

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“AIREACIÓN INTERMITENTE PARA LA REMOCIÓN
BIOLÓGICA DE NITRÓGENO DE AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS CON UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS
CON MEDIO DE ADHERENCIA SUMERGIDO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

YEAN CARLOS ARAPA MAMANI

ASESOR:

ING. OTTO BRUNO ROSASCO GERKES

LIMA - PERÚ

2020

DEDICATORIA

A Dios, por el don de la vida y darme las facultades físicas necesarias.

A mi madre, que me enseñó que para alcanzar las metas no hay atajos, y que las cosas se hacen, no se dicen, porque al hacerlas se dicen solas.

Y a mi padre, que me enseñó que cuando se tiene que hacer algo importante, uno debe tomarse su tiempo y hacerlo bien.

A mis hermanos José, Rivaldo y Neil, que me motivaron a ser mejor persona y sobretodo paciente.

Y finalmente a mis amigos que me brindaron palabras de aliento en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, Ing. Otto Bruno Rosasco Gerkes, por su predisposición, ayuda y orientación que me brindo durante la realización de la presente investigación, por su amistad y sobre todo por su curiosidad tan contagiosa que motiva a profundizar más en los estudios.

A la Directora del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos, Dra. Ing. Rosa Elena Yaya Beas, por facilitarme todos los recursos necesarios y permitirme realizar la presente tesis de investigación en las instalaciones del CITRAR-FIA-UNI.

Al Sr. Oscar, la Sra. Margarita y la Srta. Luz Marina por todo su apoyo y facilitarme las instalaciones del LIA-FIA para realizar las determinaciones analíticas planteadas en la presente investigación.

A mis compañeros y amigos, Litza, Mayra, Javier, Martin, Laleshka, Naomi, Gladys, Rocio, Claudia, George, Carlos, y en especial a Lilian por ayudarme con el abstract de esta tesis, entre otros. Por su apoyo, amistad y sus ánimos en momentos de dificultad durante la realización del presente trabajo.

Al Sr. Manuel y Ramses por su ayuda y paciencia al momento de instalar y armar el sistema, además de sus consejos tan útiles a la hora de operar y mantener el reactor.

A mis padres, Andrés y Nélide que sacrificaron gran parte de sus horas de sueño para darme un futuro mejor, y por la comprensión, paciencia y apoyo moral.

Y por último, hago un extenso agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo satisfactorio de la presente investigación.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se ha evaluado el desempeño de un reactor de lodos activados con medio de adherencia fijo que fue operado con aireación intermitente para la remoción simultánea del nitrógeno total y la materia orgánica carbonácea. La capacidad del tanque de aireación fue de 81.2 L, de las cuales el medio de adherencia ocupó menos de 1L, sin embargo, estuvieron homogéneamente distribuidos en el 70% del volumen útil del reactor. El medio de adherencia fijo estuvo compuesto de hebras de polipropileno agrupadas en 40 columnas y fijadas verticalmente a un soporte de acero inoxidable. El reactor fue alimentado con agua residual doméstica pre-tratada del CITRAR-UNI-FIA y con un caudal constante durante las 24 horas del día. Se experimentaron con 6 escenarios diferentes, tres de los cuales con un TRH de 8.7 h y los tres restantes con un TRH de 11.7, además los escenarios se operaron con patrones de aireación intermitente que iban desde 40 min de aireación y 140 min de mezcla sin aireación hasta 120 min de aireación y 60 min de mezcla en ciclos de 3 horas. Los parámetros que se evaluaron fueron: temperatura, pH, turbiedad, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO, SST, SSV, NTK, N-amoniaco, nitritos, nitratos y N-total. Los mejores resultados, en cuanto a la remoción de N-total, se obtuvieron con el patrón de aireación/no aireación de 90/90 min, alcanzándose una eficiencia media del 81.18% y una concentración media del efluente de 12.58 mg/L, y con respecto a la remoción de materia orgánica carbonácea (DQO) se obtuvieron eficiencias alrededor de 86% y concentraciones medias en el efluente alrededor de 34 mg/L en los escenarios que operaron con patrones de aireación/no aireación de 90/90 min y 120/60 min. Estos resultados nos indican que la aireación intermitente es una buena opción para mejorar el desempeño de reactores existentes en cuanto a la remoción de nitrógeno total y materia orgánica carbonácea.

ABSTRACT

In this research, the performance of an activated sludge reactor with fixed adhesion medium has been evaluated, the reactor was operated with intermittent aeration for simultaneous removal of total nitrogen and carbonaceous organic matter. The capacity of the aeration tank was 81.2 L, where the adhesion medium occupied less than 1L, however, they were homogeneously distributed in 70% of the useful volume of the reactor. The fixed adhesion medium was composed of polypropylene strands grouped into 40 columns and fixed vertically to a stainless steel support. The reactor was fed with pre-treated domestic wastewater from CITRAR-UNI-FIA and at a constant flow during 24 hours a day. The research covered 6 different scenarios, three of them with an HRT of 8.7 h and the remaining three with an HRT of 11.7 h, in addition the scenarios were operated with intermittent aeration patterns ranging from 40 min of aeration and 140 min of mixing without aeration, to 120 min of aeration and 60 min of mixing without aeration in 3-hour cycles. The parameters that were evaluated were: temperature, pH, turbidity, dissolved oxygen, BOD₅, COD, TSS, VSS, TKN, Ammonia-N, nitrites, nitrates and Total-N. The best results, in terms of N-total removal, were obtained with the aeration/non-aeration pattern of 90/90 min, reaching an average efficiency of 81.18% and an average effluent concentration of 12.58 mg/L, and about the removal of carbonaceous organic matter (COD), efficiencies were obtained around 86% and average concentrations in the effluent around 34 mg/L in the scenarios that operated with aeration/non-aeration patterns of 90/90 min and 120 / 60 min. These results indicate that intermittent aeration is a good option to improve the performance of existing reactors in terms of the removal of total nitrogen and carbonaceous organic matter.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT.....	V
1. CAPÍTULO I.	1
INTRODUCCIÓN.....	1
2. CAPÍTULO II	2
ANTECEDENTES	2
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
2.1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
2.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
2.1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	5
2.2. OBJETIVO PRINCIPAL.....	6
2.3. OBJETIVOS SECUNDARIOS	6
2.4. HIPÓTESIS.....	6
2.5. VARIABLES DE ESTUDIO	7
2.5.1. VARIABLES INDEPENDIENTES.....	7
2.5.2. VARIABLES DEPENDIENTES	7
2.5.3. VARIABLES INTERVINIENTES	8
2.5.4. PARÁMETROS DE CONTROL DE PROCESOS	8
2.6. MARCO LEGAL.....	9
2.6.1. ASPECTOS LEGALES DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ	9
3. CAPÍTULO III	10
MARCO TEÓRICO	10
3.1. SISTEMAS HÍBRIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.	10
3.1.1. PRINCIPIOS DE LA TECNOLOGÍA IFAS.....	10
3.2. NITRÓGENO EN EL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	17
3.2.1. TRANSFORMACIÓN BIOLÓGICA DEL NITRÓGENO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	20
3.2.2. NITRIFICACIÓN.	20

3.2.3.	DESNITRIFICACIÓN.....	23
3.2.4.	NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN SIMULTÁNEA.	25
3.3.	REMOCIÓN BIOLÓGICA DEL NITRÓGENO UTILIZANDO AIREACIÓN INTERMITENTE.....	26
4.	CAPÍTULO IV	29
	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	29
4.1.	UBICACIÓN DEL SISTEMA.....	29
4.2.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	29
4.2.1.	AGUA RESIDUAL AFLUENTE.	31
4.2.2.	COMPONENTES DEL SISTEMA.....	32
4.3.	DIMENSIONES DEL REACTOR – ESCALA LABORATORIO.....	36
4.4.	CAUDALES DE OPERACIÓN.....	40
4.5.	PARÁMETROS DE MEDICIÓN Y CONTROL.....	40
4.5.1.	PARÁMETROS EVALUADOS.....	40
4.5.2.	MÉTODOS.....	41
4.6.	FRECUENCIA DE MONITOREO.....	42
4.7.	PUNTOS DE MUESTREO.	43
4.8.	ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN.	43
4.8.1.	PUESTA EN MARCHA.....	43
4.8.2.	EVALUACIÓN DEL REACTOR.	44
4.8.3.	CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	46
5.	CAPÍTULO V	48
	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	48
5.1.	PUESTA EN MARCHA.....	48
5.2.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA.....	49
6.	CAPÍTULO VI	55
	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	55
6.1.	TEMPERATURA AMBIENTAL Y DEL AGUA RESIDUAL.	55
6.2.	POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).....	58
6.2.1.	RELACIÓN DE PH Y TEMPERATURA.....	60
6.3.	TURBIEDAD.	62
6.3.1.	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD.....	63
6.4.	OXÍGENO DISUELTO.	65

6.4.1.	ETAPA 1.....	69
6.4.2.	ETAPA 2.....	72
6.5.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.....	77
6.5.1.	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO.	77
6.6.	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	82
6.6.1.	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO	82
6.6.2.	RELACIÓN DE DQO Y DBO ₅	87
6.7.	NITRÓGENO	90
6.7.1.	ETAPA 1.....	90
6.7.2.	ETAPA 2	96
6.7.3.	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL, NTK Y NITRÓGENO AMONIAICAL	101
6.7.4.	RELACIÓN DE TEMPERATURA Y EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE N-TOTAL Y DQO.	111
6.7.5.	RELACIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE N-TOTAL Y PH.....	113
6.8.	SÓLIDOS.	115
6.8.1.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	115
6.8.2.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES	116
6.8.3.	BIOMASA EN EL LICOR MIXTO Y EN EL MEDIO DE ADHERENCIA.....	118
6.9.	DEL CUMPLIMIENTO DEL MARCO LEGAL.....	122
6.9.1.	CON RESPECTO A LOS LMP.	122
6.9.2.	CON RESPECTO A LOS ECA.	123
7.	CAPÍTULO VII	126
	CONCLUSIONES.....	126
8.	CAPÍTULO VIII	128
	RECOMENDACIONES.....	128
9.	CAPÍTULO IX	130
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	130
10.	CAPÍTULO X	133
	ANEXOS	133
10.1.	ANEXO N° 1: MARCO LEGAL.....	133
10.2.	ANEXO N° 2: TABLAS DE MONITOREOS DIARIOS.....	142
10.3.	ANEXO N° 3: TABLAS DE VALORES PROMEDIO POR SEMANA.....	151

10.4.	ANEXO N° 4: METODOLOGÍA DEL HIDRÓXIDO DE SODIO PARA LA DETERMINACIÓN DE SST Y SSV.....	184
10.5.	ANEXO N° 5: PANEL FOTOGRÁFICO.....	185

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.	Clasificación moderna de los procesos mecanizados de tratamiento aerobio, con respecto al estado de la biomasa (adaptado de Lazarova y Manen, 1994.)	10
Figura 3.2.	Proceso IFAS versus proceso convencional de lodos activados.....	11
Figura 3.3.	Representación esquemática de los gradientes de O.D. y DBO en el floc.	14
Figura 3.4.	Estructura típica de un floc de lodo activado.	14
Figura 3.5.	Representación esquemática de una sección de biopelícula.	16
Figura 3.6.	Distribución de los componentes nitrogenados en el agua residual doméstica.	18
Figura 3.7.	Distribución del nitrógeno en un sistema de tratamiento con nitrificación.	23
Figura 3.8.	Distribución del nitrógeno en un sistema de tratamiento con nitrificación y desnitrificación.	24
Figura 3.9.	Sección de corte de un floc.	26
Figura 3.10.	Variación del pH a lo largo del ciclo.	28
Figura 4.1.	Ubicación del reactor IFAS a escala de laboratorio en la zona de tesis N° 1 CITRAR UNI.	29
Figura 4.2.	Diagrama de flujo del recorrido del agua residual en la investigación.	30
Figura 4.3.	Componentes del sistema a escala de laboratorio.	32
Figura 4.4.	Componentes internos del reactor a escala de laboratorio.	33
Figura 4.5.	Vista del isométrico y dimensiones del reactor a escala de laboratorio.	36
Figura 4.6.	Vista interior del reactor a escala de laboratorio.	37
Figura 4.7.	Vista de planta y dimensiones del reactor a escala de laboratorio.	37
Figura 4.8.	Vista lateral y dimensiones del reactor a escala de laboratorio.	38
Figura 4.9.	Visión general de todas las etapas de la investigación.	46

- Figura 10.0.** Biomasa extraída de las hebras de polipropileno, antes de la determinación de SST y SSV.184
- Figura 10.1.** Tanque de almacenamiento y piezómetro, tanque eternit de 600 L con las válvulas de control, de descarga y distribución al sistema, acopladas en la parte inferior.185
- Figura 10.2.** Motor de ventilador, adaptado para utilizarlo como mezclador homogenizador del tanque de almacenamiento, ubicado sobre la tapa del tanque, operó a 30 rpm.185
- Figura 10.3.** Se muestra el tablero de control empotrado a la pared y en la izquierda de la figura se muestra los elementos internos del tablero compuesto por una llave termomagnética, diferencial, dos contactores, dos timer digitales y dos tomacorrientes.186
- Figura 10.4.** Mangueras siliconadas de Ø 3/8 pulg. forradas con cinta aislante negra para evitar el desarrollo de algas en su pared interna. Va hacia la bomba peristáltica.186
- Figura 10.5.** Bomba peristáltica Cole-Parmer con dos cabezales para mangueras masterflex de Ø 3/8 pulg. La imagen de la derecha muestra su ubicación en la caja de concreto.187
- Figura 10.6.** En la derecha de la imagen se muestra las dos mangueras de impulsión de Ø 3/8 pulg. con sus respectivas válvulas de paso y purga, además, se muestra la zona de ingreso en la que se aprecia las tuberías sumergidas.187
- Figura 10.7.** Tuberías de CPVC de Ø 1/2 pulg. y 42 cm de longitud, de ingreso sumergido.188
- Figura 10.8.** Reactor de vidrio de 6 mm de espesor con medio de adherencia fijo de hebras de polipropileno ancladas al soporte de acero inoxidable y tuberías de CPVC.188
- Figura 10.9.** Disposición de los 6 difusores de piedra de burbuja fina, pegados en la base del reactor de vidrio.189
- Figura 10.10.** Vertedero de aluminio de 30 cm de largo por 5 cm de ancho y alto, además, se observa la tubería de PVC de paso hacia el decantador secundario.189
- Figura 10.11.** Mezclador de dos paletas apoyado en los arcos de soporte, ubicado por encima del reactor. El mezclador fue adaptado de un equipo de prueba de jarras y operó a 55 rpm.190
- Figura 10.12.** Detalle de paletas de acero inoxidable, operó con una longitud sumergida de 35 cm, por debajo del medio fijo y por encima de los difusores.190
- Figura 10.13.** La imagen de la derecha muestra el compresor de aire marca ACO de 60 L/min, y la imagen de la izquierda muestra la canastilla donde se ubicó.191

- Figura 10.14.** Sedimentador secundario, en la imagen de la izquierda se observa el interior del sedimentador donde está el vertedero de embudo y la tubería de ingreso sumergido al sedimentador, en la imagen de la derecha se observa una vista de perfil del sedimentador vacío.191
- Figura 10.15.** Salida del sedimentador y sistema de recolección conformado por un embudo y tuberías de PVC de Ø 1 pulg.192
- Figura 10.16.** Cuerdas de polipropileno de Ø 3/8 pulg. y 35.5 cm de longitud, en la imagen de la izquierda se aprecia las cuerdas seccionadas y en la imagen de la derecha una cuerda deshilachada en hebras.193
- Figura 10.17.** Marco de soporte compuesto de varillas de acero inoxidable dentro de mangueras siliconadas de Ø 3/8 pulg. y conectadas con codos (horizontales), estos unidos mediante cuatro secciones de tubería de CPVC de Ø 1/2 pulg. y 35 cm de longitud (verticales).193
- Figura 10.18.** Encaje de prueba del marco de soporte apoyado sobre las cuñas de vidrio y dentro del reactor.194
- Figura 10.19.** Elaboración del medio de adherencia fijo, que consistió en el tendido de cuerdas de manera horizontal en la parte superior e inferior del marco de soporte, luego se procedió a fijar las hebras de polipropileno de manera transversal, mediante el cosido manual con las cuerdas horizontales.194
- Figura 10.20.** Medio de adherencia fijo instalado dentro del reactor de vidrio. ...195
- Figura 10.21.** Vista superior del medio de adherencia fijo donde se aprecia los espacios dejados para las dos paletas del mezclador.195
- Figura 10.22.** La imagen de la izquierda muestra el potenciómetro HACH AQ11D con el cual se midió el pH, y en la derecha se muestra en turbidímetro HACH 2100Q, equipo utilizado para la medición de turbiedad.196
- Figura 10.23.** En la izquierda se observa el equipo HACH HQ40D, utilizado para la medición de oxígeno disuelto y temperatura de la muestra, en la derecha el proceso de medición.196
- Figura 10.24.** En la imagen de la izquierda se observa en colorímetro HACH 890 en la cual se midió la DQO, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos, en la derecha se aprecia en digestor de viales HACH DRB 200, el cual se utilizó para digerir los viales de DQO.197
- Figura 10.25.** En la izquierda se aprecia el proceso de medición con el colorímetro y en la derecha los viales para la determinación de nitrógeno amoniacal y las celdas usadas para la determinación de nitritos y nitratos.197
- Figura 10.26.** En la imagen de la izquierda se observa la aireación del agua de dilución, en la derecha los 12 frascos winkler, de los cuales 2 de ellos fueron usados como blancos y 5 frascos para las diferentes diluciones del afluente y otros 5 para el efluente.198

Figura 10.27. Proceso de adición de los 4 nutrientes al agua de dilución, 1 mL de cada uno por litro de agua destilada saturada en oxígeno.	198
Figura 10.28. Filtros de fibra de vidrio de 45 mm, usados para determinar los SST y SSV de las muestras del agua residual afluyente, efluente y del tanque de aireación.	199
Figura 10.29. Compresor y tubo de vacío para el proceso de filtrado de las muestras.	199
Figura 10.30. Plancha de evaporación de las muestras, calienta hasta 300 °C.	200
Figura 10.31. A la izquierda se observa el horno mufla que calcina a 550 °C y a la derecha se puede apreciar la estufa que calienta a 105° C.	200
Figura 10.32. A la izquierda se observa el desecador con las muestras en proceso de secado, y a la derecha se aprecia las muestras secas y enfriadas, listos para su pesado correspondiente.	201
Figura 10.33. La balanza analítica usada para el proceso de pesado de las muestras de sólidos (SST y SSV).	201
Figura 10.34. Muestras tomadas en el primer escenario evaluado, de izquierda a derecha se observa la muestra del afluyente, tanque de aireación y efluente respectivamente, alta concentración de SST en el tanque de aireación, es decir alta biomasa suspendida y efluente regularmente clarificado.	202
Figura 10.35. Muestras tomadas en el quinto escenario evaluado, se observa la baja concentración de SST en el tanque de aireación, es decir hubo poca biomasa suspendida y efluente muy clarificado.	202
Figura 10.36. Muestras del afluyente y efluente tomadas para la determinación de NTK, estas muestras se midieron en un laboratorio acreditado (Servicios Analítico Generales S.A.C).	203
Figura 10.37. Fotografía del medio de adherencia fijo en el primer escenario evaluado, tomada durante la primera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón blanquecina durante todo el mes de evaluación y además se presentó el desarrollo de algas en el medio fijo.	203
Figura 10.38. Fotografía del medio de adherencia fijo en el segundo escenario evaluado, tomada en la primera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón al inicio del escenario, sin embargo, las 2 últimas semanas evaluadas la biopelícula se tornó marrón blanquecina y hubo desarrollo de algas.	204
Figura 10.39. Fotografía del medio de adherencia fijo en el tercer escenario evaluado, tomada en la segunda semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón durante todo el periodo evaluado.	204

Figura 10.40. Fotografía del medio de adherencia fijo en el cuarto escenario evaluado, tomada en la tercera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón durante todo el periodo evaluado.	204
Figura 10.41. Fotografía del medio de adherencia fijo en el quinto escenario evaluado, tomada en la tercera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón durante las 3 primeras semanas.	205
Figura 10.42. Fotografía del medio de adherencia fijo en el quinto escenario evaluado, tomada en la cuarta semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón ligeramente blanquecina en la última semana evaluada.	205
Figura 10.43. Fotografía del medio de adherencia fijo en el sexto escenario evaluado, tomada en la tercera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón medianamente blanquecina y con ligero desarrollo de algas en el medio fijo.	206
Figura 10.44. Fotografía del medio de adherencia fijo en el sexto escenario evaluado, tomada en la cuarta semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón medianamente blanquecina y con alto desarrollo de algas en el medio fijo.	206
Figura 10.45. Fotografías del medio de adherencia fijo después de haber culminado los seis escenarios evaluados, donde se visualiza la biopelícula desarrollada.	207

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Valores referencia de las diferentes especies de nitrógeno en agua residual doméstica.	17
Tabla 3.2. Proporción de amoníaco disuelto y ionizado dentro del nitrógeno amoniacal total, como función de pH y temperatura.	19
Tabla 3.3. Comparación de las características de los procesos de nitrificación y desnitrificación.	25
Tabla 4.1. Características del afluente (agua residual pre-tratada).	32
Tabla 4.2. Características del medio de adherencia.	33
Tabla 4.3. Componentes y materiales usados en la investigación.	34
Tabla 4.4. Dimensiones de los elementos del reactor.	38
Tabla 4.5. Caudales afluentes evaluados en la investigación.	40
Tabla 4.6. Métodos de medición de los parámetros evaluados.	41
Tabla 4.7. Frecuencia de monitoreo de los parámetros evaluados en la investigación.	42
Tabla 4.8. Condiciones de operación referenciales por escenario.	46

Tabla 5.1. Resumen de los parámetros evaluados durante la puesta en marcha.	48
Tabla 5.2. Resumen de los parámetros evaluados durante la puesta en marcha.	49
Tabla 5.3. Resumen de la calidad del afluente promedio durante los seis escenarios evaluados.	50
Tabla 6.1. Resumen de la temperatura ambiental, afluente y efluente por cada escenario de operación.	57
Tabla 6.2. Resumen del pH afluente y efluente en cada escenario de operación.	59
Tabla 6.3. Resumen de eficiencias, valores máximos, mínimos y promedios por escenario.	65
Tabla 6.4. Resumen de valores promedio por escenario, de la concentración de O.D. en el afluente y efluente.	68
Tabla 6.5. Variación de OD. en un ciclo.	70
Tabla 6.6. Variación de OD. en un ciclo.	71
Tabla 6.7. Variación de OD. en un ciclo.	72
Tabla 6.8. Variación de OD. en un ciclo.	74
Tabla 6.9. Variación de OD. en un ciclo.	75
Tabla 6.10. Resumen de valores de DBO ₅ por escenario.	78
Tabla 6.11. Resumen de valores de DQO por escenario.	83
Tabla 6.12: Concentración media de los compuestos nitrogenados y eficiencia de remoción del nitrógeno total en cada escenario.	101
Tabla 6.13: Valores de sólidos registrados en el decantador secundario de 19.86 L.	121
Tabla 10.1. Estándares de Calidad Ambiental - Categoría 4	140
Tabla 10.2. Límites Máximos Permisibles para efluentes de PTAR	141
Tabla 10.3. Valores registrados diariamente según fecha y hora del muestreo durante la etapa de puesta en marcha.	142
Tabla 10.4. Valores registrados diariamente según fecha y hora del muestreo durante la primera etapa.	145
Tabla 10.5. Valores registrados diariamente según fecha y hora del muestreo durante la segunda etapa.	148
Tabla 10.6. Resultados obtenidos por semana durante la puesta en marcha.	151

Tabla 10.7. Resultados obtenidos por semana durante la primera etapa (TRH = 8.7 h).162

Tabla 10.8. Resultados obtenidos por semana durante la segunda etapa (TRH = 11.7 h).173

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 6.1. Comportamiento de la temperatura ambiental y de la muestra afluente y efluente en el tiempo (semanas) de la investigación.	56
Gráfica 6.2. Comportamiento del pH en el tiempo (semanas) de la investigación.	58
Gráfica 6.3. Relación del pH y temperatura del afluente.	60
Gráfica 6.4. Relación del pH y temperatura del efluente.	61
Gráfica 6.5. Variación de la turbiedad afluente y efluente en el tiempo.	62
Gráfica 6.6. Eficiencia del reactor IFAS en remoción de turbiedad Vs. el tiempo.	64
Gráfica 6.7. Variación del oxígeno disuelto del afluente y efluente en el tiempo.	66
Gráfica 6.8. Relación de la temperatura ambiental y el OD. del afluente y efluente.	68
Gráfica 6.9. Perfil de variación de OD. durante 3 h.	70
Gráfica 6.10. Perfil de variación de OD. en un tercio del ciclo.	71
Gráfica 6.11. Perfil de variación de OD. en 2/3 de un ciclo.	73
Gráfica 6.12. Perfil de variación de OD. en la mitad de un ciclo.	74
Gráfica 6.13. Perfil de variación de OD. en un ciclo.	76
Gráfica 6.14. Valores de DBO ₅ del afluente y efluente y su respectiva eficiencia en los diferentes escenarios evaluados.	77
Gráfica 6.15. Eficiencias de remoción de DBO ₅ y temperaturas por escenario.	79
Gráfica 6.16. Eficiencias de remoción de DBO ₅ y cargas orgánicas por escenario.	80
Gráfica 6.17. Valores de DQO del afluente y efluente y su respectiva eficiencia en los diferentes escenarios evaluados.	82
Gráfica 6.18. Valores de eficiencia promedio de DQO y temperatura para las diferentes fracciones aireadas (AF) de los escenarios evaluados.	84
Gráfica 6.19. Valores de eficiencia promedio de DQO y COV en los diferentes escenarios evaluados.	84

Gráfica 6.20. Valores de DQO y DBO ₅ del afluente registrados durante todo el proceso de investigación.	88
Gráfica 6.21. Valores de DQO y DBO ₅ del efluente registrados durante todo el proceso de investigación.	88
Gráfica 6.22. Correlación entre valores de DQO y DBO ₅ del afluente, registrados durante todo el proceso de investigación.	89
Gráfica 6.23. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario I.	91
Gráfica 6.24. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario II.	93
Gráfica 6.25. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario III.	95
Gráfica 6.26. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario IV.	97
Gráfica 6.27. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario V.	98
Gráfica 6.28. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario VI.	100
Gráfica 6.29. Variación de eficiencias de N-total, NTK y N-NH ₄ ⁺ por escenario.	102
Gráfica 6.30. Variación de la eficiencia de N-total y concentraciones afluente y efluente por semana.	104
Gráfica 6.31. Variación de la eficiencia de NTK y concentraciones afluente y efluente por semana.	105
Gráfica 6.32. Variación de la eficiencia de N-amoniaco y concentraciones afluente y efluente por semana.	107
Gráfica 6.33. Variación de las concentraciones del NTK y N- NH ₄ ⁺ en el afluente y efluente durante los 6 escenarios evaluados.	108
Gráfica 6.34. Variación de las concentraciones del NTK, N-NO ₂ ⁻ y N-NO ₃ ⁻ en el afluente por semana.	109
Gráfica 6.35. Variación de las concentraciones del NTK, N-NO ₂ ⁻ y N-NO ₃ ⁻ en el efluente por semana.	110
Gráfica 6.36. Relación de la temperatura, la eficiencia de remoción de N-total y la eficiencia de remoción de DQO.	111
Gráfica 6.37. Relación de la eficiencia de remoción de N-total y el pH en el licor mixto.	114

Gráfica 6.38. Concentración y eficiencia de remoción de SST en el afluente y efluente por semana.	115
Gráfica 6.39. COV y eficiencia de remoción de SST por escenario.	116
Gráfica 6.40. Concentración y eficiencia de remoción de SSV en el afluente y efluente por semana.	117
Gráfica 6.41. COV y eficiencia de remoción de SST por escenario.	117
Gráfica 6.42. SST y SSV en el licor mixto durante 5 escenarios evaluados. ...	119
Gráfica 6.43. SST y SSV promedio por escenario en el licor mixto.	120

1. CAPITULO I.

INTRODUCCIÓN

Los procesos biológicos en el tratamiento de aguas residuales se han dirigido, desde hace varias décadas, a la eliminación de materia orgánica y sólidos, y sólo hacia finales de los años ochenta se dio real importancia a los efectos negativos que causan los elementos como el nitrógeno (N) y el fósforo (P). La presencia de altas concentraciones de N y P en las masas de agua trae como consecuencia la acelerada eutrofización de cuerpos de agua lénticos y lóticos.

La eutrofización y la disminución de oxígeno en lagos y ríos, así como la presencia de nitratos en agua para consumo humano han sido reconocidas como un tema de especial interés por sus repercusiones en el medio ambiente acuático y la salud pública. La presencia de N dificulta el uso del recurso hídrico, en especial cuando se trata de sistemas de potabilización de agua, debido a los altos costos que demanda su tratamiento.

Para resolver estos problemas, en los últimos años ha surgido un especial interés en la búsqueda de alternativas de remoción de nutrientes (N y P) que trajeron como resultado modificaciones a tecnologías convencionales e innovaciones ingenieriles de los procesos unitarios y operacionales.

En la actualidad existen diversas tecnologías disponibles que permiten remover el nitrógeno o el nitrógeno conjuntamente con el fósforo en procesos de biomasa suspendida o adherida, separados o combinados en dos o más etapas. Algunas de estas tecnologías requieren el pago de los derechos de patentes o la necesidad de diversas unidades de tratamiento, lo cual las hace costosas. Siendo en tal sentido necesaria la búsqueda de nuevas tecnologías o la modificación de las existentes para que nos permitan hacerlo al menor costo y cumplir los niveles establecidos en las normativas vigentes.

En esta investigación se ha modificado la operación de aireación continua a intermitente en el sistema de lodos activados con medio fijo, para que de esta manera se pueda obtener, en el mismo reactor o tanque de aireación, las condiciones óptimas y lograr con ello la máxima remoción de nutrientes, en el caso específico de esta investigación, la remoción de nitrógeno.

2. CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

En el año 2002, se presentó una investigación dirigida a la remoción biológica de nitrógeno en una etapa, mediante la aplicación de aireación intermitente en una planta de aireación extendida (Collí et al., 2002). El sistema de aireación extendida se construyó para un caudal de diseño de 2 L/s y TRH de 24 horas, sin embargo, la experimentación se realizó con 20 y 34 horas de TRH. En la investigación se realizaron cambios operacionales para tener condiciones aerobias y anóxicas, suministrando aire de manera cíclica o intermitente en una serie de ciclos de tres horas en un solo reactor. Se experimentaron con 15 escenarios donde se variaron los tiempos de aireación desde 20 minutos de aireación y 160 minutos de agitación hasta 180 minutos de aireación continua, con la finalidad de encontrar los tiempos óptimos requeridos para los procesos de nitrificación y desnitrificación. Se realizaron registros en línea cada minuto, a través de sensores, de OD, potencial de óxido-reducción, sólidos suspendidos, temperatura, pH, gasto de aire y determinaciones analíticas de DBO, SST, nitrógeno y fósforo en todas sus formas. Los mejores resultados se obtuvieron con el ciclo de 50 minutos de aireación y 130 minutos de mezclado (50/130), obteniéndose eficiencias de remoción de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal del 90% y 94% respectivamente y concentraciones en el efluente menores a 10 mg/L y 1,5mg/L respectivamente, además el consumo de energía en el escenario más eficiente se redujo en un 76% con respecto a la aireación continua.

