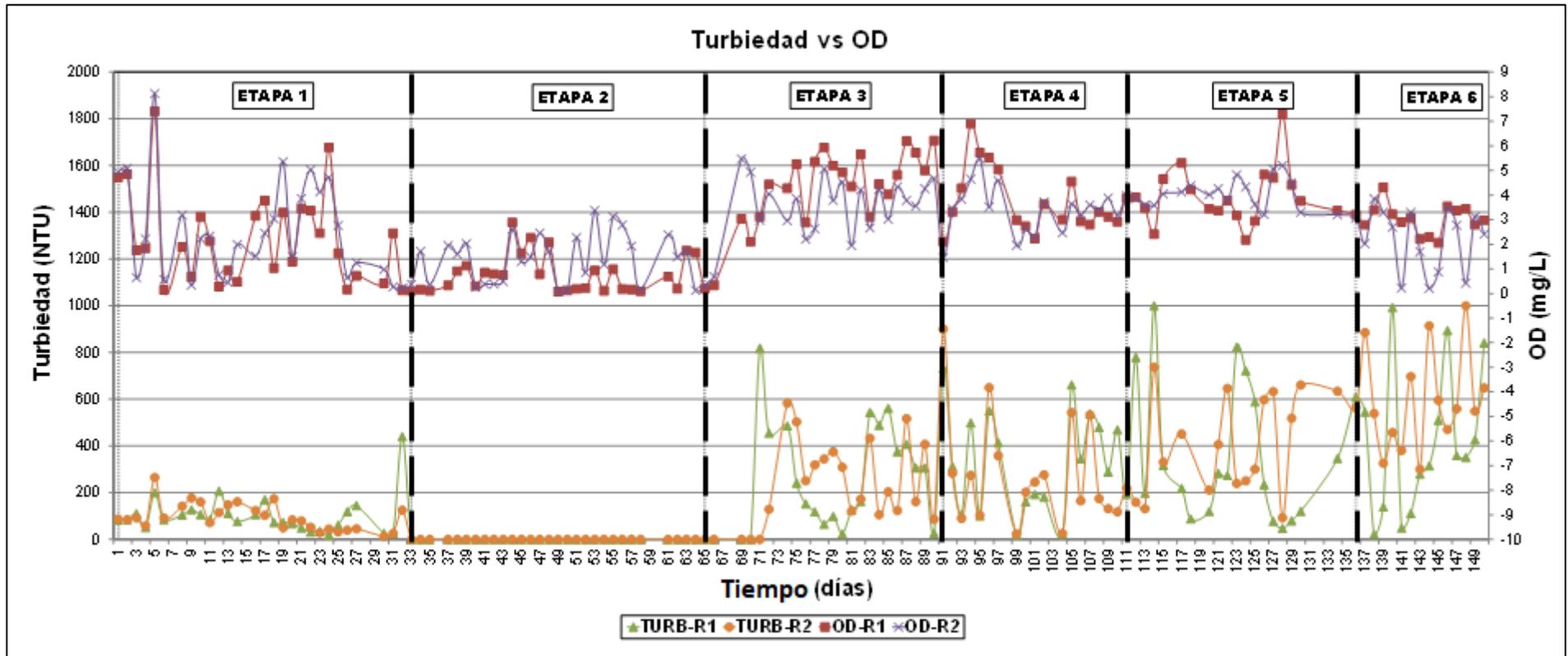
*Fuente: Elaboración propia*

## 5.4 OXIGENO DISUELTO

Metcalf & Eddy (2013) se debe tener una concentración de OD mínima de 2mg/L en los tanques de aireación para evitar el bulking. El gráfico 5.5 muestra que, a lo largo de la presente investigación, de OD registrados en los reactores R1 y R2 fueron adecuados ya que eran valores mayores a 2mg/L; a excepción de la etapa N°2, en la cual los valores registrados de OD fueron menores que 2 mg/L. Pero esta anomalía en la medición del OD en la etapa N°2 no se debió a la operación de los reactores, sino a las interferencias en la medición del OD.

Durante el arranque (etapa N°1), los licores mezclados de R1 y R2 no tenían de niveles de turbiedad altos porque no se contaba con la recirculación de lodos y estos estaban en una etapa de formación, pero cuando se empezó a recircular los lodos en la etapa N°2 los niveles de turbiedad de los reactores R1 y R2 aumentaron significativamente por la producción de lodos dentro de los tanques de aireación. El gráfico 5.5 muestra que la turbiedad en la etapa N°2 no fue medida dentro de R1 y R2 porque sus niveles eran tan altos que el turbidímetro no podía registrar la medición a causa de los altos niveles de SST. Se descubrió al culminar la etapa N°2 que, si se medía el oxígeno disuelto al sobrenadante de la muestra, después de haber dejado sedimentar el lodo, el oxígeno disuelto aumentaba y se conseguía valores dentro del rango adecuado, razón por la cual desde la etapa N°3 en adelante se volvieron a registrar valores de OD mayores a 2mg/L en ambos reactores. Es preciso señalar que los niveles de OD se midieron utilizando una sonda luminiscente marca HACH modelo LDO10105. Para dicha sonda, los SST son una interferencia en la medición del OD, pues se mide con el paso de la luz.

El gráfico 5.5 permitió descubrir como afectaba la turbiedad en la medición del OD dentro de los reactores y permitió corregir la interferencia de los SST en la medición de OD. El gráfico 5.5 evidenció que los niveles de OD de R1 y R2 no fueron la causa de los casos de bulking ocurridos ( $OD > 2$  mg/L), ya que estos fueron mayores a los 2 mg/L y también muestra que, a los picos bajos de OD, le corresponde los picos altos de la turbiedad, dado que a mayor biomasa (lodos) hay un mayor consumo de OD

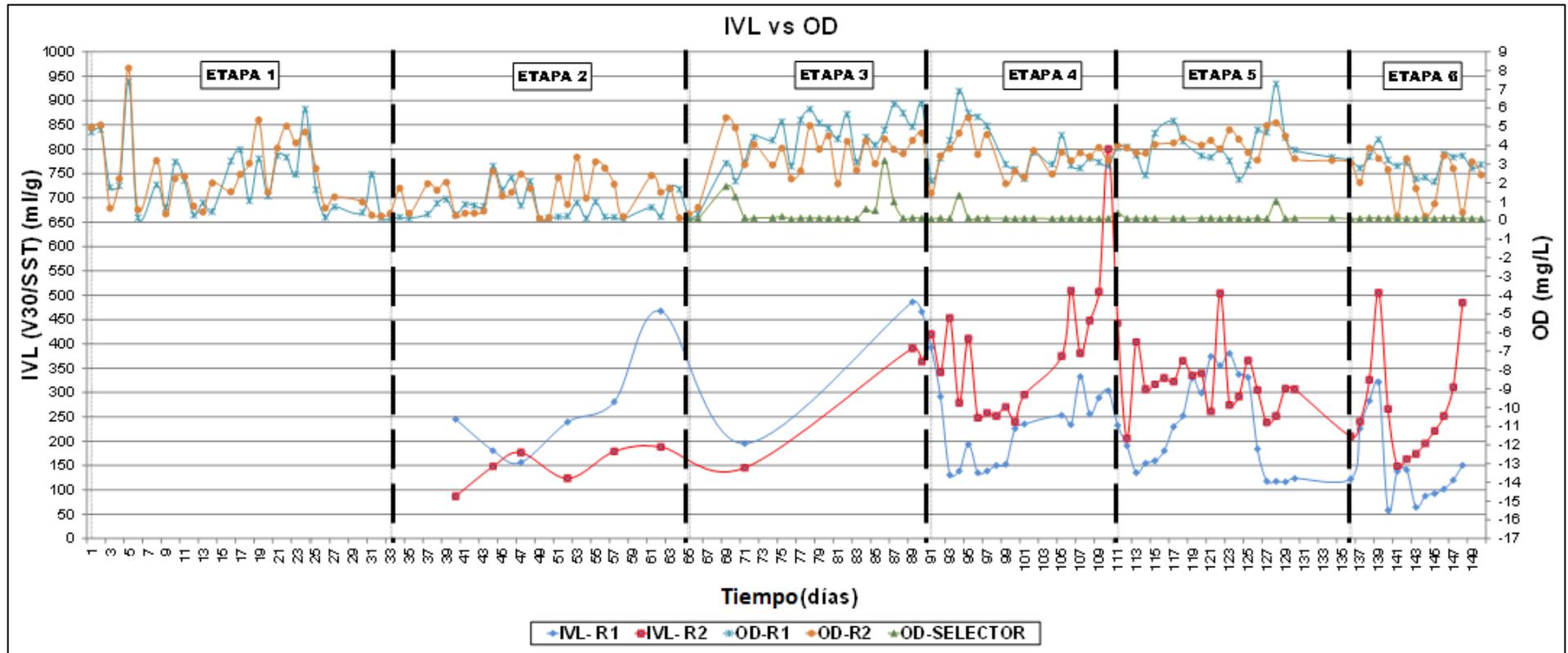


**Gráfico 5.5.** Variación de la turbiedad en los reactores R1 y R2s con influencia del OD  
*Fuente: Elaboración propia*

Según la investigación de Martins et al. (2003), un bajo nivel de oxígeno (menor a 1 mg/L) en el selector aireado compartimentado se debe a que las tasas de respiración inicial son muy altas y no resuelve adecuadamente el problema del bulking. El gráfico 5.6 compara el IVL de los reactores R1 y R2 con sus respectivos niveles de OD y del selector. Se evidencia que el OD del selector, a lo largo de la investigación, fue menor a 1mg/L, a excepción de oportunidades ocasionales; por lo tanto, a pesar de que el selector usó toda la capacidad de su aireador, no se pudo elevar el nivel de OD debido a su alta carga orgánica y sus pequeñas dimensiones. Por tal motivo, el rendimiento del selector no fue el óptimo y no se pudo conseguir en R1 valores de  $IVL < 150$  ml/g la mayor parte del tiempo. Si bien se redujo el IVL de R1 en comparación con el IVL de R2 y se mejoró la calidad del lodo; no se pudo erradicar los casos de bulking por completo ( $IVL < 150$  ml/g).

Al no poder elevar la concentración de OD en el selector, los organismos pueden haber utilizado parte del oxígeno de los nitratos como fuente, y puede ser la razón por la cual en el sistema N°1 se evidenciaron microburbujas en el lodo activado.

En el gráfico 5.6, también se evidencia que, a partir de la etapa N°4, el IVL de R1 es menor que el IVL de R2, debido a que el sistema N°1 contaba con el selector instalado previo al tanque de aireación y el bulking se mejora. También cabe resaltar que la instalación del selector en el sistema N°1 se realizó en la etapa N°3; pero debido a que, en casi toda esta etapa, no se contaba con la disponibilidad del LIA-FIA-UNI, solo se midieron 3 valores de los IVL durante toda la etapa. Por lo tanto, la etapa N°3 no resulta representativa en lo que respecta a la evaluación del IVL, por esta razón, se realizó la etapa N°6 a la misma recirculación que la etapa N°3 ( $R=70\%$ ).



**Gráfico 5.6.** Comparativo del IVL entre los reactores R1 y R2 con influencia sus niveles de OD durante la operación  
*Fuente: Elaboración propia*

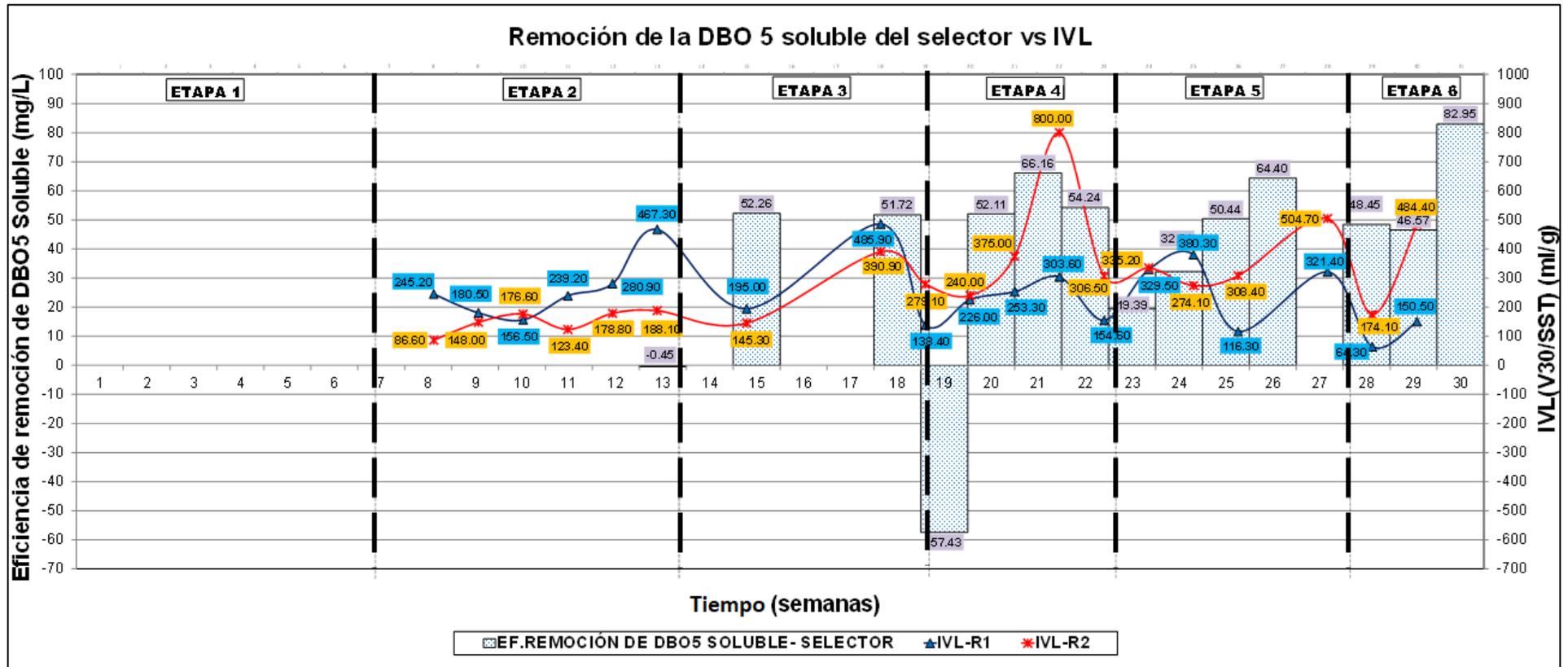
## 5.5 DBO5

### 5.5.1 DBO<sub>5</sub> Soluble

Jenkins, Richard y Daigger (2003) indican que, cualquier tipo de selector tendría que proporcionar un tiempo de contacto necesario para que por lo menos un 80% de la materia orgánica soluble sea rápidamente adsorbida por las bacterias formadoras de flóculos para evitar el bulking. A diferencia de lo mencionado por Jenkins et al. (2003), la tabla 4.18 de la presente tesis señala que la eficiencia promedio de remoción de DBO5 soluble en el selector a lo largo de la presente investigación fue de  $40.22 \pm 33.38$  % (valor menor al 80%); esta diferencia podría deberse a que en el selector no se logró elevar el OD por encima de 1mg/L y podría conllevar a que el IVL de R1 no llegue a alcanzar valores menores a 150 ml/g la mayoría de las veces.

El gráfico 5.7 muestra la variación del IVL de R1 respecto al porcentaje de remoción de sustrato fácilmente biodegradable (DBO5 soluble) por parte del selector, pero a su vez lo compara con el IVL de R2, el cual no cuenta con selector previo. No se observa ninguna relación entre los valores de IVL y la eficiencia de remoción de DBO5 soluble en el selector, ya que a los picos más altos de remoción no le corresponden necesariamente los picos más bajos del IVL de R1 y viceversa. Se puede deducir que la remoción de la DBO5 soluble no es un factor significativo para la reducción del IVL. En el gráfico 5.7 se observó en dos ocasiones que eficiencia de remoción de la DBO5 soluble resultó negativa, estos valores negativos se deben a cortocircuitos debido a la rápida acumulación de biomasa y el pequeño volumen del selector

Cabe señalar que la etapa N°3 no es representativa respecto a estos parámetros, pues solo pues solo se pudieron registrar dos datos porque no se tenía disponibilidad el LIA-FIA-UNI.



**Gráfico 5.7.** Comparativo de la variación del IVL de los reactores con influencia de la eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> soluble durante el almacenamiento del sustrato en el selector

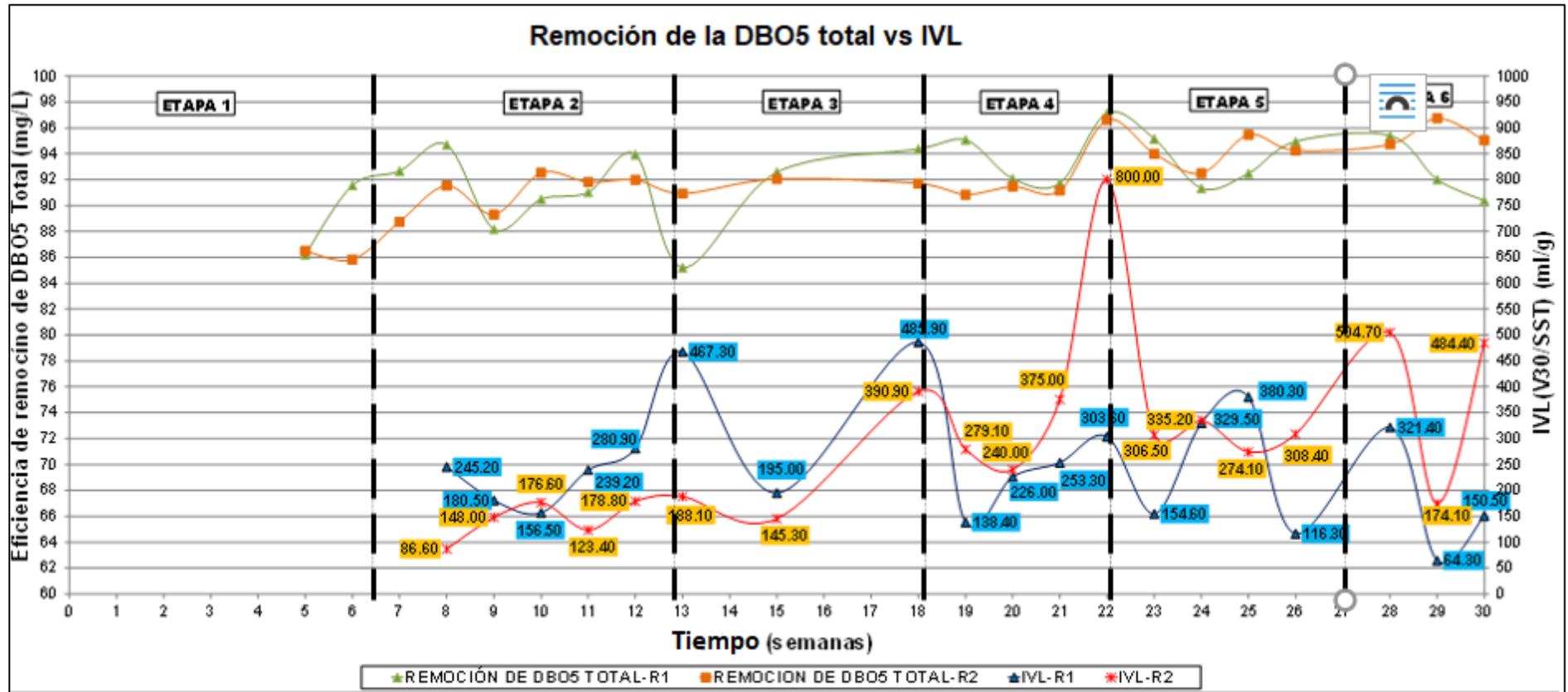
*Fuente: Elaboración propia*

### 5.5.2 DBO<sub>5</sub> Total

Tal como se observa en la tabla 4.19, los dos reactores de lodos activados cumplen con el rango de remoción de la DBO<sub>5</sub> total (70-95%) que exige la normativa de plantas de tratamiento de aguas residuales (RNE - OS.090) para este tipo de tecnologías.

Por otro lado, la normativa de los LMP de los efluentes de las plantas de tratamiento, D.S. N°003-2010-MINAM, indica que no se deben sobrepasar los 100mg/L de DBO<sub>5</sub>, para no atentar con salud de las personas y el medio ambiente. Por lo tanto, se observa que ambos reactores implementados en la investigación cumplen con la normativa de los LMP (ver tabla 4.19).

El gráfico 5.8 compara la variación semanal de la eficiencia de la DBO<sub>5</sub> total de los reactores R1 y R2 en función a sus respectivos valores de IVL. En líneas generales, se observa en el gráfico 5.8 que, a partir de la etapa N°3 (se cuenta con la instalación del selector), los picos altos de eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> total del reactor R1 les corresponde los picos bajos de IVL y viceversa. El aumento de la eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> total de R1 se debe a que, hay una mejor recirculación de la biomasa al reactor cuando el IVL disminuye, ya que esto indica una mejor sedimentación de lodos del sedimentador S1. No obstante, durante la etapa N°2, la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> total de R1 aumenta paralelamente con sus valores de IVL, pues aún no estaba instalado el selector en el sistema N°1. Por otro lado, la eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> total de R2 no presenta una relación clara con los valores de sus IVL.



**Gráfico 5.8.** Comparativo de la variación de la remoción de la DBO<sub>5</sub> total entre los reactores R1 y R2 con influencia de sus respectivos valores de IVL

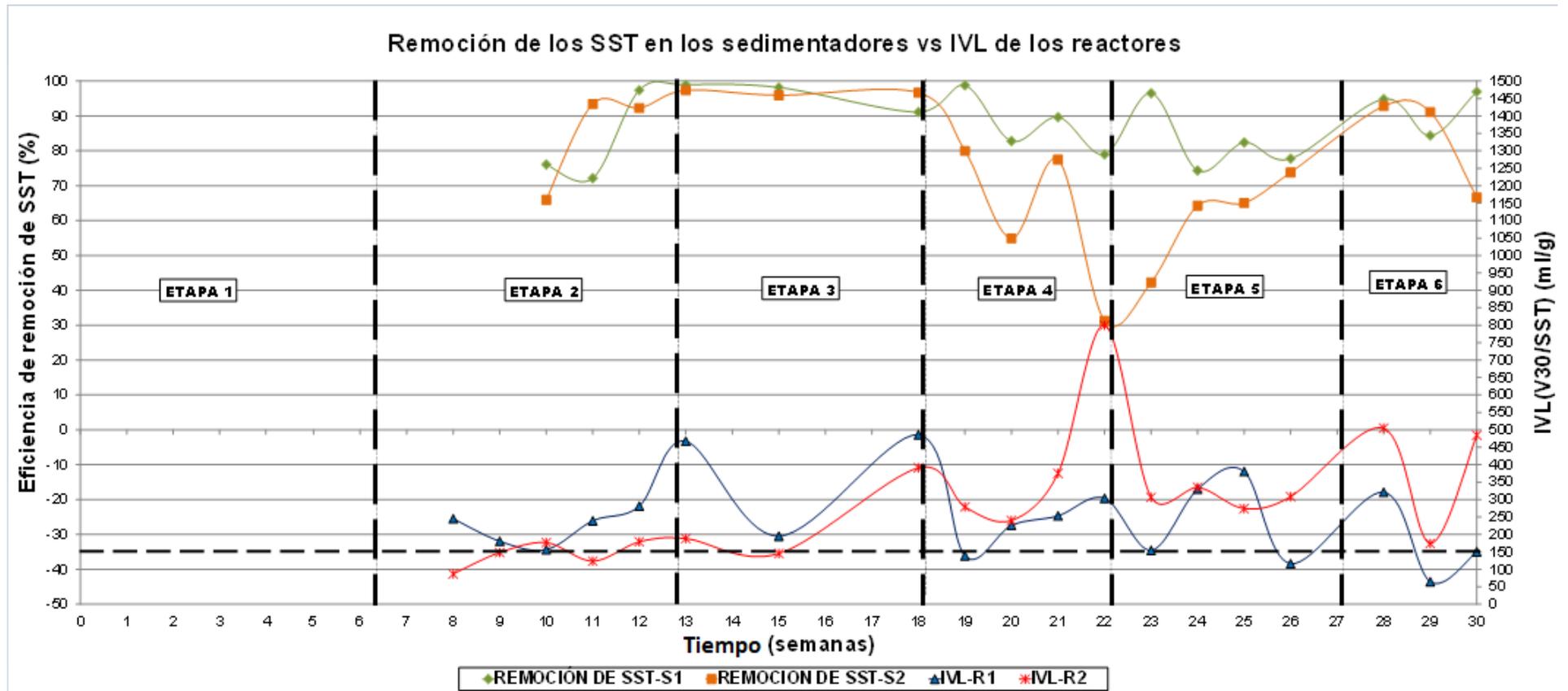
Fuente: Elaboración propia

## 5.6 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Siendo 150 mg/L el LMP que establece el D.S N°003-2010-MINAM para los SST, se observa En la tabla 4.20 que ambos sistemas llegan a un tratamiento adecuado que consigue valores menores a los establecidos por la normativa.

En el gráfico 5.9 se evalúa la eficiencia de remoción de los SST de los clarificadores S1 y S2, esta eficiencia se incrementa únicamente a partir de la instalación del selector en el sistema N°1 (se cuenta desde la etapa N°4, pues se tiene pocos datos en la etapa N°3), dado que la calidad de sedimentación mejora al reducir los valores de IVL en R1.

Se supone que a los picos altos y bajos de IVL les tendrían que corresponder picos bajos y altos de eficiencia con respecto a la remoción de SST en los efluentes de los sedimentadores respectivamente, pero contrario a lo esperado de la investigación de Ghanizadeh y Sarrafpour (2001), en el gráfico 5.9, se observó que en algunas semanas esto no ocurre, y se puede deber a que cuando se presentaba bulking o ascenso de lodos, muchas veces el lodo que flotaba era tan espeso que se acumulaba y se retenía en el contorno de los vertederos de salida dejando escapar solo los sólidos flotantes más pequeños y no escapaban todos los sólidos flotantes en su totalidad.

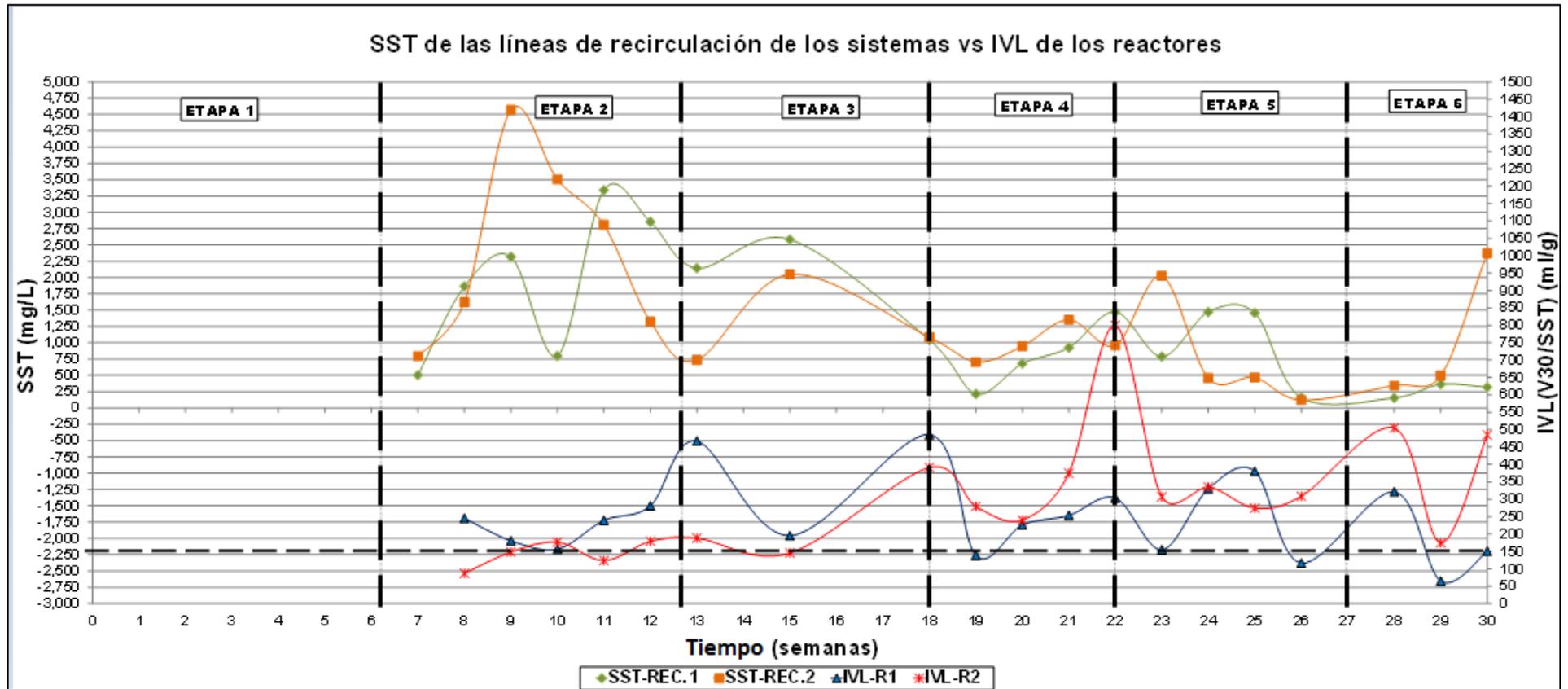


**Gráfico 5.9.** Comparativo de las eficiencias de remoción de los SST de los sedimentadores S1 y S2 con influencia de los valores de IVL de los reactores R1 y R2, para evaluar la calidad de la sedimentación.

*Fuente: Elaboración propia*

Los SST de las recirculaciones en la presente tesis están en un rango de 120.00 mg/L a 4600 mg/L, y se encuentran fuera del rango recomendado por Von Sperling (2007a), que propone concentraciones de 8000 mg/L a 12000 mg/L.

Según el gráfico 5.10, los picos altos de IVL de R1 y R2 no corresponden necesariamente a los picos bajos de la concentración de SST en las líneas de recirculación para ambos sistemas y viceversa; de ello se entiende que cuando hay problemas de bulking (picos altos de IVL), la concentración del lodo recirculado no siempre disminuye, a veces aumenta. Esto se debe a que, la toma de muestras, en sí no fue tan representativa, ya que durante el muestreo de las líneas de recirculación se observó que el lodo del fondo de los sedimentadores era evacuado a los reactores de forma intermitente a pesar de que la recirculación se efectuaba en forma continua; pues para que se desarrolle el espesamiento de los lodos se requiere que transcurra tiempo. Por lo tanto, las muestras simples que se tomaron en las líneas de recirculación no fueron tan representativas como lo serían unas muestras compuestas. No obstante, por razones de la duración de los ensayos y de la disponibilidad del laboratorio LIA-FIA-UNI, solo se pudieron tomar muestras simples. No obstante, este comportamiento de los SST en las líneas de recirculación también se podría deber al ascenso de lodos debido a la presencia de microburbujas, ya que este problema no se refleja necesariamente durante el ensayo de IVL que dura solo 30 minutos, mientras que la estadía de los lodos en los sedimentadores es mayor y permite que el lodo flote desde el fondo justo cuando se está realizando la toma de muestras en las líneas de recirculación.