Daniel (2005), hizo una investigación en un reactor de lecho fijo, utilizando como medio de adherencia espuma de poliuretano, fue operado como un reactor secuencial Batch sometido a ciclos de aireación intermitente y alimentado con sustrato sintético con concentraciones de nitrógeno amoniacal de 125, 250, 500 y 40 mg/L. El modelo experimental consistió en un reactor construido en acrílico, con 20 cm de diámetro, 27 cm de longitud y un volumen útil de 6 litros; en el interior del cilindro de acrílico se fijó un cesto de acero inoxidable, que contenía el medio de soporte utilizado para la inmovilización de la biomasa. En la investigación se verificó la posibilidad de promover la nitrificación corta en el reactor sometido a

aireación intermitente, con la formación de nitrito como principal compuesto intermedio, seguida de la desnitrificación. Para las concentraciones de nitrógeno amoniacal de 125 y 250 mg/L se observó remoción de nitrógeno por encima del 90% después de apenas 20 días de operación, además se observó que, a lo largo del tiempo no fue posible detectar, en el efluente del reactor, ninguna de las formas de nitrógeno monitoreadas (nitritos, nitratos y N-amoniacal); para la concentración de 500mg/L de nitrógeno amoniacal la eficiencia de remoción media en la fase de mejor desempeño fue de 85%, y finalmente para la concentración de nitrógeno amoniacal de 40 mg/L se registró una eficiencia de remoción media de 97% en su fase de mejor desempeño.

Singh et al., (2017), estudió el efecto de varios ciclos de aireación intermitente (AI) sobre la remoción de nutrientes y compuestos orgánicos carbonados, así como de las comunidades microbianas en un reactor integrado de lodo activado de película fija (IFAS) que trata aguas residuales municipales. Todos los experimentos se realizaron en un reactor a escala piloto de 3 m de largo, 2 m de ancho y 3.34 m de alto, ocupando un volumen útil de 20 m³, concebido y operado inicialmente como un proceso de lodos activados convencional, sin embargo, para fines de la investigación se implementó con un medio fijo patentado (Biotextil Cleartec media) dentro del tanque de aireación, ocupando aproximadamente el 0.5% del volumen útil del tanque. Un total de cuatro escenarios (Escenario 1: aireación continua; escenario 2: aireación/no aireación de 150/30 min; escenario 3: aireación/no aireación de 120/60 min y el escenario 4: aireación/no aireación de 90/60 min) fueron investigados en la evaluación del reactor IFAS, entre todos los ciclos de AI, la segunda fase (120/60) reportó remociones máximas de DQO y DBO con valores registrados de 97% y 93.8% respectivamente; con respecto a la remoción de nutrientes (TN y TP), se encontró que la primera fase de AI (150/30) es la más óptima, con eficiencias de 77.8% y mayor a 80% respectivamente.

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Según el diagnóstico de las PTAR realizado por la SUNASS el año 2008, se puso en evidencia las debilidades de las empresas prestadoras de servicios de saneamiento (EPS), indicándose que el 90 % de estas no cuenta con la autorización para el vertimiento o reúso y que además no se está cumpliendo con los ECA-Agua debido a que la tecnología empleada no es la adecuada, esto implica que la situación actual en materia de tratamiento de aguas residuales domésticas en el país se encuentra en precarias condiciones, tanto es así que en algunas EPS el desagüe entra y sale sin mayor tratamiento.

Esto aunado al creciente incremento de la población en la costa peruana, por ende, del volumen de desagüe vertido sin tratar en los cuerpos receptores de agua significan un gran problema de salud pública y ambiental, sobretodo en la costa, que se caracterizan por tener ríos de caudales bajos, lo cual implica un mayor potencial de contaminación.

Los nutrientes, principalmente el nitrógeno constituye uno de los componentes más importantes de los alimentos, proteínas. Este implica que los efluentes domésticos presenten gran concentración de estos componentes (Nitratos, Amoniac), además de la materia orgánica carbonácea presente de manera implícita en esta.

El nitrógeno amoniacal y nitrato presente en las aguas residuales domésticas causa la eutrofización de los ríos, lagos o lagunas, de manera que se está generando problemas en estos cuerpos receptores y como consecuencia se busca soluciones que nos permitan prevenir y mitigar sus efectos.

2.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La poca información sobre experiencias realizadas en el Perú con el sistema de lodos activados con medio de adherencia sumergido (IFAS) y aireación intermitente para la remoción de nitrógeno motiva a realizar la presente tesis de investigación, y de esta manera generar conocimiento en torno a la aplicabilidad de esta tecnología en el país, que permitirá establecer directrices acerca del diseño y operación óptima de este tipo de sistemas.

2.1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La materia orgánica carbonácea y el nitrógeno son los principales contaminantes de las fuentes hídricas, sin embargo, en el País y en general en Sudamérica se ha dado mayor prioridad a la remoción de materia orgánica carbonácea; y en vista del estado crítico de contaminación que actualmente presentan los cuerpos receptores, principalmente por los nutrientes (nitrógeno y fósforo), se opta por realizar investigación en el tema de la remoción de nitrógeno, para asegurar el cumplimiento de las normas y evitar la eutrofización de los cuerpos receptores ya que es de vital importancia.

Por otro lado, el acelerado crecimiento poblacional nos lleva a optimizar recursos, así por ejemplo el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) deben de ocupar el menor espacio y tratar grandes volúmenes de agua, además de operar en condiciones fluctuantes de calidad de agua residual.

En respuesta a la necesidad de contar con sistemas compactos, eficientes y económicos surge la propuesta de conocer el comportamiento y la eficiencia de remoción de nitrógeno con un sistema de lodos activados con medio fijo y aireación intermitente.

Por último, la investigación nos permitirá abordar de manera metódica los principales problemas que pudieran presentarse en un tratamiento de este tipo, para así poder facilitar las medidas y acciones correctivas que tenga que realizar el personal encargado de la operación de estos sistemas de tratamiento.

2.2. OBJETIVO PRINCIPAL

Verificar la aplicabilidad de la aireación intermitente para la remoción biológica del nitrógeno total de aguas residuales domésticas, en un solo sistema con medio de adherencia fijo (IFAS).

2.3. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Determinar la concentración de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) en el afluente y efluente de un sistema IFAS operado con aireación intermitente.
- Determinar la remoción de nitrógeno amoniacal en un sistema IFAS operado con aireación intermitente.
- Determinar la eficiencia de remoción de la DBO₅ y DQO en un sistema IFAS operado con aireación intermitente.
- Comparar el efecto de los patrones de aireación en la remoción biológica de nitrógeno total, en un sistema IFAS.
- Evaluar la influencia del tiempo de retención hidráulica en la remoción de nitrógeno total, DBO₅ y DQO de un sistema IFAS operado con aireación intermitente.
- Observar la influencia de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, OD, turbiedad) en la eficiencia de remoción de los componentes nitrogenados medidos en esta investigación.
- Determinar la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el afluente, efluente y tanque de aireación del sistema.

2.4. HIPÓTESIS

La aireación intermitente, en un sistema de lodos activados con medio de adherencia fijo de una sola etapa de tratamiento, puede influir positivamente en la eficiencia de remoción del nitrógeno total del agua residual doméstica pre-tratada, logrando eficiencias mayores al 75%.

2.5. VARIABLES DE ESTUDIO

2.5.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

- Calidad de agua del afluente determinado por:
 - DBO en el afluente.
 - DQO en el afluente.
 - Concentración de SST en el afluente.
 - Concentración de SSV en el afluente.
 - Concentración de Nitrógeno total kjeldahl en el afluente.
 - Concentración de Nitrógeno amoniacal en el afluente.
 - Concentración de nitritos en el afluente.
 - Concentración de nitratos en el afluente.
 - Turbiedad del afluente.
 - pH del afluente.
 - OD en el afluente.
- Características hidráulicas determinadas por:
 - Tiempo de retención hidráulica (TRH).
 - Caudal.
- Condiciones operacionales determinadas por:
 - Tiempo de aireación y no aireación (Fracción aireada).
 - Ciclos de aireación.
 - Mezcla en el almacenamiento.

2.5.2. VARIABLES DEPENDIENTES

- Calidad de agua del efluente determinado por:
 - DBO en el efluente.
 - DQO en el efluente.
 - Concentración de SST en el efluente.
 - Concentración de SSV en el efluente.
 - Concentración de Nitrógeno total kjeldahl en el efluente.
 - Concentración de Nitrógeno amoniacal en el efluente.

- Concentración de nitritos en el efluente.
- Concentración de nitratos en el efluente.
- Turbiedad del efluente.
- pH en el tanque de aireación.
- OD en el tanque de aireación.

2.5.3. VARIABLES INTERVINIENTES

- Temperatura ambiental.
- Temperatura del agua residual.
- Altitud sobre el nivel del mar.

2.5.4. PARÁMETROS DE CONTROL DE PROCESOS

Para la operación y evaluación de la eficiencia del sistema de lodos activados con medio de adherencia fijo y con aireación intermitente, se ha considerado el monitoreo de los siguientes parámetros.

- Temperatura del agua residual.
- Temperatura ambiental.
- pH.
- Turbiedad.
- Oxígeno disuelto (OD).
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).
- Demanda química de oxígeno (DQO).
- Sólidos suspendidos totales (SST).
- Sólidos suspendidos volátiles (SSV).
- Nitrógeno total Kjeldahl.
- Nitrógeno amoniacal.
- Nitritos.
- Nitratos.
- Nitrógeno total.

2.6. MARCO LEGAL

2.6.1. ASPECTOS LEGALES DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ

Se indican los principales documentos legales en el marco de la legislación peruana en materia de calidad agua. (Ver anexo N° 1)

A. Ley General de la Salud: Ley N° 28642

B. Ley General del Ambiente: Ley N° 28611

C. Ley de recursos hídricos: Ley N° 29338

D. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua: Decreto supremo N° 004-2017 MINAM.

E. Límites máximo permisibles para los efluentes de PTAR doméstica o municipales: Decreto supremo N° 003-2010 MINAM.

3. CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. SISTEMAS HÍBRIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.

Los sistemas de tratamiento biológico se pueden clasificar en dos grupos, de acuerdo con el tipo de crecimiento de la biomasa dentro del reactor: crecimiento suspendido y crecimiento fijo. La unión de estos dos tipos de crecimiento de biomasa, en un mismo reactor, originan el sistema híbrido, ver figura 3.1.

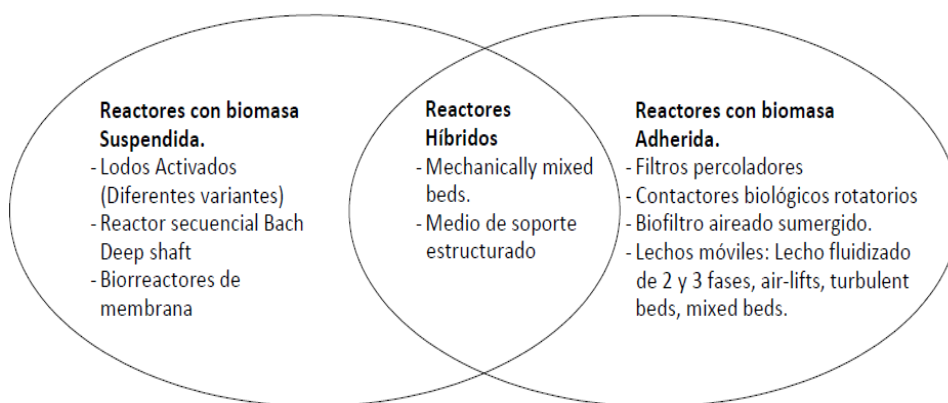


Figura 3.1. Clasificación moderna de los procesos mecanizados de tratamiento aerobio, con respecto al estado de la biomasa (adaptado de Lazaroova y Manen, 1994.)

Fuente: (Von Sperling, 2007)

3.1.1. PRINCIPIOS DE LA TECNOLOGÍA IFAS.

El enfoque de esta investigación en los procesos híbridos se basa en el proceso de lodo activado de película fija adherida (IFAS) por sus siglas en inglés, que combina procesos de tratamiento de lodos activados de crecimiento convencional suspendido y de película fija.

Se han utilizado una variedad de sistemas de medios, y varios tipos se han convertido en estándar en la industria. En general, los tipos de medios se pueden diferenciar como fijos o de libre flotación. Los medios fijos incluyen los medios que se tejen en una cuerda o un patrón hexagonal. El medio fijo se monta en marcos y permanece estacionario en el tanque de lodo activado. Los medios de flotación

libre pueden consistir en cuboides de un material de esponja o pequeños portadores de plástico, denominados “carriers”, que se asemejan a las ruedas de un carro. Básicamente, cualquier tipo de medio de película fija se puede usar en un sistema IFAS, sin embargo, el único tipo de medio fijo que prevalece en el mercado es el medio de cuerda. Los medios de cuerda, también llamados medios enrollados de cuerda o medios de hebras, adoptan la forma de una cuerda tejida con bucles protuberantes que proporcionan una superficie para el crecimiento de biomasa.

El objetivo principal de un proceso IFAS es proporcionar biomasa adicional dentro del volumen del reactor de un proceso de lodo activado, con el fin de aumentar la capacidad del sistema o mejorar su rendimiento, como se ilustra en la Figura 3.2. De hecho, la concentración efectiva de sólidos suspendidos en licor mixto (MLSS) se puede duplicar en un proceso IFAS, utilizando un medio de adherencia. Debido a que la biomasa se fija en un sistema de medios, la concentración de licor mixto de crecimiento suspendido no se incrementa, y el rendimiento de los clarificadores finales aguas abajo no se ve negativamente afectado por un aumento en la tasa de carga de sólidos. De hecho, en muchos casos, el rendimiento del clarificador se mejora por una reducción en el índice volumétrico de lodo (IVL), como resultado del crecimiento de la película fija.

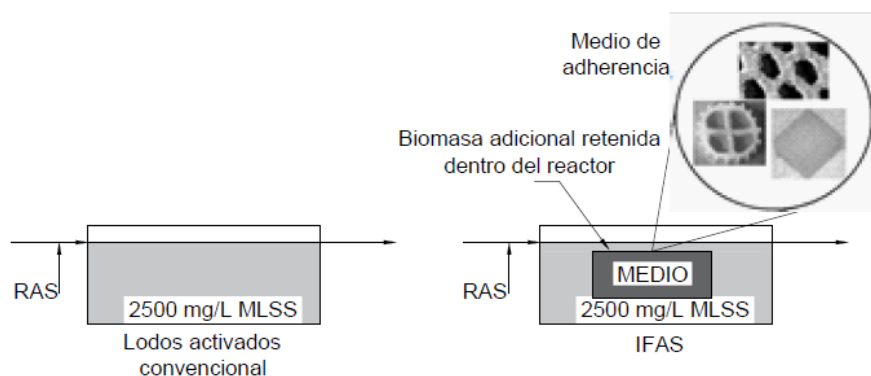


Figura 3.2. Proceso IFAS versus proceso convencional de lodos activados.

Fuente: (Copithorn et al, 2010)

Por lo tanto, el proceso IFAS generalmente se ha considerado como una opción de mejoramiento “upgrade” en las plantas de tratamiento existentes que deben incorporar la eliminación de nutrientes. Los medios y la biomasa que admite, permiten que los procesos de tratamiento aeróbico se completen dentro de un volumen reducido y, por lo tanto, permiten que una parte del volumen del tanque existente se convierta en una zona anóxica o incorpore una zona anaeróbica para la remoción biológicamente mejorada del fósforo.

También, se ha encontrado que los sistemas híbridos mejoran la reducción de DQO y la decantación de sólidos; hace que la eficiencia de nitrificación sea independiente del tiempo de retención de sólidos de la biomasa en suspensión (Gebara, 1999; Santos, 2007; Lamego, 2008), elimina el crecimiento excesivo de microorganismos filamentosos (Gebara, 1999) y favorece la estabilidad y resistencia a las cargas choque (Metcalf y Eddy, 2003).

Según Muller (1998) “los sistemas híbridos tienen la ventaja de ser incorporados a las plantas de tratamiento biológicas existentes para la eliminación de nitrógeno, al igual que diseñar plantas más compactas y en consecuencia reducir los costos de implementación y operación”. Sin embargo, de acuerdo con Mesa y Ponce (2004), “una desventaja es que como los diseños de los sistemas híbridos son empíricos debido a su complejidad y la compresión de la actividad de la biopelícula, se requieren estudios que establezcan parámetros confiables de diseño” (citado por Gómez, 2014 p. 31).

Sriwiriyarat & Randall, (2005) y Kermani et al., (2008) sostienen que con la inmovilización de la biomasa en forma de biofilm, se entiende que la edad del lodo se eleva, favoreciendo el desarrollo de microorganismos de crecimiento lento, como los nitrificantes (citado por Minegatti, 2015 p. 7).

3.1.1.1. BIOMASA EN SUSPENSIÓN.

Con respecto a la biomasa en suspensión, los microorganismos tienden a concentrarse, formando una unidad estructural más amplia denominada floc. Este presenta una estructura heterogénea que contiene material orgánico adsorbido, material inerte también presente en las alcantarillas, material microbiano producido para la estructuración de la propia matriz del floc y otras células vivas y muertas (Von Sperling, 2007). Branco, (1978), sostiene que “entre los microorganismos que constituyen el floc, además, de las bacterias y protozoarios, hongos, rotíferos, nematodos e incluso ocasionalmente larvas de insectos pueden estar presentes en el floc” (citado por Von Sperling, 2007 p. 16).

La formación del floc se debe a la producción de una matriz constituida por bacterias filamentosas, a la que se adhieren los otros microorganismos. Se indica que esta adherencia ocurre a través de exopolisacáridos, en forma de capa gelatinosa, lo que permite la aglutinación de otros microorganismos y partículas coloidales, y consecuentemente el aumento del diámetro del floc, formando estructuras macroscópicas más fácilmente sedimentables (Von Sperling, 2007; Metcalf & Eddy, 2003).

Horan, (1990) sostiene que “de acuerdo con el crecimiento de los flocs, cuyos diámetros se comprenden entre 50 a 500 μ m, puede existir un gradiente de concentración de sustratos (DBO) y oxígeno disuelto (OD) entre el borde exterior (concentraciones altas) y el centro de su estructura (concentraciones muy bajas), consecuentemente, en dirección al centro del floc, las bacterias aerobias son privadas de la fuente de nutrientes, posibilitando la creación de condiciones anóxicas en su interior”, como se muestra en la Figura 3.3. Complementariamente se muestra la estructura de un floc, ver Figura 3.4. (citado por Von Sperling, 2007 p. 17).

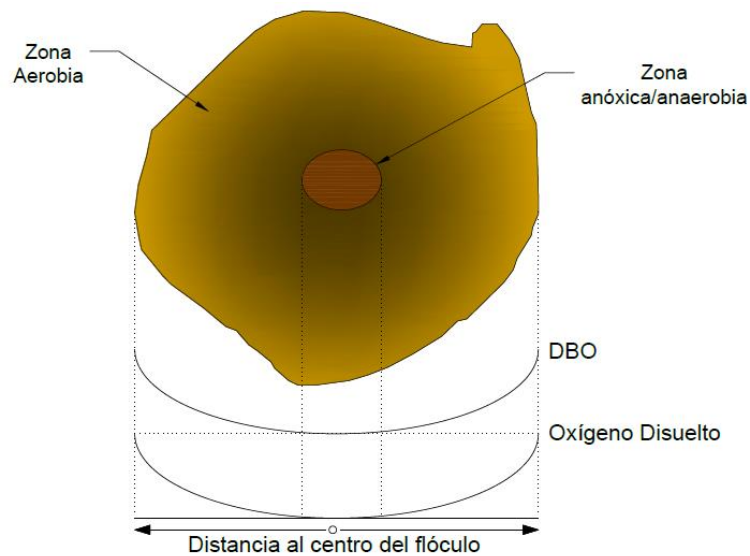


Figura 3.3. Representación esquemática de los gradientes de O.D. y DBO en el floc.

Fuente: (Adaptado de Von Sperling, 2007)

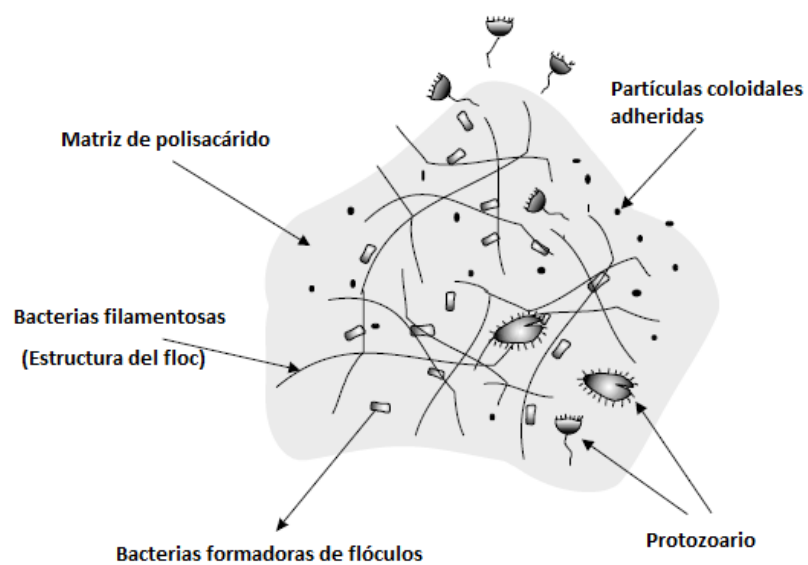


Figura 3.4. Estructura típica de un floc de lodo activado.

Fuente: (Adaptado de Von Sperling, 2007)

3.1.1.2. BIOMASA ADHERIDA

Los microorganismos que corresponden a la biomasa adherida producen polímeros extracelulares responsables del potencial de adhesión físico-química de las mismas a un determinado tipo de medio de soporte. La inmovilización de la biomasa posibilita su elevada concentración para ser retenidos en el reactor por elevados períodos de tiempo. De acuerdo con Rouxhet & Mozes (1990), la adherencia de la biomasa es influenciada por interacciones entre células, por el potencial que ofrecen las moléculas de polímeros y la propia composición del sustrato (citado por Von Sperling, 2007 p. 19).

En el caso de los procesos aeróbicos de biomasa adherida, los principios de remoción de la materia orgánica y de conversión de los compuestos nitrogenados son influenciados por los mecanismos de difusión y transferencia de oxígeno y sustrato soluble a través de la biopelícula. Las sustancias coloidales y sólidos suspendidos no se pueden difundir a través de la biopelícula, y necesitan ser hidrolizados a moléculas más pequeñas (Von Sperling, 2007).

El aumento del espesor del biofilm en función de la síntesis de nuevas células, dificulta la difusión de OD y sustrato, desde el medio externo hasta las capas internas, junto a la superficie del medio de soporte, donde el proceso de estabilización puede ocurrir incluso, en condiciones anaerobias (Minegatti, 2015)

En la figura 3.5 se representa de forma esquemática la difusión, consumo de sustrato y generación de subproductos derivados de las reacciones bioquímicas en procesos con formación de biopelícula.

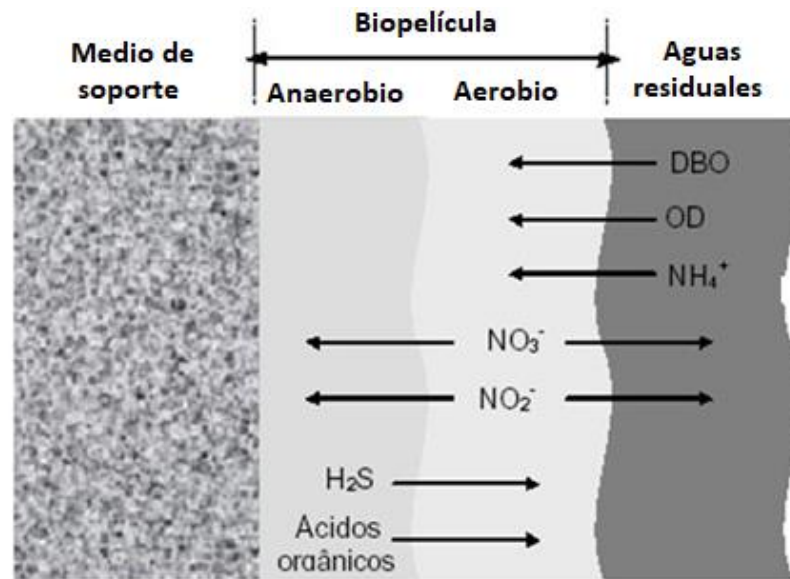


Figura 3.5. Representación esquemática de una sección de biopelícula.

Fuente: (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2003)

La densidad del medio junto con la biomasa es muy diferente de la densidad del líquido en el reactor, lo que permite la aparición de gradientes de velocidad entre el líquido y la capa externa de la biopelícula. Como resultado, las células están continuamente expuestas a nuevos sustratos, aumentando potencialmente su actividad. Sin embargo, si el grosor de la biopelícula es muy alto, el consumo de sustrato a lo largo de la biopelícula podría ser tal, que las capas internas tengan deficiencias de sustrato, lo que reduce su actividad. En estas condiciones, la unión con el medio de soporte se reduce y la biomasa puede ser desprendida del medio de soporte (Von Sperling, 2007).

3.1.1.3. VENTAJAS DE UN SISTEMA IFAS.

- Posibilidad de incorporar capacidad adicional de tratamiento o mejora del rendimiento, agregando más medio de soporte.
- Biomasa adicional para el tratamiento sin incrementar la carga de sólidos en el clarificador final.
- Procesos de tratamiento de mayor tasa posible, lo que permite un mayor tratamiento en un espacio más pequeño.

- Mejora las características de sedimentabilidad (IVL reducidos).
- Reducción de producción de lodo.
- Incentiva la nitrificación y desnitrificación simultánea.
- Mejora la capacidad de recuperación ante posibles alteraciones de los procesos, es decir, son más estables.

3.1.1.4. DESVENTAJAS DE UN SISTEMA IFAS.

- Puede producir malos olores cuando se vacía el tanque.
- Necesidad de implementar aparatos adicionales.
- Necesidad de reubicar medios
- Mayor pérdida de carga asociada a las pantallas de retención de medios.

3.2. NITRÓGENO EN EL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.

El nitrógeno en el agua residual doméstica suele estar presente en forma de amonio (N-NH_4^+) y nitrógeno orgánico en forma soluble (N-N_{org}), procedente de los procesos del metabolismo humano y de los residuos orgánicos de las actividades cotidianas. En cuanto a las formas de nitritos y nitratos, usualmente no están presentes en el agua residual doméstica o se encuentran en concentraciones muy bajas (Von Sperling, 2007). En la Tabla 3.1 se presenta una composición de referencia del contenido de nitrógeno en un agua residual doméstica en condiciones de clima tropical.

Tabla 3.1. Valores referencia de las diferentes especies de nitrógeno en agua residual doméstica.

Parámetro	Concentración (mg.L^{-1})		
	Rango	Típico	Unidades
Nitrógeno total (NTotal)	35 - 70	50	mg.L^{-1}
Nitrógeno orgánico (N-NOrg)	15 - 30	20	mg.L^{-1}
N-NH_4^+	20 - 40	30	mg.L^{-1}
Nitritos (N-NO_2^-)	≈ 0	≈ 0	mg.L^{-1}
Nitratos (N-NO_3^-)	0 - 2	≈ 0	mg.L^{-1}

Fuente: (Von Sperling, 2007)

Del nitrógeno total en el agua residual doméstica, se tiene que la suma del nitrógeno asociado a los compuestos orgánicos y la forma amoniacal se le conoce como Nitrógeno Total Kjeldahl (N-NTK), y la suma de nitrito (N-NO_2^-) y nitrato (N-NO_3^-) se le denomina N-NO_x . El N-NTK se puede dividir en dos fracciones: Soluble dominada por el amonio y particulada asociada a los sólidos en suspensión orgánicos (Figura 3.6).

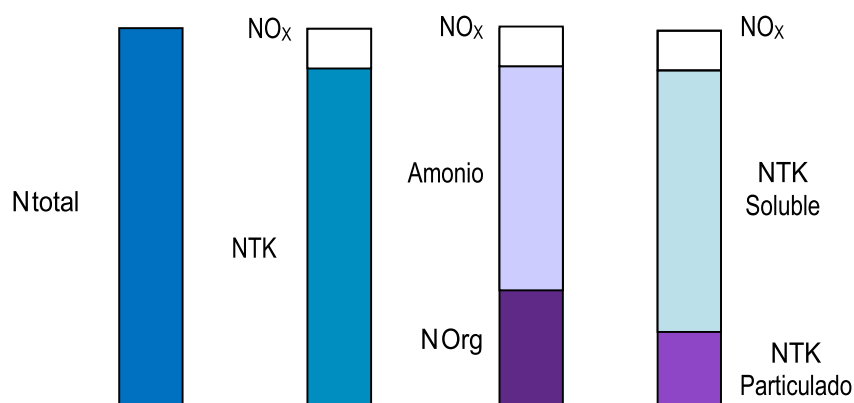
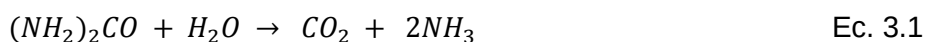


Figura 3.6. Distribución de los componentes nitrogenados en el agua residual doméstica.

Fuente: (Adaptado de Von Sperling, 2007)

Según Fernández et al. (2008) el nitrógeno amoniacal se produce por la hidrólisis de la urea (Ecuación 3.1) y otras sustancias proteínicas presentes en el agua residual doméstica, este proceso es tan rápido que produce una cantidad excesiva de amoníaco (citado por Gómez, 2014 p. 17).



Fernández et al., (2008) sostiene que la descomposición da como productos NH_3 (amoníaco disuelto) y NH_4^+ (ion amonio), el amoníaco está en equilibrio con el ión amonio (Ecuación 3.2) en función del pH de la solución (citado por Gómez, 2014 p. 18).



Cuando el pH es superior a 7, el equilibrio se desplaza a la izquierda generándose pequeñas concentraciones de NH_3 , mientras que sí el pH es inferior a 7 unidades, predomina el NH_4^+ (Fernández et al., 2008). En la tabla 3.2 se muestra la distribución de las formas de amoníaco, ionizado y libre, según el pH y la temperatura.

Tabla 3.2. Proporción de amoníaco disuelto y ionizado dentro del nitrógeno amoniacal total, como función de pH y temperatura.

pH	T = 15 °C		T = 20 °C		T = 25 °C	
	% NH_3	% NH_4^+	% NH_3	% NH_4^+	% NH_3	% NH_4^+
6,50	0,09	99,91	0,13	99,87	0,18	99,82
7,00	0,27	99,73	0,40	99,60	0,57	99,43
7,50	0,86	99,14	1,24	98,76	1,77	98,23
8,00	2,67	97,33	3,82	96,18	5,38	94,62
8,50	7,97	92,03	11,16	88,84	15,25	84,75
9,00	21,50	78,50	28,43	71,57	36,27	63,73
9,50	46,41	53,59	55,68	44,32	64,28	35,72

Fuente: (Adaptado de Von Sperling, 2007)

A continuación, se muestra la distribución relativa entre las formas del amoníaco en función del pH.

- pH < 8 Prácticamente todo el amoníaco está en la forma de NH_4^+ .
- pH = 9.5 Aproximadamente el 50% está en forma de NH_3 y el otro 50% en forma de NH_4^+ .
- pH > 11 Prácticamente todo el amoníaco está en la forma de NH_3 .