**Gráfico 5.10.** Comparativo de la variación de los SST de las líneas de recirculación del Sistema N°1 y el Sistema N°2 con influencia de los valores de IVL de los reactores R1 y R2.

*Fuente: Elaboración propia*

## 5.7 CARGA MÁSCICA (F/M)

Los valores altos de carga másica (F/M) en el selector se debe a que sus dimensiones son muy reducidas. La alta carga másica provoca que se sature rápidamente el selector debido a la formación y acumulación de lodos de gran tamaño. A pesar de que se instalaron válvulas de purga de lodos desde la concepción del diseño del selector, el lodo formado era tan grande que atoraba las tuberías de purga y la única solución fue vaciar todo del lodo del selector manualmente. Las saturaciones del selector marcaron las fases de cierre de cada etapa, pues cada vez que esto pasaba había cortocircuitos en esta unidad y también se atoraba la tubería de salida, provocando aniegos y que el reactor R1 se quede sin alimento. El selector solía saturarse a partir de la tercera o cuarta semana. La fotografía 5.1 muestra la saturación del selector.



**Fotografía 5.1.** Saturación del selector debido a la formación y acumulación de lodos de gran tamaño

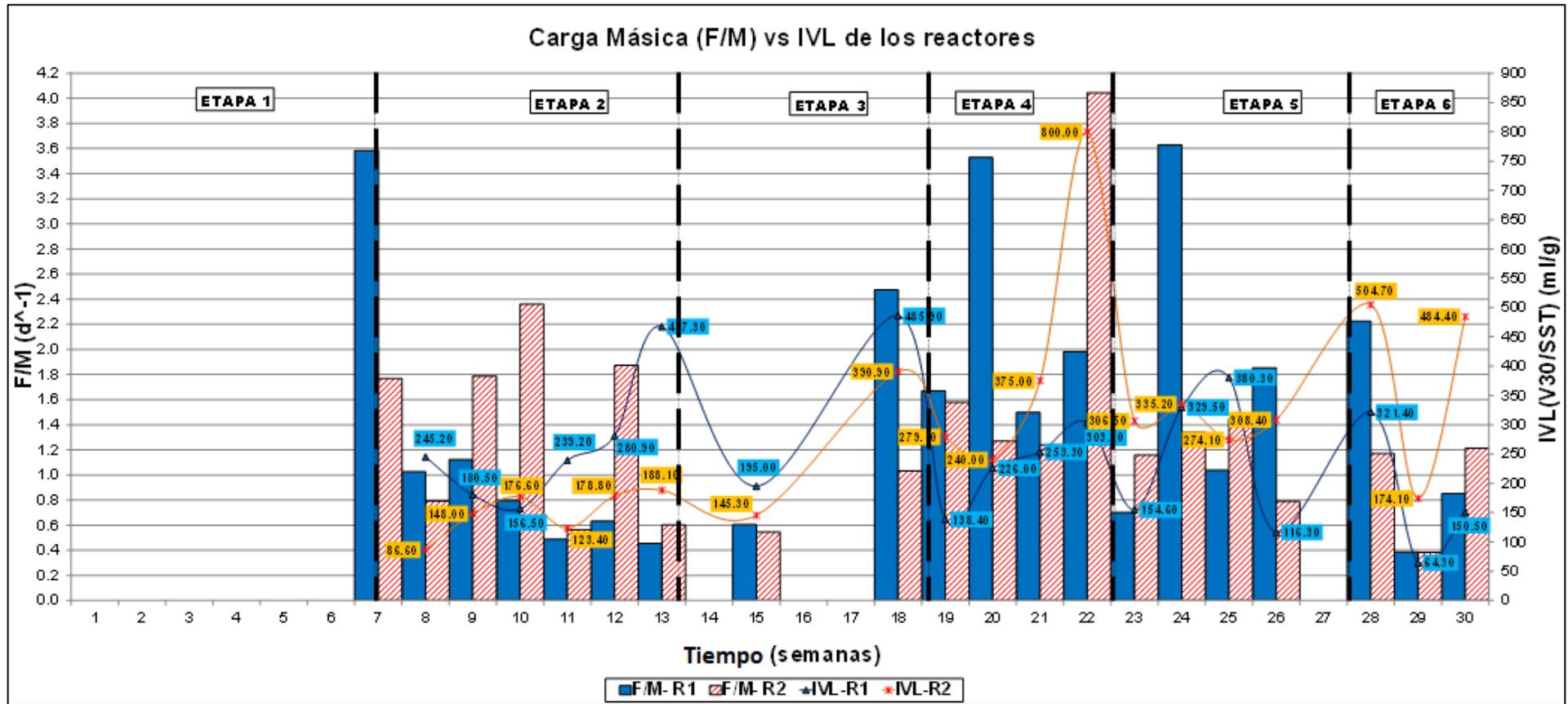
*Fuente: Elaboración propia*

También se puede observar que la desviación estándar de la carga másica (F/M) del selector corresponde a un 70.45% del valor promedio ( ver tabla 4.24), esto significa que la carga másica del selector es muy inestable, y se debe principalmente a que en el sistema N°1 se siguieron teniendo problemas de sedimentación originado por la presencia de microburbujas que hacían que el lodo del sedimentador S1 ascienda, perjudicando a veces la recirculación de los lodos hacia el selector y haciendo que la cantidad de biomasa recirculada sea muy variable.

El gráfico 5.11 evalúa los valores de IVL de los reactores con la carga másica (F/M), se observa que la carga másica (F/M) de los reactores R1 y R2 son muy variables. Cabe resaltar que se mantuvo el caudal afluente constante, por lo tanto,

la carga másica dependía únicamente de la  $DBO_5$  del afluente y la biomasa (SSLM). Se deduce que la variabilidad de las relaciones F/M se deben principalmente a que las concentraciones de SSLM (biomasa) de los reactores son menos estables.

A diferencia de la relación inversa que se estableció entre la carga másica (F/M) y el IVL en la investigación de Méndez et al. (2004), en el gráfico 5.11 de la presente tesis no se muestra ninguna relación entre la carga másica de los reactores R1 y R2 y sus valores de IVL. Por lo tanto, la carga másica (F/M) de los mismos reactores de lodos activados no resultan factores influyentes en la carga másica (F/M). La diferencia radica principalmente en que, Méndez et al. (2004) no utilizaron recirculación de lodos, mientras que en la presente tesis sí se recircularon los lodos de los sedimentadores, y tal como se explicó en el gráfico 5.10, la variación los valores de SST de recirculación se vieron afectados por los problemas de sedimentación como el bulking o el ascenso de lodos. Dicha recirculación altera directamente la carga másica (F/M) de los reactores R1 y R2.



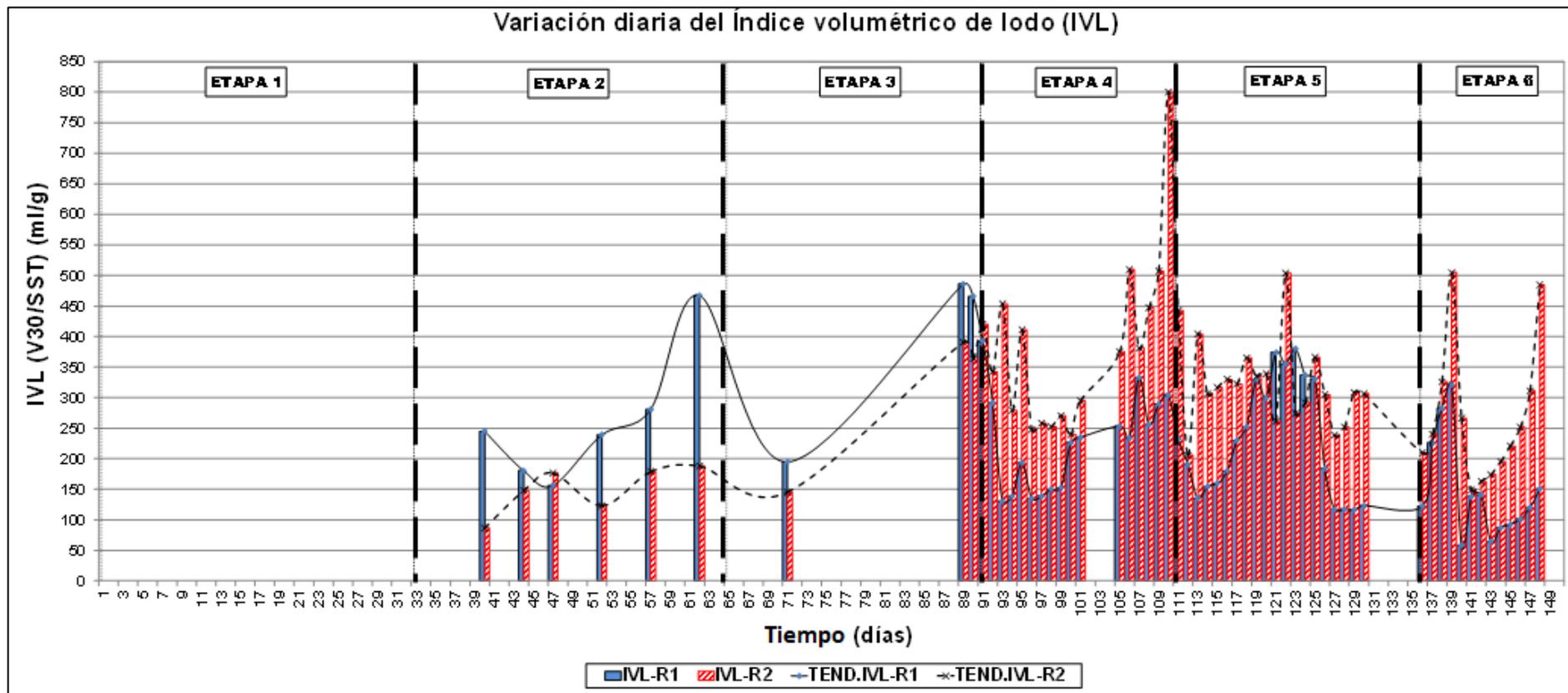
**Gráfico 5.11.** Comparativo de la variación del IVL de los reactores R1 y R2 con influencia de sus respectivas cargas másicas (F/M)  
Fuente: Elaboración propia

## 5.8 INDICE VOLUMETRICO DE LODOS (IVL)

El análisis de la medición diaria del IVL es el más preciso. El IVL promedio diario de R2 es mayor que el de R1 en un 39.66% (ver tabla 4.26), lo cual sugiere que la separación de sólidos es mejor en el sistema N°1 que en el sistema N°2. No obstante, ambos sistemas tienen un IVL promedio mayor a 150 ml/g a lo largo de toda la investigación, por tal motivo, no se logra confirmar la hipótesis, sin embargo, sí se reducen los valores de IVL con la instalación de un selector biológico aerobio.

Los gráficos 5.12 y 5.13 muestran la evolución diaria y semanal del IVL de los reactores respectivamente. En ambos gráficos no se consideraron las mediciones de IVL pues correspondía al arranque de los sistemas y además no se habían instalado los sedimentadores S1 y S2. Las mediciones de ambos gráficos se consideraron partir de la etapa N°3, pero debido a que no se tenía la disponibilidad del LIA-FIA-UNI, se trasladó la evaluación de la etapa N°3 a la N°6, pues ambas tienen la misma recirculación ( $R=70\%$ ) y cuentan con el selector.

De ambos gráficos 5.12 y 5.13, se deduce que antes de instalar el selector, la calidad de sedimentación del sistema N°1 era inferior a la del sistema N°2, pues sus valores de IVL eran más altos, lo cual indica una peor calidad de sedimentación; pero a partir de la instalación del selector en adelante, la calidad del sistema N°1 mejora y supera a la del sistema N°2. Por tal motivo se infiere, que con la instalación del selector sí se reducen los valores de IVL y se mejora la calidad de sedimentación, pero no necesariamente se llega a erradicar los casos de bulking filamentoso ( $IVL < 150 \text{ML/g}$ ).



**Gráfico 5.12.** Comparativo de la variación diaria de los valores de IVL entre los reactores R1 y R2

*Fuente: Elaboración propia*

Variación semanal del Índice volumétrico de lodo (IVL)

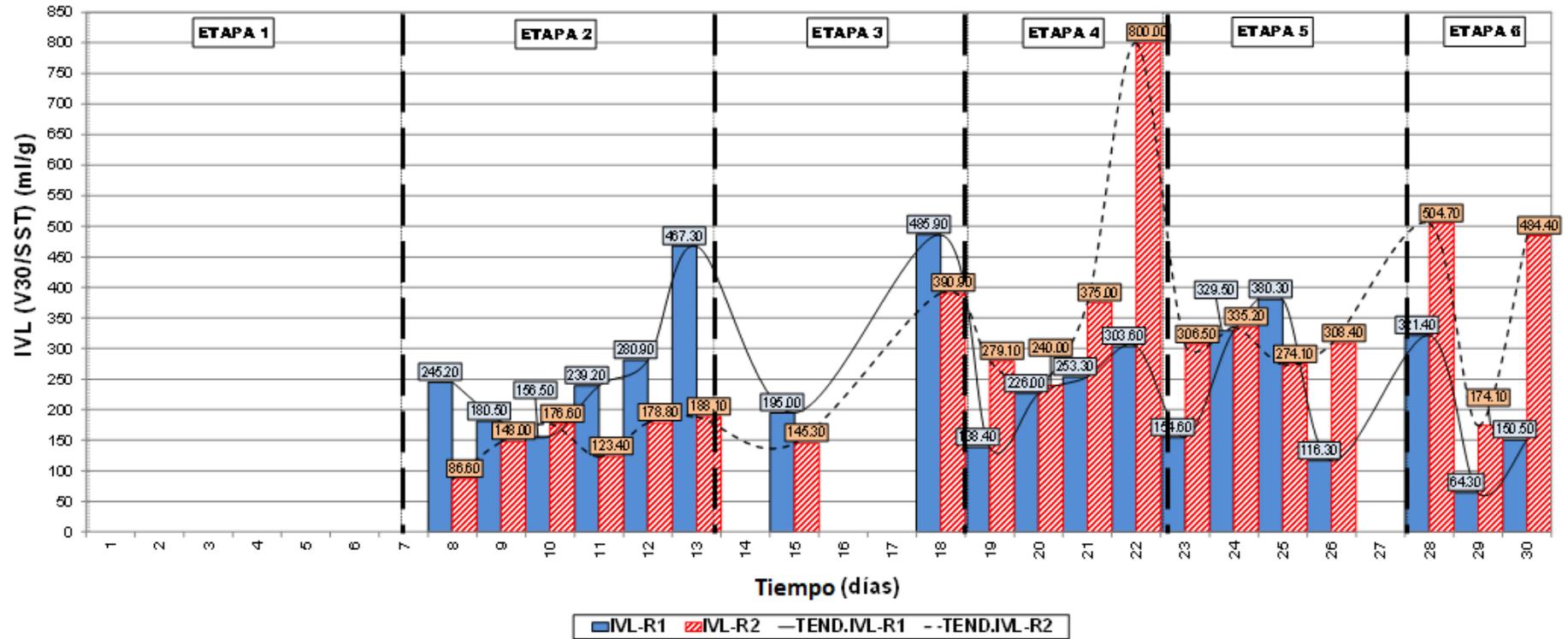


Gráfico 5.13. Comparativo de la variación semanal de los valores de IVL entre los reactores R1 y R2

Fuente: Elaboración propia

## 5.9 ABUNDANCIA DE FILAMENTOS Y CALIDAD DE SEDIMENTACIÓN

En todas las etapas se observa una flotación de los lodos en el sedimentador S1, a pesar de que se cuenta con la instalación del selector aerobio a partir de la etapa N°3 en adelante. Es evidente el mejoramiento de los lodos en cuanto a la disminución de la abundancia de filamentos y la mejor estructura de los flóculos, gracias a la presencia del selector. Sin embargo, este problema puede deberse principalmente al ascenso de lodos, la cual se justifica con la observación de microburbujas detallada en la tabla 4.30.