El nitrógeno en el agua residual también se presenta en formas reducidas e influye de diferentes maneras (Camargo y Alonso, 2007; Von Sperling, 2007):

- El NH_3 es muy tóxico para los animales acuáticos, en especial para los peces, mientras que NH_4^+ es apreciablemente menos tóxico, con niveles elevados de Na^+ y Ca^{+2} en el medio acuático pueden reducir la susceptibilidad de los animales a la toxicidad del NH_3 .
- Los procesos bioquímicos de conversión de amoníaco a nitrito y de este a nitrato, implica un consumo de oxígeno disuelto en el agua que puede afectar la vida acuática.

- El nitrato está asociado a enfermedades como la metahemoglobinemia (síndrome del bebé azul).
- El NH_4^+ que reacciona con cloro en agua tratada forma cloraminas y tricloruro de nitrógeno, reduciendo la capacidad de desinfección del cloro en el agua tratada.
- El nitrógeno en sus diferentes formas causa eutrofización.

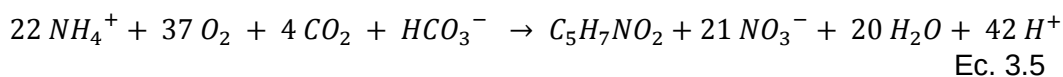
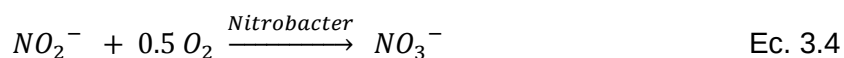
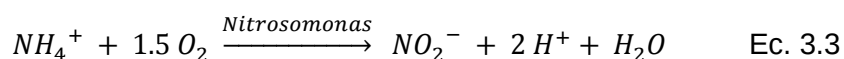
De acuerdo con Roldan y Ramírez (2008) en cuerpos de agua dulce, concentraciones de nitrógeno amoniacal superiores a $0,25 \text{ mg.L}^{-1}$ afectan el crecimiento de los peces, y superiores a $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ se consideran letales (citado por Gómez, 2014 p. 18).

3.2.1. TRANSFORMACIÓN BIOLÓGICA DEL NITRÓGENO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL.

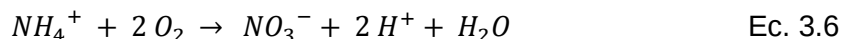
Los sistemas biológicos convencionales para la transformación del nitrógeno del agua residual, se basan principalmente en dos etapas: la Nitrificación y la Desnitrificación. Estos procesos buscan, la oxidación del nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) hasta nitrato (N-NO_3^-) y la reducción del N-NO_3^- a N_2 respectivamente (Ramalho, 1991).

3.2.2. NITRIFICACIÓN.

La nitrificación es el proceso de oxidación donde el N-NH_4^+ se oxida a N-NO_2^- y luego a N-NO_3^- en presencia de microorganismos autótrofos como *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosopira*, *Nitrisovibrio*, *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrospina*, *Nitrococcus* y *Nitrocystis* (Ahn, 2006). Las ecuaciones 3.3 y 3.4 describen el proceso y en la ecuación 3.5 se presenta el balance global de las reacciones involucradas en la nitrificación (Orozco, 2005).



La reacción global de oxidación de amonio para ambos grupos de bacterias se encuentra representada en la Ecuación 3.6



Las bacterias del género *Nitrosomonas* oxidan el amoníaco a nitrito, el cual es convertido a nitrato por la acción de bacterias del género *Nitrobacter*.

La nitrificación es inhibida por la aplicación de elevadas cargas orgánicas, que proporcionan el crecimiento de microorganismos heterotróficos, los cuales compiten por oxígeno y nutrientes con los microorganismos autotróficos nitrificantes, de acuerdo con tasas de crecimiento hasta cinco veces mayor (Schmidt et al. 2003). Según Metcalf & Eddy (2003), la fracción de microorganismos nitrificantes puede relacionarse con la razón de DBO_5 / NTK ; los valores superiores a 5 limitan la presencia de microorganismos nitrificantes en el 5% de la población microbiana. Sin embargo, Bitton, (2011), sostiene que, si se espera que los procesos predominantes sean de nitrificación, se recomiendan valores de DBO_5 / NTK menores que 3, de tal manera que no se presente una competencia con los microorganismos heterótrofos (citado por Amorocho y Sánchez, 2013).

El consumo de oxígeno libre debido a los microorganismos nitrificantes es generalmente referido como la demanda nitrogenada de oxígeno, la cual teóricamente requiere 4,57 mg de O_2 por mg de nitrógeno amoniacal convertido a nitrato.

La temperatura y el pH también afectan a la tasa de nitrificación. Las altas temperaturas hacen el proceso de nitrificación más dinámico, propiciando un elevado consumo de oxígeno y de alcalinidad en función de la liberación de H^+ y de la reducción del pH. Teóricamente, se consume 7,14 mg de alcalinidad por 1 mg de N- NH_4^+ oxidado (Metcalf y Eddy, 2003; Von Sperling, 2007). En bajas temperaturas, las bacterias nitrificantes pierden actividad. Abreu, (1994) y Metcalf &

Eddy, (2003) sostienen que, el pH óptimo para las bacterias nitrificantes es ligeramente alcalino, en el rango comprendido entre 7,2 y 9,0 (citado por Minegatti, 2015 p. 12).

Otras variables como el OD y el Tiempo de retención celular (TRC) también pueden afectar la nitrificación. Una deficiencia de oxígeno puede inhibir el proceso, ya que los microorganismos encargados de la oxidación del amonio y el nitrito, necesitan el oxígeno como aceptor final de electrones.

El TRC requerido para la nitrificación, debe ser suficiente para garantizar el crecimiento de los microorganismos encargados de las reacciones de oxidación; Orozco, (2005) afirma que el proceso ocurre de manera más efectiva con valores de TRC superiores a 5 d y Van Haandel y Marais (1999) reportaron que, en condiciones de clima tropical, el proceso puede desarrollarse incluso cuando los sistemas son operados específicamente para reducir el contenido de materia orgánica carbonácea. Adicionalmente, los autores reportan el efecto de la temperatura sobre la tasa de crecimiento de las bacterias nitrificantes en un sistema de lodos activados, ya que según estudios experimentales en regiones donde la temperatura del agua residual es menor a 14°C, el proceso de nitrificación no se desarrollará para TRC bajos, debido a que el TRC mínimo a estas condiciones tiende a ser de 6 a 14 d. Para agua residual cuya temperatura es superior a 26°C el TRC mínimo requerido para la nitrificación puede estar alrededor de 1,25 d, siempre y cuando se garantice el suministro adecuado de OD.

En la figura 3.7, se muestra de manera esquemática la transformación del nitrógeno en sus diferentes formas en un sistema aerobio.

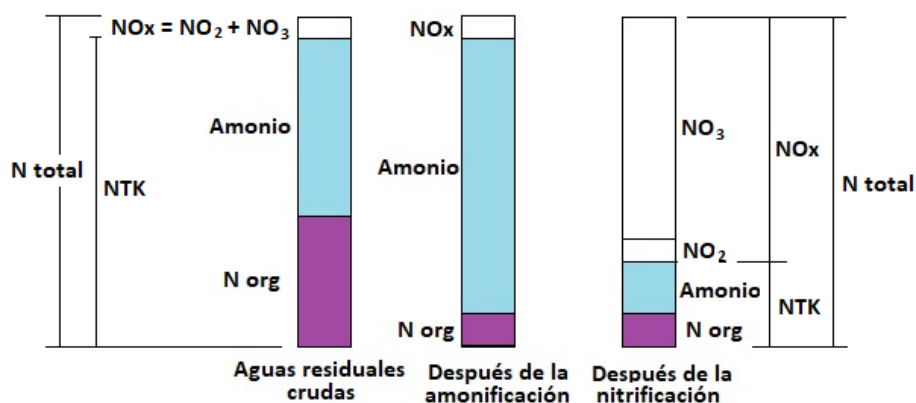
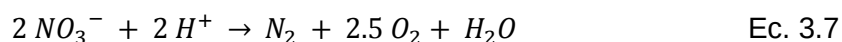


Figura 3.7. Distribución del nitrógeno en un sistema de tratamiento con nitrificación.

Fuente: (Adaptado de Von Sperling, 2007)

3.2.3. DESNITRIFICACIÓN.

El proceso de desnitrificación consiste en la reducción del nitrato a nitrito y, posteriormente, a compuestos de nitrógeno gaseoso (óxido nítrico NO, óxido nitroso N_2O y nitrógeno molecular N_2), por la acción de bacterias heterotróficas anaerobias o facultativas, en presencia de una fuente de carbono orgánica. El nitrato y el nitrito reemplazan al oxígeno en la cadena de transporte de electrones (respiración microbiana), por lo que la desnitrificación suele producirse en ambientes denominados anóxicos, carentes de oxígeno y con disponibilidad de nitrito y nitrato como aceptores de electrones. En la ecuación 3.7 se muestra la reacción de desnitrificación (Von Sperling, 2007)



Según Metcalf & Eddy, (2003) y Akunna et al., (1993) la reacción bioquímica de desnitrificación en ambiente anóxico involucra gran diversidad de microorganismos, tales como: *Achromobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* y *Spirillum*. En la mayoría de los casos, la especie de bacteria *Pseudomonas* es la que más prepondera (citado por Minegatti, 2015 p. 15).

El transporte de electrones requerido por la desnitrificación depende de una enzima específica cuya producción es inhibida por la presencia de OD. Además, la combinación entre la eventual presencia de materia orgánica y OD favorecerá la acción de bacterias heterotróficas aerobias y comprometerá la acción de los microorganismos desnitrificantes (Metcalf & Eddy, 2003).

El proceso de desnitrificación produce alcalinidad. En consecuencia, de acuerdo con Von Sperling (2007) y Van Haandel & Marales (1999) el aumento de la alcalinidad generado durante la desnitrificación es compensado por el consumo de ésta en sistemas combinados con la nitrificación.

El pH óptimo para la desnitrificación es alrededor de 7,0 a 8,0. Dinzer & Kargi, (2000) afirma que los organismos desnitrificantes pueden tolerar un rango de pH entre 6,0 y 9,0 (citado por Minegatti, 2015 p. 16).

La reducción de 1 mol de NO_3^- se produce junto con el consumo de 1 mol de H^+ , lo que se traduce como un incremento del pH y la mantención de un nivel satisfactorio de la alcalinidad en el licor mezclado, esto es de gran importancia para mantener el pH dentro del rango adecuado (Von Sperling, 2007).

En la figura 3.8, se muestra de manera esquemática la remoción de nitrógeno total después de la reacción de desnitrificación.

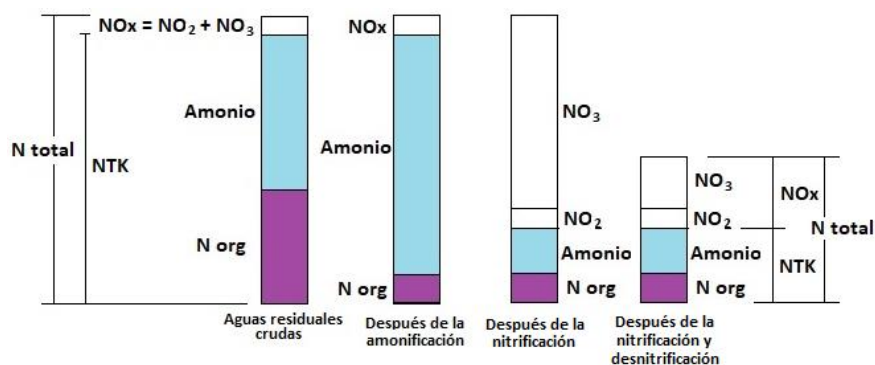


Figura 3.8. Distribución del nitrógeno en un sistema de tratamiento con nitrificación y desnitrificación.

Fuente: (Adaptado de Von Sperling, 2007)

A manera de resumen mostramos la tabla 3.3 donde se comparan las características del proceso de nitrificación y desnitrificación.

Tabla 3.3. Comparación de las características de los procesos de nitrificación y desnitrificación.

Características	Nitrificación	Desnitrificación
Tipo de microorganismos	Autótrofos	Heterótrofos
Velocidad de crecimiento	d^{-1}	h^{-1}
Tipo de respiración	Aerobia	Anóxica
Cambio de pH durante el proceso	Tendencia a la acidificación	Tendencia a la alcalinización
Factores limitantes en el proceso	Baja concentración de O_2 , presencia de materia orgánica.	Presencia de O_2 en el medio, baja concentración de materia orgánica (fuente de electrones)

Fuente: (Adaptado de Cervantes et al, 2000)

3.2.4. NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN SIMULTÁNEA.

El fenómeno de la Nitrificación y Desnitrificación Simultánea (SND) últimamente está siendo ampliamente investigado, y consiste en que en un mismo reactor ocurre concomitantemente la nitrificación y desnitrificación, bajo una única condición operacional (ZHU et al., 2007). La SND puede ser justificada, según ZHANG et al., (2007), por las teorías de microambiente en el floc y/o biopelícula, de la nitrificación heterotrófica o de la desnitrificación aerobia (citado por Minegatti, 2015 p. 17).

Entre esas teorías, la que merece mayor atención es la del microambiente en el floc y/o biopelícula, según el cual, en un sistema con SND, hay un gradiente de OD en el floc y/o biopelícula de un reactor. Debido a este gradiente, habría un mayor desarrollo de los microorganismos nitrificantes en la parte externa de la biopelícula, donde la concentración de OD es mayor, y un mayor desarrollo de microorganismos desnitrificantes en la parte interna del biofilm, donde la concentración de OD tiende a cero (MUNCH et al., 1996). La figura 3.9 muestra la representación de este fenómeno.

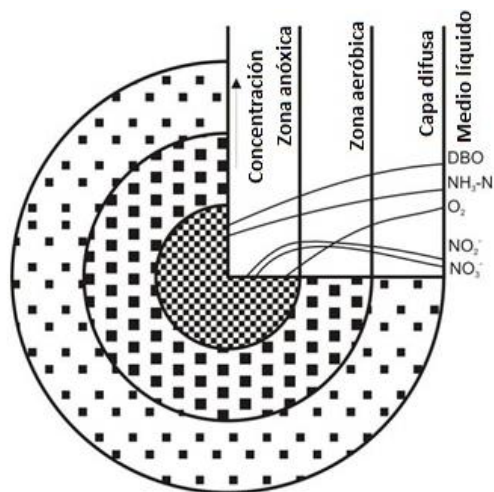


Figura 3.9. Sección de corte de un floc.

Fuente: (Adaptado de Moura, 2014)

Gonzalez et al. (2011) realizaron un estudio con una célula de flujo para verificar, por medio de microsensores, la variación de OD, amoníaco y N-NO_x en el interior de la biopelícula. Los autores concluyeron que la concentración de OD llega cerca de cero en una profundidad de 3 mm en la biopelícula, siendo la concentración de OD en el medio líquido entre 5 mg.L^{-1} y $7,5 \text{ mg.L}^{-1}$. Concluyeron también que hubo oxidación del N-NH_4^+ debido a la presencia de OD en el interior de la biopelícula, que generan una caída en la concentración de OD y N-NH_4^+ , aumentando la concentración de N-NO_x , con lo que las regiones más internas de la biopelícula favorecen el desarrollo de microorganismos desnitrificantes debido a la ausencia de OD y presencia de N-NO_x (citado por Moura, 2014 p. 14).

3.3. REMOCIÓN BIOLÓGICA DEL NITRÓGENO UTILIZANDO AIREACIÓN INTERMITENTE.

Consiste en alternar dentro de un reactor fases óxicas (FO) y anóxicas (FA). Durante la FO existe dentro del reactor una elevada concentración de oxígeno disuelto (OD) y de bacterias nitrificantes. Esta acumulación de bacterias nitrificantes oxida el nitrógeno amoniacal presente en el agua residual y lo transforman en nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-). Posteriormente durante la fase anóxica el oxígeno disuelto decrece a un nivel tan bajo que permite que los microorganismos desnitrificantes anóxicos proliferen y lleven

a cabo la reducción del nitrógeno oxidado en la fase anterior (en forma de NO_2^- y NO_3^-) a nitrógeno gaseoso (Cheng y Liu., 2001).

Los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales por aireación intermitente se fundamentan en dos parámetros específicamente. El primero es la fracción aireada (AF), esta define el tiempo de aireación (T_A), donde la nitrificación es permitida para proceder con el consumo de nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) y la formación de nitrato (N-NO_3^-), dentro del tiempo total del ciclo, tal como se muestra en la ecuación 3.8:

$$\text{Fracción Aireada} = \frac{T_A}{T_C} \quad \text{Ec. 3.8}$$

El tiempo total del ciclo (T_C) cubre el tiempo del periodo óxico y anóxico. La AF puede ser comparada con la relación volumen anóxico y volumen total (VD/V) en sistemas con pre-desnitrificación.

El segundo parámetro es la relación de tiempos de ciclo (RTC). Esta se representa a través del cociente tiempo total del ciclo (T_C) entre el tiempo de retención hidráulico (TRH) como se describe en la ecuación 3.9:

$$\text{RTC} = \frac{T_C}{\text{TRH}} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Este parámetro es similar a la tasa de recirculación interna en sistemas con pre-desnitrificación. En este sentido cuanto menor sea el valor de la RTC, mayor será la cantidad de NO_3^- generado (es decir recirculado) para el periodo anóxico.

Gracias a que no existen requerimientos anóxicos adicionales, ni equipos de bombeo para reciclos internos, la aireación intermitente es una herramienta particularmente conveniente a ser adaptada en los sistemas de remoción de nitrógeno en las plantas de tratamiento existentes (Insel y col., 2006).

Mulder y Van Kempen, (1997), sostienen que, una de las ventajas de la aeración intermitente en un sistema operado para remoción de nitrógeno es la posibilidad de que ocurran menores variaciones en los valores de pH, pues, durante la oxidación de nitrógeno amoniacal a nitrito, ocurre liberación de iones H^+ , lo que puede provocar una disminución significativa del pH. Sin embargo, por la implementación de aireación intermitente, la actividad de los

organismos en el período anóxico devuelve alcalinidad al sistema. De este modo el pH puede ser controlado por la desnitrificación y, si es necesario, por la dosificación adicional de hidróxido, obsérvese la Figura 3.10 (citado por Daniel, 2005 p. 16).



Figura 3.10. Variación del pH a lo largo del ciclo.

Fuente: (Adaptado de Mulder y Van Kempen, 1997).

Por otra parte, Chen et al., (2000) sostiene que la adición de un período sin aireación en sistemas aeróbicos ofrece también otras ventajas, como una mayor eficiencia en la remoción de nitrógeno, ahorro de energía debido a un menor período de aireación y menores producciones de lodo (citado por Moura, 2014 p. 16). Además, la adición de períodos no aireados promueve una menor oxidación aeróbica de la materia orgánica en el reactor, pudiendo generar una fuente interna de donadores de electrones para la desnitrificación, no habiendo la necesidad de agregar donadores de electrones externos.

De acuerdo con Yoo et al. (1999), el proceso de desnitrificación puede ocurrir al principio de la fase aeróbica, cuando la concentración de OD es inferior a $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$. Con concentraciones de OD superiores a $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$, la nitrificación se vuelve más activa. La desnitrificación volverá a activarse nuevamente cuando la aireación se apague y la concentración de OD en el medio líquido disminuya.

4. CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. UBICACIÓN DEL SISTEMA.

La investigación a escala de laboratorio se realizó en las instalaciones del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos CITRAR-UNI, ubicado en el sector norte de la Universidad Nacional de Ingeniería, la cual está dentro de la jurisdicción del distrito del Rimac – Lima.



Figura 4.1. Ubicación del reactor IFAS a escala de laboratorio en la zona de tesis N° 1 CITRAR UNI.

Fuente: Google Maps.

4.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Para una mejor explicación del experimento se presentará un diagrama de flujo, ver figura 4.2, en la cual se menciona todos componentes del sistema, por los que el agua residual hace su recorrido, y más adelante cada uno de los componentes del sistema implementado se describirán con más detalle.

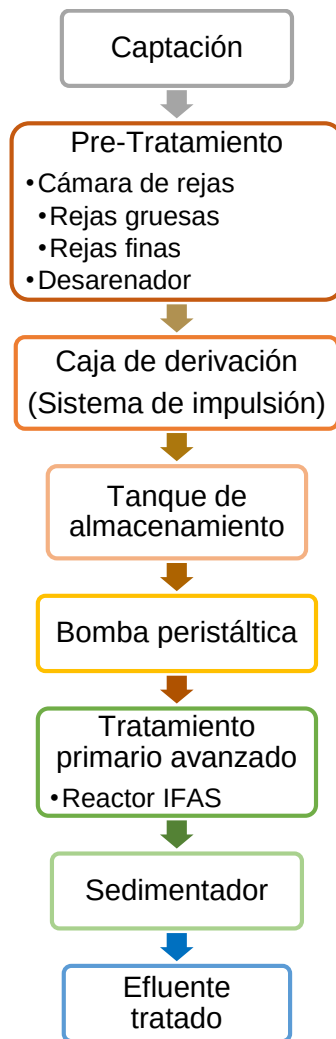


Figura 4.2. Diagrama de flujo del recorrido del agua residual en la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

El agua residual afluyente ingresa a la planta piloto CITRAR-UNI a través de la captación, luego es conducido hacia el pre-tratamiento, pasando por la cámara de rejas (rejas gruesas y finas, en ese orden) y el desarenador, posteriormente sigue su recorrido hacia la caja de derivación, esta unidad deriva el agua residual pre-tratada hacia dos unidades, el reactor UASB y el tanque séptico, sin embargo, para esta investigación se ha hecho una tercera derivación, implementando una bomba de impulsión en dicha caja de derivación, con el único objetivo de abastecer el tanque de almacenamiento del sistema evaluado, finalmente con la ayuda de una

bomba peristáltica se alimentó el reactor, para tratar el agua residual y obtener un efluente con características adecuadas.

El tratamiento primario avanzado se llevó cabo en un reactor IFAS, Integrates Fixed- film activated sludge, por sus siglas en inglés, conocido también como reactor de lodos activados con medio de adherencia fijo, el cual operó con aireación intermitente para lograr la remoción del nitrógeno total y asegurar la calidad del efluente.

Durante la puesta en marcha, que duro 11 semanas, el reactor operó con aireación continua porque en esta etapa se priorizo es desarrollo de la biomasa adherida y la estabilización del reactor.

Posteriormente, en la etapa de evaluación del reactor, se pusieron en funcionamiento los timer digitales, que controlaban el compresor de aire y el mezclador, estos dispositivos permitieron generar la fase aerobia y la fase anóxica, es importante precisar que durante la fase anóxica entra en funcionamiento el mezclador para distribuir homogéneamente la fuente de carbono (agua residual) y, además, evitar la sedimentación de la biomasa suspendida en el reactor; de esta manera se generó condiciones para la ocurrencia de la nitrificación y la posterior desnitrificación en un ciclo de operación, compréndase ciclo de operación como fase aerobia más fase anóxica.

4.2.1. AGUA RESIDUAL AFLUENTE.

Durante toda la fase experimental, que duro 33 semanas, el reactor a escala de laboratorio fue alimentado con agua residual pre-tratada captada de las poblaciones asentadas en los sectores de El Milagro y El Ángel, cabe indicar también que el agua residual pre-tratada ha sido almacenada en un tanque eternit de 600 L, el volumen almacenado fue calculado para la alimentación de reactor durante 24 h a un caudal constante determinado, por lo que no se utilizó toda la capacidad del tanque de almacenamiento, además, dicho tanque de almacenamiento contaba con un mezclador de paleta para mantener homogénea las características del agua residual pre-tratada. Las

características promedio del agua residual pre-tratada se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características del afluente (agua residual pre-tratada).

Parámetro	Unidad	Valor	Min	Max	n*
Temperatura	°C	23.89±3.37	16.80	29.20	207
pH		7.14±0.25	6.39	8.90	207
Turbidez	NTU	124.28±62.15	25.30	439.00	186
DBO ₅	mg/L	155.72±35.16	107.64	247.74	18
DQO	mg/L	292.36±57.79	201.00	451.00	22
NTK	mg/L	24.17±3.10	19.50	33.71	19
N-NH ₄ ⁺	mg/L	15.05±2.61	11.00	21.00	19
N-NO ₂ ⁻	mg/L	17.74±4.80	9.00	25.00	21
N-NO ₃ ⁻	mg/L	22.07±6.43	11.40	35.00	21
N total	mg/L	63.97±8.02	44.73	79.12	19
SST	mg/L	88.12±20.30	62.85	136.00	17
SSV	mg/L	75.40±21.07	37.78	135.00	17

*Número de datos analizados.

4.2.2. COMPONENTES DEL SISTEMA.

A continuación, se muestra la figura 4.3 donde se aprecia de manera general los componentes del sistema, y en la figura 4.4 se muestra los componentes internos del reactor. Además, para esta investigación se utilizó una bomba peristáltica, la cual permitió mantener un caudal constante del afluente para los dos TRH evaluados.

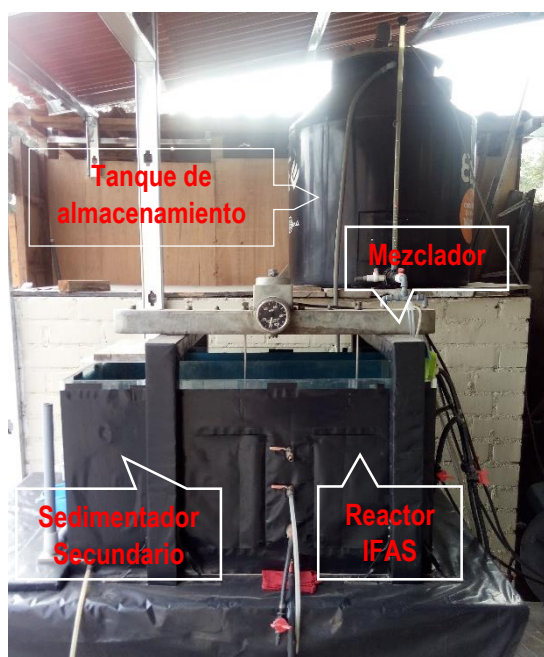


Figura 4.3. Componentes del sistema a escala de laboratorio.

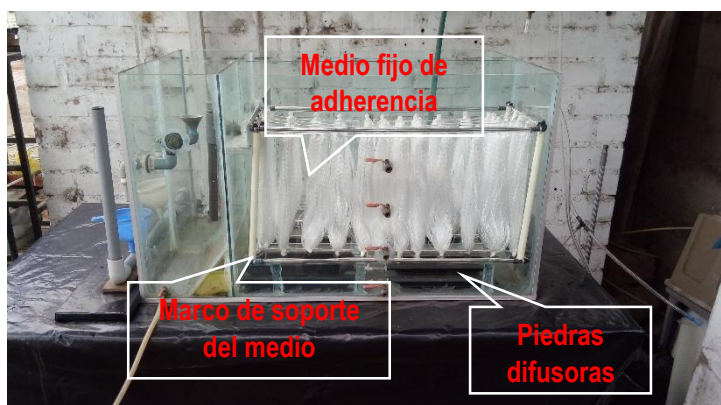


Figura 4.4. Componentes internos del reactor a escala de laboratorio.

4.2.2.1. MEDIO DE ADHERENCIA.

El medio de adherencia fue elaborado por hebras de polipropileno, distribuidas en 40 columnas y sujetas a un marco de soporte, de acero inoxidable y 4 secciones de tubería de CPVC de ½ pulg (ver anexo 10.5). Las hebras deshilachadas dispuestas verticalmente tenían una longitud de 35.5 cm y un diámetro como cuerda trenzada de 3/8 pulg. La configuración y distribución de las hebras en el tanque de aireación se hizo de manera tal que la separación entre columna y columna fue de aproximadamente 5 cm tanto longitudinalmente como transversalmente a la dirección del flujo, además, es importante mencionar que se consideró 2 espacios, donde no se instaló columnas de hebras, con la finalidad de que en dichos espacios funcionen las 2 paletas del mezclador, dichos espacios adoptaron la una sección cuadrada de 16 cm de lado aproximadamente.

Tabla 4.2. Características del medio de adherencia.

1 Cuerda de polipropileno	
Nombre	Polipropileno
Fórmula	$(C_3H_6)_n$
Tipo	Poliolefina

1 Cuerda de polipropileno	
Peso promedio	13.01 gramos
Volumen desplazado	0.02 litros
Cantidad	40 columnas
Longitud	35.5 cm
Solubilidad	Insoluble (no reacciona con el agua)
Color	Blanco

Fuente: Elaboración Propia

Los demás componentes se enumerarán de manera sucinta en la tabla 4.3, además, se mencionarán los materiales usados para la implementación del sistema.

Tabla 4.3. Componentes y materiales usados en la investigación.

Item	Componente	Materiales usados
1	Tanque de almacenamiento	Tanque eternit de 600 L y piezómetro
2	Mezclador homogenizador	Temporizador analógico, un contactor, un motor y una paleta de 40 cm x 10 cm.
3	Tuberías de distribución y tubería de limpieza.	2 válvulas de bola, tubería de PVC de 1/2", 3 codos de 1/2 ", 1 tee de 1/2 ", 2 espigas macho de bronce de 1/2 " a 3/8 ", niple reductor de 1/2" y 7m de manguera de plástico de 3/4".
4	Tuberías de succión	Mangueras de 3/8 ", 2 tees plásticas para manguera de 3/8 ", 2 válvulas plásticas de dos vías de 1/4 ".
5	Sistema de impulsión	Bomba peristáltica Cole-Parmer con dos cabezales, 2 mangueras Masterflex de 3/8 " y adaptadores.

Item	Componente	Materiales usados
6	Tuberías de impulsión	Mangueras de 3/8 ", 2 tees plásticas para manguera de 3/8 ", 2 válvulas plásticas de dos vías de 1/4 ".
7	Zona de ingreso al reactor IFAS	2 tuberías de CPVC de 1/2" de 42 cm, 2 tees de CPVC, 2 uniones universales de CPVC.
8	Reactor IFAS	Reactor de vidrio de 6 mm de espesor, 4 válvulas de bronce de 1/4 ", 6 piedras difusoras de burbuja fina, 1 soporte de acero inoxidable y tubería de CPVC, Medio fijo de adherencia de hebras de polipropileno (cuerda de 3/8")
9	Zona de salida del reactor IFAS	Un vertedero de aluminio, tubería de PVC.
10	Mezclador	Un equipo de jarras adaptado con dos paletas de acero inoxidable, dos soportes de madera, un transformador de corriente de 220 V a 110 V.
11	Sistema de aireación	1 compresor ACO de 60 L/min y accesorios, 3 líneas de mangueras de 1/8 "
12	Ingreso al sedimentador	1 tubería de PVC de 1/2 ", 1 tee de PVC de 1/2 ".
13	Sedimentador	Tanque de vidrio de 6 mm de espesor.
14	Salida del sedimentador	2 codos de PVC de 1/2 ", 1 vertedero de PVC (reducción de 2" a 1/2"), 1 niple reductor de 1/2 ", 1 tuerca de adaptación con arandela.

Item	Componente	Materiales usados
15	Sistema de recolección del efluente.	1 embudo pequeño de plástico, 1 tee de 1", tubería de PVC de 1", 3 codos de 1", manguera de plástico de 3/4".
16	Tablero de control	1 interruptor termomagnético, 1 interruptor diferencial, 2 contactores, 2 timer digitales, 2 tomas de corriente dobles.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. DIMENSIONES DEL REACTOR – ESCALA LABORATORIO.

El reactor se diseñó con material de vidrio de 6 mm de espesor. Para tener una mejor idea de las dimensiones del reactor se puede observar las figuras 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, además, se detallará las dimensiones de cada componente del reactor en la tabla 4.4.