Se observa en el sedimentador S2 una mala sedimentación debido al bulking filamentoso, ya que se registra una mayor abundancia de filamentos durante la observación microscópica

Las tablas 4.27, 4.28 y 4.29 se construyeron según la guía de los cuadros realizados en la investigación de Arango y López (2011). Pero a diferencia de ellos, en la presente investigación se tomó en cuenta un análisis cuantitativo subjetivo de la abundancia de filamentos. Otra diferencia radica en que, la investigación citada no recirculó los lodos del sedimentador y se avocó a determinar la relación que tenía la forma de alimentación de los reactores y la cantidad de inóculo sobre el bulking; mientras que las tablas 4.27, 4.28 y 4.29 buscan determinar la relación que existe entre la instalación de un selector biológico y la reducción de organismos filamentosos, y también la relación existente entre la tasa de recirculación de los lodos y la calidad de sedimentación.

Otra investigación realizada por Di Marzio et al. (2001) trató aguas residuales industriales y evaluó la eliminación de organismos filamentosos mediante la combinación de selectores aeróbicos y axónicos.; la presente investigación se avoca al tratamiento de aguas residuales domésticas y a la reducción de filamentos mediante un selector aeróbico con compartimentos. Al igual que en la presente investigación, en el estudio de Di Marzio et al. (2001), se caracterizó el fango cuantitativamente a nivel microscópico mediante el método del puntaje subjetivo de la abundancia de filamentos según Jenkins et al. (2006). Pero, a

diferencia del presente trabajo, en dicho estudio también se realizó un análisis cuantitativo más exacto y representativo, siguiendo el método de Madoni e Davoli (1992) (como se mencionó en Di Marzio et al., 2001), el cual consistía en determinar el índice de bacterias filamentosas de acuerdo con la densidad óptica de los flóculos.

Por otro lado, las incidencias mostradas en la tabla 4.30 confirman que el análisis del IVL no es un parámetro definitorio para confirmar o descartar problemas de sedimentación, pues la prueba dura 30 minutos, y muchas veces los problemas de sedimentación se presentan después de este intervalo de tiempo. También observa que en los días N°143, N°144 y N°145 se obtuvieron valores de IVL de R1 que sugieren una buena calidad de sedimentación (menores a 150 ml/g), pero a pesar de ello se tuvo problemas de flotación del lodo debido a la presencia de microburbujas ascendentes. Cabe resaltar que sólo en los lodos provenientes de R1 se podía observar la presencia de microburbujas. Es muy probable que dicha aparición de microburbujas se deba a una nitrificación- desnitrificación simultánea.

## 5.10 EVALUACIÓN DE BIOINDICADORES

Dado que se observó una gran cantidad de ciliados libres (similares a *Aspidisca cicada*) durante la etapa N°6 en el reactor R1, mientras que en R2 no se observó. Indicase deduce que el selector elevó la carga másica F/M según la tendencia mostrada en la figura 2.8 y se obtuvo un fango mejor estabilizado. La observación microscópica de los organismos bioindicadores también ratifica, que en el selector se logra elevar la carga másica inicial (F/M)

Se percibió una abundante cantidad de rotíferos durante las etapas 5 y 6, lo cual indica, según la figura 2.8, que la carga másica (F/M) en los reactores disminuye, esto se debe a que la tasa de recirculación aumenta en estas etapas, incrementando la cantidad de microorganismos hambrientos y reduciendo así el alimento.

También se presenciaron bacterias filamentosas con morfología similares a *Microthrix parvicella* y el Tipo 0092, que según la tabla 2.5 (véase el capítulo 2), se forman a causa de una baja carga másica (F/M) y se solucionan creando un gradiente de sustrato mediante la instalación de selectores biológicos.

## CONCLUSIONES

- Si bien se redujo significativamente el IVL de R1 luego de instalar el selector, disminuyendo los casos de bulking filamentoso y mejorando la sedimentación de los lodos, se rechaza la hipótesis de la presente investigación, ya que no se redujo el IVL promedio de R1 a valores menores a 150 ml/g.
- La turbiedad generada por el lodo sedimentable y los SST del selector y de los reactores R1 y R2 resulta ser una interferencia en la medición del OD mediante un oxímetro con una sonda luminiscente. Si el OD de estas muestras turbias se toma sin dejar sedimentar previamente el lodo, la medición arroja valores engañosos, los cuales son muy bajos, incluso valores cercanos a 0 mg/L, a pesar de que se trata de muestras provenientes de un sistema aeróbico.
- La operación del selector no fue totalmente óptima ( $OD > 1 \text{ mg/L}$ ) ya que el valor promedio de OD en el selector fue de 0.24 mg/L, esto se debió a que el valor de la carga másica (F/M) promedio fue alta (23.11 d<sup>-1</sup>). Por tal motivo no se llegó a reducir el IVL del reactor R1 a valores inferiores a 150 ml/g.
- En el sistema N°01, el sedimentador S1 se observaron microburbujas ascendentes que elevaban el lodo sedimentado, y también en el lodo proveniente del reactor R1 (durante el ensayo de IVL). Por otro lado, en el sistema N°02 no se presenciaron estas microburbujas. Dado que estas burbujas se presenciaron únicamente en el sistema N°1, se concluye que el selector instalado en la cabecera del reactor R1 tiene influencia sobre este efecto observado. Es muy probable que la presencia de microburbujas se deba a una nitrificación-desnitrificación simultánea, esta deducción se respalda en que el OD del selector estuvo por debajo de 1 mg/L.
- Existe una relación ligeramente inversa entre los valores de pH y de IVL de los reactores. Dado que se obtienen valores de pH de los reactores superiores a 6, se descarta que el bulking observado se deba a la presencia de hongos.
- Los casos de bulking observado durante la investigación no se debieron a niveles bajos de aireación dentro de los reactores de lodos activados R1 y R2,

ya que, a lo largo de la investigación, los niveles promedio de OD de R1 y R2 se encontraban dentro del rango óptimo de operación para la tecnología de lodos activados (2mg/L- 4mg/L).

- La remoción de la DBO5 soluble (sustrato fácilmente biodegradable) no es un factor significativo para la reducción del IVL según lo expuesto en la presente tesis.
- No se logró obtener una eficiencia de remoción del 80% de la DBO5 soluble en el selector, solo se llegó a obtener una remoción promedio de 45.4% de la DBO5 soluble en el selector; esto se debió principalmente a que no se logró elevar el OD por encima de 1mg/L en esta unidad.
- A partir de la instalación del selector (etapa N°3), la eficiencia de remoción de los SST del sedimentador S1 aumenta en comparación con el sedimentador S2, dicho comportamiento coincide con la disminución del IVL de R1 con respecto al IVL de R2, por tal motivo se concluye que la instalación del selector efectivamente mejora la calidad de sedimentación de los lodos.
- Las concentraciones de SST en los lodos muestreados de las líneas de recirculación de ambos sistemas variaron de forma intermitente a pesar de que la tasa de recirculación fue continua las 24h. A veces se recirculaba los sólidos densos ya decantados y otras veces sólo licor mezcla, por tal motivo no se encontró ninguna relación entre los SST recirculados y los valores de IVL en los reactores R1 y R2. Debido a que muchas veces los problemas de sedimentación como el bulking y el ascenso de lodos generados por las microburbujas, que, si se llevan a cabo en los sedimentadores, no se ven reflejados en los datos de IVL, pues en varias ocasiones ocurren pasados los 30 minutos que requiere dicho ensayo y no se detecta el problema.
- Las muestras simples o puntuales no resultan ser tan precisas para la determinación de los SST en las líneas de recirculación, ya que a veces el muestreo ocurre cuando no hay problemas de sedimentación y otras veces cuando si los hay.

- Se concluye que el selector, debido a su corto tiempo de retención hidráulica de 15.5 minutos y su pequeño volumen útil de 5 L, permite elevar la carga másica (F/M) del reactor R1 10.45 a 65.33 d<sup>-1</sup> en el selector.
- La gran variación de 10.45 a 65.33 d<sup>-1</sup> de la carga másica (F/M) en el selector se debe a que no se podía mantener una biomasa estable (SSLM) dentro de estos, ya que gran parte del lodo que se debía recircular flotaba a la superficie de los sedimentadores producto de los problemas de sedimentación como el bulking filamentos y el ascenso de lodos.
- A medida que se aumenta la tasa de recirculación (de 50%, 60% y 70%), los valores de IVL se reducen, esto se debe a que la concentración de SSLM aumentan dentro de los reactores. Por lo tanto, aumentar la tasa de recirculación también resulta una solución para reducir los valores de IVL.
- A partir de la etapa N°3, la cantidad de filamentos de R1 se redujo de abundante a ocasional después de instalar el selector y también se redujo en comparación con R2 que mantuvo una cantidad de filamentos abundante.
- Cualitativamente se observaron presuntamente solo 2 organismos filamentosos: Microthrix Parvicella y Tipo 0092 (bioindicador: bajo F/M) en cantidades bajas en el reactor R1 y el selector, y en cantidades altas en el reactor R2. Se concluye que el selector reduce los filamentos causados por bajas relaciones F/M.
- Los valores SST de los efluentes de los sistemas N°1 y N°2 estuvieron en un rango de 3.33 -130 mg/L y de 7.50 -183.33 mg/L. Se concluye que, a diferencia del sistema N°2, con la instalación del selector se mejoró la calidad de sedimentación del sistema N°1 reduciendo en todo momento la concentración de SST en el efluente, con lo cual se logró no sobrepasar los 150 mg/L que se establece como LMP de acuerdo con el DS. N°003-2010-MINAM.

## RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones se recomienda realizar el ensayo de transferencia de oxígeno tanto con agua potable como con agua residual, para poder tener la capacidad de oxigenación correcta y aplicar una adecuada tasa de aireación a los equipos aireadores para ahorrar consumo energético.
- Verificar con el rotámetro diariamente el flujo de aire de cada vía, ya que las válvulas de aguja, al ser de plástico, pequeñas y delicadas se pueden romper y permitir fugas que descalibren la distribución de caudal, resultando una aireación poco homogénea y dando lugar a zonas con poca aireación permitiendo formación de flóculos con zonas anóxicas que puedan llegar a producir microburbujas que perjudiquen la calidad de sedimentación producto del ascenso de lodos ocasionado por la liberación de gases. También tener presente que durante la calibración de los caudales de aireación en el manifold siempre es bueno realizar las calibraciones varias veces para evitar descompensaciones en cada línea de distribución y poder homogenizarlas.
- Evaluar los reactores y sedimentadores, y realizar la prueba de trazadores en la etapa de cierre de la investigación, en la cual el lodo ya estaba formado, para tener en cuenta la influencia de la presencia de la biomasa (flóculos) en el tipo de flujo y poder realizar una mejor evaluación de cortos circuito y espacios muertos.
- Evaluar mediante la prueba de trazadores el comportamiento del flujo en cada compartimento del selector biológico, ya que, al tener una gran capacidad de almacenamiento de sustrato debido a su pequeño tamaño y su corto tiempo de retención, se forma una gran cantidad de biomasa (flóculos grandes) en un tiempo relativamente corto que puede interrumpir el flujo ocasionando cortocircuitos.
- Limpiar semanalmente el selector vaciándolo por completo, ya que la saturación por acumulación de lodo en esta unidad ocurre a las 3 semanas.

- Dejar sedimentar las muestras provenientes de los reactores R1 y R2, del selector y del afluente de los sedimentadores S1 y S2 previo a realizar la medición de oxígeno con el sensor luminiscente, realizar la medición en el sobrenadante. Ya que los sólidos sedimentables interfieren en la medición arrojando valores falsos que resultan muy bajos para un sistema aerobio.
- Para futuras investigaciones se recomienda utilizar la DQO como parámetro de medición del material orgánico. Además, se pueden obtener más datos por semana y se puede evaluar mejor la carga másica (F/M en función a la DQO) y los valores de IVL, a que con la DBO se tiene que esperar un período de 5 días para su determinación, limitando de esa manera la cantidad de datos.
- Tomar muestras compuestas en las líneas de recirculación de ambos sistemas.
- Se recomienda que el caudal de ingreso del afluente se controle con una bomba peristáltica ya que los cambios de caudales (debido a obstrucciones de las tuberías debido a la presencia de sólidos) puede generar variaciones en la carga másica F/M
- Realizar futuros estudios con selectores anóxicos y reactores de lodos activados que remuevan nutrientes, ya que se presume una nitrificación-desnitrificación simultánea en el sistema N°1 debido a la presencia de microburbujas ascendentes.
- Se recomienda medir la variable cualitativa del número de filamentos mediante el método objetivo Madoni e Davoli (1992) usando la densidad óptima para determinar el índice de bacterias filamentosas, dado que el método subjetivo de escala relativa, propuesta por Jenkins, usado en la presente tesis no es tan preciso al medir esta variable.
- Utilizar test de tinciones (Gram, Neisser, cristal violeta, etc), para identificar certeramente a los microorganismos filamentosos de acuerdo con su reacción a estos tintes, o llevar la muestra a un laboratorio especializado para su identificación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amy, G., Brdjanovic, D., Comeau, Y., Ekama, G., Orozco, J., Gerba, C., ... M., Zeeman, G. (2008). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño* (1a ed.). London, UK: IWA PUBLISHING. DOI: 10.2166/9781780409146.

Tandoi, V., Jenkins, D. y Wanner, J. (Eds.). (2006). *Activated sludge separation problems. Theory, control measures, practical experience* (1a ed.). London, UK: IWA Publishing. ISBN 1900222841.

Rossetti, S., Tandoi, V., Wanner, J. (2017). *Activated Sludge Separation Problems. Theory, Control Measures, Practical Experience*. (2a ed.). London, UK: IWA Publishing. ISBN 9781780408644 (eBook).

Von Sperling, M., Chernicharo, C., Gonçalves, R. (2007). *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors* (1a ed., Vol.5). Biological Wastewater Treatment. London, UK: IWA Publishing. ISBN 1 84339 1651.

Von Sperling, M. (2007). *Basic Principles of wastewater treatment*. Biological Wastewater Treatment (1a ed., Vol.2). Biological Wastewater Treatment. London, UK: IWA publishing. ISBN: 1 84339 162 7

Jenkins, D., Wanner, J. (2014). *Activated Sludge- 100 Years and Counting*. London, UK: IWA publishing. ISBN: 9781780404943 (eBook).

van Haandel, A.C., van der Lubbe, J.G.M. (2012). *Handbook of Biological Wastewater Treatment-Design and Optimization of Activated Sludge Systems* (2a ed.). UK: IWA Publishing. ISBN 9781780400808.

Daigger, G.T, Robbins, M.H., Marshall, B.R. (marzo, 1985). The Design of a Selector to Control Low-F/M Filamentous Bulking. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 57(3), 220- 226. Recuperado de <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/542-1-99.pdf>.

Romero, J (2013). *Tratamiento de aguas residuales Teoría y principios de diseño* (3a ed.). Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN.958-8060-13-3.

Ramalho. R.S. (2009). *Tratamiento de aguas residuales* (2a ed.). España: Editorial Reverté. ISBN 10: [8429179755](#) / ISBN 13: [9788429179750](#)

- Metcalf & Eddy (2013). *Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización* (5th ed). New York McGraw-Hill, Inc.

Trillo Montsoriu, J. y García del Campo; I. (1996). El bulking en sistemas de fangos activados – Fundamentos de la utilización de selectores. *Tecnología del agua*, 14 (155), 52-60.