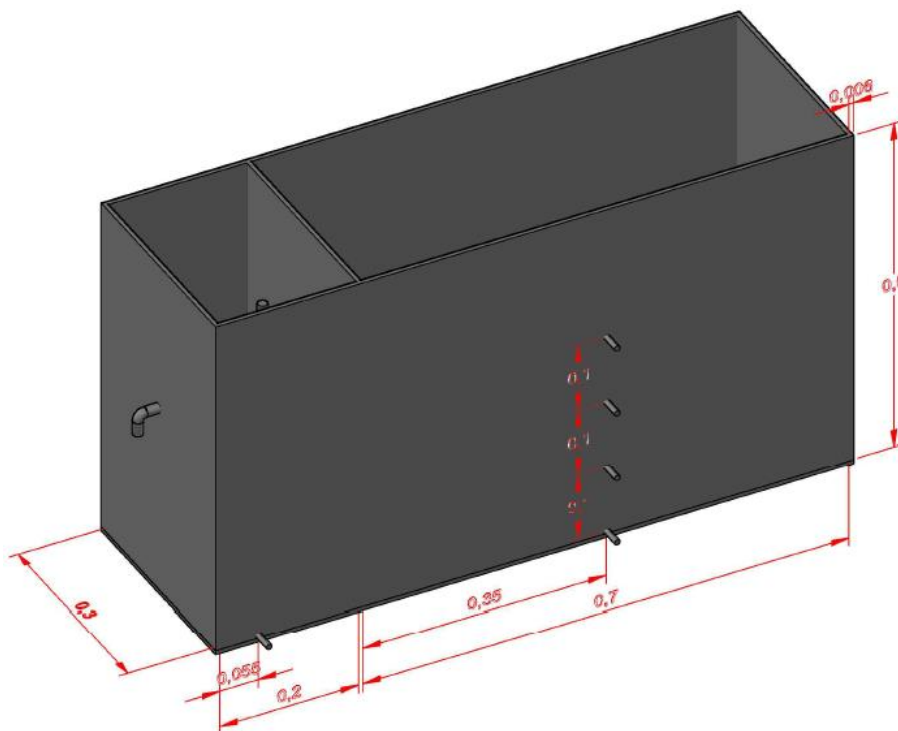


Figura 4.5. Vista del isométrico y dimensiones del reactor a escala de laboratorio.

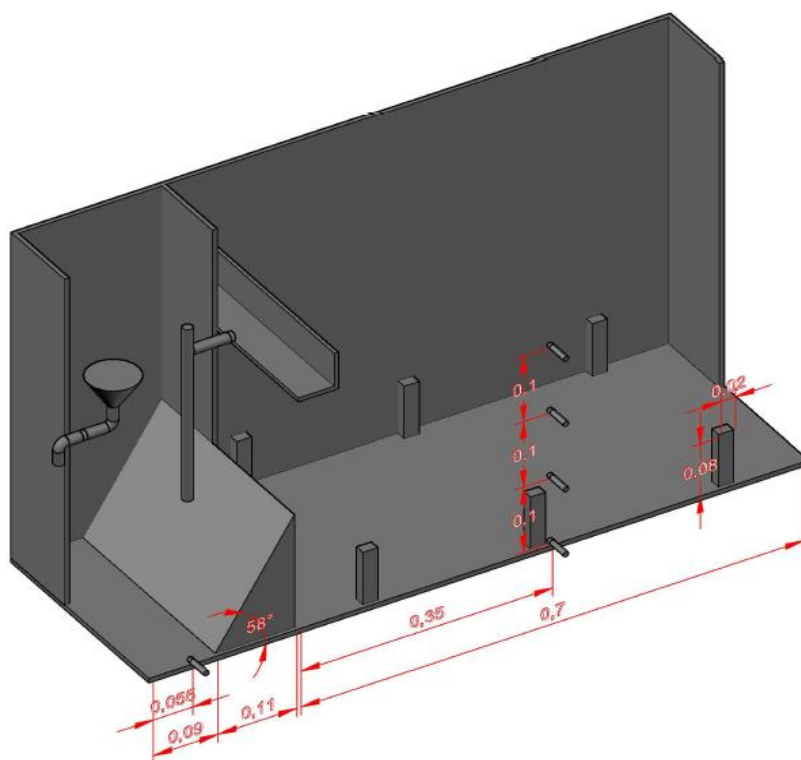


Figura 4.6. Vista interior del reactor a escala de laboratorio.

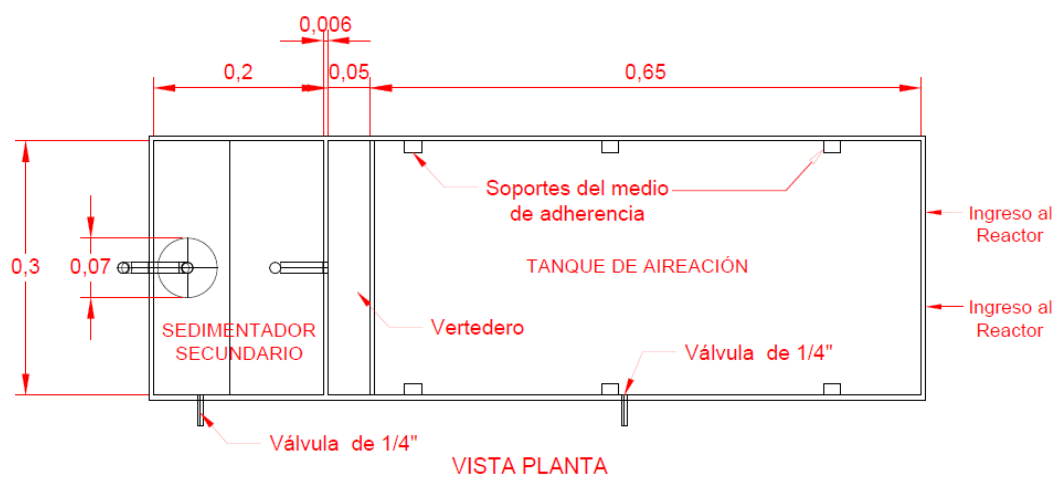
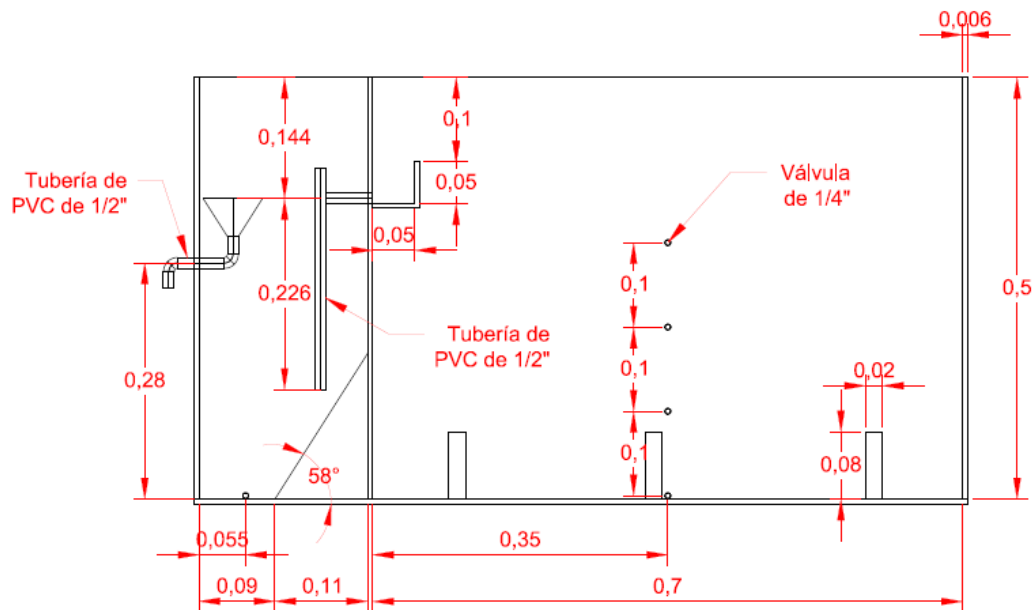


Figura 4.7. Vista de planta y dimensiones del reactor a escala de laboratorio.



VISTA LATERAL

Figura 4.8. Vista lateral y dimensiones del reactor a escala de laboratorio.**Tabla 4.4.** Dimensiones de los elementos del reactor.

ZONA	ELEMENTO	DIMENSIONES		
		Característica	Magnitud	Unidad
Zona de entrada	Tubería de CPVC	Cantidad	2	Unid.
		Longitud	42,5	cm
		Diámetro exterior	15,87	mm
		Espesor de pared	1,73	mm
		Volumen sumergido	0,000049	m ³
Zona de aireación	Tanque de vidrio	Largo	70,0	cm
		Ancho	30,0	cm
		Altura	40,0	cm
		Espesor de pared	6,0	mm
		Borde libre	10,0	cm
		Volumen	0,084	m ³
	Medio fijo de adherencia	Cantidad	40	Unid.
		Longitud	35,5	cm
		Diámetro	3/8	Pulg.
		Volumen desplazado	0,00002	m ³

ZONA	ELEMENTO	DIMENSIONES		
		Característica	Magnitud	Unidad
Zona de aireación	Marco de soporte del medio fijo	Largo	65,0	cm
		Ancho	30,0	cm
		Altura	32,0	cm
		Diámetro	1,1	cm
		Volumen desplazado	0,00045	m ³
	Cuñas de apoyo de vidrio para el marco de soporte	Cantidad	6	Unid.
		Ancho	2,0	cm
		Altura	8,0	cm
		Espesor	1,4	mm
		Volumen desplazado	0,00013	m ³
	Piedras difusoras	Cantidad	6	Unid.
		Largo	29,0	cm
		Volumen desplazado	0,00054	m ³
Zona de salida	Vertedero de aluminio	Largo	30,0	cm
		Ancho	5,0	cm
		Altura	5,0	cm
		Volumen desplazado	0,00075	m ³
Zona de sedimentación	Tubería de ingreso de PVC	Longitud	25,0	cm
		Diámetro exterior	21,0	mm
		Espesor de pared	1,8	mm
	Tanque sedimentador	Largo	20,0	cm
		Ancho	30,0	cm
		Altura	37,0	cm
		Espesor de pared	6,0	mm
		Borde libre	13,0	cm
		Volumen útil	0,01989	m ³
	Vertedero circular de salida	Diámetro	2	Pulg.
VOLÚMENES		Volumen útil del reactor.	0.081197	m ³
		Volumen del sedimentador	0.01980	m ³

4.4. CAUDALES DE OPERACIÓN.

En esta investigación se evaluó dos caudales, y por ende dos TRH, determinándose de esta manera las etapas de la investigación. En la tabla 4.5 se aprecia los caudales evaluados.

Tabla 4.5. Caudales afluentes evaluados en la investigación.

CAUDAL			TRH (horas)	Tiempo de evaluación (semanas)
L/día	mL/s	m ³ /día		
223.20	2.58	0.22	8.73	11
167.04	1.93	0.17	11.67	11

Fuente: Elaboración propia.

4.5. PARÁMETROS DE MEDICIÓN Y CONTROL.

4.5.1. PARÁMETROS EVALUADOS.

Los parámetros evaluados durante la investigación, con el fin de hacer un seguimiento del comportamiento y evolución del reactor, fueron los siguientes:

- Temperatura del agua residual.
- Temperatura ambiental.
- pH.
- Turbiedad.
- Oxígeno disuelto (OD).
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).
- Demanda química de oxígeno total (DQO).
- Sólidos suspendidos totales (SST).
- Sólidos suspendidos volátiles (SSV).
- Nitrógeno total Kjeldahl.
- Nitrógeno amoniacal.
- Nitritos.
- Nitratos.

4.5.2. MÉTODOS

Se emplearon los métodos establecidos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Tabla 4.6. Métodos de medición de los parámetros evaluados.

PARÁMETRO	MÉTODO EMPLEADO
Temperatura	APHA, AWWA, WEF 4500-H+B: 2012; 22nd Ed. Laboratory and Field Methods
pH	APHA, AWWA, WEF 4500-H+B: 2012; 22nd Ed. Electrometric Method.
Turbiedad	APHA, AWWA, WEF 2130.B: 2012; 22nd Ed. Turbiedad, Nephelometric Method.
Oxígeno disuelto (OD)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-O G., 22nd Ed. 2012. Membrane Electrode Method.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)	APHA, AWWA, WEF 5210-B: 2012; 22nd Ed. Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD). 5 day BOD Test.
Demanda química de oxígeno total (DQO)	APHA, AWWA, WEF 5220-D: 2012; 22nd Ed. Demanda Química de Oxígeno (DQO). Closed Reflux, Colorimetric Method.
Sólidos suspendidos totales (SST)	APHA, AWWA, WPCF 2540 D: 2012; 22nd Ed. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C. Método Gravimétrico.
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	APHA, AWWA, WPCF 2540 E: 2012; 22nd Ed. Fixed and Volatile Solids Ignited at 550°C. Método Gravimétrico.
Nitrógeno total Kjeldahl	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-Norg-B, 23rd Ed. 2017. Nitrogen (Organic). Macro-Kjeldahl Method.
Nitrógeno amoniacal	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NH ₃ H, 22nd Ed. 2012. Flow Injection Analysis Method.
Nitritos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NO ₂ -B, 22nd Ed. 2012. Colorimetric Method.
Nitratos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NO ₃ -F, 22nd Ed. 2012. Cadmium Reduction Method.

Fuente: Elaboración propia.

4.6. FRECUENCIA DE MONITOREO.

Se muestra la tabla 4.7 para detallar y especificar la frecuencia de monitoreo de cada parámetro evaluado en la investigación. Cabe mencionar que esta tabla aplica estrictamente a las 22 semanas de evaluación del reactor, no aplica necesariamente a las 11 semanas de la etapa de puesta en marcha, porque algunos de los parámetros mostrados en esta tabla no se midieron en dicha etapa.

Tabla 4.7. Frecuencia de monitoreo de los parámetros evaluados en la investigación.

PARÁMETRO	FRECUENCIA
Temperatura	DIARIO (2 veces al día)
pH	
Turbiedad	
Oxígeno Disuelto	
Demanda bioquímica de Oxígeno	SEMANAL
Demanda química de Oxígeno total	
Sólidos suspendidos totales	
Sólidos suspendidos volátiles	
Nitrógeno total Kjeldahl	
Nitrógeno amoniacal	
Nitritos	
Nitratos	

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros monitoreados diariamente se realizaron 2 veces al día, en la mañana, comprendido entre las 9:00 am y 11:00 am, y en la tarde en el rango de 1:00 pm – 3:00 pm, se debe mencionar que por circunstancias extraordinarias algunos días solo se logró medir 1 vez al día, ver anexo N° 2.

En el caso de los parámetros monitoreados semanalmente, estos se midieron una vez por semana, sin embargo, algunos parámetros como el nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos se lograron medir, ocasionalmente, hasta dos veces por semana.

4.7. PUNTOS DE MUESTREO.

Para la investigación se ha considerado 3 puntos de muestreo, el primer punto de muestreo denominado **Afluente** se ubicó en la línea de impulsión de la bomba peristáltica, justo antes del ingreso al reactor, con la finalidad de monitorear los parámetros del agua residual afluente; se debe mencionar que el agua residual afluente para la alimentación del reactor se retuvo en volumen suficiente en el tanque de almacenamiento para suministrar durante 24 h, y mediante un temporizador, durante ese periodo se mantuvo un proceso de mezclado de 15 min seguido de 15 min de parado del motor mezclador, cumpliendo de esa manera un ciclo repetitivo de 30 min, a lo largo del día.

El punto **LM (licor mezclado)**, ubicado a 10.5 cm del fondo del tanque se aireación, fue el segundo punto de toma de muestra, compuesto por una válvula y una manguera de 3/8", y tuvo la finalidad de monitorear los parámetros de control enfocadas a vigilar y hacer un seguimiento del comportamiento del licor mezclado en el tanque de aireación. Por último, tenemos el punto **Efluente**, ubicada a la salida del sedimentador, en este punto se tomó muestras para monitorear el efluente, y con ello determinar la eficiencia de los parámetros de respuesta enfocadas en cumplir los objetivos de la investigación.

4.8. ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN.

4.8.1. PUESTA EN MARCHA.

Esta parte de la investigación tuvo una duración de 11 semanas, y se suministró aire de manera continua, las 24 h del día, durante toda la duración de la puesta en marcha para fomentar el desarrollo de la biomasa adherida al medio fijo. Se mantuvieron condiciones adecuadas de pH, OD y el suministro continuo y constante de agua residual pre-tratada; así mismo se midieron otros parámetros como la temperatura, turbiedad y en las últimas semanas se midió también nitritos, nitratos y DQO.

4.8.2. EVALUACIÓN DEL REACTOR.

La evaluación del reactor con aireación intermitente tuvo una duración de 22 semanas, durante ese periodo se ha monitoreado los parámetros establecidos en la tabla 4.7 y se ha operado en dos etapas, es decir con dos TRH, dentro de cada etapa se experimentó con tres escenarios, los cuales se diferencian uno del otro por la fracción aireada en cada ciclo. Cada ciclo tuvo una duración de tres horas, y dentro de un ciclo se estableció una fase aerobia seguida de una fase anóxica con mezcla. Para una mejor explicación de las etapas de esta investigación, a continuación, se detallará cada una de estas.

4.8.2.1. ETAPA 1

Estuvo comprendida entre la semana 12 y 22 y operó con un TRH de 8,7 h, se divide en tres escenarios, cada uno de los cuales con ciclos de 3 horas a lo largo del día, completando de esta manera 8 ciclos por día. Cabe mencionar también que durante la fase anóxica se agitó el licor mixto con un mezclador de paletas a una velocidad de 55 rpm aproximadamente.

4.8.2.1.1. ESCENARIO I

Comprendido entre la semana 12 y 14, cuyo patrón de aireación y no aireación fue de 40/140 min, el cual se repite a lo largo del día, completando de esa manera los 8 ciclos diarios. Durante la fase anóxica se aplicó agitación a 55 rpm.

4.8.2.1.2. ESCENARIO II

Este escenario estuvo comprendido entre la semana 15 y 18, y operó con un patrón de aireación y no aireación de 50/130 min. Durante la fase anóxica se aplicó agitación a 55 rpm.

4.8.2.1.3. ESCENARIO III

Estuvo comprendido entre la semana 19 y 22, y operó con un patrón de aireación y no aireación de 120/60 min.

Durante la fase anóxica se aplicó agitación a 55 rpm.

4.8.2.2. ETAPA 2

Estuvo comprendida entre la semana 23 y 33, operó con un TRH de 11,7 h, y al igual que en la etapa 1, se divide en tres escenarios, en cada uno de los cuales se operó también con 8 ciclos de 3 horas diariamente. La agitación se mantuvo en 55 rpm durante la fase anóxica de cada escenario.

4.8.2.2.1. ESCENARIO IV

Operó entre la semana 23 a 26, con un patrón de aireación y no aireación de 120/60 min. Durante la fase anóxica se aplicó agitación a 55 rpm.

4.8.2.2.2. ESCENARIO V

Estuvo comprendido entre la semana 27 y 30, con un patrón de aireación y no aireación de 90/90 min. Durante la fase anóxica se aplicó agitación a 55 rpm.

4.8.2.2.3. ESCENARIO VI

Este escenario estuvo comprendido entre la semana 31 y 33, con un patrón de aireación y no aireación de 60/120 min. Durante la fase anóxica se aplicó agitación a 55 rpm.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo donde se indican de manera general las etapas evaluadas en esta tesis de investigación.

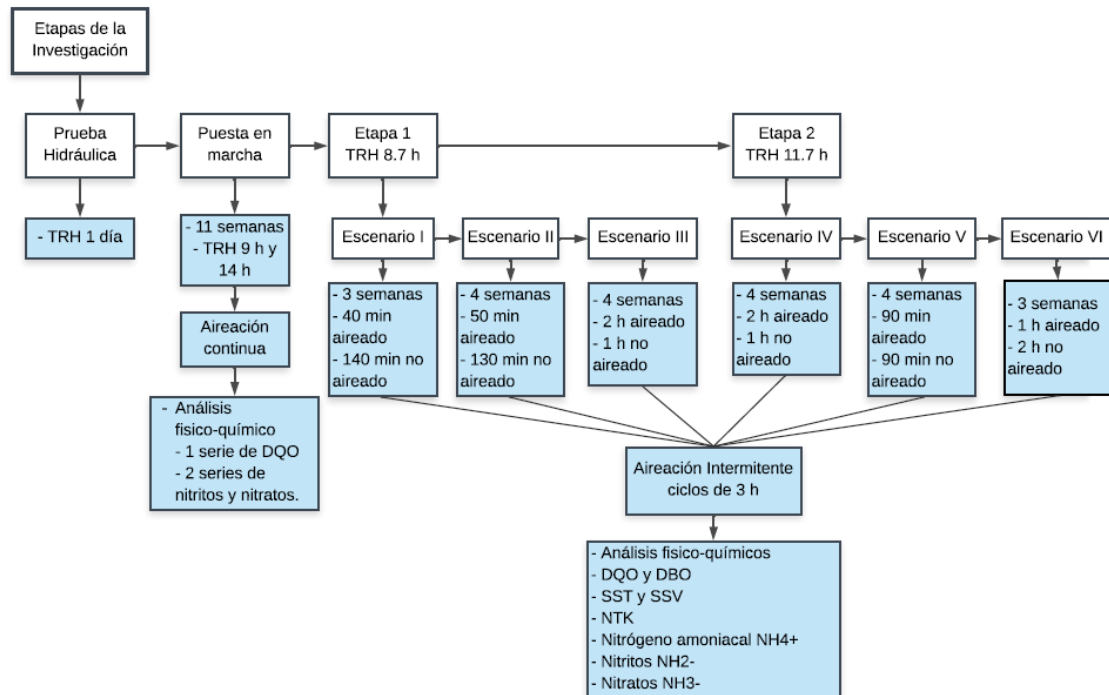


Figura 4.9. Visión general de todas las etapas de la investigación.

Fuente: (Adaptado de Moura, 2014)

4.8.3. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.

La operación del sistema ha quedado supeditada a las variables operacionales tales como: Tiempo de retención hidráulica (TRH), Tiempo de retención celular (TRC), Sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM), caudal de aire suministrado.

Tabla 4.8. Condiciones de operación referenciales por escenario.

Caudal de aire Suministrado	TRH	Escenario	TRC (días)	SSVLM (mg/L)
12 L/min	8,7 h	I	11.70	1654.83
		II	8.11	1654.83
		III	14.50	2000.00
	11,7 h	IV	36.38	2000.00
		V	31.46	2000.00
		VI	13.77	1654.83

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que los valores del tiempo de retención celular (TRC) se calcularon de manera referencial considerando un coeficiente de producción de crecimiento ($Y = 0.65 \text{ mgSSV/mgDBO}$), constante de declinación endógena ($K_d = 0.05 \text{ d}^{-1}$), (Romero, 2005), DBO afluente y efluente promedio para cada escenario, y considerando una concentración de biomasa en el reactor de 2000 mg/L para los escenarios III, IV y V, mientras que para el escenario VI si se logró medir experimentalmente la concentración de biomasa adherida al medio fijo, la cual tuvo una concentración de 1654.83 mgSSV/L , y en los escenarios I y II se optó por adoptar el mismo valor que el escenario VI porque los patrones de aireación/no aireación fueron muy próximos en cuanto a fracción aireada se trata y por tanto las características del lodo fueron relativamente similares.

El caudal de aire suministrado (12 L/min) fue por exceso debido a que las válvulas de regulación de caudal del equipo compresor no permitieron hacer una menor reducción, el caudal de aire requerido de acuerdo a los cálculos fue menor a 2.5 L/min en todos los escenarios.

Y también es importante resaltar que durante toda la evaluación del reactor no se recirculó el lodo acumulado en el decantador secundario por dos razones, la primera es que el volumen de lodo acumulado por semana era despreciable y la segunda razón fue porque el medio fijo permitió retener la biomasa dentro del tanque de aireación.

5. CAPÍTULO V

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo de la tesis se mostrarán los resultados de los parámetros medidos durante las 33 semanas, es decir, en la puesta en marcha y las dos etapas de evaluación de la investigación.

5.1. PUESTA EN MARCHA.

En este capítulo se muestra los promedios de los resultados de los parámetros evaluados durante las 11 semanas que duró la puesta en marcha, la puesta en marcha se divide en dos etapas debido a la marcada diferencia en la temperatura, además, en el primer mes solo se hizo una medición de la turbidez.

Tabla 5.1. Resumen de los parámetros evaluados durante la puesta en marcha.

Parámetros	Unidad	n (**)	Etapa 1 (setiembre)		
			Afluyente	LM	Efluente
Temp. ambiental	°C	13	18,26 ± 1,45		
Temp. muestra	°C	14	17,59 ± 0,88	17,16 ± 0,88	17,14 ± 0,78
pH		14	7,56 ± 0,49	8,14 ± 0,36	7,92 ± 0,32
Turbidez	NTU	1	118,0	47,0	55,00
O.D.(*)	mg/L	14	0,19 ± 0,07	7,90 ± 2,37	3,98 ± 2,41
DBO ₅	mg/L	1	162.36	-	134.65

* O.D.: Oxígeno disuelto

** “n” es el número de muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el O.D. en el tanque de aireación (Licor mixto) es elevado, esto es debido a que durante el primer mes de arranque aún no se ha desarrollado la biomasa, ergo, no hay demanda de oxígeno por parte de microorganismos.

Tabla 5.2. Resumen de los parámetros evaluados durante la puesta en marcha.

Parámetros	Unidad	n (**)	Etapa 2 (octubre - noviembre)		
			Afluente	LM	Efluente
Temp. ambiental	°C		22,09 ± 2,02		
Temp. muestra	°C	60	21,18 ± 1,80	20,57 ± 1,56	20,55 ± 1,70
pH		60	7,17 ± 0,24	7,41 ± 0,23	7,45 ± 0,19
Turbidez	NTU	54	92,56 ± 60,12	39,10 ± 68,33	20,38 ± 11,21
O.D.(*)	mg/L	60	0,21 ± 0,59	3,46 ± 2,32	3,31 ± 1,58
DQO _{Total}	mg/L	1	278	-	59
Nitritos NO ₂ ⁻	mg/L	2	18 ± 2,0	-	6,50 ± 5,50
Nitratos NO ₃ ⁻	mg/L	2	19 ± 7,20	-	5,40 ± 1,20

* O.D.: Oxígeno disuelto

** “n” es el número de muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. EVALUACIÓN DEL SISTEMA.

Los resultados de las 22 semanas, que corresponden al periodo de evaluación del reactor, se encuentran resumidas en la tabla 5.3.

Se detallan cada uno de los parámetros evaluados en el afluente y efluente, cabe mencionar que, para la temperatura de la muestra, potencial de hidrógeno (pH) y turbidez se muestran también los valores registrados en el licor mezclado.

Tabla 5.3. Resumen de la calidad del afluente promedio durante los seis escenarios evaluados.

Parámetros	Unidad	TRH	Escenario	n	Punto Evaluado		
					Afluente	LM	Efluente
Temperatura ambiental	°C	8,7 h	I	18	24.83 ± 2.18		
			II	25	28.24 ± 1.96		
			III	28	29.16 ± 1.35		
		11,7 h	IV	25	27.64 ± 2.09		
			V	21	26.70 ± 1.67		
			VI	16	21.93 ± 2.32		
Temperatura de la muestra	°C	8,7 h	I	18	23.99 ± 1.47	23.43 ± 1.40	23.72 ± 1.53
			II	25	26.79 ± 1.35	26.25 ± 1.24	26.41 ± 1.21
			III	28	27.63 ± 1.07	27.20 ± 1.06	27.09 ± 0.87
		11,7 h	IV	25	26.58 ± 1.28	25.96 ± 1.30	25.84 ± 1.20
			V	21	25.69 ± 1.09	24.92 ± 1.06	24.92 ± 1.04
			VI	16	21.84 ± 1.73	21.32 ± 1.75	21.30 ± 1.63
pH		8,7 h	I	18	7.15 ± 0.15	7.44 ± 0.17	7.52 ± 0.11
			II	25	7.00 ± 0.19	7.24 ± 0.13	7.40 ± 0.14
			III	28	7.06 ± 0.15	7.31 ± 0.14	7.41 ± 0.12
		11,7 h	IV	25	7.06 ± 0.16	7.18 ± 0.15	7.32 ± 0.13
			V	21	7.13 ± 0.14	7.28 ± 0.15	7.36 ± 0.08
			VI	16	7.21 ± 0.10	7.37 ± 0.13	7.47 ± 0.11

NOTA: “n” es el número de muestras analizadas

Parámetros	Unidad	TRH	Escenario	n	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
					Afluente	LM	Efluente	
Turbidez	NTU	8,7 h	I	17	122.37 ± 34.26	158.91 ± 163.67	60.08 ± 31.20	49.32 ± 29.13
			II	25	139.16 ± 53.69	353.40 ± 191.45	38.39 ± 23.72	68.54 ± 21.88
			III	28	128.78 ± 34.50	248.81 ± 251.58	9.85 ± 5.10	92.01 ± 4.23
		11,7 h	IV	25	113.44 ± 31.56	424.86 ± 332.28	5.24 ± 3.72	94.70 ± 4.85
			V	21	150.33 ± 69.86	312.29 ± 322.02	3.11 ± 1.77	97.64 ± 1.85
			VI	16	183.38 ± 94.04	29.56 ± 17.14	8.86 ± 2.45	93.32 ± 5.38
Oxígeno disuelto (O.D.)	mg/L	8,7 h	I	18	0.00 ± 0.00	-	1.21 ± 1.69	-
			II	25	0.02 ± 0.08	-	1.54 ± 1.72	-
			III	28	0.07 ± 0.20	-	3.38 ± 1.30	-
		11,7 h	IV	25	0.22 ± 0.38	-	4.47 ± 0.73	-
			V	21	0.20 ± 0.40	-	4.71 ± 0.85	-
			VI	16	0.23 ± 0.43	-	4.12 ± 0.70	-
DBO ₅	mg/L	8,7 h	I	-	-	-	-	-
			II	3	197.24 ± 42.38	-	46.59 ± 10.39	75.44 ± 6.29
			III	4	159.12 ± 29.96	-	31.77 ± 17.54	80.37 ± 8.97
		11,7 h	IV	3	130.20 ± 13.05	-	15.98 ± 8.09	87.90 ± 5.38
			V	4	130.91 ± 21.97	-	11.59 ± 4.72	91.12 ± 3.17
			VI	3	166.03 ± 16.65	-	20.62 ± 5.13	87.75 ± 1.78

NOTA: “n” es el número de muestras analizadas

Parámetros	Unidad	TRH	Escenario	n	Punto Evaluado		Eficiencia (%)
					Afluente	Efluente	
DQO Total	mg/L	8,7 h	I	3	305.00 ± 29.71	106.67 ± 27.18	65.56 ± 6.11
			II	3	366.33 ± 61.65	91.67 ± 15.80	74.19 ± 6.28
			III	4	298.25 ± 68.39	41.25 ± 15.24	86.36 ± 3.60
		11,7 h	IV	4	264.50 ± 35.20	34.25 ± 6.02	86.50 ± 4.29
			V	4	249.25 ± 33.51	34.00 ± 5.92	86.37 ± 1.31
			VI	3	297.33 ± 33.77	60.33 ± 13.52	79.88 ± 3.01
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	8,7 h	I	2	24.78 ± 2.25	22.87 ± 3.50	8.23 ± 5.79
			II	3	27.44 ± 4.46	23.43 ± 2.81	11.70 ± 20.87
			III	4	24.99 ± 1.77	13.06 ± 1.03	47.41 ± 5.99
		11,7 h	IV	4	21.62 ± 2.04	4.72 ± 0.57	78.09 ± 2.39
			V	4	22.57 ± 1.46	4.86 ± 2.39	78.78 ± 9.97
			VI	2	25.29 ± 0.58	16.15 ± 0.05	36.12 ± 1.68
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	8,7 h	I	2	15.50 ± 1.50	22.00 ± 3.74	-45.17 ± 33.40
			II	3	16.67 ± 3.30	20.67 ± 6.28	-26.46 ± 31.02
			III	4	14.50 ± 2.06	9.75 ± 0.83	30.55 ± 15.78
		11,7 h	IV	4	14.50 ± 2.18	2.75 ± 0.43	80.44 ± 5.05
			V	4	13.25 ± 1.30	1.50 ± 0.50	88.63 ± 3.84
			VI	2	18.00 ± 2.00	15.00 ± 0.00	15.63 ± 9.38

NOTA: “n” es el número de muestras analizadas

Parámetros	Unidad	TRH	Escenario	n	Punto Evaluado		Eficiencia (%)
					Afluente	Efluente	
Nitritos (NO_2^-)	mg/L	8,7 h	I	2	13.50 ± 4.50	12.00 ± 1.70	-
			II	3	11.00 ± 2.16	11.00 ± 2.16	-
			III	4	17.25 ± 3.77	2.25 ± 1.30	-
		11,7 h	IV	4	20.25 ± 1.48	4.75 ± 1.48	-
			V	4	21.75 ± 3.27	4.25 ± 1.30	-
			VI	2	20.00 ± 1.00	6.50 ± 1.50	-
Nitratos (NO_3^-)	mg/L	8,7 h	I	2	13.65 ± 0.45	4.70 ± 0.64	-
			II	3	20.27 ± 7.62	4.23 ± 0.66	-
			III	4	26.73 ± 6.44	1.48 ± 1.57	-
		11,7 h	IV	4	23.58 ± 6.69	3.60 ± 0.83	-
			V	4	21.48 ± 1.02	3.48 ± 1.00	-
			VI	2	22.05 ± 2.45	3.35 ± 1.25	-
Nitrógeno total (N_{Total})	mg/L	8,7 h	I	2	51.93 ± 7.20	39.57 ± 0.80	22.53 ± 9.20
			II	3	58.71 ± 7.34	38.67 ± 5.53	32.46 ± 16.05
			III	4	68.96 ± 7.00	16.78 ± 2.17	75.34 ± 4.55
		11,7 h	IV	4	65.44 ± 6.41	13.07 ± 2.42	79.61 ± 4.98
			V	4	65.80 ± 4.24	12.58 ± 4.14	81.18 ± 5.22
			VI	2	67.34 ± 2.03	26.00 ± 2.81	61.24 ± 5.33

NOTA: “n” es el número de muestras analizadas

Parámetros	Unidad	TRH	Escenario	n	Punto Evaluado		Eficiencia (%)
					Afluente	Efluente	
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	8,7 h	I	-	-	-	-
			II	3	90.91 ± 11.29	15.67 ± 0.35	82.51 ± 2.04
			III	4	111.86 ± 19.58	9.21 ± 3.82	91.35 ± 4.56
		11,7 h	IV	3	67.48 ± 3.38	2.67 ± 0.68	96.01 ± 1.13
			V	4	71.92 ± 4.94	4.77 ± 1.15	93.44 ± 1.21
			VI	3	95.93 ± 7.47	10.03 ± 1.44	89.58 ± 0.82
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	8,7 h	I	-	-	-	-
			II	3	77.58 ± 8.56	15.30 ± 0.15	80.07 ± 1.87
			III	4	89.59 ± 35.76	7.10 ± 2.26	91.61 ± 1.52
		11,7 h	IV	3	62.98 ± 5.68	2.63 ± 0.66	95.71 ± 1.31
			V	4	63.60 ± 4.26	4.20 ± 1.43	93.41 ± 2.10
			VI	3	82.47 ± 4.31	9.57 ± 1.19	88.39 ± 1.30

NOTA: “n” es el número de muestras analizadas

Fuente: Elaboración propia.

6. CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el este capítulo se realizó el análisis de todos los parámetros evaluados durante la investigación, además, se relacionó los parámetros de control y los parámetros objetivo.

6.1. TEMPERATURA AMBIENTAL Y DEL AGUA RESIDUAL.

Se ha realizado la gráfica 6.1, donde se plasman los promedios semanales de las temperaturas (ambiental y de las muestras del afluente y efluente) que nos permite apreciar el comportamiento en el tiempo de este parámetro.

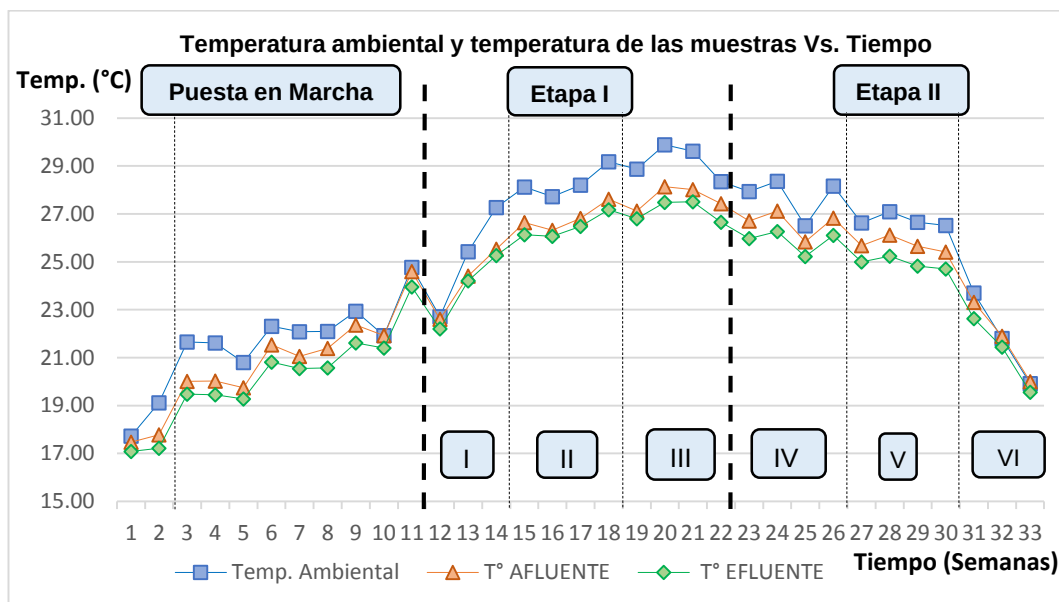
De la gráfica 6.1 se observa que el comportamiento de la temperatura tanto en el afluente como en el efluente tienen una tendencia de variación muy similar a la temperatura ambiental. Además, durante prácticamente toda la fase de evaluación la temperatura ambiental fue mayor a las temperaturas de las muestras de agua.

Durante la fase de puesta en marcha, que se llevó a cabo entre los meses de setiembre a noviembre, se puede observar que las dos primeras semanas de monitoreo, pertenecientes al mes de setiembre, la temperatura registrada, del afluente, efluente y ambiental, se mantuvieron aproximadamente entre 17 °C y 19,5 °C, mientras que, en las siguientes 9 semanas, pertenecientes a los meses de octubre y noviembre, se registró temperaturas entre 19 °C y 25 °C.

Por otro lado, analizando las temperaturas promedio semanales, del afluente y efluente, registradas durante las 2 etapas de evaluación, comprendidas entre diciembre y mayo, se puede notar claramente que el reactor operó en un rango entre 19 °C y 29°C, el cual, según Rittmann y McCarty (2001) citado por Comeau (2008), se encuentra en el rango mesofílico (15 a 40°C). Además, se observa un incremento de temperatura desde la semana 12 hasta la semana 20, alcanzando un pico máximo en el escenario III (febrero), luego la temperatura empieza a descender gradualmente, con ocasionales incrementos, hasta la semana 30, y de la semana 31 en adelante el descenso de temperatura es brusco, alcanzando

la temperatura mínima en el escenario VI (mayo), tal como se observa en la gráfica 6.1.

Existe una tendencia de disminución de la temperatura en el efluente de reactor con respecto al afluente, esto podría deberse a que el tanque de almacenamiento del agua residual afluente y las mangueras de la línea de impulsión estuvieron expuestos al sol, mientras que el reactor y el sedimentador siempre se mantuvieron en la sombra, y en ese caso la energía liberada por los microorganismos queda relegada porque es despreciable con respecto a la energía transferida por la energía solar.



Gráfica 6.1. Comportamiento de la temperatura ambiental y de la muestra afluente y efluente en el tiempo (semanas) de la investigación.

Según Arceivala, 1981; Barnes and Bliss, 1983, la nitrificación se produce en el rango de temperatura del agua residual comprendida entre 5 °C y 50°C, pero la temperatura optima esta entre 25 °C y 36°C (Von Sperling. 2007). Haciendo un contraste con el monitoreo de temperaturas se observa que en las 22 semanas de evaluación se registraron temperaturas por encima de 19°C y debajo de 31°C, para la mayoría de valores medidos, por lo que se puede afirmar que, con respecto a la temperatura, las condiciones fueron las adecuadas, sin embargo, solo se operó a la temperatura optima entre la semana 14 y 29 de la evaluación.

La tabla 6.1 muestra el resumen de las temperaturas por cada escenario de operación, donde se indican las temperaturas máximas, mínimas y promedios.

Tabla 6.1. Resumen de la temperatura ambiental, afluente y efluente por cada escenario de operación.

Temperatura (°C)	TRH	Escenario	n	Máximo (°C)	Mínimo (°C)	Promedio (°C)
Ambiental	8,7 h	I	18	27.80	20.70	24.83 ± 2.18
		II	25	31.70	23.30	28.24 ± 1.96
		III	28	31.40	26.10	29.16 ± 1.35
	11,7 h	IV	25	31.10	23.70	27.64 ± 2.09
		V	21	29.00	23.80	26.70 ± 1.67
		VI	16	26.80	18.10	21.93 ± 2.32
Afluente	8,7 h	I	18	26.20	21.40	23.99 ± 1.47
		II	25	29.10	24.10	26.79 ± 1.35
		III	28	29.20	25.30	27.63 ± 1.07
	11,7 h	IV	25	28.60	24.20	26.58 ± 1.28
		V	21	27.60	23.20	25.69 ± 1.09
		VI	16	25.20	18.60	21.84 ± 1.73
Efluente	8,7 h	I	18	25.80	20.90	23.72 ± 1.53
		II	25	28.60	23.70	26.41 ± 1.21
		III	28	28.60	25.40	27.09 ± 0.87
	11,7 h	IV	25	27.80	23.60	25.84 ± 1.20
		V	21	26.50	22.70	24.92 ± 1.04
		VI	16	24.50	18.20	21.30 ± 1.63

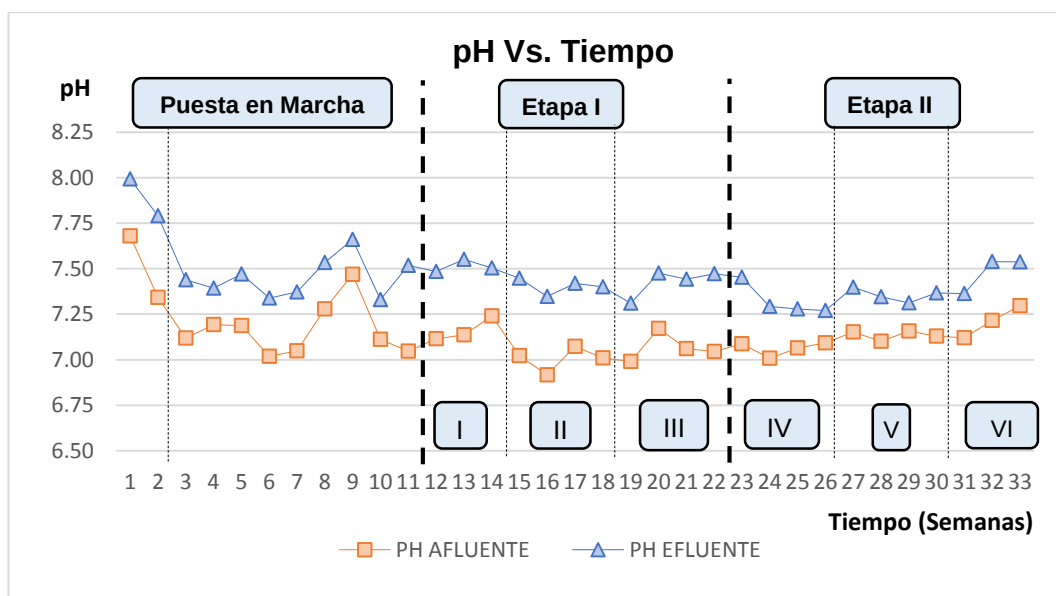
“n” es el número de muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 6.1 se observa que las temperaturas promedio máximas tanto para el afluente, efluente y temperatura ambiental se alcanzaron en el escenario III con valores de 27,63°C, 27,09°C y 29,16°C respectivamente, mientras que las temperaturas promedio mínimas para el afluente, efluente y temperatura ambiental se registraron en el escenario VI con valores de 21,84°C, 21,30°C y 21,93°C respectivamente.

6.2. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).

De los valores medidos diariamente se calculó los promedios semanales, que se representan en la gráfica 6.2; tanto los valores registrados durante la puesta en marcha y las dos etapas de investigación se plasman a continuación:



Gráfica 6.2. Comportamiento del pH en el tiempo (semanas) de la investigación.

Como se puede observar, durante las primeras 11 semanas, correspondientes a la puesta en marcha, se registraron valores de pH mucho más variables que en las 2 etapas de evaluación posteriores.

También se visualiza que los valores tanto del afluente como del efluente presentan poca variación a medida que transcurre el tiempo.

Ekama & Wentzel (2008), afirman que las tasas óptimas de nitrificación se encuentran entre 7,0 y 8,5 de pH con una disminución abrupta fuera de ese rango, y contrastando con los valores registrados en esta investigación, podemos observar que solo en la semana 16 y 19 se registran valores ligeramente menores al límite inferior del rango recomendado, con lo que podemos inferir que las condiciones, con respecto al pH, para el desarrollo de los microorganismos nitrificantes y desnitrificantes ha sido el adecuado.

La alcalinidad ha sido un parámetro que no se ha medido en esta investigación, sin embargo, existen antecedentes con respecto a la alcalinidad del agua residual pre-tratada del CITRAR-UNI, Paiz (2016), registró valores de alcalinidad entre 300 mg/L y 400 mg/L (como CaCO_3), lo cual nos indica que el afluente del reactor, que también empleó agua residual pre-tratada en esta investigación, tiene una buena capacidad para amortiguar la generación de protones (H^+) en la nitrificación, producida en la fase aerobia de un ciclo de operación.

A continuación, se presenta un cuadro de resumen de los valores registrados en cada escenario de operación de la investigación.

Tabla 6.2. Resumen del pH afluente y efluente en cada escenario de operación.

pH	TRH	Escenario	n	Máximo	Mínimo	Promedio
Afluente	8,7 h	I	18	7.44	6.92	7.15 ± 0.15
		II	25	7.30	6.39	7.00 ± 0.19
		III	28	7.35	6.71	7.06 ± 0.15
	11,7 h	IV	25	7.49	6.83	7.06 ± 0.16
		V	21	7.49	6.82	7.13 ± 0.14
		VI	16	7.35	7.04	7.21 ± 0.10
Efluente	8,7 h	I	18	7.74	7.36	7.52 ± 0.11
		II	25	7.67	7.11	7.40 ± 0.14
		III	28	7.65	7.17	7.41 ± 0.12
	11,7 h	IV	25	7.55	7.11	7.32 ± 0.13
		V	21	7.57	7.22	7.36 ± 0.08
		VI	16	7.68	7.30	7.47 ± 0.11

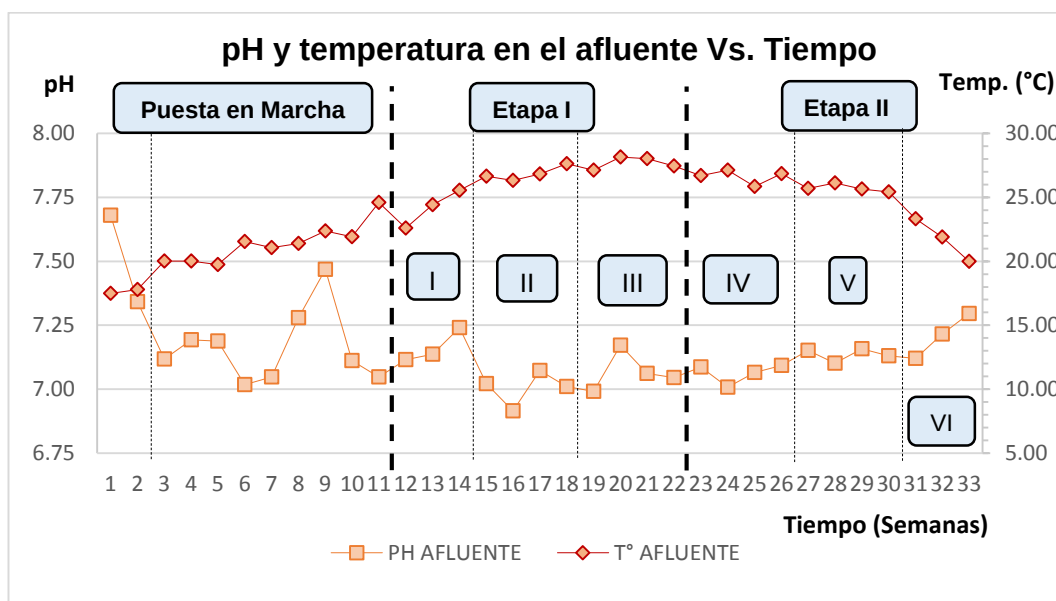
"n" es el número de muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 6.2 se nota que el pH promedio del afluente, para cada escenario, está muy cercano al pH neutro, mientras que el pH promedio de cada escenario del efluente es ligeramente alcalino.

6.2.1. RELACIÓN DE PH Y TEMPERATURA.

Se presenta la relación del comportamiento de la temperatura y el pH, para ello se analiza el afluente y efluente de manera separada, ver gráfica 6.3 y 6.4.

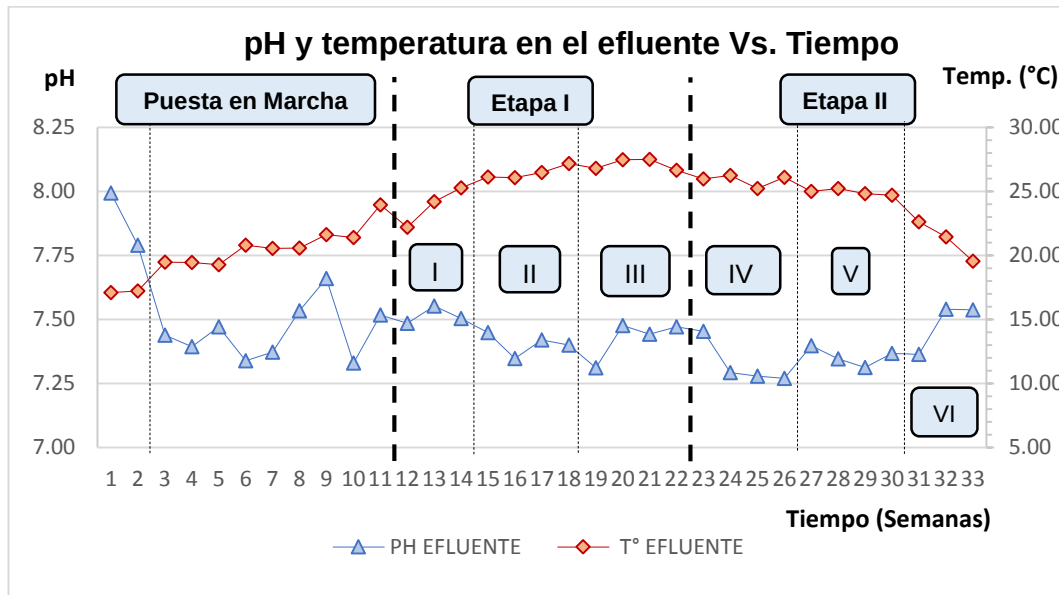


Gráfica 6.3. Relación del pH y temperatura del afluente.

De la gráfica se observa que durante la puesta en marcha hay un incremento de la temperatura, sin embargo, la mayoría de los valores de pH en ese periodo se mantienen en el rango de 7.0 a 7.25, con picos fuera de ese rango en las semanas 1, 2, 8 y 9, de modo que no es posible establecer una relación estricta entre ambos parámetros, no obstante, se observa que, a pesar de la tendencia de incremento de la temperatura, el pH mantiene una variación ligera, sin alejarse mucho del pH neutro.

En la primera etapa de la evaluación, entre la semana 12 y la semana 22, se observa que a medida que la temperatura asciende el pH se mantiene en el rango de 7.0 y 7.25, describiendo ascensos y descensos en sus valores, impidiendo de esta manera afirmar si hay una relación directa o inversa. No obstante, en la segunda etapa, de la semana 23 hasta la semana 33, se observa que ambos parámetros guardan una relación inversa, es decir, mientras que la temperatura

muestra un descenso en sus valores, el pH afluente mantiene un ascenso moderado, intensificándose este incremento de pH en las 2 últimas semanas de esta etapa.



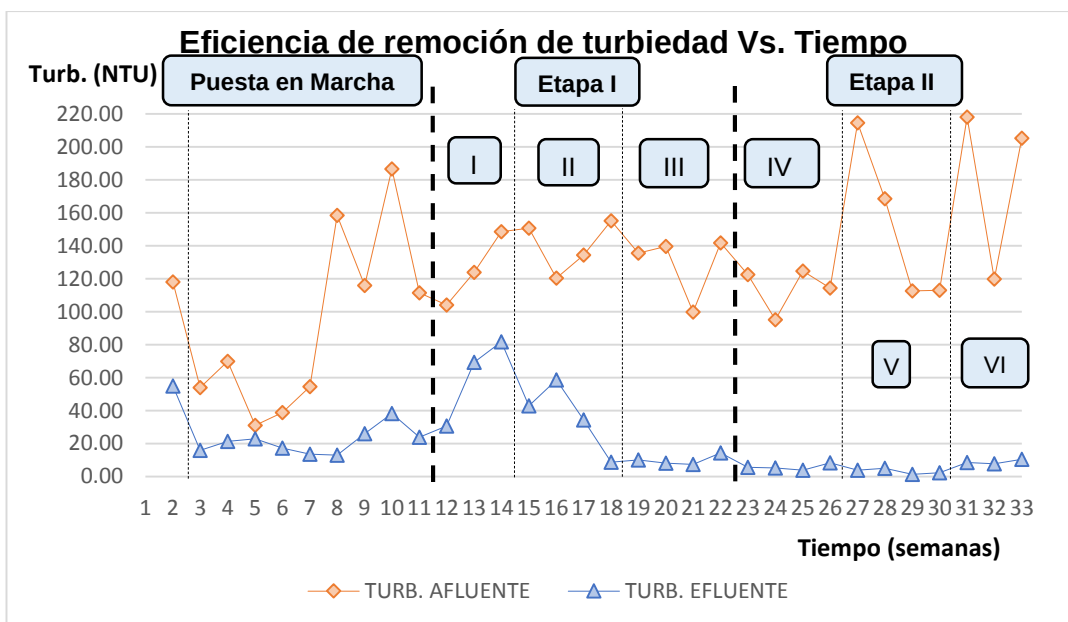
Gráfica 6.4. Relación del pH y temperatura del efluente.

Los valores promedio semanales de pH en el efluente, durante la puesta en marcha, se encuentran en el rango de 7.25 a 7.50, con picos fuera de ese rango en las semanas 1, 2, 8, 9 y 11 a medida que la temperatura del efluente se incrementa.

Durante la primera etapa de evaluación, entre la semana 12 y la semana 22, se observa que a medida que se incrementa la temperatura del agua residual efluente, el pH se mantiene en el rango de 7.25 y 7.50, con una tendencia de descenso hasta la semana 19, luego se incrementa el pH y se mantiene prácticamente constante durante las semanas restantes de la primera etapa. Sin embargo, en la segunda etapa, comprendida entre la semana 23 y 33, los valores de pH se mantienen en el rango de 7.0 a 7.54, con picos meseta dentro de ese rango, esto podría deberse a que el efluente está influenciado por las condiciones de operación (ciclos de aireación/no aireación) de cada escenario en esta etapa.

6.3. TURBIEDAD.

La turbiedad es un parámetro que está asociado a los sólidos en suspensión, y por ese motivo ha sido tomado como referencia práctica para detectar anomalías de manera inmediata, en la operación del reactor IFAS. Cabe mencionar que, en la puesta en marcha del reactor, este parámetro no pudo ser medido hasta la segunda semana de evaluación, por esta razón la gráfica inicia desde la segunda semana. A continuación, se muestra el comportamiento de la turbiedad afluente y efluente en el tiempo, desde la puesta en marcha hasta la culminación de la evaluación del reactor (ver gráfica 6.5).



Gráfica 6.5. Variación de la turbiedad afluente y efluente en el tiempo.

De la gráfica se observa que la turbiedad afluente es muy variable, manteniendo un valor promedio de las 32 semanas de monitoreo de 124.28 NTU, además, durante la puesta en marcha del reactor se registra el valor promedio semanal mínimo de la turbidez afluente de 30.95 NTU en la semana 5, y un valor promedio semanal máximo en la semana 10 de 186.60 NTU.

De la semana 12 hasta la semana 26 la turbiedad mantiene valores cercanos al promedio, sin embargo, de la semana 27 hasta la semana 33 los valores de turbiedad son muy variables, y llegan hasta un valor promedio semanal

máximo de 218.17 NTU en la semana 31. Por lo tanto, analizando las dos etapas evaluadas, podemos afirmar que la primera etapa (semana 12 a 22) operó con una turbiedad afluente relativamente estable, cercana al promedio, dentro del rango de turbiedad de 99.70 y 155.20 NTU, mientras que en la etapa 2, la turbiedad promedio semanal fue mucho más variable.

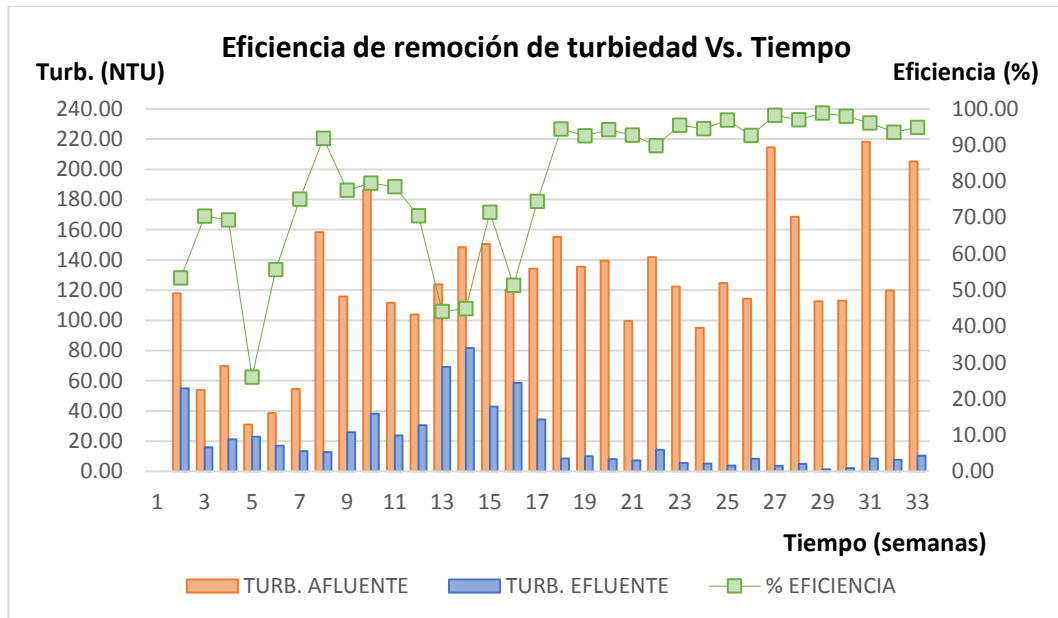
Con respecto a la variación de la turbiedad del efluente, se observa que durante la puesta en marcha este parámetro se estabiliza en la tercera semana de operación, registrándose valores muy cercanos a 20 NTU, no obstante, en la semana 10 su valor se incrementa, esto podría deberse a que la turbiedad afluente también se incrementó entre la semana 8 y 10. A partir de la semana 12 se implementó la aireación intermitente, empezando con el ciclo de aireación/no aireación de 40/140 min, y se observa claramente que la turbiedad efluente se incrementó en el escenario I, registrándose un valor promedio semanal máximo de 81.77 NTU en la semana 14, a pesar de que la turbiedad afluente se mantuvo muy cercano al valor promedio de 124.28 NTU.

En el escenario II, correspondiente a las semanas 15 a 18, se refleja una clara tendencia a la disminución de la turbiedad efluente, registrándose un valor promedio semanal mínimo de 8.61 NTU en la semana 18, a partir de esta semana los valores de turbiedad efluente se mantuvieron estables y muy cercanas a 10 NTU, siendo todos los valores promedios semanales menores a 20 NTU, a pesar de las diferentes fracciones aireadas de cada escenario y TRH a las que se operó el reactor, y haber registrado valores de turbiedad afluente picos en las últimas semanas. Demostrándose de esta manera que fracciones aireadas muy pequeñas en la etapa 1 (TRH = 8.7 h), como fue el caso del escenario I y II que operaron con 40 min y 50 min de aireación respectivamente, en un ciclo de 180 min, influyen negativamente en la eficiencia de remoción de turbiedad.

6.3.1. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD.

Las eficiencias durante la puesta en marcha han sido muy variables, registrándose un valor promedio semanal mínimo de 26.01% en la semana 5, y una eficiencia máxima de 91.85 % en la semana 8, a partir

de la semana 9 a 11 las eficiencias se han estabilizado y mantenido prácticamente constantes, alrededor de 78 %.



Gráfica 6.6. Eficiencia del reactor en remoción de turbiedad Vs. el tiempo.

En el primer escenario de operación (aireación/no aireación de 40/140 min), la eficiencia del reactor, con respecto a la turbiedad, disminuye hasta alcanzar eficiencias de solamente 44.13 % y 44.94 %, mientras que en el escenario II, al variar las condiciones de aireación/no aireación a 50/130 min, la eficiencia empieza a mejorar hasta alcanzar una eficiencia máxima en dicho periodo de 94.45 % en la semana 18, cabe recordar que dicha eficiencia ha sido obtenida con los valores promedio semanales, es decir, es posible que algunas eficiencias diarias sean mayores.

A partir de la semana 18 de operación, la última semana del segundo escenario, las eficiencias se mantuvieron por encima de 90 %, con excepción de la semana 22 en la que se obtuvo una eficiencia de 89.96 %. También es importante mencionar que durante la segunda etapa (TRH = 11,7 h) se registraron las eficiencias más altas de toda la investigación, para ser más específicos y tener una mejor idea de las eficiencias alcanzadas durante dicha etapa, se presenta la tabla 6.3 a manera de resumen.

Tabla 6.3. Resumen de eficiencias, valores máximos, mínimos y promedios por escenario.