Rodríguez, L.M., y Molina, F.J. (julio-diciembre, 2018). Estrategias operacionales para el control de problemas de baja sedimentación causados por bacterias filamentosas en plantas de lodos activados. *Revista en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad* (CAS), 4(1). Recuperado de <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/CAA>

Pérez Carrión, J.M. (2004). Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención. En Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Ed.2006) Manual III: Evaluación de plantas. Perú. Recuperado de <http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/web/index.php/manuales/plantas-de-filtracion-rapida>.

Dilek Çetin. F.; Gülerman Sürücü. (1990). Effects of temperature and Ph on the settleability of activated sludge flocs. *Water Science & Technology*, 22 (9), 249-254. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1990.0089>

Ghanizadeh, Gh., Sarrafpour, R. (2001). The Effects of Temperature and PH on Settability of Activated Sludge Flocs. *Iranian Journal of Public Health* , 30 (3-4), 139-142. Obtenido de <https://ijph.tums.ac.ir/index.php/ijph/article/view/1661>

Martins, A & Heijnen, Sef & van Loosdrecht, Mark. (2003). Effect of dissolved oxygen concentration on sludge settleability. *Applied microbiology and biotechnology*, 62, 586-93. DOI: 10.1007/s00253-003-1384-6.

Jenkins, D., Richard, M.G., Daigger, G.T. (2003). *Manual on the causas and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming, and Other Solids Separation Problems* (3r ed.). Michigan, Estados Unidos. Lewis Publishers. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203503157>

Park, J.K. (s.f.). *Bulking Control* [Diapositiva de PowerPoint]. SlideShare. University of Wisconsin. Madison. USA. Recuperado de <https://slideplayer.com/slide/10784229/>

Lynne, E., Marten B. (2011). *Controlling Activated Sludge Bulking & Foaming: From Theory to Practice* [Diapositiva de PowerPoint]. Wisconsin Wastewater Operators Associaton. Southeast Region. Recuperado de [https://www.wwoa.org/files/publishedpapers/2011\\_08\\_17%20Controlling%20Activated%20Sludge%20Bulking%20and%20Foaming%20-%20From%20Theory-%20to%20Practice%20by%20Marten\\_Lynne.pdf](https://www.wwoa.org/files/publishedpapers/2011_08_17%20Controlling%20Activated%20Sludge%20Bulking%20and%20Foaming%20-%20From%20Theory-%20to%20Practice%20by%20Marten_Lynne.pdf)

Chudoba, J., Chech, J.S., Farkac, J., Grau, P. (1985). Control of activated sludge filamentous bulking. *Water Res*, 19 (2), 191-196.

Méndez, L., Miyashiro, V., Rojas, R., Cotrado, M., Carrasco, N. (2004). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7(14), 74-83. ISSN : 1628-8097

Arango Muñoz, L., López Hincapié, J.D. (2011). *Estudio a escala de laboratorio de los efectos de la forma de alimentación y de la cantidad de inóculo sobre el*

*hinchamiento de los lodos de reactores aerobios de mezcla completa en etapa de arranque.* (Tesis de grado para optar por el título de Ingenieros Ambientales). Recuperada de <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:w9wJ0-H40n4J:repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/1232/Estudio%2520a%2520escala%2520de%2520laboratorio%2520de%2520los%2520efectos%2520de%2520la%2520forma%2520de%2520alimentaci%25F3n%2520y%2520de%2520la%2520cantidad%2520de%2520in%25F3culo%2520sobre%2520el%2520hinchamiento%2520de%2520los%2520lodos%2520de%2520reactores%2520aerobios%2520mezcla%2520completa%2520en%2520etapa%2520de%2520arranque.pdf%3Fsequence%3D1+%&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=pe>

Di Marzio, W.D., Saénz, M.E., Tortorelli, M.C., Alberdi, J.L. (2001). Control de organismos filamentosos mediante selección cinética y metabólica en sistemas de lodos activados. *Rev. Ingeniería Sanitaria y Ambiental-AIDIS* (54), 31-36. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/342721435\\_Di\\_Marzio\\_2001\\_AIDIS](https://www.researchgate.net/publication/342721435_Di_Marzio_2001_AIDIS)

Al-Mutairi, N.Z. (January. 2009). Aerobic selectors in slaughterhouse activated sludge systems: a preliminary investigation. *Bioresour Technol*, 100(1):50-8. doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.030.

Rodríguez González, E., Isac Oria, L., Fernández Moriña, N., Salas Rodríguez, D., Jiménez Gamero, C. (2002). Guía metodológica para la elaboración de análisis microbiológicos de fangos activados de E.D.A.R.s. Grupo Bioindicación Sevilla. Recuperado de <https://blogdelagua.com/documentacion/biblioteca/guia-metodologica-para-la-elaboracion-de-analisis-microbiologicos-de-fangos-activados-de-edars/>.

Palomino Lucano, G., Ballón Jomeque, M. (2007). "Tratamiento de aguas residuales por procesos de Biopelícula". Universidad Nacional de Ingeniería. Lima.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (2017). APHA, AWWA, WEF, 23rd Edition.

**ANEXOS**

## ANEXO N°1. DISEÑO DEL SELECTOR

### 5.10.1 Criterios de diseño del selector

En la figura 9.1 se muestran los datos necesarios, en el esquema general del sistema N°1, que permiten diseñar el selector biológico. El diseño del selector aerobio de la presente tesis, se llevó a cabo siguiendo la metodología de Park (s.f.)

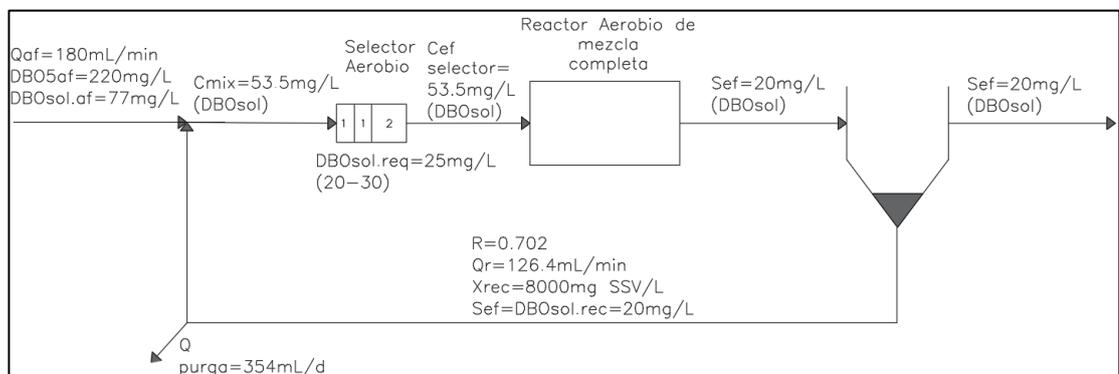


Figura 9.1. Esquema del sistema N°1 para el diseño del selector

#### Datos de entrada:

- Caudal afluente:  $Q_{af}=180$  ml/min
- Tasa de recirculación y caudal recirculado:  $R=0.702$ ,  $Q_{Rec.}=126.4$  ml/min
- Se asume una concentración de DBO soluble efluente del selector =25 mg/L (20-30 mg/L). (Lynne y Marten, 2011, diapositiva 27)
- Concentración de DBO<sub>5</sub> total del afluente:  $DBO_{5af}=220$  mg/L
- Se asume que un 35% de la DBO<sub>5</sub> de las aguas residuales domésticas es fácilmente biodegradable o soluble (Ramalho, 2009).
- Concentración de DBO soluble del efluente,  $DBO_{sol,ef}=20$  mg/l (calculado con la metodología de lodos activados)
- Concentración de MLSS en la recirculación:  $MLSS_{Rec.}=10\ 000$  mg/L (valor asumido en la metodología de lodos activados)
- Se asume que la concentración de SSV es del 80 % de los SST (Von Sperling, 2007a). Por lo tanto, la biomasa en la recirculación viene a estar representada de la siguiente manera:

$$MLVSS_{Rec.} = 0.8 * 10000 \text{ mg/L} = 8000 \text{ mg/L}$$

- Eikelboom (1991) establece una tasa de absorción de sustrato ( $B_x$ ) de 2-5 kg DBO<sub>5</sub>/kgSS.d para selectores aerobios (como se mencionó en Jenkins et al., 2006). Por lo tanto, se asumió un  $B_x = 2$  kg DBO<sub>5</sub>/kgSS.d

Se determinó la concentración del sustrato fácilmente biodegradable o soluble del afluente de la siguiente manera:

$$DBO_{sol. afluente} = 0.35 \times 220 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 77 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Se determinó la concentración de la DBO biodegradable del afluente del selector después de la dilución con la recirculación, usando dos criterios para evaluar la eliminación del sustrato soluble que se llevará a cabo en el selector:

#### 5.10.1.1 Criterio de la concentración de DBO<sub>5</sub> soluble en el efluente selector (20-30 mg/L).

Para el cálculo de la DBO que ingresa al tanque selector ( $C_{mix}$ ) se realizó el balance de masas respecto al DBO<sub>5</sub> soluble (fácilmente biodegradable) en el punto de dilución del afluente y la recirculación de lodos:

$$180 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times 77 \frac{\text{mg}}{\text{L}} + 0.702 \times 180 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times 20 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 1.702 \times 180 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times C_{mix}$$

$$C_{mix} = 53.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Se asumió una concentración de DBO<sub>5</sub> soluble efluente del selector de 25 mg/l. Por tal motivo, la cantidad de sustrato soluble almacenado dentro del selector se calculó de la siguiente manera:

$$S_{SELECTOR} = 53.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 25 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 28.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

#### 5.10.1.2 Criterio del porcentaje de la DBO<sub>5</sub> soluble biodegradable almacenada en el selector (50-70%)

Se calculó la DBO<sub>5</sub> soluble disponible para ser consumida por el selector:

$$DBO_{soluble} \text{ disponible para el selector} = DBO_{soluble} \text{ afluente} - DBO_{soluble} \text{ efluente}$$

$$DBO_{soluble} \text{ disponible para el selector} = 77 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 25 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 52 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Se realizó un balance de masas con respecto al sustrato en el punto de mezcla del afluente y la recirculación:

$$180 \frac{ml}{min} * 52 \frac{mg}{L} + 0.702 * 180 \frac{ml}{min} * 20 \frac{mg}{L} = (1 + 0.702) * 180 \frac{ml}{min} * C_{mix}$$

$$C_{mix} = 40.86 \frac{mg}{L}$$

Se asumió que el 60% de la concentración de sustrato biodegradable se consume en el selector; por tal motivo la concentración de sustrato que se consume dentro del selector se calcula de la siguiente manera:

$$S_{SELECTOR} = 0.6 * 40.86 \frac{mg}{L} = 24.52 \frac{mg}{L}$$

El primer criterio es más conservador que el segundo, pues determinó una concentración mayor de sustrato a eliminar en el selector, por tal motivo se utilizó la concentración de 28.5 mg DBO<sub>5</sub>soluble/L para dimensionar el selector.

Se determinó la concentración de la biomasa que ingresa al selector, realizando un balance de masa respecto a la biomasa en el punto de dilución entre el afluente y la recirculación:

$$Q * X_{afluente} + R * Q * X_r = (1 + R) * Q \frac{ml}{min} * X_{mix}$$

$$180 \frac{ml}{min} * 0 \frac{mg}{L} + 0.702 * 180 \frac{ml}{min} * 8000 \frac{mg}{L} = (1 + 0.702) * 180 \frac{ml}{min} * X_{mix}$$

$$X_{mix} = 3299.65 \frac{mgSSV}{L}$$

Como  $B_x=2$  kg DBO<sub>5</sub>/kgSS.d, se procedió a expresar la tasa de absorción de sustrato en términos de los SSV:

$$B_x = 2 \frac{mgDBO_5soluble}{mgSS.d} * \frac{1d}{24h} * \frac{0.8 mgSS}{1mgSSV} = 0.0667 \frac{mgDBO_5soluble}{mgSSV.h}$$

Se calculó la tasa de sustrato almacenado en el selector:

$$Tasa\ de\ sustrato\ almacenado = 0.0667 \frac{mgDBO_5soluble}{mgSSV.h} * 3299.65 \frac{mgSSV}{L}$$

$$Tasa\ de\ sustrato\ almacenado = 220 \frac{mgDBO_5\ soluble}{L.h}$$

Se calculó el tiempo de retención hidráulico del selector de la siguiente manera:

$$TRH_{selector} = \frac{53.5 \frac{mg}{L}}{220 \frac{mgDBO_5\ soluble}{L.h}} = 0.243h$$

$$TRH_{selector} = 14.6\ min$$

El tiempo de retención hidráulico calculado se encuentra dentro los 10 a 15 minutos propuestos por Eikelboom (1991) para tiempos de retención hidráulicos de selectores aerobios (como se mencionó en Jenkins et al., 2006)

Teniendo en cuenta que, el caudal que ingresa al selector es la suma del caudal afluyente del sistema y el de la recirculación, se procedió a calcular el volumen del selector de la siguiente manera:

$$V_{selector} = (Q_{afluyente} + Q_{recirculación}) * TRH_{selector}$$

$$V_{selector} = (1 + R) * Q_{afluyente} * TRH_{selector}$$

$$V_{selector} = (1 + 0.702) * 180 \frac{ml}{min} * 14.6\ min = 4472.856ml = 4.473L$$

$$V_{selector} \approx 5L$$

Con el volumen calculado se procedió a recalculer el TRH del selector de la siguiente manera:

$$TRH_{selector} = \frac{V_{selector}}{(Q_{afluyente} + Q_{recirculación})}$$

$$TRH_{selector} = \frac{5000\ ml}{(1 + 0.702) * 180 \frac{ml}{min}} = 15.5\ min$$

El tiempo de retención hidráulico recalculado se encuentra fuera de los 10 a 15 minutos propuestos por Eikelboom (1991) para tiempos de retención hidráulicos de selectores aerobios (como se mencionó en Jenkins et al., 2006), pero es solamente por medio minuto, por lo tanto, el valor es aceptable.