TRH	Esc.	n	Turb.	Máx. (NTU)	Mín. (NTU)	Promedio (NTU)	Eficiencia (%)
8.7 h (Etapa 1)	I	17	Afl.	205.00	88.20	122.37 ± 34.26	49.32 ± 29.13
			Efl.	107.00	18.50	60.08 ± 31.20	
	II	25	Afl.	373.00	76.80	139.16 ± 53.69	68.54 ± 21.88
			Efl.	82.50	5.88	38.39 ± 23.72	
	III	28	Afl.	200.00	70.50	128.78 ± 34.50	92.01 ± 4.23
			Efl.	20.60	3.53	9.85 ± 5.10	
11.7 h (Etapa 2)	IV	25	Afl.	180.00	63.50	113.44 ± 31.56	94.70 ± 4.85
			Efl.	16.90	2.89	5.24 ± 3.72	
	V	21	Afl.	347.00	74.10	150.33 ± 69.86	97.64 ± 1.85
			Efl.	7.83	0.92	3.11 ± 1.77	
	VI	16	Afl.	439.00	43.00	183.38 ± 94.04	93.32 ± 5.38
			Efl.	14.00	4.65	8.86 ± 2.45	

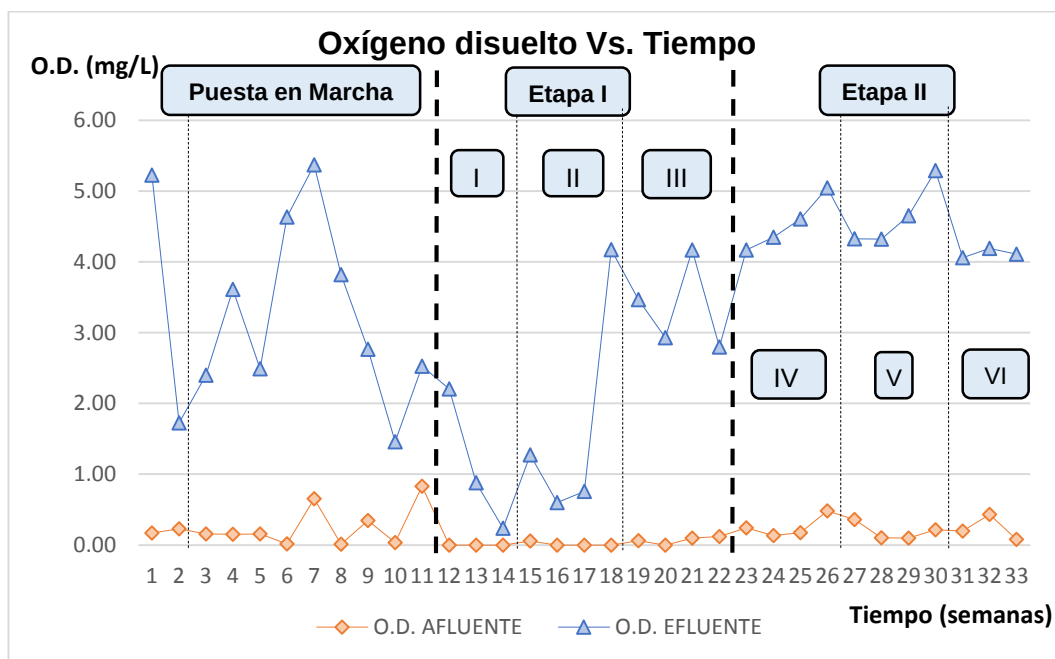
"n" es el número de muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 6.3 se observa que el escenario V, que operó con ciclos de aireación/no aireación de 90/90 min y TRH de 11.7 h, fue el que registró la mayor eficiencia, alcanzando un valor promedio por escenario de 97.64 %. Además, durante este escenario no se superó las 7.83 NTU, a pesar que se registró picos altos de turbiedad afluente, mientras que el escenario menos eficiente fue el primero, alcanzando tan solo una eficiencia promedio por escenario de 49.32 %, esto debido a una fracción aireada muy pequeña.

6.4. OXÍGENO DISUELTO.

El oxígeno disuelto es un parámetro de suma importancia en sistemas de tratamiento aerobio, es por ello que, en este ítem, el análisis se hará detallando cada etapa de la evaluación. Primero mostramos de manera general la variación del O.D. en el tiempo (Ver gráfica 6.7).



Gráfica 6.7. Variación del oxígeno disuelto del afluente y efluente en el tiempo.

De la gráfica se observa que el oxígeno disuelto del afluente presenta muy poca variación a lo largo del tiempo, registrando valores inferiores a 0,5 mg/L de oxígeno disuelto durante las dos etapas de investigación, sin embargo, en el periodo de puesta en marcha se registraron algunos picos que sobrepasan ligeramente dicho valor, en las semanas 7 y 11.

Por otro lado, el oxígeno disuelto en el efluente durante la puesta en marcha, que operó con aireación continua, fue muy variable, y se obtuvo un valor promedio de O.D. en la puesta en marcha igual a 3,44 mg/L. En la primera etapa de evaluación, comprendida entre la semana 12 y 22, que operó con TRH de 8,7 h y dentro de la cual se ensayó tres escenarios; en el primer escenario, de la semana 12 a 14, se observa que hubo una caída brusca del O.D., esto se debe principalmente al ciclo de aireación/no aireación de 40/140 min, implementado en dicho escenario, es decir que en un ciclo de 3 h (180 min) solo se aireó durante 40 min y en los 140 min restantes el compresor de aire dejó de funcionar para dar paso a la mezcla lenta, generándose de esta manera, en el periodo anóxico, un volumen de agua con baja concentración de O.D., de 3,5 veces el volumen generado en el periodo aerobio, y de acuerdo al balance de masas esto conllevó a concentraciones bajas de O.D. en el efluente.

En el escenario II, comprendido entre la semana 15 y 18, que operó con ciclos de aireación/no aireación de 50/130 min, se observa un ligero incremento de O.D. en las semanas 15, 16 y 17, sin embargo, en la semana 18, se registró un valor promedio semanal pico de O.D. de 4,17 mg/L.

Del escenario III, comprendido entre la semana 19 a 22, que operó con ciclos de 120/60 min, se observa un comportamiento más predecible, registrándose un valor promedio del escenario igual a 3,38 mg/L de O.D., esto debido a que el volumen de agua tratada en la fase aerobia es el doble del volumen tratado en la fase anóxica.

La segunda etapa de evaluación, comprendida entre la semana 23 y 33, que operó con un TRH de 11,7 h, y en la cual se ensayaron los escenarios IV, V y IV, muestra un comportamiento ascendente de la concentración de O.D., en los escenarios IV y V, registrándose valores promedio por escenario de 4,47 mg/L y 4,71 mg/L respectivamente. Mientras que el comportamiento del O.D. en el escenario VI mantiene una variación muy baja, presentando un valor promedio de 4.12 mg/L. Este comportamiento más predecible y más estable es seguramente debido a que en esta etapa se operó con un caudal inferior al de la etapa 1, amortiguándose de mejor manera los balances de masa entre las fases aerobia y anóxica, además, es necesario recordar que los escenarios en esta segunda etapa operaron con fases aerobias de 60 min a 120 min.

A manera de resumen mostramos la tabla 6.4, en el que presentan los máximos, mínimos y promedios de las concentraciones de O.D. por escenario.

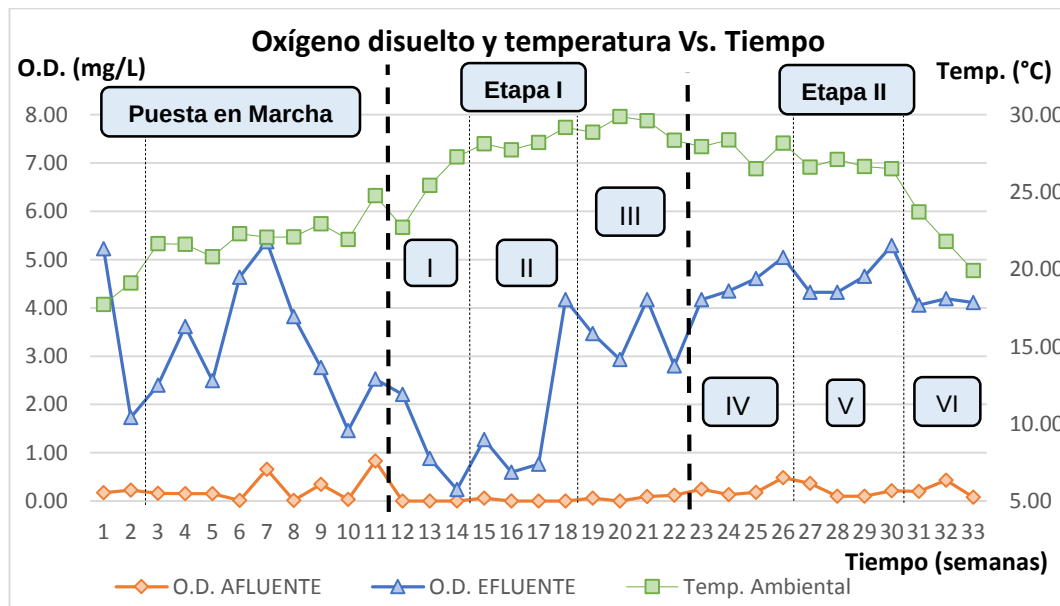
Tabla 6.4. Resumen de valores promedio por escenario, de la concentración de O.D. en el afluente y efluente.

O.D.	TRH	Escenario	n	Máximo (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Promedio (mg/L)
Afluente	8,7 h	I	18	0.00	0.00	0.00 ± 0.00
		II	25	0.41	0.00	0.02 ± 0.08
		III	28	0.71	0.00	0.07 ± 0.20
	11,7 h	IV	25	1.42	0.00	0.22 ± 0.38
		V	21	1.50	0.00	0.20 ± 0.40
		VI	16	1.78	0.00	0.23 ± 0.43
Efluente	8,7 h	I	18	4.80	0.00	1.21 ± 1.69
		II	25	4.72	0.00	1.54 ± 1.72
		III	28	5.47	0.96	3.38 ± 1.30
	11,7 h	IV	25	5.77	2.92	4.47 ± 0.73
		V	21	6.27	3.36	4.71 ± 0.85
		VI	16	5.34	2.78	4.12 ± 0.70

“n” es el número de muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora mostramos la gráfica 6.8, en la cual se relaciona el oxígeno disuelto y la temperatura ambiental.



Gráfica 6.8. Relación de la temperatura ambiental y el OD. del afluente y efluente.

De la relación se percibe que para el OD. afluente hay un incremento de la concentración de dicho parámetro cuando la temperatura del medio disminuye, es decir hay una relación inversa entre la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto en el afluente. De igual manera sucede con la concentración de OD. del efluente durante la puesta en marcha, la relación inversa se mantiene, se observa que mientras la temperatura ambiental se incrementa la concentración de OD. mantiene una tendencia a la disminución. Sin embargo, para la concentración de OD. en el efluente durante las dos etapas de investigación, no se puede afirmar con certeza que la concentración registrada durante dichos periodos, o la tendencia que estos mantengan, sean debido a la variación de temperatura, porque en estas etapas los ciclos de aireación y no aireación son condiciones mucho más relevantes o ejercen una mayor influencia en la concentración de OD. del efluente; por ello se analizará con mayor detalle los perfiles de consumo de OD. durante los escenarios evaluados.

6.4.1. ETAPA 1.

Esta etapa estuvo comprendida entre la semana 12 y 22, operó con un TRH de 8,7 h, y se divide en tres escenarios, cada uno de estos con ciclos de 3 horas a lo largo del día, haciendo 8 ciclos por día.

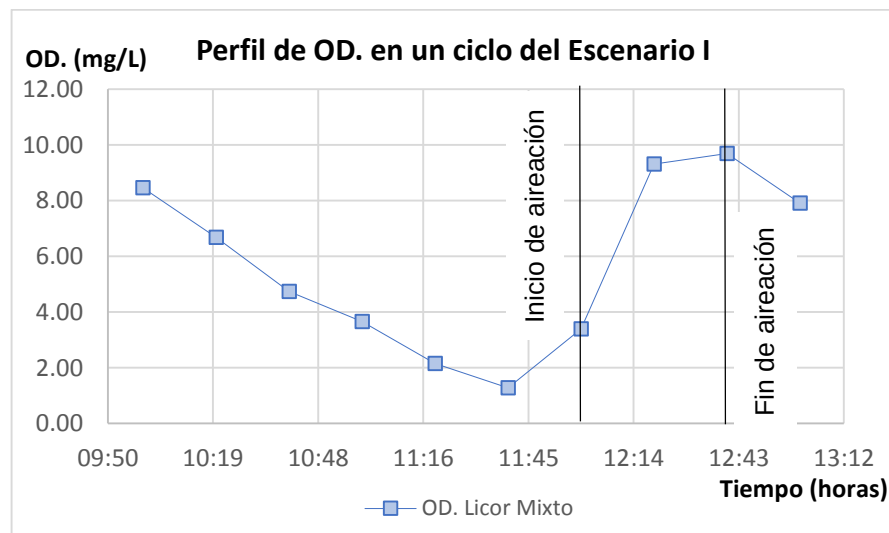
6.4.1.1. ESCENARIO I.

Comprendido entre la semana 12 y 14, cuyo ciclo de aireación y no aireación fue de 40/140 min; es importante recordar que el primer ciclo inició a las 0:00 horas y duró 3h, posteriormente el ciclo se repitió a lo largo del día, completando en total los 8 ciclos diarios, a continuación, se presenta la tabla 6.5 y el perfil de consumo de OD. en el licor mezclado (tanque de aireación), para ver el comportamiento de OD. en un ciclo.

Tabla 6.5. Variación de OD. en un ciclo.

Hora	Temp. Ambiental (°C)	OD. en el Licor Mixto (mg/L)
10:00	20.80	8.46
10:20	20.70	6.68
10:40	20.60	4.74
11:00	21.40	3.66
11:20	21.50	2.15
11:40	21.70	1.28
12:00	22.40	3.40
12:20	22.60	9.31
12:40	22.60	9.69
13:00	23.10	7.91

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 6.9.** Perfil de variación de OD. durante 3 h.

De la gráfica se nota que la primera medición de OD. se hizo 20 min después de haber culminado la fase aerobia del ciclo, y se observa que el OD. se está consumiendo a medida que transcurre el tiempo, esto debido, en parte, a que el licor mixto sigue recibiendo caudal con baja concentración de OD. y en parte, a la respiración celular; luego, a las 12:00 pm, hora a la que vuelve a funcionar el aireador, se observa el incremento de OD. rápidamente hasta que llega a su máximo a las 12:40 pm, y en seguida empieza el descenso de la concentración OD. y así se repite el ciclo a lo largo del día, generando las fases aerobias y anóxicas.

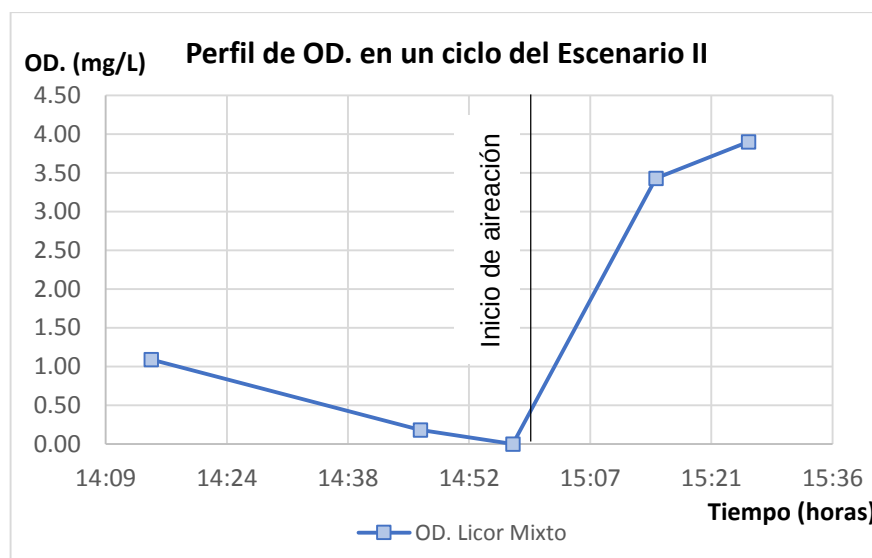
6.4.1.2. ESCENARIO II.

Comprendido entre la semana 15 y 18, y con un ciclo de aireación y no aireación de 50/130 min, además es importante mencionar que el primer ciclo empezó a las 0:00 horas y culminó a las 3:00 am., es decir se aireó desde las 0:00 hasta 0:50 am., luego se prosiguió con 130 min de mezcla hasta completar el ciclo, y eso se repitió en cada ciclo, a continuación, se presenta el perfil de concentración de OD. en el licor mixto.

Tabla 6.6. Variación de OD. en un ciclo.

Hora	Temp. Ambiental (°C)	OD. en el Licor Mixto (mg/L)
14:15	31.70	1.09
14:47	31.80	0.18
14:58	31.70	0.00
15:15	30.90	3.43
15:26	30.80	3.90

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 6.10. Perfil de variación de OD. en un tercio del ciclo.

De la gráfica se observa que en este escenario solo se hizo el monitoreo de las concentraciones de OD. durante 1 hora y 11 min, lo que representa prácticamente la tercera parte de un ciclo de 3 h, sin embargo, dicha gráfica ayuda a tener una idea del

comportamiento de las concentraciones de OD. en el licor mixto para el ciclo comprendido entre las 12:00 y 15:00 horas.

Además, es importante mencionar que para esta investigación no se pudo realizar el perfil de OD. para el escenario III, por lo tanto, pasaremos a ver el análisis de la etapa 2.

6.4.2. ETAPA 2.

Esta etapa estuvo comprendida entre la semana 23 y 33, operó con un TRH de 11,7 h, y se divide en tres escenarios, es importante mencionar que al igual que la etapa 1, en cada escenario de esta etapa, los ciclos que se implementaron también son de 3 horas.

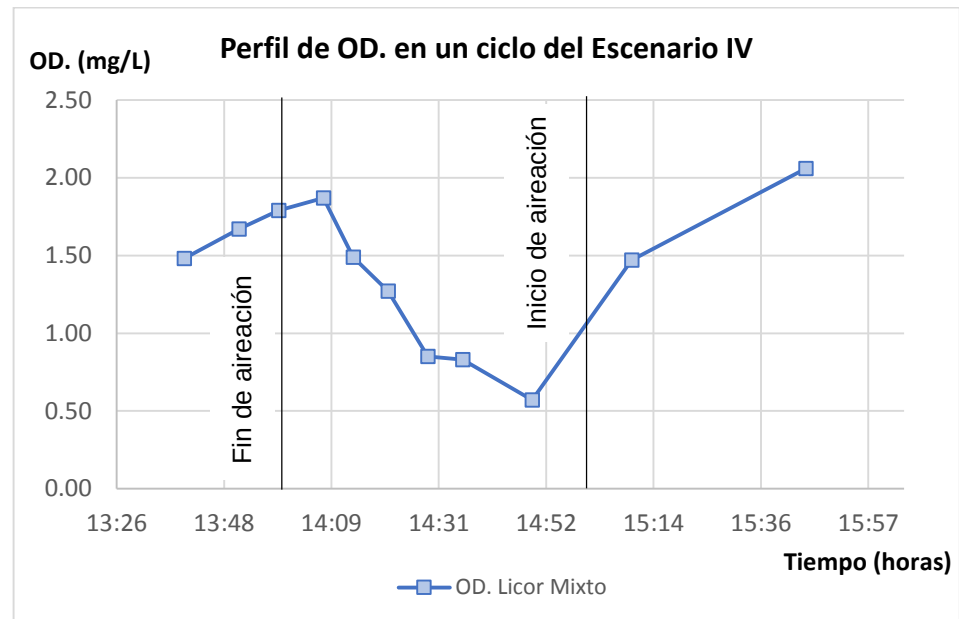
6.4.2.1. ESCENARIO IV.

Comprendido entre la semana 23 a 26, con un ciclo de aireación y no aireación de 120/60 min, sin mayor detalle se muestra la tabla y gráfica siguiente.

Tabla 6.7. Variación de OD. en un ciclo.

Hora	Temp. Ambiental (°C)	OD. en el Licor Mixto (mg/L)
13:40	28.80	1.48
13:51	28.90	1.67
13:59	29.00	1.79
14:08	29.30	1.87
14:14	29.30	1.49
14:21	29.40	1.27
14:29	29.10	0.85
14:36	28.80	0.83
14:50	28.80	0.57
15:10	28.80	1.47
15:45	29.00	2.06

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 6.11. Perfil de variación de OD. en 2/3 de un ciclo.

De la gráfica se observa que, pese a que en este escenario la aireación duro 120 min, la concentración de OD. en el licor mixto no presenta valores muy elevados en sus picos máximos, esto se debe en parte a que en este periodo se presentó fugas en el sistema de aireación, y en parte a que la temperatura del ambiente es muy elevada por lo que la solubilidad del oxígeno disminuye; sin embargo, se logra apreciar el perfil de consumo de OD debido a la intermitencia de la aireación.

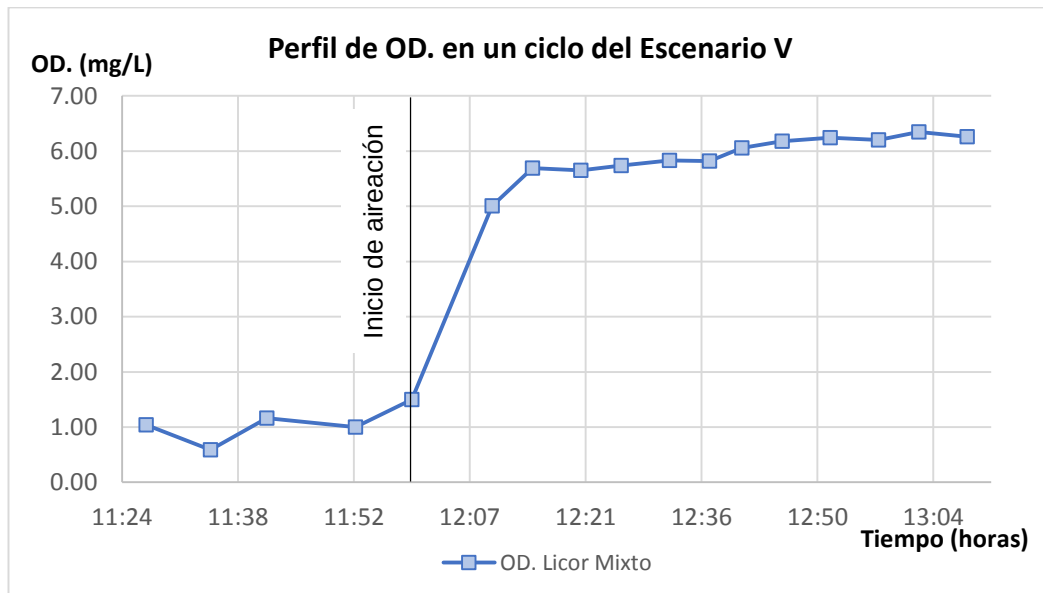
6.4.2.2. ESCENARIO V.

Comprendido entre la semana 27 y 30, con un ciclo de aireación y no aireación de 90/90 min, a continuación, se muestra la tabla y gráfica correspondiente.

Tabla 6.8. Variación de OD. en un ciclo.

Hora	Temp. Ambiental (°C)	OD. en el Licor Mixto (mg/L)
11:27	27.00	1.04
11:35	27.10	0.59
11:42	27.20	1.16
11:53	27.60	1.00
12:00	27.90	1.50
12:10	28.20	5.01
12:15	27.90	5.69
12:21	28.10	5.65
12:26	28.20	5.74
12:32	28.40	5.83
12:37	28.50	5.82
12:41	28.70	6.06
12:46	28.80	6.18
12:52	28.80	6.24
12:58	29.00	6.20
13:03	29.10	6.35
13:09	29.20	6.26

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 6.12.** Perfil de variación de OD. en la mitad de un ciclo.

De la gráfica se observa que las mediciones se tomaron 57 min después de haber terminado la fase aerobia, del ciclo correspondiente a 9 am a 12 pm., es decir en la fase anóxica del

ciclo mencionado, y se aprecia que el OD en el licor mixto no desciende hasta consumirse completamente, además, presenta un comportamiento más estable, por lo menos media hora antes de finalizar dicho ciclo, lo que podría conllevar a un mayor tiempo disponible para la desnitrificación, luego a partir de las 12:00 pm empieza el siguiente ciclo, y se percibe el rápido incremento de la concentración de OD., en tan solo 10 min se logra alcanzar la concentración de 5.01 mg/L, posteriormente a medida que transcurren los minutos, de la fase aerobia de este nuevo ciclo, se visualiza un incremento leve del OD., cabe mencionar que este perfil no representa el comportamiento de todos los ciclos de este escenario, porque la prueba se realizó solamente por una vez, sin embargo nos muestra una aproximación del comportamiento alternado de fases aerobias y anóxicas en el licor mezclado dentro de un ciclo de operación.

6.4.2.3. ESCENARIO VI.

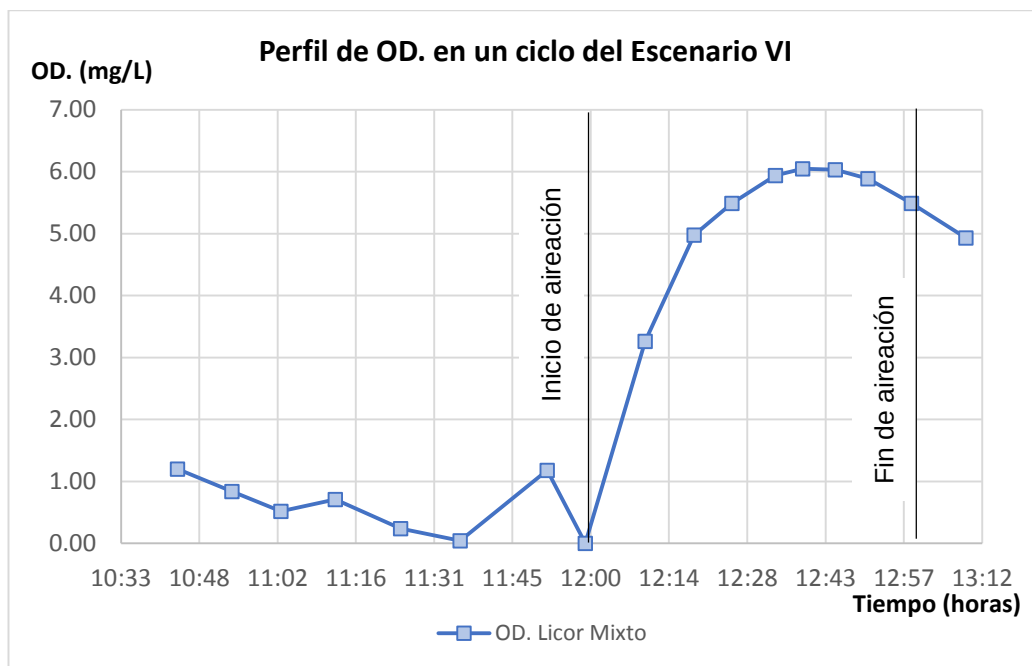
Comprendido entre la semana 31 y 33, con un ciclo de aireación y no aireación de 60/120 min, más adelante se muestra la tabla y su gráfica correspondiente.

Tabla 6.9. Variación de OD. en un ciclo.

Hora	Temp. Ambiental (°C)	OD. en el Licor Mixto (mg/L)
10:44	19.00	1.20
10:54	19.10	0.84
11:03	19.20	0.52
11:13	19.30	0.71
11:25	19.40	0.24
11:36	19.60	0.04
11:52	19.90	1.18
11:59	19.90	0.00
12:10	19.90	3.26
12:19	20.00	4.98
12:26	20.00	5.49
12:34	20.10	5.94
12:39	20.10	6.05
12:45	20.10	6.03

Hora	Temp. Ambiental (°C)	OD. en el Licor Mixto (mg/L)
12:51	20.10	5.89
12:59	20.20	5.49
13:09	20.30	4.93

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 6.13. Perfil de variación de OD. en un ciclo.

De la gráfica se observa que el monitoreo del OD se inició 44 min después de haber culminado con la fase aerobia del ciclo comprendido entre las 9 am a 12 pm, y de manera muy similar al comportamiento anterior, en la fase anóxica de este ciclo se presentó una rápida caída del OD en licor mixto, luego, mantiene un descenso muy leve hasta registrar valores muy cercanos a cero, en seguida se da paso al inicio del siguiente ciclo, y la concentración de OD empieza un rápido ascenso en la primera media hora del ciclo, y contrario a lo que nos dice la intuición, la máxima concentración de OD. se alcanzó 20 min antes de que culmine la fase aerobia de este ciclo, sin embargo, este comportamiento pudo haber sido debido a que en el reactor no hubo una mezcla completa, como idealmente se asumió.

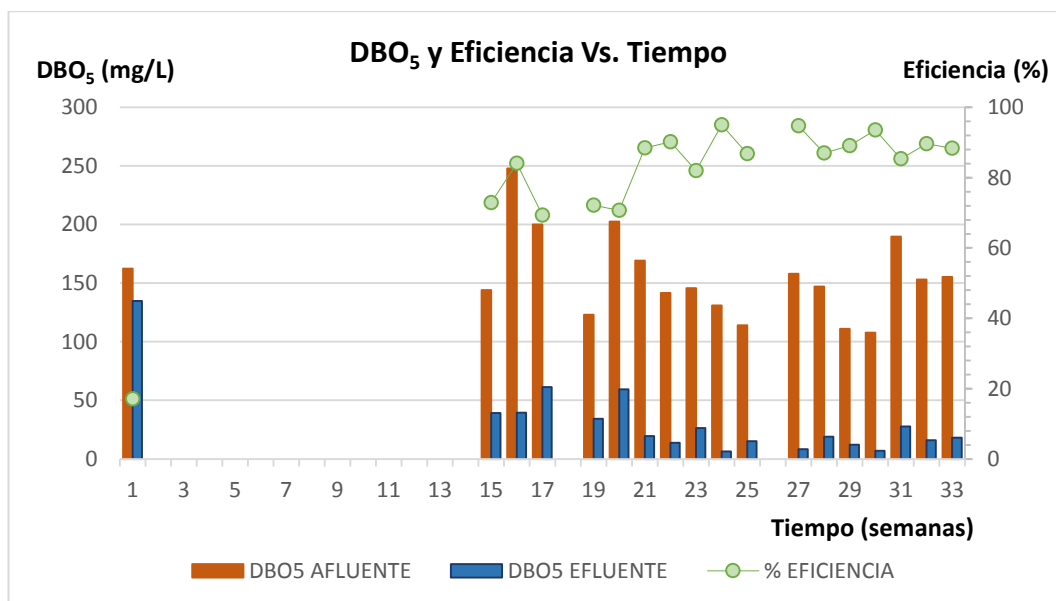
6.5. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

En este ítem son representados todos los resultados referentes a la remoción de la DBO_5 , el análisis y relación de DBO con otros parámetros, durante los seis escenarios evaluados.

Cabe resaltar que durante la puesta en marcha solo se hizo una medición, en la primera semana, mientras que durante el primer escenario de esta investigación no se realizó ninguna medición de DBO_5 , porque el laboratorio estuvo en mantenimiento. Además, se debe especificar también que cada semana solo se hizo una medición de DBO_5 , y por lo tanto se tomó ese único valor como representativo de dicha semana.

6.5.1. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO .

Primero se mostrarán las eficiencias y valores semanales por cada escenario, más adelante se resumirán los gráficos a eficiencias por escenario, para facilitar el análisis de datos.



Gráfica 6.14. Valores de DBO_5 del afluente y efluente y su respectiva eficiencia en los diferentes escenarios evaluados.

Se observa que en la primera semana de la puesta en marcha apenas se alcanzó una eficiencia de 17.07%, con una DBO_5 en el afluente de 162.36 mg/L y efluente de 134.65 mg/L, esto indica que solo se removió la materia orgánica particulada, debido a que la biomasa, en el tanque de aireación, todavía no estaba desarrollada, y esa baja

remoción de DBO registrada es solo por la retención de sólidos en el tanque de aireación y el decantador secundario. Por otro lado, las eficiencias alcanzadas en los escenarios evaluados son mucho mayores que la eficiencia de la puesta en marcha, los cuales superaron el 69.00% de eficiencia en todos los escenarios medidos.

Los resultados de las mediciones semanales indican que la DBO₅ para el afluente tuvo un valor semanal mínimo de 107.64 mg/L y un valor semanal máximo de 247.74 mg/L, durante las 2 etapas evaluadas.

Mientras que, para el efluente, en los escenarios evaluados, se tuvo un valor semanal mínimo de 6.56 mg/L y un valor semanal máximo de 61.29 mg/L. Los valores mínimos, máximos y promedios por escenario se mostrarán en la tabla 6.10.

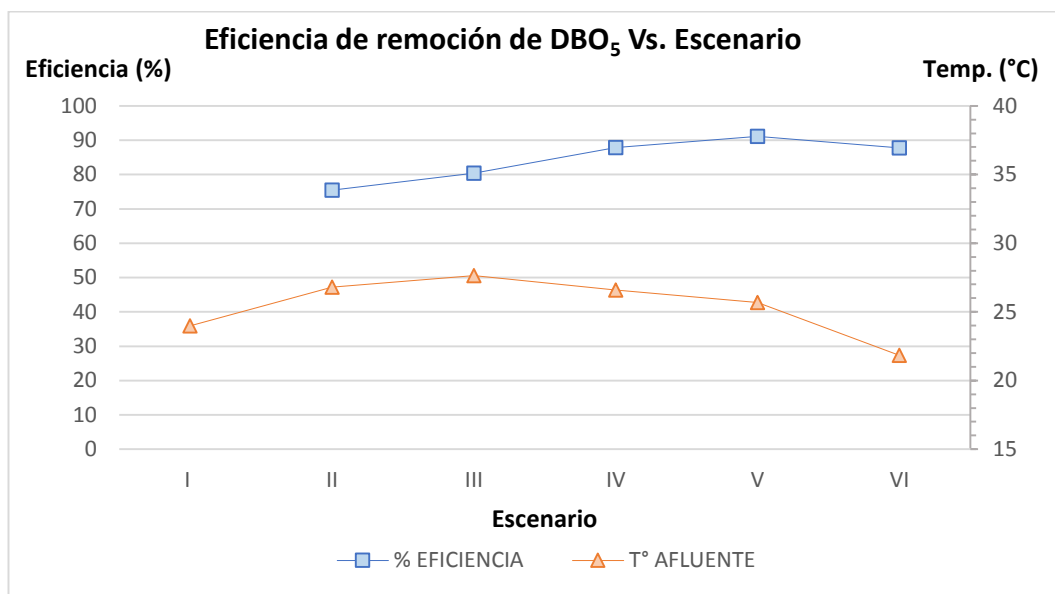
Tabla 6.10. Resumen de valores de DBO₅ por escenario.

TRH	Esc.	n	DBO ₅	Máx. (mg/L)	Mín. (mg/L)	Promedio (mg/L)	Eficiencia (%)
8.7 h (Etapa 1)	I		Afl.	-	-	-	-
			Efl.	-	-	-	
	II	3	Afl.	247.74	144.03	197.24 ± 42.38	75.44 ± 6.29
			Efl.	61.29	39.08	46.59 ± 10.39	
	III	4	Afl.	202.58	123.09	159.12 ± 29.96	80.37 ± 8.97
			Efl.	59.28	13.90	31.77 ± 17.54	
11.7 h (Etapa 2)	IV	3	Afl.	145.84	113.90	130.20 ± 13.05	87.90 ± 5.38
			Efl.	26.32	6.56	15.98 ± 8.09	
	V	4	Afl.	158.00	107.64	130.91 ± 21.97	91.12 ± 3.17
			Efl.	19.08	6.91	11.59 ± 4.72	
	VI	3	Afl.	189.55	153.22	166.03 ± 16.65	87.75 ± 1.78
			Efl.	27.77	15.94	20.62 ± 5.13	

"n" es el número de muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

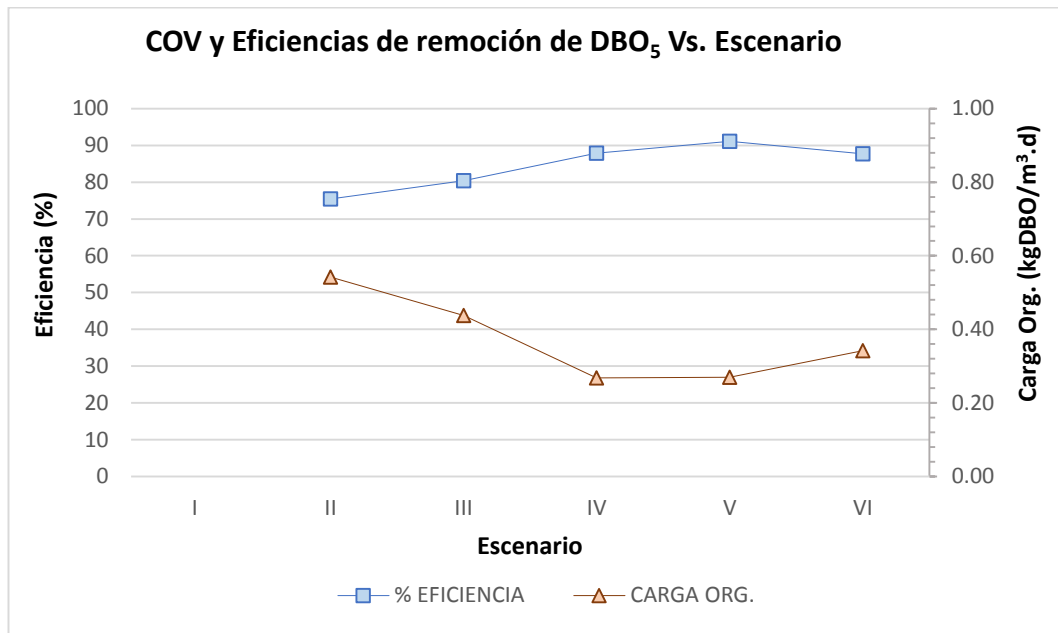
Para un mejor análisis, se graficará las eficiencias de remoción de DBO₅ y temperaturas por escenario.



Gráfica 6.15. Eficiencias de remoción de DBO₅ y temperaturas por escenario.

En la primera etapa se operó con un mayor caudal que la segunda etapa, es decir con una mayor carga orgánica, y como era de esperar se registró menores eficiencias en la etapa 1, esto es más notorio si comparamos el tercer y cuarto escenario, que operaron en las mismas condiciones de aireación/no aireación (120/60 min), y a pesar que en el escenario IV hay un descenso de la temperatura con respecto al escenario III, la eficiencia de remoción de DBO₅ en el escenario IV es mayor, esto nos indica que existe una relación inversa entre la carga orgánica y la eficiencia de remoción de DBO₅, es decir que a mayor carga orgánica la eficiencia de remoción será menor y viceversa, además, se nota que la carga orgánica tiene mayor influencia que la temperatura en cuanto a eficiencia de remoción de DBO₅, porque cuando la temperatura entre el escenario III y IV desciende la eficiencia se incrementa, esto solo se justifica por la disminución de la carga orgánica del escenario IV en adelante.

Podemos apreciar directamente la relación que existe entre la eficiencia y la carga orgánica volumétrica (COV) en la gráfica 6.16.



Gráfica 6.16. Eficiencias de remoción de DBO₅ y cargas orgánicas por escenario.

Se corrobora lo mencionado con respecto a la relación inversa entre la eficiencia y la carga orgánica volumétrica (COV), sin embargo, comparando el escenario IV y V, que operan con el mismo TRH y sus COV's coinciden, se tiene una mayor eficiencia de remoción de DBO₅ en el escenario V, a pesar que la temperatura en este escenario es menor con respecto a la del escenario IV; esto solo se explica por la menor fracción aireada del escenario V con respecto al IV.

Es muy importante resaltar que para lograr mayores eficiencias de remoción de DBO₅ no necesariamente se debe incrementar la fracción aireada (AF) en un ciclo de operación, demostrándose experimentalmente que con un patrón de aireación/no aireación de 90/90 min (Escenario V) se logra mayor eficiencia de remoción de DBO₅ que con un patrón de aireación/no aireación de 120/60 min (escenario IV), además, no se debe pasar por alto que con un patrón de aireación/no aireación de 60/120 min (escenario VI) se logra prácticamente la misma eficiencia de remoción de DBO₅ que con un patrón de aireación/no aireación de 120/60 min (escenario IV), pese a que se redujo la AF en un 50%; y por otra parte queda demostrado también que cuando la variación de COV es al menos mayor en un

40%, lo que sucede con la etapa 1 con respecto a la etapa 2, la temperatura ya no juega un rol importante, es decir, ya no influye en la eficiencia de remoción de DBO_5 , esto para una temperatura afluente en el rango de 21°C a 27°C .

Además, de los análisis respectivos que se hicieron y de la observación de la gráfica, podemos afirmar que en cuanto a la remoción de DBO_5 en la etapa 1, como se esperaba, el escenario III fue el que registró la mayor eficiencia, debido a que operó con una mayor fracción aireada y una menor carga orgánica que el escenario II, alcanzando una eficiencia promedio de 80.37%, pero no se puede afirmar que este escenario sea el óptimo en esta etapa, mientras que en la etapa 2, la mayor eficiencia se alcanzó en el escenario V, con un valor promedio de 91.12%, sin embargo, en ambas etapas no fue posible determinar la eficiencia óptima, porque la COV no fue constante, y no se pudo determinar que la variación de eficiencia haya sido estrictamente debido de la variación de la fracción aireada de cada ciclo o debido a la variación de la COV; no está demás recalcar que la temperatura no influye en la eficiencia, porque como ya se mencionó, esta queda relegada a un segundo plano.

Queda claramente demostrado que un reactor IFAS a escala de laboratorio muestra un mejor desempeño, cuando opera con TRHs altos, es decir, con caudales bajos, lo que a su vez implica cargas bajas si se asume un afluente con concentraciones de DBO poco variables.

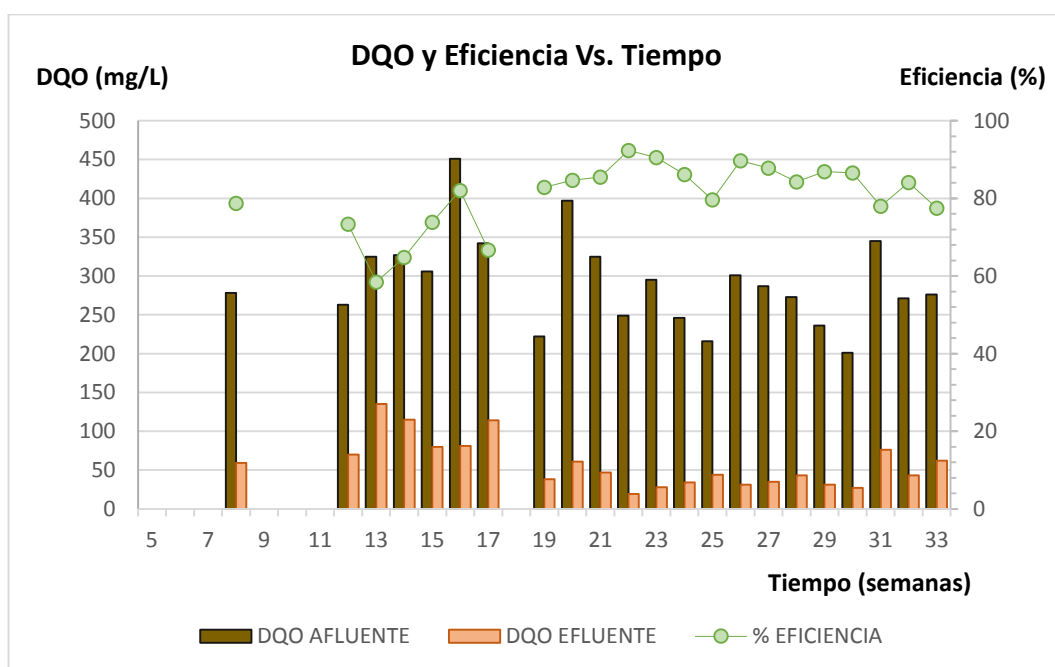
Las altas eficiencias promedio de DBO_5 alcanzadas en cada uno de los escenarios de la etapa 2, todas por encima del 87%, se atribuyen también a la eficiente utilización de los componentes orgánicos en la fase anóxica, en la cual las bacterias desnitrificantes usaron la materia orgánica como fuente de carbono para la respiración y el crecimiento.

6.6. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

En este ítem se presentan los valores de mediciones semanales de la DQO, tanto en la puesta en marcha como en las dos etapas posteriores, cabe resaltar que durante la puesta en marcha solo se hizo una medición de DQO, en la octava semana, además, debemos mencionar también que este parámetro, al igual que la DBO₅, solo se ha medido 1 vez a la semana, y por lo tanto se ha tomado ese valor como representativo de dicha semana.

6.6.1. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO

La gráfica 6.17 muestra los valores semanales medidos en cada escenario, con la finalidad de mostrar la variabilidad de las concentraciones de DQO afluente y efluente, más adelante se resumirán las gráficas a valores promedio por escenario.



Gráfica 6.17. Valores de DQO del afluente y efluente y su respectiva eficiencia en los diferentes escenarios evaluados.

Del valor medido en la puesta en marcha podemos observar que, en la octava semana el reactor ya mostraba una eficiencia de remoción de DQO relativamente alta, la cual llegó a un valor de 78.78%, eso nos indicó que en cuanto a la remoción de materia orgánica carbonácea,

el reactor ya estaba mostrando un buen desempeño, sin embargo, todavía no alcanzaba la eficiencia esperada de más del 90%, esa fue una de las razones por las que la puesta en marcha se prolongó 3 semanas más, cabe recordar que durante toda la puesta en marcha el reactor operó con aireación continua y con una concentración OD. promedio en el licor mixto de 4.30 mg/L.

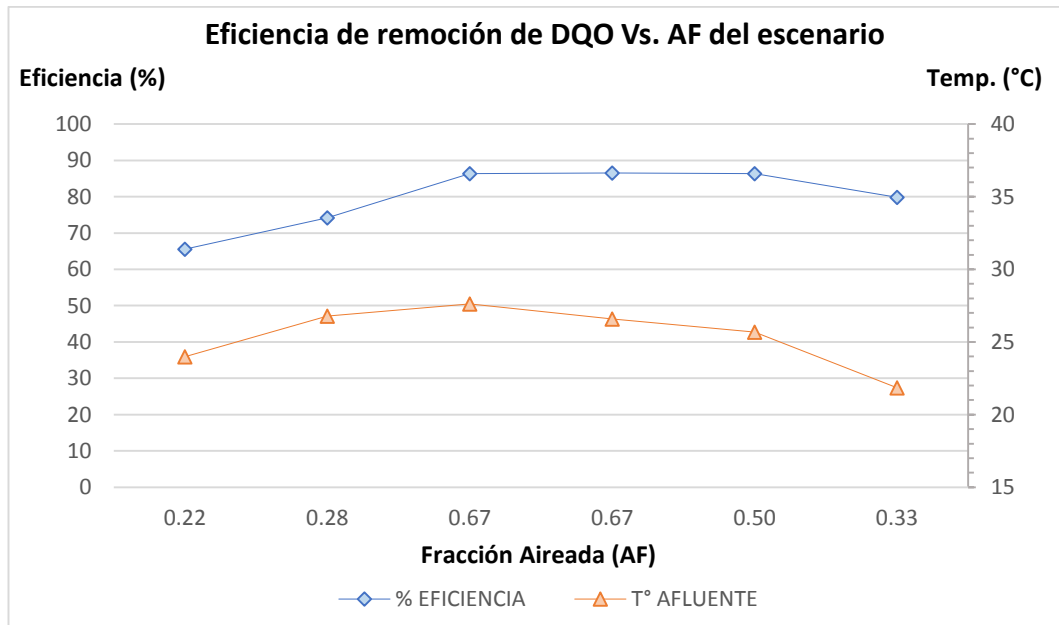
Es posible verificar también que en el agua residual afluente se registró valores de DQO muy variables, con un mínimo de 201 mg/L en la semana 30 y un máximo de 451 mg/L en la semana 16, el valor promedio de DQO fue igual a 292.36 mg/L, el cual fue menor al valor típico que caracteriza un agua residual municipal de baja concentración, que según la clasificación de Henze and Comeau (2017) es de 500 mg/L.

Mientras que, para el efluente, considerando las dos etapas evaluadas, se registró un valor semanal mínimo de 19 mg/L, en la semana 22, y un valor semanal máximo de 135 mg/L, en la semana 13. Los valores mínimos, máximos y promedios por escenario se mostrarán en la tabla 6.11.

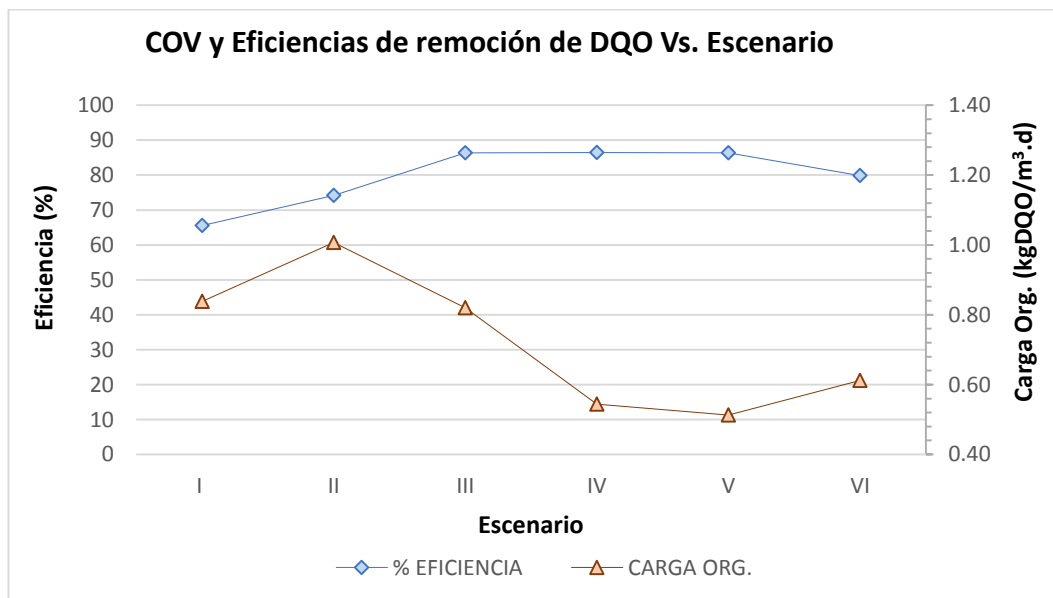
Tabla 6.11. Resumen de valores de DQO por escenario.

TRH	Esc.	n	DQO	Máx. (mg/L)	Mín. (mg/L)	Promedio (mg/L)	Eficiencia (%)
8.7 h (Etapla 1)	I	3	Afl.	327	263	305.00 ± 29.71	65.56 ± 6.11
			Efl.	135	70	106.67 ± 27.18	
	II	3	Afl.	451	306	366.33 ± 61.65	74.19 ± 6.28
			Efl.	114	80	91.67 ± 15.80	
	III	4	Afl.	397	222	298.25 ± 68.39	86.36 ± 3.60
			Efl.	61	19	41.25 ± 15.24	
11.7 h (Etapla 2)	IV	4	Afl.	301	216	264.50 ± 35.20	86.50 ± 4.29
			Efl.	44	28	34.25 ± 6.02	
	V	4	Afl.	287	201	249.25 ± 33.51	86.37 ± 1.31
			Efl.	43	27	34.00 ± 5.92	
	VI	3	Afl.	345	271	297.33 ± 33.77	79.88 ± 3.01
			Efl.	76	43	60.33 ± 13.52	

Para el análisis de las 2 etapas de la investigación se muestra la gráfica 6.18 y 6.19, en la que se observa los valores promedio por escenario de la DQO, temperatura y carga orgánica volumétrica.



Gráfica 6.18. Valores de eficiencia promedio de DQO y temperatura para las diferentes fracciones aireadas (AF) de los escenarios evaluados.



Gráfica 6.19. Valores de eficiencia promedio de DQO y COV en los diferentes escenarios evaluados.

De las dos gráficas, se observa que durante el primer escenario la temperatura mantiene un ascenso, con temperaturas de 23.99°C, 26.79°C y 27.63°C para los escenarios I, II y III respectivamente, y con respecto a la COV notamos que esta asciende y desciende, con valores de 0.84, 1.01 y 0.82 kgDQO/m³.d para los escenarios I, II y III respectivamente, además, se percibe que la COV a la que opera la etapa 1 es al menos 25% mayor que la COV con la que opera la etapa 2, esto está asociado al mayor caudal de operación de la primera etapa. En la etapa 2 observamos un descenso de la temperatura, con valores de 26.58, 25.69 y 21.84 para los escenarios I, II y III respectivamente, mientras que la COV presenta ligeras variaciones, con valores de 0.54, 0.51 y 0.61 kgDQO/m³.d para los escenarios I, II y III respectivamente.

Ahora enfocándonos en las etapas de la investigación, la primera etapa, comprendida entre la semana 12 y 22, la cual operó con un TRH igual a 8.7 h, y que, a diferencia de la DBO₅, en esta etapa si se logró monitorear durante los tres escenarios; asimismo, en el primer escenario, que operó con un patrón de aireación/no aireación de 40/140 min, se observa una clara caída en la eficiencia de remoción de DQO con respecto a la eficiencia obtenida en la puesta en marcha, llegando a obtenerse una eficiencia promedio del escenario de tan solo 65.56 %, esto debido, a que la AF, para el TRH establecido en esta etapa, fue muy pequeña, es decir, el reactor estuvo expuesto a condiciones anóxicas (presencia de NO_x⁻ y ausencia de O₂) y podría decirse que incluso llegó a trabajar en condiciones anaerobias (ausencia de NO_x⁻ y O₂) durante un periodo prolongado dentro de un ciclo de operación, en el cual no se pudo oxidar la materia orgánica porque no hubo un aceptor de electrones.

Durante el segundo escenario, el cual operó con un patrón 50/130 min, se observa que la eficiencia promedio se incrementó a 74.19%, pese a que la COV también se incrementó, este incremento de la eficiencia

puede haber sido porque en este escenario se incrementó la AF, y la temperatura favoreció el metabolismo de los microorganismos.

El tercer escenario, el cual operó con un patrón de 120/60 min, alcanzó una eficiencia promedio de remoción de DQO de 86.36%, en este escenario se visualiza una caída en la COV y un ligero incremento de la temperatura con respecto al escenario II, además, la fracción aireada se incrementó considerablemente en este escenario, estas variables afectan positivamente a la eficiencia, sin embargo, si hacemos un contraste entre el escenario I y III, observamos que ambos escenarios operaron con una COV promedio muy similar, entonces las variables que mayor influencia han ejercido han sido la temperatura y la AF.

La etapa 2, la cual operó con un TRH de 11.7 h, y estuvo comprendida entre la semana 23 y 33, tuvo eficiencias de remoción de DQO por encima de 79%, mostrando eficiencias ligeramente superiores al 86% para los escenarios IV y V.

El escenario IV, el cual operó un patrón de aireación/no aireación de 120/60 min, alcanzó una eficiencia promedio de 86.50%, pese a que en este escenario se operó con un COV mucho menor a la del escenario III, el incremento de eficiencia es despreciable.

Durante el escenario V, el cual operó con un patrón de 90/90 min, se alcanzó una eficiencia del 86.37%, registrándose un descenso despreciable de la eficiencia con respecto al escenario IV.

Además, cabe destacar que las eficiencias alcanzadas en estos escenarios son prácticamente igual a la del escenario III de la primera etapa, pese a que en los escenarios IV y V se operó con COVs menores que la del escenario III, los cuales debieron favorecer positivamente la eficiencia, sin embargo, la temperatura descendió, lo cual influyó negativamente en la eficiencia, de este análisis podemos

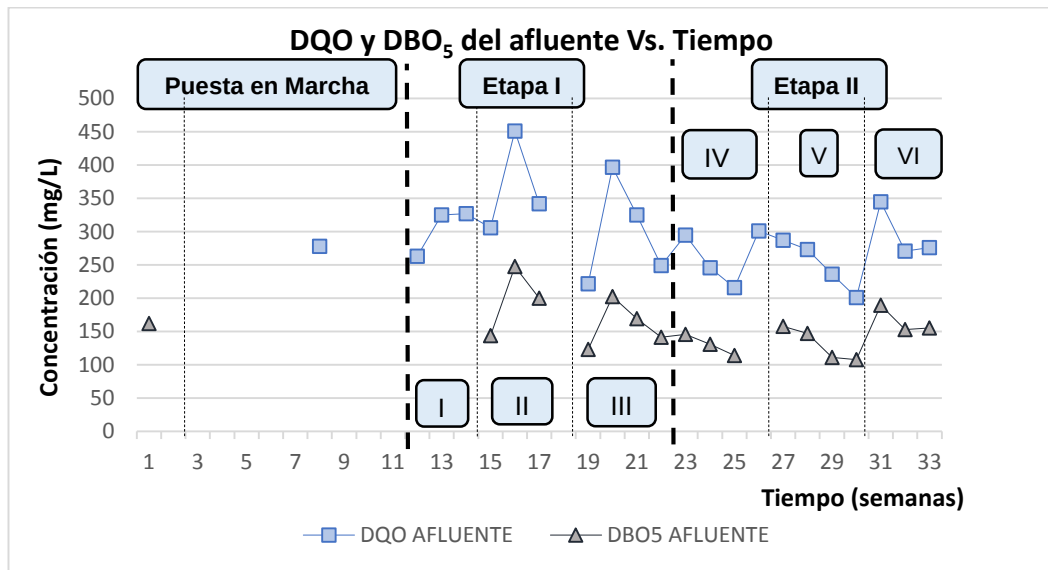
inferir que en un rango de operación de AF entre 0,5 y 0,67, el reactor opera en condiciones estables, amortiguando de manera eficiente la variabilidad de cargas que se registran durante la operación, además, la variación de temperatura registrada, dentro del rango de AF mencionado no influye en la eficiencia de remoción de DQO.

El escenario VI, el cual operó con un patrón de aireación/ no aireación de 60/120 min, alcanzó una eficiencia de remoción de DQO del 79.88%, en este escenario se nota claramente que un excesivo descenso de la AF, influye negativamente en la eficiencia de remoción de DQO, sin embargo, la disminución de eficiencia no es tan brusco como en el caso los escenarios I y II, de lo cual podemos inferir que un reactor IFAS opera de manera más estable con un TRH alto y cuando se le suministra una menor COV.

Las eficiencias alcanzadas en el escenario IV y V coinciden con los resultados obtenidos en la investigación de Moura et al. (2012), que obtuvieron eficiencias entre 85% y 90% de remoción de DQO con un TRH entre 8 y 12 h y periodos de aireación/no aireación de 120/60 min.

6.6.2. RELACIÓN DE DQO Y DBO₅.

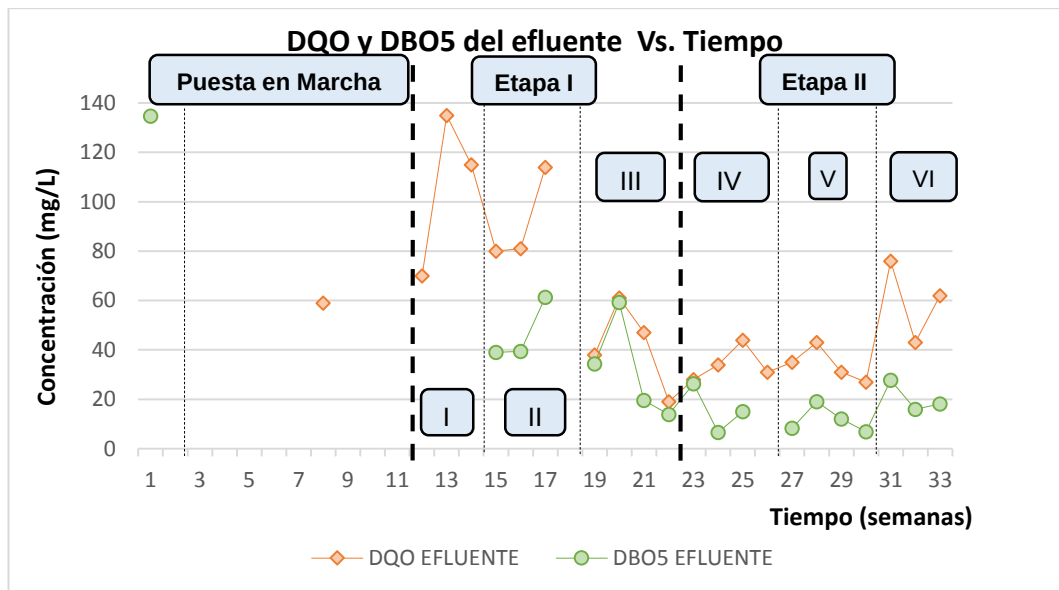
Como algo adicional a los objetivos planteados en esta investigación, determinaremos la relación existente entre la DQO y DBO₅, para el agua residual proveniente de los poblados El Ángel y el Milagro, el cual es tratado en el CITRAR-UNI, a continuación, mostramos las gráficas donde se visualizan las concentraciones de DQO y DBO del afluente y efluente.



Gráfica 6.20. Valores de DQO y DBO₅ del afluente registrados durante todo el proceso de investigación.

Se observa que la DBO₅ y la DQO muestran el mismo comportamiento de crecimiento y decrecimiento, de acuerdo a la dinámica variable del agua residual afluente, esto nos indica que las variables mencionadas guardan una relación, que determinaremos mediante una correlación en la gráfica 6.22.

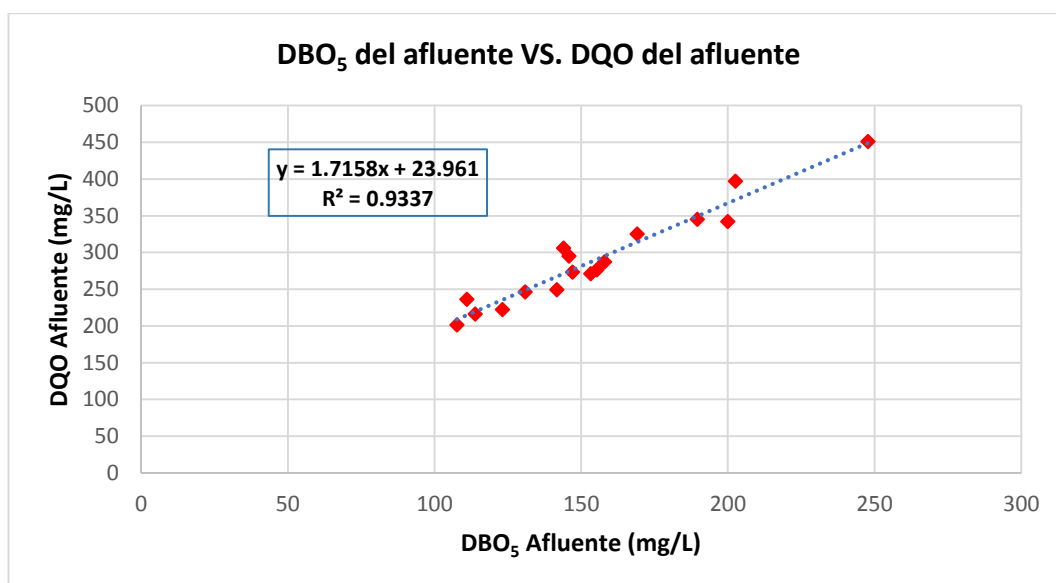
Seguidamente, mostraremos los valores de DQO y DBO₅ del efluente.