## ANEXO N°2. REGISTRO PROMEDIO SEMANAL DE LOS PARÁMETROS DE RUTINA

Tabla 9.1. Registro semanal del promedio de monitoreos diarios de temperatura, pH, conductividad, turbiedad y oxígeno disuelto del Sistema N°1

SEM.	SISTEMA 1																								
	AF					SEL					R1					R1-EF					S1				
	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)
1	18.3	7.57	1.2679	152.88	0.72	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	18.0	8.16	1.2707	106.09	4.12	18.3	8.09	1.6113	224.85	2.11	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
2	18.9	7.76	1.2359	176.38	0.14	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	18.9	8.02	1.1966	105.85	1.46	19.1	8.10	1.1136	121.85	1.97	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
3	18.8	7.45	1.0708	175.83	0.12	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	18.7	7.90	1.0619	120.03	0.95	18.9	8.06	1.0665	89.71	2.27	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
4	18.3	7.20	1.1659	216.00	0.11	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	18.7	7.68	1.1402	97.75	2.51	18.7	7.68	1.1345	86.35	4.09	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
5	18.2	6.99	1.1778	159.81	0.19	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	17.9	7.55	1.1492	38.94	3.37	16.8	7.67	1.1521	56.99	4.94	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
6	18.5	7.42	1.2005	166.80	0.26	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	18.6	7.40	1.1757	96.76	0.43	18.5	7.39	1.1950	37.33	4.62	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
7	19.7	7.02	1.1169	206.80	0.21	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	19.5	7.33	1.1491	232.35	0.59	19.6	7.45	1.1387	32.61	3.64	19.8	7.49	1.1377	13.46	4.88
8	19.9	7.12	1.2999	205.75	0.18	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	19.7	7.38	1.1234	S/M	0.67	19.8	7.51	1.1254	20.41	3.83	19.8	7.36	1.1204	14.66	4.46
9	19.3	7.20	1.2432	196.50	0.16	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	19.2	7.41	1.0808	S/M	1.39	19.3	7.43	1.0754	25.46	3.49	19.5	7.51	1.0672	12.88	4.79
10	20.7	7.18	1.2152	204.70	0.12	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	20.8	7.29	1.0956	S/M	1.07	20.9	7.39	1.0983	22.49	1.76	21.1	7.48	1.0955	16.25	3.91
11	20.4	6.95	1.2204	189.58	0.16	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	20.2	7.12	0.9933	S/M	0.49	20.1	7.22	0.9713	37.07	2.14	20.2	7.33	0.9961	17.34	3.79
12	22.0	7.03	1.0746	175.17	0.13	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M	21.6	6.70	0.8920	S/M	0.14	21.7	6.66	0.8857	149.37	0.11	21.5	6.92	0.9039	14.08	3.56
13	21.9	6.94	1.0821	232.20	0.17	22.5	7.17	0.9823	S/M	0.10	21.8	6.69	0.9150	S/M	0.89	21.8	6.70	0.8994	408.81	0.30	21.9	6.86	0.8930	26.53	3.85
14	22.9	7.02	1.0582	149.50	0.31	22.8	7.23	0.9463	S/M	1.07	22.8	6.73	0.8753	S/M	1.82	22.8	6.77	0.8766	757.33	2.11	22.7	6.92	0.8770	9.42	5.76
15	21.7	6.98	1.1413	165.88	0.12	21.7	7.32	1.1319	S/M	0.15	22.0	7.05	1.0609	499.91	4.27	21.9	7.03	1.0049	372.92	4.76	21.7	7.11	1.0155	24.13	6.13
16	23.4	7.14	1.0957	211.40	0.12	23.4	7.51	1.0442	85.00	0.10	23.3	7.70	1.0354	91.37	4.86	23.3	7.60	1.0228	112.00	3.96	23.3	7.64	1.0422	19.46	5.05
17	23.5	7.13	1.1404	163.10	0.13	23.9	7.53	0.9614	391.73	0.28	23.3	7.55	1.0258	376.46	4.32	23.4	7.59	1.0342	332.70	3.69	23.2	7.58	1.0541	32.93	4.24
18	23.0	7.32	1.1162	172.22	0.15	23.2	7.50	0.9698	381.88	0.91	22.8	7.43	0.9261	284.26	5.59	22.9	7.36	0.9055	200.30	5.58	23.2	7.45	0.9406	9.75	5.59
19	23.5	7.14	1.0633	265.90	0.13	23.5	7.55	0.9667	450.29	0.35	23.1	7.50	0.9116	350.44	4.47	23.2	7.47	0.9124	220.45	4.51	23.2	7.53	0.9186	10.36	4.07
20	24.8	7.78	1.1306	125.83	0.13	24.8	7.87	1.0222	239.75	0.10	24.3	7.62	0.8913	286.28	4.07	24.6	7.74	0.9194	141.94	4.09	24.9	7.70	0.9202	15.60	3.46
21	25.0	7.25	1.2139	203.63	0.12	25.0	7.67	1.0958	200.35	0.09	24.6	7.56	0.9938	264.39	3.35	25.0	7.57	1.0201	103.10	3.64	25.2	7.59	1.0235	22.15	3.28
22	25.5	7.16	1.1618	239.50	0.12	25.3	7.56	1.0998	331.80	0.09	25.0	7.49	1.0243	424.00	3.01	25.3	7.52	1.0372	198.08	3.55	25.5	7.52	1.0395	27.01	3.44
23	25.8	7.36	1.3983	294.50	0.13	25.5	7.61	1.0993	569.30	0.16	25.5	7.48	1.0370	497.43	3.67	25.6	7.50	1.0312	348.19	3.97	25.7	7.47	1.0455	11.96	3.13
24	26.0	7.06	1.3578	232.67	0.13	25.9	7.36	1.0406	248.33	0.10	25.6	7.48	0.9805	141.85	4.33	26.0	7.39	1.0050	106.20	4.61	25.9	7.30	0.9996	14.32	2.55
25	26.5	6.99	1.1348	182.83	0.11	26.5	7.36	1.0061	620.40	0.10	26.1	7.34	0.9604	538.00	3.09	26.1	7.25	0.9605	445.86	3.48	26.7	7.25	0.9658	55.11	4.31
26	26.4	6.95	0.9705	161.86	0.14	26.2	7.15	0.8591	243.14	0.29	25.7	7.08	0.7775	111.58	5.00	25.9	7.04	0.7798	232.52	4.61	26.4	7.13	0.8072	7.38	4.50
27	27.1	6.94	0.8913	222.00	0.64	27.2	7.08	0.7924	185.00	0.12	27.2	7.42	0.6846	346.00	3.37	27.4	7.27	0.6880	260.00	3.76	27.0	7.20	0.6873	9.48	4.80
28	28.2	6.89	1.0840	249.00	0.16	27.7	7.23	0.9524	132.89	0.11	27.7	7.22	0.9039	461.74	3.39	27.8	7.22	0.8833	80.17	4.15	28.0	7.21	0.8934	4.00	3.65
29	27.3	7.07	1.0094	149.69	0.12	27.1	7.48	0.8474	483.96	0.09	26.9	7.44	0.7788	252.56	2.51	27.3	7.45	0.7688	286.07	3.77	27.5	7.46	0.7982	11.85	2.49
30	27.4	7.18	1.0610	132.02	0.14	27.4	7.49	0.9136	368.60	0.11	27.2	7.25	0.8134	574.30	3.23	27.5	7.29	0.8066	345.25	4.24	27.8	7.16	0.7937	7.78	4.15

Fuente: Elaboración propia

S/M: Sin medir

**Tabla 9.2.** Registro semanal del promedio de monitoreos diarios de temperatura, pH, conductividad, turbiedad y oxígeno disuelto del Sistema N°2

SEM.	SISTEMA 2																			
	AF					R2					R2-EF					S2				
	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)	T (°C)	PH	COND. (mS/cm)	TURB. (UNT)	OD (mg/L)
1	18.3	7.57	1.2679	152.88	0.72	18.0	8.15	1.2652	117.34	4.21	17.4	8.08	1.2654	188.35	2.61	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
2	18.9	7.76	1.2359	176.38	0.14	19.0	8.02	1.1189	142.83	1.58	19.0	8.07	1.1200	110.40	2.55	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
3	18.8	7.45	1.0708	175.83	0.12	18.8	7.87	1.0663	124.03	1.38	18.9	7.96	1.0646	125.88	1.16	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
4	S/M	S/M	S/M	216.00	0.11	18.7	7.64	1.1466	106.66	2.77	18.7	7.66	1.1485	60.75	3.34	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
5	18.2	6.99	1.1778	159.81	0.19	16.6	7.62	1.1479	47.41	4.10	16.7	7.64	1.1540	41.14	4.35	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
6	18.5	7.42	1.2005	166.80	0.26	18.5	7.47	1.1932	32.55	0.96	18.6	7.39	1.2050	26.50	3.40	S/M	S/M	S/M	S/M	S/M
7	19.7	7.02	1.1169	206.80	0.21	19.6	7.43	1.1247	75.13	0.59	19.6	7.51	1.1291	37.67	3.78	20.0	7.56	1.1278	24.59	4.51
8	19.9	7.12	1.2999	205.75	0.18	19.7	7.51	1.1274	S/M	1.46	19.7	7.60	1.1134	19.30	4.91	19.5	7.63	1.1326	16.89	4.03
9	19.3	7.20	1.2432	196.50	0.16	19.1	7.47	1.1021	S/M	1.03	19.4	7.53	1.0933	42.24	3.76	19.4	7.52	1.1098	19.53	4.51
10	20.7	7.18	1.2152	204.70	0.12	20.7	7.45	1.1241	S/M	1.18	20.8	7.53	1.1300	32.88	2.26	21.0	7.56	1.1323	21.29	3.84
11	20.4	6.95	1.2204	189.58	0.16	20.0	7.42	1.0484	S/M	2.16	20.0	7.52	1.0469	22.07	3.03	20.4	7.54	1.0647	12.89	4.11
12	22.0	7.03	1.0746	175.17	0.13	21.6	7.25	0.9927	S/M	1.63	21.6	7.44	1.0057	24.75	2.72	21.5	7.49	1.0254	11.70	2.82
13	21.9	6.94	1.0821	232.20	0.17	21.7	6.94	0.9275	S/M	1.21	21.8	6.99	0.9548	162.40	1.84	21.9	7.10	0.9195	13.54	4.29
14	22.9	7.02	1.0582	149.50	0.31	22.8	6.83	0.8897	S/M	3.70	22.7	6.84	0.8834	117.85	4.14	22.5	6.93	0.8883	14.68	5.48
15	21.7	6.98	1.1413	165.88	0.12	21.8	6.94	1.0244	404.92	3.46	21.8	6.98	1.0249	262.16	4.25	21.7	7.12	1.0350	17.36	5.79
16	23.4	7.14	1.0957	211.40	0.12	23.1	7.32	0.9701	319.60	3.64	23.2	7.27	0.9708	400.20	3.09	23.0	7.35	0.9509	23.77	5.49
17	23.5	7.13	1.1404	163.10	0.13	23.3	7.46	1.0225	207.21	3.22	23.5	7.51	1.0206	212.28	3.08	23.2	7.47	1.0372	29.49	4.67
18	23.0	7.32	1.1162	172.22	0.15	22.9	7.34	0.9480	259.05	4.12	22.9	7.29	0.9498	181.17	4.06	23.1	7.34	0.9571	22.36	5.17
19	23.5	7.14	1.0633	265.90	0.13	23.1	7.54	0.9438	330.02	3.77	23.2	7.56	0.9611	216.43	3.84	23.4	7.57	0.9630	21.81	3.65
20	24.8	7.78	1.1306	125.83	0.13	24.2	7.67	0.9409	308.20	3.17	24.6	7.71	0.9468	104.78	3.74	25.1	7.62	1.0084	24.74	2.57
21	25.0	7.25	1.2139	203.63	0.12	24.7	7.51	1.0315	272.38	3.03	25.2	7.44	1.0260	125.89	3.82	25.4	7.42	1.0693	22.82	2.87
22	25.5	7.16	1.1618	239.50	0.12	25.1	7.49	1.0683	224.46	3.45	25.5	7.61	1.0749	145.41	3.80	25.7	7.44	1.1009	32.02	3.36
23	25.8	7.36	1.3983	294.50	0.13	25.4	7.54	1.0833	315.49	3.82	25.7	7.58	1.0898	150.27	4.05	25.9	7.52	1.1036	23.43	1.58
24	26.0	7.06	1.3578	232.67	0.13	25.7	7.28	0.9168	331.00	4.18	25.9	7.19	0.9202	143.83	4.65	26.1	7.02	0.9218	27.78	4.31
25	26.5	6.99	1.1348	182.83	0.11	25.9	7.16	0.9129	368.60	4.17	26.2	7.14	0.9154	134.35	4.78	26.8	7.09	0.9805	33.99	3.70
26	26.4	6.95	0.9705	161.86	0.14	25.7	6.89	0.7991	500.44	4.25	26.1	6.99	0.8060	136.73	4.67	26.7	7.09	0.8625	13.09	4.44
27	27.1	6.94	0.8913	222.00	0.64	27.3	7.16	0.6748	634.00	3.20	27.2	7.09	0.6788	63.40	4.47	27.1	7.04	0.6775	15.70	3.75
28	28.2	6.89	1.0840	249.00	0.16	27.7	7.12	0.8469	554.20	2.99	28.0	7.11	0.8268	176.73	3.97	28.2	6.96	0.8668	11.34	3.17
29	27.3	7.07	1.0094	149.69	0.12	27.0	7.40	0.7324	577.40	1.26	27.2	7.40	0.7592	282.71	3.22	27.6	7.23	0.8256	19.26	3.33
30	27.4	7.18	1.0610	132.02	0.14	27.2	7.28	0.8211	645.30	2.43	27.5	7.19	0.8236	110.90	3.72	28.0	7.22	0.8936	25.74	2.91

Fuente: Elaboración propia  
S/M: Sin medir

**ANEXO N°3. REGISTRO SEMANAL DE SÓLIDOS****Tabla 9.3.** Mediciones semanales de los sólidos en el sistema N°1

SEM.	FECHA	SISTEMA N°01								
		PTO N°01								
		AF								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019	756.67	114.00	642.67	563.33	21.00	542.33	193.33	93.00	100.33
8	04/10/2019	700.00	105.00	595.00	225.00	95.00	130.00	475.00	10.00	465.00
9	10/10/2019	766.67	86.67	680.00	116.67	50.00	66.67	650.00	36.67	613.33
10	15/10/2019	713.33	100.00	613.33	180.00	86.67	93.33	533.33	13.33	520.00
11	22/10/2019	903.33	300.00	603.33	173.33	96.67	76.67	730.00	203.33	526.67
12	29/10/2019	743.33	136.67	606.67	223.33	110.00	113.33	520.00	26.67	493.33
13	05/11/2019	653.33	116.67	536.67	203.33	113.33	90.00	450.00	3.33	446.67
15	18/11/2019	923.33	156.67	766.67	233.33	100.00	133.33	690.00	56.67	633.33
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	726.67	96.67	630.00	200.00	93.33	106.67	526.67	3.33	523.33
19	19/12/2019	610.00	113.33	496.67	240.00	86.67	153.33	370.00	26.67	343.33
20	27/12/2019	753.33	163.33	590.00	323.33	130.00	193.33	430.00	33.33	396.67
21	03/01/2020	1026.67	193.33	833.33	373.33	146.67	226.67	653.33	46.67	606.67
22	10/01/2020	860.00	170.00	690.00	276.67	116.67	160.00	583.33	53.33	530.00
23	16/01/2020	846.67	173.33	673.33	253.33	136.67	116.67	593.33	36.67	556.67
24	23/01/2020	696.67	133.33	563.33	253.33	110.00	143.33	443.33	23.33	420.00
25	29/01/2020	820.00	150.00	670.00	310.00	110.00	200.00	510.00	40.00	470.00
26	06/02/2020	836.67	153.33	683.33	330.00	103.33	226.67	506.67	50.00	456.67
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	726.67	163.33	563.33	343.33	156.67	186.67	383.33	6.67	376.67
29	26/02/2020	740.00	143.33	596.67	263.33	110.00	153.33	476.67	33.33	443.33
30	04/03/2020	806.67	96.67	710.00	256.67	90.00	166.67	550.00	6.67	543.33

SEM.	FECHA	SISTEMA N°01								
		PTO N°02								
		SEL								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019									
8	04/10/2019									
9	10/10/2019									
10	15/10/2019									
11	22/10/2019									
12	29/10/2019									
13	05/11/2019									
15	18/11/2019	1973.33	1156.67	816.67	1130.00	960.00	170.00	843.33	196.67	646.67
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	1133.33	546.67	586.67	583.33	486.67	96.67	550.00	60.00	490.00
19	19/12/2019	996.67	476.67	520.00	543.33	423.33	120.00	453.33	53.33	400.00
20	27/12/2019	1470.00	750.00	720.00	953.33	690.00	263.33	516.67	60.00	456.67
21	03/01/2020	1873.33	1200.00	673.33	1153.33	1046.67	106.67	720.00	153.33	566.67
22	10/01/2020	1296.67	666.67	630.00	646.67	556.67	90.00	650.00	110.00	540.00
23	16/01/2020	1763.33	1070.00	693.33	1020.00	900.00	120.00	743.33	170.00	573.33
24	23/01/2020	1536.67	876.67	660.00	883.33	743.33	140.00	653.33	133.33	520.00
25	29/01/2020	1410.00	796.67	613.33	846.67	680.00	166.67	563.33	116.67	446.67
26	06/02/2020	773.33	163.33	610.00	256.67	123.33	133.33	516.67	40.00	476.67
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	1300.00	686.67	613.33	796.67	643.33	153.33	503.33	43.33	460.00
29	26/02/2020	846.67	276.67	570.00	323.33	216.67	106.67	523.33	60.00	463.33
30	04/03/2020	1140.00	506.67	633.33	596.67	466.67	130.00	543.33	40.00	503.33

SEM.	FECHA	SISTEMA N°01								
		PTO N°03								
		R1								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019	2443.33	1496.87	946.60	880.00	246.87	633.13	1563.33	1250.00	313.33
8	04/10/2019	1640.00	1120.00	520.00	1003.33	950.00	53.33	636.67	170.00	466.67
9	10/10/2019	1190.00	733.33	456.67	606.67	600.00	6.67	583.33	133.33	450.00
10	15/10/2019	1870.00	1330.00	540.00	1113.33	1106.67	6.67	756.67	223.33	533.33
11	22/10/2019	2070.00	1546.67	523.33	1323.33	1303.33	20.00	746.67	243.33	503.33
12	29/10/2019	2476.67	1886.67	590.00	1646.67	1573.33	73.33	830.00	313.33	516.67
13	05/11/2019	1826.67	1326.67	500.00	1193.33	1146.67	46.67	633.33	180.00	453.33
15	18/11/2019	2430.00	1743.33	686.67	1563.33	1440.00	123.33	866.67	303.33	563.33
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	1033.33	473.33	560.00	443.33	396.67	46.67	590.00	76.67	513.33
19	19/12/2019	973.33	446.67	526.67	543.33	396.67	146.67	430.00	50.00	380.00
20	27/12/2019	813.33	256.67	556.67	393.33	243.33	150.00	420.00	13.33	406.67
21	03/01/2020	1503.33	750.00	753.33	790.00	640.00	150.00	713.33	110.00	603.33
22	10/01/2020	1423.33	823.33	600.00	746.67	673.33	73.33	676.67	150.00	526.67
23	16/01/2020	2070.00	1293.33	776.67	1206.67	1080.00	126.67	863.33	213.33	650.00
24	23/01/2020	820.00	220.00	600.00	296.67	196.67	100.00	523.33	23.33	500.00
25	29/01/2020	1486.67	946.67	540.00	870.00	800.00	70.00	616.67	146.67	470.00
26	06/02/2020	1036.67	430.00	606.67	450.00	350.00	100.00	586.67	80.00	506.67
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	873.33	373.33	500.00	426.67	343.33	83.33	446.67	30.00	416.67
29	26/02/2020	3190.00	2643.33	546.67	2400.00	2353.33	46.67	790.00	290.00	500.00
30	04/03/2020	1600.00	930.00	670.00	956.67	816.67	140.00	643.33	113.33	530.00

SEM.	FECHA	SISTEMA N°01								
		PTO N°04								
		R1 -EF								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019									
8	04/10/2019									
9	10/10/2019									
10	15/10/2019	693.33	153.33	540.00	106.67	93.33	13.33	586.67	60.00	526.67
11	22/10/2019	983.33	466.67	516.67	433.33	386.67	46.67	550.00	80.00	470.00
12	29/10/2019	1763.33	1153.33	610.00	1040.00	963.33	76.67	723.33	190.00	533.33
13	05/11/2019	1496.67	970.00	526.67	893.33	840.00	53.33	603.33	130.00	473.33
15	18/11/2019	2420.00	1676.67	743.33	1406.67	1383.33	23.33	1013.33	293.33	720.00
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	826.67	263.33	563.33	273.33	233.33	40.00	553.33	30.00	523.33
19	19/12/2019	770.00	280.00	490.00	403.33	280.00	123.33	366.67	0.00	366.67
20	27/12/2019	776.67	213.33	563.33	306.67	170.00	136.67	470.00	43.33	426.67
21	03/01/2020	963.33	420.00	543.33	390.00	343.33	46.67	573.33	76.67	496.67
22	10/01/2020	910.00	396.67	513.33	366.67	323.33	43.33	543.33	73.33	470.00
23	16/01/2020	1953.33	1150.00	803.33	1110.00	970.00	140.00	843.33	180.00	663.33
24	23/01/2020	680.00	130.00	550.00	196.67	116.67	80.00	483.33	13.33	470.00
25	29/01/2020	1233.33	720.00	513.33	673.33	596.67	76.67	560.00	123.33	436.67
26	06/02/2020	696.67	120.00	576.67	176.67	90.00	86.67	520.00	30.00	490.00
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	826.67	260.00	566.67	363.33	256.67	106.67	463.33	3.33	460.00
29	26/02/2020	773.33	213.33	560.00	260.00	190.00	70.00	513.33	23.33	490.00
30	04/03/2020	1326.67	660.00	666.67	746.67	586.67	160.00	580.00	73.33	506.67

SEM.	FECHA	SISTEMA N°01								
		PTO N°05								
		REC.1								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019	1465.22	503.33	961.88	865.22	86.67	778.55	600.00	416.67	183.33
8	04/10/2019	2553.33	1863.33	690.00	1723.33	1556.67	166.67	830.00	306.67	523.33
9	10/10/2019	2810.00	2316.67	493.33	1983.33	1933.33	50.00	826.67	383.33	443.33
10	15/10/2019	1356.67	796.67	560.00	690.00	673.33	16.67	666.67	123.33	543.33
11	22/10/2019	3850.00	3340.00	510.00	2893.33	2843.33	50.00	956.67	496.67	460.00
12	29/10/2019	3410.00	2853.33	556.67	2433.33	2363.33	70.00	976.67	490.00	486.67
13	05/11/2019	2690.00	2143.33	546.67	1880.00	1813.33	66.67	810.00	330.00	480.00
15	18/11/2019	3270.00	2583.33	686.67	2153.33	2146.67	6.67	1116.67	436.67	680.00
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	1603.33	1043.33	560.00	973.33	913.33	60.00	630.00	130.00	500.00
19	19/12/2019	740.00	213.33	526.67	326.67	180.00	146.67	413.33	33.33	380.00
20	27/12/2019	1206.67	680.00	526.67	740.00	620.00	120.00	466.67	60.00	406.67
21	03/01/2020	1606.67	923.33	683.33	870.00	790.00	80.00	736.67	133.33	603.33
22	10/01/2020	2056.67	1473.33	583.33	1313.33	1250.00	63.33	743.33	223.33	520.00
23	16/01/2020	1586.67	786.67	800.00	823.33	680.00	143.33	763.33	106.67	656.67
24	23/01/2020	2013.33	1470.00	543.33	1350.00	1273.33	76.67	663.33	196.67	466.67
25	29/01/2020	1960.00	1456.67	503.33	1290.00	1223.33	66.67	670.00	233.33	436.67
26	06/02/2020	673.33	156.67	516.67	190.00	123.33	66.67	483.33	33.33	450.00
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	710.00	153.33	556.67	263.33	150.00	113.33	446.67	3.33	443.33
29	26/02/2020	870.00	363.33	506.67	340.00	296.67	43.33	530.00	66.67	463.33
30	04/03/2020	1026.67	316.67	710.00	456.67	276.67	180.00	570.00	40.00	530.00

SEM.	FECHA	SISTEMA N°01								
		PTO N°06								
		S1								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
<b>7</b>	<b>25/09/2019</b>									
<b>8</b>	<b>04/10/2019</b>	557.50	22.50	535.00	60.00	17.50	42.50	497.50	5.00	492.50
<b>9</b>	<b>10/10/2019</b>	763.33	76.67	686.67	113.33	46.67	66.67	650.00	30.00	620.00
<b>10</b>	<b>15/10/2019</b>	590.00	36.67	553.33	46.67	33.33	13.33	543.33	3.33	540.00
<b>11</b>	<b>22/10/2019</b>	656.67	130.00	526.67	110.00	80.00	30.00	546.67	50.00	496.67
<b>12</b>	<b>29/10/2019</b>	570.00	30.00	540.00	70.00	30.00	40.00	500.00	0.00	500.00
<b>13</b>	<b>05/11/2019</b>	573.33	10.00	563.33	73.33	6.67	66.67	500.00	3.33	496.67
<b>15</b>	<b>18/11/2019</b>	823.33	30.00	793.33	80.00	10.00	70.00	743.33	20.00	723.33
<b>16</b>		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
<b>17</b>		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
<b>18</b>	<b>12/12/2019</b>	603.33	23.33	580.00	66.67	20.00	46.67	536.67	3.33	533.33
<b>19</b>	<b>19/12/2019</b>	613.33	3.33	610.00	156.67	3.33	153.33	456.67	0.00	456.67
<b>20</b>	<b>27/12/2019</b>	620.00	36.67	583.33	143.33	36.67	106.67	476.67	0.00	476.67
<b>21</b>	<b>03/01/2020</b>	776.67	43.33	733.33	196.67	40.00	156.67	580.00	3.33	576.67
<b>22</b>	<b>10/01/2020</b>	723.33	83.33	640.00	106.67	60.00	46.67	616.67	23.33	593.33
<b>23</b>	<b>16/01/2020</b>	850.00	40.00	810.00	176.67	40.00	136.67	673.33	0.00	673.33
<b>24</b>	<b>23/01/2020</b>	683.33	33.33	650.00	140.00	20.00	120.00	543.33	13.33	530.00
<b>25</b>	<b>29/01/2020</b>	680.00	126.67	553.33	206.67	103.33	103.33	473.33	23.33	450.00
<b>26</b>	<b>06/02/2020</b>	606.67	26.67	580.00	126.67	16.67	110.00	480.00	10.00	470.00
<b>27</b>		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
<b>28</b>	<b>20/02/2020</b>	523.33	13.33	510.00	86.67	13.33	73.33	436.67	0.00	436.67
<b>29</b>	<b>26/02/2020</b>	586.67	33.33	553.33	80.00	26.67	53.33	506.67	6.67	500.00
<b>30</b>	<b>04/03/2020</b>	700.00	20.00	680.00	176.67	10.00	166.67	523.33	10.00	513.33

Fuente: Elaboración propia

S/R: Sin registro

**Tabla 9.4.** Mediciones semanales de los sólidos en el sistema N°2

SEM.	FECHA	SISTEMA N°02								
		PTO N°01								
		AF								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019	756.67	114.00	642.67	563.33	21.00	542.33	193.33	93.00	100.33
8	04/10/2019	700.00	105.00	595.00	225.00	95.00	130.00	475.00	10.00	465.00
9	10/10/2019	766.67	86.67	680.00	116.67	50.00	66.67	650.00	36.67	613.33
10	15/10/2019	713.33	100.00	613.33	180.00	86.67	93.33	533.33	13.33	520.00
11	22/10/2019	903.33	300.00	603.33	173.33	96.67	76.67	730.00	203.33	526.67
12	29/10/2019	743.33	136.67	606.67	223.33	110.00	113.33	520.00	26.67	493.33
13	05/11/2019	653.33	116.67	536.67	203.33	113.33	90.00	450.00	3.33	446.67
15	18/11/2019	923.33	156.67	766.67	233.33	100.00	133.33	690.00	56.67	633.33
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	726.67	96.67	630.00	200.00	93.33	106.67	526.67	3.33	523.33
19	19/12/2019	610.00	113.33	496.67	240.00	86.67	153.33	370.00	26.67	343.33
20	27/12/2019	753.33	163.33	590.00	323.33	130.00	193.33	430.00	33.33	396.67
21	03/01/2020	1026.67	193.33	833.33	373.33	146.67	226.67	653.33	46.67	606.67
22	10/01/2020	860.00	170.00	690.00	276.67	116.67	160.00	583.33	53.33	530.00
23	16/01/2020	846.67	173.33	673.33	253.33	136.67	116.67	593.33	36.67	556.67
24	23/01/2020	696.67	133.33	563.33	253.33	110.00	143.33	443.33	23.33	420.00
25	29/01/2020	820.00	150.00	670.00	310.00	110.00	200.00	510.00	40.00	470.00
26	06/02/2020	836.67	153.33	683.33	330.00	103.33	226.67	506.67	50.00	456.67
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	726.67	163.33	563.33	343.33	156.67	186.67	383.33	6.67	376.67
29	26/02/2020	740.00	143.33	596.67	263.33	110.00	153.33	476.67	33.33	443.33
30	04/03/2020	806.67	96.67	710.00	256.67	90.00	166.67	550.00	6.67	543.33

SEM.	FECHA	SISTEMA N°02								
		PTO N°07								
		R2								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019	1763.33	623.36	1139.97	773.33	500.24	273.09	990.00	123.12	866.88
8	04/10/2019	1966.67	1443.33	523.33	1246.67	1233.33	13.33	720.00	210.00	510.00
9	10/10/2019	920.00	496.67	423.33	383.33	376.67	6.67	536.67	120.00	416.67
10	15/10/2019	973.33	443.33	530.00	383.33	373.33	10.00	590.00	70.00	520.00
11	22/10/2019	1866.67	1336.67	530.00	1163.33	1133.33	30.00	703.33	203.33	500.00
12	29/10/2019	1210.00	643.33	566.67	593.33	530.00	63.33	616.67	113.33	503.33
13	05/11/2019	1520.00	1010.00	510.00	920.00	866.67	53.33	600.00	143.33	456.67
15	18/11/2019	2603.33	1926.67	676.67	1613.33	1593.33	20.00	990.00	333.33	656.67
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	1663.33	1100.00	563.33	1020.00	950.00	70.00	643.33	150.00	493.33
19	19/12/2019	900.00	430.00	470.00	530.00	420.00	110.00	370.00	10.00	360.00
20	27/12/2019	1306.67	750.00	556.67	800.00	676.67	123.33	506.67	73.33	433.33
21	03/01/2020	1650.00	906.67	743.33	873.33	773.33	100.00	776.67	133.33	643.33
22	10/01/2020	990.00	400.00	590.00	366.67	330.00	36.67	623.33	70.00	553.33
23	16/01/2020	1473.33	766.67	706.67	740.00	653.33	86.67	733.33	113.33	620.00
24	23/01/2020	1223.33	596.67	626.67	646.67	533.33	113.33	576.67	63.33	513.33
25	29/01/2020	1236.67	656.67	580.00	646.67	573.33	73.33	590.00	83.33	506.67
26	06/02/2020	1540.00	956.67	583.33	916.67	823.33	93.33	623.33	133.33	490.00
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	1270.00	713.33	556.67	776.67	653.33	123.33	493.33	60.00	433.33
29	26/02/2020	3773.33	2700.00	1073.33	2803.33	2356.67	446.67	970.00	343.33	626.67
30	04/03/2020	1776.67	640.00	1136.67	1113.33	573.33	540.00	663.33	66.67	596.67

SEM.	FECHA	SISTEMA N°02								
		PTO N°08								
		R2 -EF								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019									
8	04/10/2019									
9	10/10/2019									
10	15/10/2019	716.67	156.67	560.00	76.67	76.67	0.00	640.00	80.00	560.00
11	22/10/2019	1290.00	763.33	526.67	670.00	653.33	16.67	620.00	110.00	510.00
12	29/10/2019	720.00	173.33	546.67	206.67	143.33	63.33	513.33	30.00	483.33
13	05/11/2019	1160.00	636.67	523.33	616.67	550.00	66.67	543.33	86.67	456.67
15	18/11/2019	1820.00	1070.00	750.00	953.33	886.67	66.67	866.67	183.33	683.33
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	1196.67	603.33	593.33	653.33	516.67	136.67	543.33	86.67	456.67
19	19/12/2019	623.33	133.33	490.00	246.67	113.33	133.33	376.67	20.00	356.67
20	27/12/2019	1010.00	406.67	603.33	570.00	403.33	166.67	440.00	3.33	436.67
21	03/01/2020	1283.33	266.67	1016.67	303.33	226.67	76.67	980.00	40.00	940.00
22	10/01/2020	770.00	160.00	610.00	183.33	136.67	46.67	586.67	23.33	563.33
23	16/01/2020	1003.33	236.67	766.67	363.33	206.67	156.67	640.00	30.00	610.00
24	23/01/2020	840.00	186.67	653.33	306.67	173.33	133.33	533.33	13.33	520.00
25	29/01/2020	856.67	210.00	646.67	333.33	193.33	140.00	523.33	16.67	506.67
26	06/02/2020	790.00	140.00	650.00	260.00	100.00	160.00	530.00	40.00	490.00
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	780.00	186.67	593.33	320.00	183.33	136.67	460.00	3.33	456.67
29	26/02/2020	870.00	300.00	570.00	310.00	246.67	63.33	560.00	53.33	506.67
30	04/03/2020	803.33	100.00	703.33	283.33	100.00	183.33	520.00	0.00	520.00

SEM.	FECHA	SISTEMA N°02								
		PTO N°09								
		REC.2								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019	1373.33	793.33	580.00	706.67	156.67	550.00	666.67	636.67	30.00
8	04/10/2019	2160.00	1620.00	540.00	1443.33	1386.67	56.67	716.67	233.33	483.33
9	10/10/2019	5053.33	4570.00	483.33	3833.33	3806.67	26.67	1220.00	763.33	456.67
10	15/10/2019	4143.33	3503.33	640.00	3036.67	2923.33	113.33	1106.67	580.00	526.67
11	22/10/2019	3293.33	2806.67	486.67	2393.33	2353.33	40.00	900.00	453.33	446.67
12	29/10/2019	1843.33	1323.33	520.00	1126.67	1096.67	30.00	716.67	226.67	490.00
13	05/11/2019	1263.33	733.33	530.00	700.00	626.67	73.33	563.33	106.67	456.67
15	18/11/2019	2773.33	2050.00	723.33	1730.00	1686.67	43.33	1043.33	363.33	680.00
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	1673.33	1083.33	590.00	1003.33	933.33	70.00	670.00	150.00	520.00
19	19/12/2019	1243.33	703.33	540.00	790.00	650.00	140.00	453.33	53.33	400.00
20	27/12/2019	1520.00	946.67	573.33	1000.00	850.00	150.00	520.00	96.67	423.33
21	03/01/2020	2096.67	1353.33	743.33	1266.67	1153.33	113.33	830.00	200.00	630.00
22	10/01/2020	1510.00	960.00	550.00	866.67	816.67	50.00	643.33	143.33	500.00
23	16/01/2020	2760.00	2023.33	736.67	390.00	296.67	93.33	2370.00	1726.67	643.33
24	23/01/2020	1010.00	456.67	553.33	480.00	413.33	66.67	530.00	43.33	486.67
25	29/01/2020	1040.00	466.67	573.33	486.67	400.00	86.67	553.33	66.67	486.67
26	06/02/2020	760.00	120.00	640.00	176.67	80.00	96.67	583.33	40.00	543.33
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	956.67	343.33	613.33	473.33	333.33	140.00	483.33	10.00	473.33
29	26/02/2020	1113.33	496.67	616.67	566.67	423.33	143.33	546.67	73.33	473.33
30	04/03/2020	3020.00	2373.33	646.67	2250.00	2073.33	176.67	770.00	300.00	470.00

SEM.	FECHA	SISTEMA N°02								
		PTO N°10								
		S2								
		ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	STV(mg/L)	SSV(mg/L)	SDV(mg/L)	STF(mg/L)	SSF(mg/L)	SDF(mg/L)
7	25/09/2019									
8	04/10/2019	560.00	7.50	552.50	42.50	5.00	37.50	517.50	2.50	515.00
9	10/10/2019	720.00	50.00	670.00	556.67	33.33	523.33	163.33	16.67	146.67
10	15/10/2019	563.33	53.33	510.00	16.67	16.67	0.00	546.67	36.67	510.00
11	22/10/2019	566.67	50.00	516.67	66.67	10.00	56.67	500.00	40.00	460.00
12	29/10/2019	546.67	13.33	533.33	60.00	13.33	46.67	486.67	0.00	486.67
13	05/11/2019	550.00	16.67	533.33	93.33	16.67	76.67	456.67	0.00	456.67
15	18/11/2019	783.33	43.33	740.00	56.67	16.67	40.00	726.67	26.67	700.00
16		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
17		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
18	12/12/2019	580.00	20.00	560.00	70.00	13.33	56.67	510.00	6.67	503.33
19	19/12/2019	493.33	26.67	466.67	110.00	23.33	86.67	383.33	3.33	380.00
20	27/12/2019	760.00	183.33	576.67	280.00	183.33	96.67	480.00	0.00	480.00
21	03/01/2020	866.67	60.00	806.67	226.67	53.33	173.33	640.00	6.67	633.33
22	10/01/2020	723.33	110.00	613.33	130.00	93.33	36.67	593.33	16.67	576.67
23	16/01/2020	860.00	136.67	723.33	183.33	126.67	56.67	676.67	10.00	666.67
24	23/01/2020	660.00	66.67	593.33	133.33	46.67	86.67	526.67	20.00	506.67
25	29/01/2020	633.33	73.33	560.00	166.67	66.67	100.00	466.67	6.67	460.00
26	06/02/2020	640.00	36.67	603.33	146.67	36.67	110.00	493.33	0.00	493.33
27		S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
28	20/02/2020	626.67	13.33	613.33	136.67	13.33	123.33	490.00	0.00	490.00
29	26/02/2020	610.00	26.67	583.33	103.33	26.67	76.67	506.67	0.00	506.67
30	04/03/2020	663.33	33.33	630.00	186.67	33.33	153.33	476.67	0.00	476.67

Fuente: Elaboración propia

S/R: Sin registro

### ANEXO N°4. REGISTRO SEMANAL DE LA DBO<sub>5</sub> TOTAL, SOLUBLE Y EFICIENCIAS DE REMOCIÓN

Tabla 9.5. Mediciones semanales de la DBO<sub>5</sub> total y soluble en el sistema N°1

SEM.	DIA	FECHA	SISTEMA N°01													EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 TOTAL DEL SISTEMA (%)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 SOLUBLE DEL SISTEMA (%)
			PTO N° 01			PTO N° 02		PTO N° 03				PTO N° 04					
			AFLUENTE			SELECTOR		REACTOR N°01				EFLUENTE N°01					
			DBO 5 TOTAL (mg/L)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	SOLUBILIDAD (%)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	EFICIENCIA EF. DBO 5 SOLUBLE (%)	DBO 5 TOTAL (mg/L)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	SOLUBILIDAD (%)	EFICIENCIA		DBO 5 TOTAL (mg/L)	EFICIENCIA EF. DBO 5 TOTAL (%)			
EF. DBO 5 TOTAL (%)	EF. DBO 5 SOLUBLE (%)																
5	21	09/09/2019	205.56	125.64	61.12			28.33	3.30	11.65	86.22	97.37				97.37	
6	26	16/09/2019	188.78	98.78	52.33			15.95	5.34	33.48	91.55	94.59				94.59	
7	31	23/09/2019	212.13	110.52	52.10			15.56	4.60	29.56	92.66	95.84				95.84	
8	36	30/09/2019	233.55	95.84	41.04			12.42	7.64	61.51	94.68	92.03	36.05	-190.26	84.56	92.03	
9	41	07/10/2019	161.39	86.93	53.86			19.10	4.76	24.92	88.17	94.52	16.07	15.86	90.04	94.52	
10	46	14/10/2019	211.13	77.55	36.73			20.10	4.76	23.68	90.48	93.86	19.23	4.33	90.89	93.86	
11	51	21/10/2019	152.80	90.22	59.04			13.73	3.83	27.90	91.01	95.75	11.66	15.08	92.37	95.75	
12	56	28/10/2019	237.94	75.66	31.80			14.42	4.49	31.14	93.94	94.07	11.29	21.71	95.26	94.07	
13	61	04/11/2019	125.09	46.39	37.09	46.60	-0.45	18.50	2.98	16.11	85.21	93.61	6.87	62.86	94.51	93.58	
14	66	11/11/2019	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	
15	71	18/11/2019	208.43	96.75	46.42	46.19	52.26	15.49	3.66	23.63	92.57	92.08	13.72	11.43	93.42	96.22	
16	76	25/11/2019	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	
17	81	02/12/2019	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	
18	86	09/12/2019	235.26	90.58	38.50	43.73	51.72	13.27	4.34	32.71	94.36	90.08	11.32	14.69	95.19	95.21	
19	91	16/12/2019	158.80	59.85	37.69	94.22	-57.43	7.82	4.43	56.65	95.08	95.30	9.07	-15.98	94.29	92.60	
20	96	23/12/2019	205.88	80.65	39.17	38.62	52.11	16.33	3.25	19.90	92.07	91.58	10.68	34.60	94.81	95.97	
21	101	30/12/2019	229.86	107.84	46.92	36.49	66.16	19.04	2.34	12.29	91.72	93.59	18.84	1.05	91.80	97.83	
22	106	06/01/2020	319.92	105.29	32.91	48.18	54.24	9.19	3.86	42.00	97.13	91.99	8.07	12.19	97.48	96.33	
23	111	13/01/2020	181.40	65.09	35.88	52.47	19.39	8.79	3.34	38.00	95.15	93.63	7.29	17.06	95.98	94.87	
24	116	20/01/2020	171.12	89.64	52.38	60.77	32.21	14.84	5.69	38.34	91.33	90.64	17.33	-16.78	89.87	93.65	
25	121	27/01/2020	198.95	106.33	53.45	52.70	50.44	14.96	4.27	28.54	92.48	91.90	9.97	33.36	94.99	95.98	
26	126	03/02/2020	155.42	93.72	60.30	33.36	64.40	7.87	4.28	54.38	94.94	87.17	7.51	4.57	95.17	95.43	
27	131	10/02/2020	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	
28	136	17/02/2020	183.03	88.43	48.31	45.59	48.45	8.41	1.83	21.76	95.41	95.99	6.65	20.93	96.37	97.93	
29	141	24/02/2020	216.64	98.20	45.33	52.47	46.57	17.33	2.54	14.66	92.00	95.16	13.75	20.66	93.65	97.41	
30	146	02/03/2020	166.77	86.24	51.71	14.70	82.95	16.04	3.15	19.64	90.38	78.57	9.36	41.65	94.39	96.35	

Fuente: Elaboración propia

S/R: Sin registro

Tabla 9.6. Mediciones semanales de la DBO<sub>5</sub> total y soluble en el sistema N°2

SEM.	DIA	FECHA	SISTEMA N°02												EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 TOTAL DEL SISTEMA (%)	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 SOLUBLE DEL SISTEMA (%)
			PTO N° 01			PTO N° 05						PTO N° 06				
			AFLUENTE			REACTOR N°02						EFLUENTE N°02				
			DBO 5 TOTAL (mg/L)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	SOLUBILIDAD (%)	DBO 5 TOTAL (mg/L)	DBO5 SOLUBLE (mg/L)	SOLUBILIDAD (%)	EFICIENCIA		DBO 5 TOTAL (mg/L)	EFICIENCIA EF. DBO 5 TOTAL (%)				
EF. DBO 5 TOTAL (%)	EF .DBO 5 SOLUBLE (%)															
5	21	09/09/2019	205.56	125.64	61.12	27.76	8.62	31.05	86.50	93.14					93.14	
6	26	16/09/2019	188.78	98.78	52.33	26.74	8.79	32.87	85.84	91.10					91.10	
7	31	23/09/2019	212.13	110.52	52.10	23.89	8.50	35.58	88.74	92.31					92.31	
8	36	30/09/2019	233.55	95.84	41.04	19.79	6.19	31.28	91.53	93.54	23.65	-19.50	89.87		93.54	
9	41	07/10/2019	161.39	86.93	53.86	17.27	5.01	29.01	89.30	94.24	12.99	24.78	91.95		94.24	
10	46	14/10/2019	211.13	77.55	36.73	15.80	6.88	43.54	92.52	91.13	19.16	-21.27	90.93		91.13	
11	51	21/10/2019	152.80	90.22	59.04	12.51	4.38	35.01	91.81	95.15	15.05	-20.30	90.15		95.15	
12	56	28/10/2019	237.94	75.66	31.80	19.06	4.00	20.99	91.99	94.71	14.74	22.67	93.81		94.71	
13	61	04/11/2019	125.09	46.39	37.09	11.34	3.07	27.07	90.93	93.38	10.89	3.97	91.29		93.38	
14	66	11/11/2019	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	
15	71	18/11/2019	208.43	96.75	46.42	16.57	5.52	33.31	92.05	94.29	15.78	4.77	92.43		94.29	
16	76	25/11/2019	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	
17	81	02/12/2019	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	
18	86	09/12/2019	235.26	90.58	38.50	19.53	6.12	31.34	91.70	93.24	13.30	31.90	94.35		93.24	
19	91	16/12/2019	158.80	59.85	37.69	14.53	7.78	53.54	90.85	87.00	15.74	-8.33	90.09		87.00	
20	96	23/12/2019	205.88	80.65	39.17	17.59	4.51	25.64	91.46	94.41	14.21	19.22	93.10		94.41	
21	101	30/12/2019	229.86	107.84	46.92	20.32	2.56	12.60	91.16	97.63	21.11	-3.89	90.82		97.63	
22	106	06/01/2020	319.92	105.29	32.91	10.89	4.44	40.77	96.60	95.78	10.50	3.58	96.72		95.78	
23	111	13/01/2020	181.40	65.09	35.88	10.86	3.81	35.08	94.01	94.15	16.48	-51.75	90.92		94.15	
24	116	20/01/2020	171.12	89.64	52.38	12.85	3.89	30.27	92.49	95.66	11.26	12.37	93.42		95.66	
25	121	27/01/2020	198.95	106.33	53.45	9.02	3.66	40.58	95.47	96.56	10.70	-18.63	94.62		96.56	
26	126	03/02/2020	155.42	93.72	60.30	8.94	3.96	44.30	94.25	95.77	7.65	14.43	95.08		95.77	
27	131	10/02/2020	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	
28	136	17/02/2020	183.03	88.43	48.31	9.66	1.81	18.74	94.72	97.95	8.22	14.91	95.51		97.95	
29	141	24/02/2020	216.64	98.20	45.33	7.04	2.60	36.93	96.75	97.35	5.91	16.05	97.27		97.35	
30	146	02/03/2020	166.77	86.24	51.71	8.27	2.74	33.13	95.04	96.82	7.55	8.71	95.47		96.82	

Fuente: Elaboración propia

S/R: Sin registro

## ANEXO N°5. REGISTRO DE CARGA MÁSCICA F/M y IVL SEMANALES

**Tabla 9.7.** Parámetros operativos (carga máscica F/M) y valores de IVL semanales de los sistemas N°1 y N°2

SEMANA	SISTEMA N°1		SISTEMA N°2	
	F/M (d <sup>-1</sup> )	IVL-R1	F/M	IVL-R2
7	3.584	S/R	1.769	S/R
8	1.025	245.20	0.790	86.60
9	1.122	180.50	1.787	148.00
10	0.796	156.50	2.359	176.60
11	0.489	239.20	0.562	123.40
12	0.631	280.90	1.873	178.80
13	0.455	467.30	0.602	188.10
14	S/R	S/R	S/R	S/R
15	0.604	195.00	0.546	145.30
16	S/R	S/R	S/R	S/R
17	S/R	S/R	S/R	S/R
18	2.474	485.90	1.033	390.90
19	1.670	138.40	1.577	279.10
20	3.529	226.00	1.269	240.00
21	1.498	253.30	1.240	375.00
22	1.982	303.60	4.044	800.00
23	0.701	154.60	1.158	306.50
24	3.629	329.50	1.338	335.20
25	1.037	380.30	1.447	274.10
26	1.852	116.30	0.787	308.40
27	S/R	S/R	S/R	S/R
28	2.224	321.40	1.169	504.70
29	0.384	64.30	0.383	174.10
30	0.852	150.50	1.213	484.40

Fuente: Elaboración propia

S/R: Sin registro