Gráfica 6.21. Valores de DQO y DBO₅ del efluente registrados durante todo el proceso de investigación.

De la gráfica 6.21 podemos apreciar que el efluente también mantiene el mismo comportamiento, sin embargo, hay valores de DBO que se acercan demasiado a los valores de DQO, esto podría ser porque, en el efluente, la concentración de DBO₅ y DQO biodegradable en dichas muestras son muy cercanas, y la concentración de materia orgánica no biodegradable es muy baja; o porque en la prueba de DBO₅ también haya habido una demanda bioquímica de oxígeno nitrogenácea (DBON), esto debido a que el efluente del reactor ya contenía las bacterias nitrificantes en una población suficiente para ejercer la DBON, justamente porque en el licor mezclado se fomentó el desarrollo de estas.

A continuación, mostramos la correlación entre la DBO₅ y la DQO del afluente al reactor.



Gráfica 6.22. Correlación entre valores de DQO y DBO₅ del afluente, registrados durante todo el proceso de investigación.

Del análisis de correlación se visualiza que la dependencia entre ambas variables, DBO₅ y DQO del afluente, es una relación directa fuerte, porque el coeficiente de correlación “R” es muy cercano a 1.

Asimismo, la relación de dependencia entre DBO₅ y DQO del afluente se representa a continuación.

$$DQO = 1.7158(DBO_5) + 23.961$$

$$R^2 = 0.9337$$

De la relación podemos decir que la DQO del agua residual doméstica que pasó a través del pre-tratamiento del CITRAR-UNI, representa aproximadamente 1,72 veces la DBO_5 de la misma agua residual doméstica, además, cuando la DBO_5 es 0, la DQO es 23,96 mg/L, es decir que, una muestra de 1 L contiene 23.96 mg de materia no biodegradable, que solo se oxida químicamente.

6.7. NITRÓGENO

En este ítem son presentados todos los valores resultantes, referidos a los componentes nitrogenados (Nitrógeno total, NTK, Nitrógeno amoniacal, nitratos y nitritos) medidos semanalmente. Es importante resaltar que estas mediciones solo se llevaron a cabo durante las dos etapas de operación, además, debemos mencionar que todos los componentes nitrogenados del afluente han sido medidos de una misma muestra de agua residual, se procedió de manera similar para el efluente.

Para un mejor análisis de los resultados se verá, inicialmente, cada escenario por separado y más adelante se hará una comparación de todos los escenarios evaluados.

6.7.1. ETAPA 1

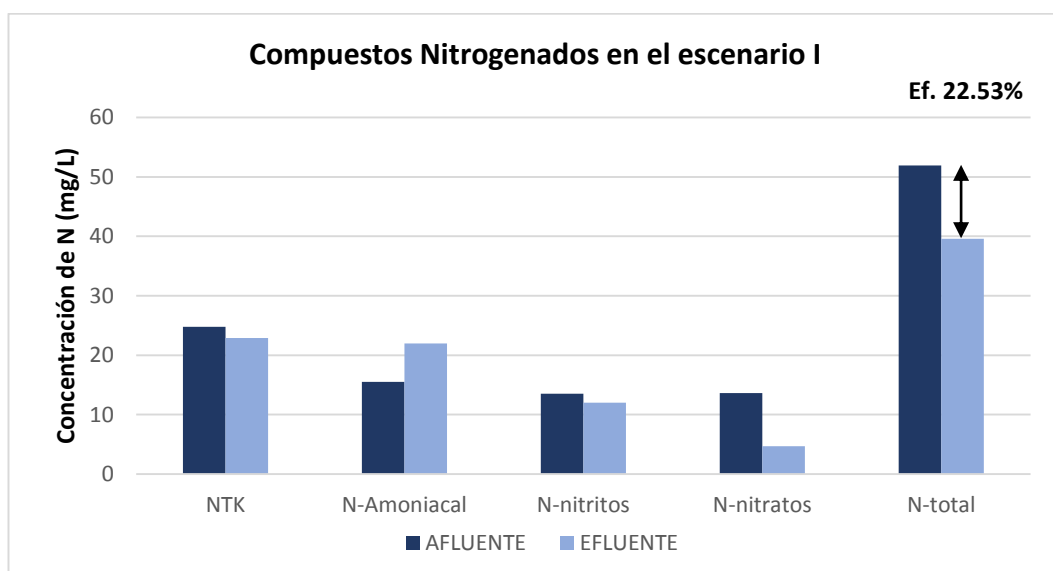
Estuvo comprendida entre la semana 12 y 22 y operó con un TRH de 8,7 h, se divide en tres escenarios, cada uno de los cuales con ciclos de 3 horas a lo largo del día, completando de esta manera 8 ciclos por día.

6.7.1.1. ESCENARIO I

Comprendido entre la semana 12 y 14, cuyo patrón de aireación y no aireación fue de 40/140 min, el cual se repitió a lo largo del día, completando de esa manera los 8 ciclos diarios, cabe mencionar que en este escenario solo se realizaron dos mediciones, en la semana 13 y 14, se decidió no completar las 3 mediciones programadas porque el sistema no mostró mejoras en las

eficiencias de remoción del NTK ni del Nitrógeno total, e inclusive se registró eficiencias negativas en el caso del nitrógeno amoniacal.

En la gráfica 6.23 se muestran las concentraciones de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente.



Gráfica 6.23. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario I.

La eficiencia de remoción de N-total en este escenario fue muy baja, registrándose tan solo un $22.53 \pm 9.20\%$ de eficiencia, lo cual indica que las concentraciones de los componentes nitrogenados en el efluente fueron altas.

La concentración promedio de N-total efluente en este escenario fue de 39.57 ± 0.80 mg/L, mientras que las concentraciones de NTK, N-NH_4^+ , N-NO_2^- y N-NO_3^- fueron de 22.87 ± 3.50 mg/L, 22.00 ± 3.74 mg/L, 12.00 ± 1.70 mg/L y 4.70 ± 0.64 mg/L respectivamente.

En este escenario se visualiza que la remoción de NTK, N-NO_2^- es prácticamente nula, y lo que más llama la atención es que la concentración de N-NH_4^+ en el efluente es mayor que la concentración en el afluente, es decir, hubo un incremento de la concentración de N-NH_4^+ , registrándose de esta manera una eficiencia negativa promedio de $-45.17 \pm 33.40\%$, esto posiblemente

sea debido a que la fracción aireada (AF) fue muy pequeña, exponiendo así la biomasa a una mezcla lenta sin aireación por un periodo de 140 min, durante la cual es probable que el reactor haya operado inicialmente en condiciones anóxicas, lo cual era lo deseado, pero posteriormente se generaron zonas anaerobias, lo que fomentó la amonificación del nitrógeno orgánico biodegradable, soluble y particulado, sin embargo, si observamos de manera más detallada, notaremos que la concentración de NTK en el efluente presenta una diferencia marginal respecto a la del afluente, lo que nos lleva inferir que principalmente se amonificó el nitrógeno orgánico biodegradable particulado que fue retenido y acumulado por adsorción en la biopelícula fija.

Otro de los problemas de operar con periodos anóxicos largos, es decir fracciones aireadas pequeñas, es que empiezan a proliferar algas en el primer tercio superior del medio fijo, los cuales cubren la biopelícula adherida al medio, consecuentemente la transferencia de nutrientes y materia orgánica carbonácea (sustrato) se ve obstaculizada y ello conlleva a una disminución del rendimiento de los microorganismos (Y).

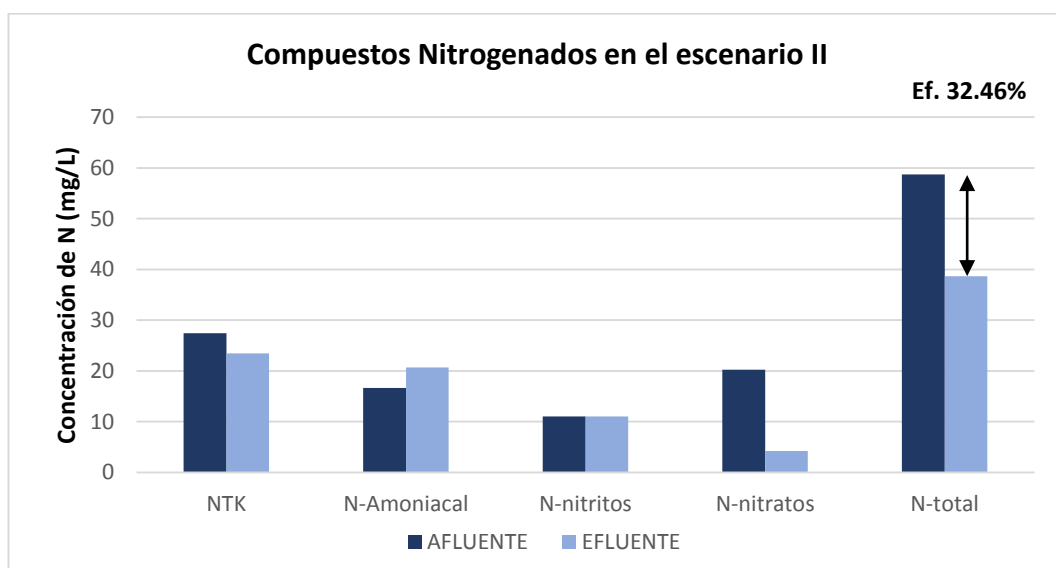
Además, es importante notar que el afluente presentó concentraciones promedio de N-NO_2^- y N-NO_3^- iguales a 13.50 ± 4.50 mg/L y 13.65 ± 0.45 mg/L respectivamente, considerado como concentraciones altas en cuanto a estos parámetros, lo cual indica que la composición del agua residual afluente que ingresa al CITRAR no corresponde a una caracterización típica de aguas residuales domésticas.

6.7.1.2. ESCENARIO II

Este escenario estuvo comprendido entre la semana 15 y 18, y operó con un patrón de aireación y no aireación de 50/130 min. Debemos mencionar que en este escenario se realizaron tres mediciones, en las semanas 15, 16 y 17, al igual que en el

escenario anterior el efluente del sistema no mostró mejoras significativas en cuanto a la remoción del NTK ni del Nitrógeno total.

En la gráfica 6.24 se detallan los compuestos nitrogenados durante este escenario.



Gráfica 6.24. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario II.

La concentración media de N-total en el efluente alcanzada en este escenario fue de 38.67 ± 5.53 mg/L mientras que las concentraciones de NTK, N-NH_4^+ , N-NO_2^- y N-NO_3^- fueron de 23.43 ± 2.81 mg/L, 20.67 ± 6.28 mg/L, 11.00 ± 2.16 mg/L y 4.23 ± 0.66 mg/L respectivamente.

Por otro lado, la eficiencia de remoción de nitrógeno total en este escenario se incrementó con el aumento de la fracción aireada, llegando a una eficiencia de $32.46 \pm 16.05\%$, sin embargo, todavía se mantiene la eficiencia negativa ($-26.46 \pm 31.02\%$) referente al N-amoniacoal, es decir, aún persiste la generación de zonas anaerobias y consecuentemente la transformación de nitrógeno orgánico a N-amoniacoal.

En este escenario, también se mantiene el crecimiento de algas que recubren al medio fijo y, por lo tanto, afectan la transferencia normal de sustratos hacia el interior de la biopelícula.

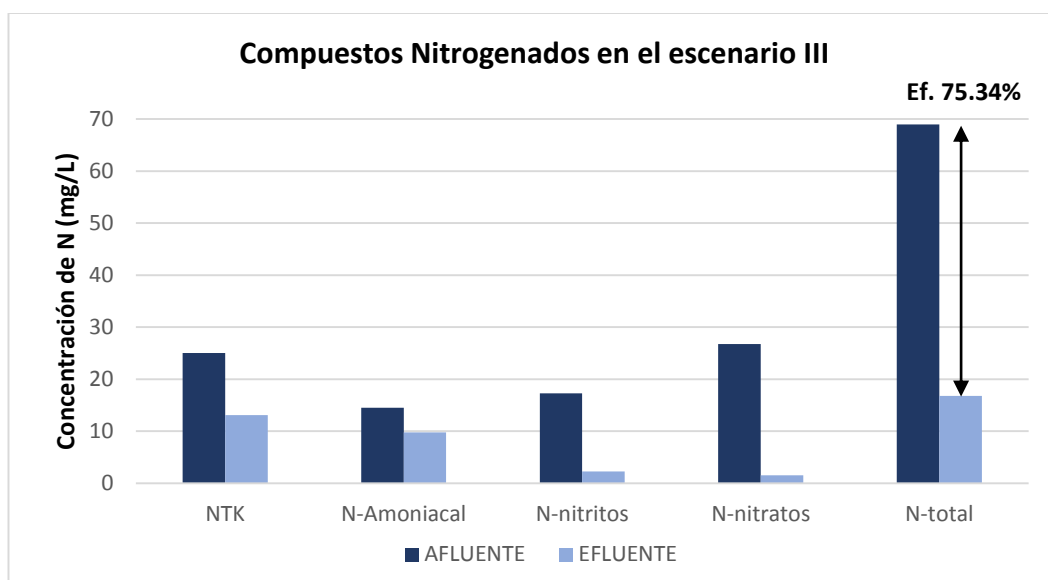
Además, la baja concentración de nitratos en el efluente respecto al afluente y la invariabilidad de la concentración de nitritos, refuerzan el planteamiento de que en el periodo de mezcla se generan condiciones anóxicas y anaerobias, en el periodo anóxico el nitrato y nitrito son usados como aceptor de electrones y por lo tanto desnitrificados parcialmente, pero al parecer la desnitrificación del nitrito respecto del nitrato es mucho menor, o su concentración fue mucho mayor que la del nitrato, y paralelamente, debido a las zonas anaerobias generadas se incrementa la concentración de N-amoniaco, estas zonas anaerobias fueron generadas por el prolongado periodo sin aireación y la mezcla que fue interrumpida por el medio fijo de adherencia.

Es importante mencionar que, en este escenario, en la primera medición de NTK, se registró una medición muy inusual, y es que la concentración de NTK en el efluente resultó mayor que la del afluente, inicialmente se pensó que se había cometido un error en la medición, pero luego se confirmó con la medición de N-amoniaco, cuyos resultados también mostraron la misma tendencia. Buscando la razón del porque ocurrió este problema, se encontró que el error se había cometido a la hora de la toma de muestras, y es que las muestras correspondían a dos lotes diferentes de agua residual almacenada, es decir las características del agua residual variaron en cuanto a la concentración de NTK y por lo tanto también del N-amoniaco, más adelante se mostrará a mayor detalle la variabilidad de las concentraciones, ver gráfico 6.33.

6.7.1.3. ESCENARIO III

Estuvo comprendido entre la semana 19 y 22, y operó con un patrón de aireación y no aireación de 120/60 min. En este escenario se decidió hacer un cambio brusco en cuanto a la fracción aireada, debido a que, como se pudo constatar en los dos escenarios anteriores, las fracciones aireadas pequeñas no influyen en gran medida a la remoción de N-total.

En la gráfica 6.25 se detallan los compuestos nitrogenados durante este escenario.



Gráfica 6.25. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario III.

La concentración media de N-total en el efluente alcanzada en este escenario fue de 16.78 ± 2.17 mg/L mientras que las concentraciones de NTK, N-NH_4^+ , N-NO_2^- y N-NO_3^- fueron de 13.06 ± 1.03 mg/L, 9.75 ± 0.83 mg/L, 2.25 ± 1.30 mg/L y 1.48 ± 1.57 mg/L respectivamente.

Se observa la marcada diferencia en cuanto a la eficiencia de remoción de N-total respecto a los escenarios anteriores, alcanzándose una eficiencia de $75.34 \pm 4.55\%$, lo cual indica que la desnitrificación ocurrió de manera aceptable en la fase anóxica.

Además, en todas las mediciones realizadas, las concentraciones de N-amoniacoal efluente fueron menores a las del afluente, lo cual guarda concordancia con las condiciones operativas a las que se le sometió, los valores registrados se indican de manera más detallada en la gráfica 6.32.

Es importante rescatar que en el efluente las concentraciones de N-NO_2^- y N-NO_3^- fueron satisfactoriamente bajas y comparativamente menores respecto a los escenarios anteriores, sin embargo, la concentración de NTK todavía se mantiene en un valor relativamente alto (13.06 ± 1.03 mg/L), lo que implica que el sistema desnitrificó los N-NO_2^- y N-NO_3^- que ingresan en el afluente, pero la nitrificación del N-amoniacoal afluente no es muy eficiente, tal como se evidencia en la gráfica 6.25.

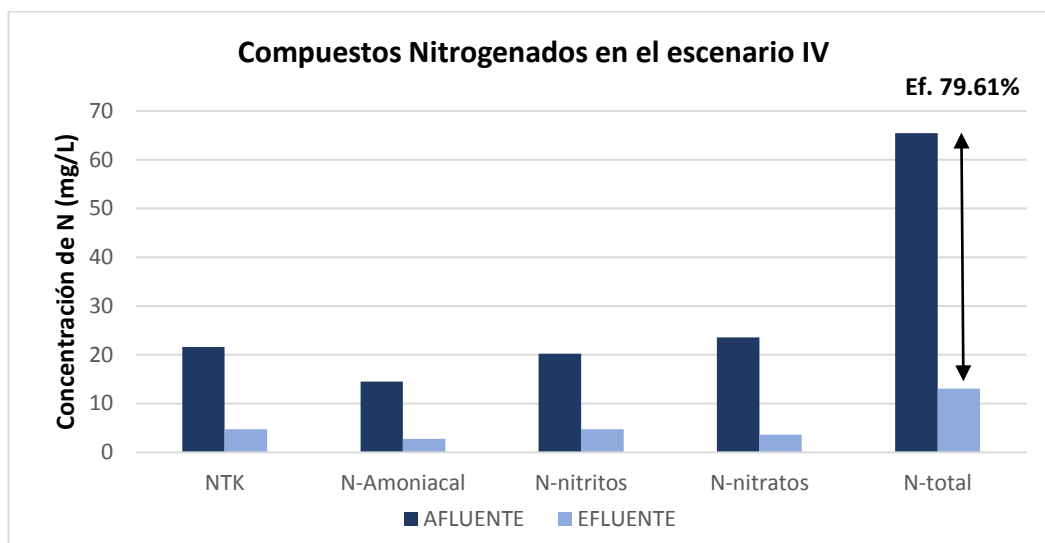
6.7.2. ETAPA 2

Estuvo comprendida entre la semana 23 y 33, operó con un TRH de 11,7 h, y al igual que en la etapa 1, se divide en tres escenarios, en cada uno de los cuales se operó también con 8 ciclos de 3 horas por día.

6.7.2.1. ESCENARIO IV

Operó entre la semana 23 a 26, con un patrón de aireación y no aireación de 120/60 min. Para este escenario se mantuvo la misma fracción aireada que el escenario III de la etapa 1, y se decidió variar el caudal del afluente, para ver la influencia del TRH en la eficiencia de remoción del N-total.

En la gráfica 6.26 se detallan los compuestos nitrogenados durante este escenario.



Gráfica 6.26. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario IV.

La concentración media de N-total en el efluente alcanzada en este escenario fue de 13.07 ± 2.42 mg/L mientras que las concentraciones de NTK, N-NH_4^+ , N-NO_2^- y N-NO_3^- fueron de 4.72 ± 0.57 mg/L, 2.75 ± 0.43 mg/L, 4.75 ± 1.48 mg/L y 3.60 ± 0.83 mg/L respectivamente.

Observamos que el efluente presentó una baja concentración con respecto a NTK, esto implica que en este escenario si hubo una buena nitrificación, contrario a lo registrado en el escenario III, además, se evidencia también que los N-NO_2^- y N-NO_3^- se desnitrificaron, pero se registraron en concentraciones ligeramente mayores a los registrados en el escenario III, lo cual es concordante, porque a la concentración de N-NO_2^- y N-NO_3^- del afluente se le sumaron los generados en la nitrificación, resultando de esta manera una mayor concentración de N-NO_2^- y N-NO_3^- disponibles para la desnitrificación, pero la capacidad de desnitrificación no se incrementó.

Conforme a lo discutido líneas arriba, se evidencia que en este escenario se mejoró la eficiencia de remoción de N-total, llegando a un valor de $79.61 \pm 4.98\%$, esto implica que al incrementar el TRH

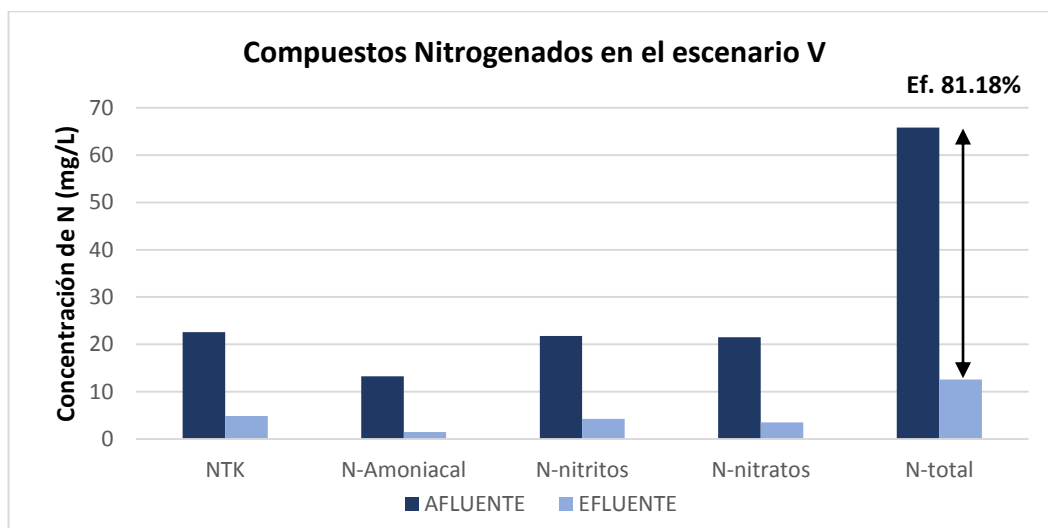
en este sistema también se incrementa la eficiencia de remoción de N-total.

En la investigación realizada por Collí (2002), se obtuvo buenos resultados de eficiencia de remoción de N-total con TRH altos (20 h y 34 h), esto permitió incluso trabajar con fracciones aireadas más bajas, alcanzando eficiencias de remoción de N-total del 90% con un patrón de aireación y no aireación de 50/130 min, es decir con una fracción aireada baja (0.28).

6.7.2.2. ESCENARIO V

Estuvo comprendido entre la semana 27 y 30, con un patrón de aireación y no aireación de 90/90 min, en este escenario se decidió disminuir la fracción aireada para observar la influencia de esta en la eficiencia de remoción de N-total.

En la gráfica 6.27 se detallan los compuestos nitrogenados durante este escenario.



Gráfica 6.27. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario V.

La concentración media de N-total en el efluente alcanzada en este escenario fue de 12.58 ± 4.14 mg/L mientras que las concentraciones de NTK, N-NH_4^+ , N-NO_2^- y N-NO_3^- fueron de

4.86±2.39 mg/L, 1.50±0.50 mg/L, 4.25±1.30 mg/L y 3.48±1.00 mg/L respectivamente.

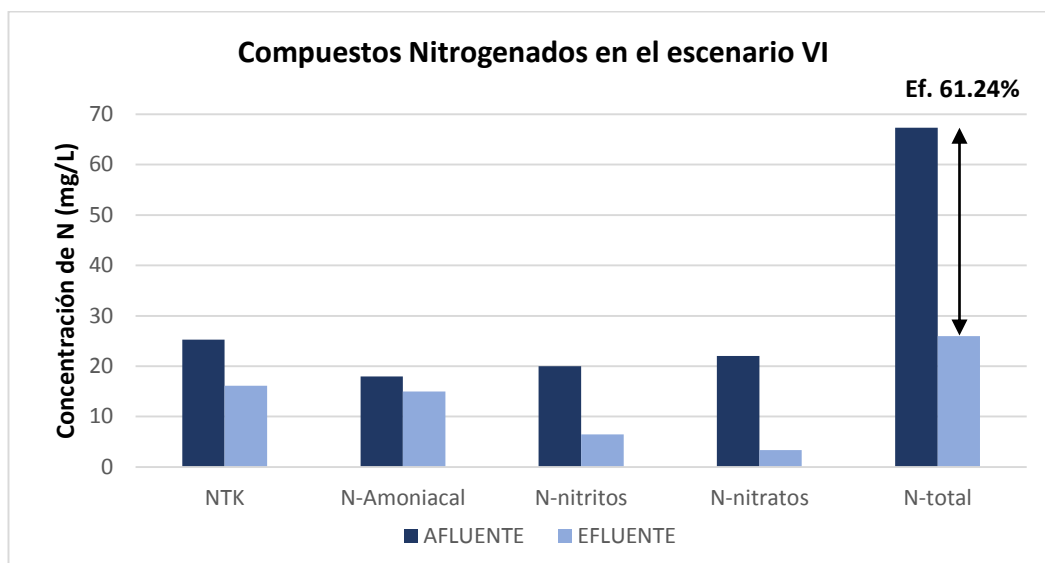
Del gráfico se visualiza que la eficiencia de remoción de N-total llegó al 81.18±5.22%, el cual evidencia un ligero incremento debido a la reducción de fracción aireada, lo cual es positivo, no tanto por el ligero incremento de la eficiencia, sino más bien porque nos muestra que incluso al disminuir el tiempo de aireación total por día todavía se puede lograr eficiencias equiparables a un sistema operado con una mayor fracción aireada, es decir, que en este escenario hay un mayor ahorro de energía eléctrica que en el escenario IV y se logró eficiencias ligeramente mayores en cuanto a remoción de nitrógeno.

6.7.2.3. ESCENARIO VI

Este escenario estuvo comprendido entre la semana 31 y 33, con un patrón de aireación y no aireación de 60/120 min; en este escenario se redujo aún más la fracción aireada con la finalidad de encontrar un óptimo que maximice la remoción de N-total con la menor fracción aireada posible.

Durante la operación del reactor, en este escenario se volvió a visualizar proliferación de algas que cubren a la biopelícula y obstaculizan la transferencia del sustrato hacia su interior, de manera que como ya se ha visto en escenarios anteriores, siempre que se operó con patrones de aireación que tengan fracciones aireadas pequeñas se mantiene la constante de proliferación de algas.

En la gráfica 6.28 se detallan los compuestos nitrogenados durante este escenario.



Gráfica 6.28. Concentración media de los compuestos nitrogenados en el afluente y efluente durante el escenario VI.

La concentración media de N-total en el efluente alcanzada en este escenario fue de 26.00 ± 2.81 mg/L mientras que las concentraciones de NTK, N-NH_4^+ , N-NO_2^- y N-NO_3^- fueron de 16.15 ± 0.05 mg/L, 15.00 ± 0.00 mg/L, 6.50 ± 1.50 mg/L y 3.35 ± 1.25 mg/L respectivamente.

De la gráfica se observa que la eficiencia de remoción de N-total se redujo a $61.24 \pm 5.33\%$, la cual es menor con respecto al escenario anterior, esta reducción de la eficiencia está asociada a la disminución de la fracción aireada, además se visualiza que la capacidad de nitrificación en estas condiciones operativas ha disminuido notablemente, lo que ha repercutido en la concentración de N-total en el efluente, haciendo que esta se incremente hasta un valor promedio de 26.00 ± 2.81 mg/L.

Más adelante se mostrará la variación semanal de los componentes nitrogenados y se hará también algunas correlaciones necesarias con otros parámetros para ver la influencia de estos en la eficiencia de remoción de N-total.

6.7.3. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL, NTK Y NITRÓGENO AMONIAICAL.

En este ítem veremos la variación de eficiencia por escenario con la finalidad de visualizar el comportamiento en respuesta a los cambios operacionales que se le aplicó, ver tabla 6.12 y gráfico 6.29.

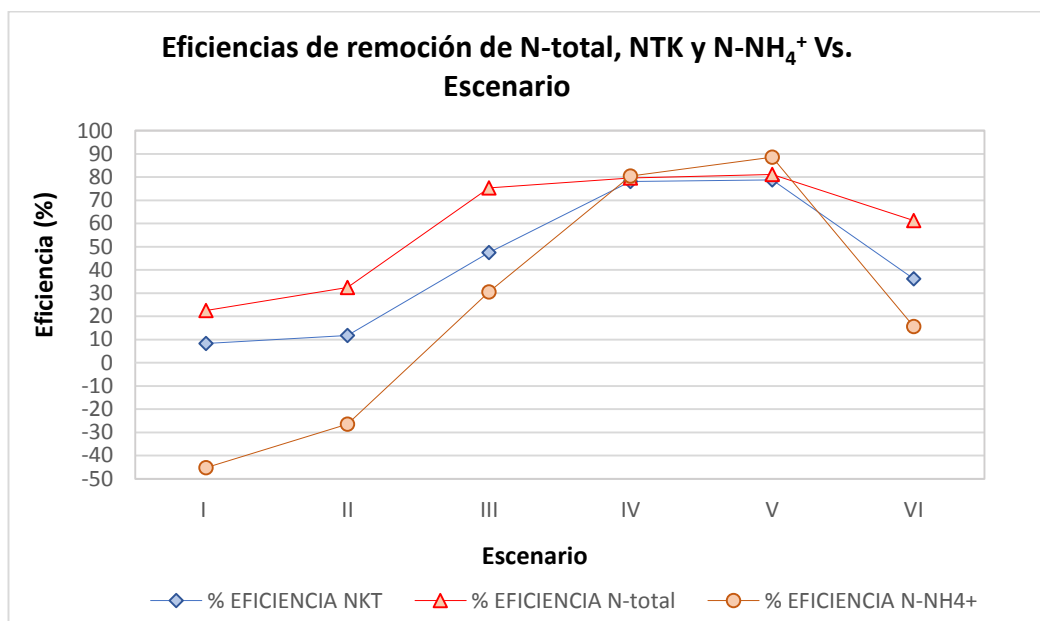
Tabla 6.12: Concentración media de los compuestos nitrogenados y eficiencia de remoción del nitrógeno total en cada escenario.

TRH	Esc.	n	Pto.	NTK (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	NH ₂ ⁻ (mg/L)	NH ₃ ⁻ (mg/L)	N _{total} (mg/L)	Eficiencia N- total (%)
8.7 h (Etapa 1)	I	2	Afl.	24.78 ± 2.25	15.50 ± 1.50	13.50 ± 4.50	13.65 ± 0.45	51.93 ± 7.20	22.53 ± 9.20
			Efl.	22.87 ± 3.50	22.00 ± 3.74	12.00 ± 1.70	4.70 ± 0.64	39.57 ± 0.80	
	II	3	Afl.	27.44 ± 4.46	16.67 ± 3.30	11.00 ± 2.16	20.27 ± 7.62	58.71 ± 7.34	32.46 ± 16.05
			Efl.	23.43 ± 2.81	20.67 ± 6.28	11.00 ± 2.16	4.23 ± 0.66	38.67 ± 5.53	
	III	4	Afl.	24.99 ± 1.77	14.50 ± 2.06	17.25 ± 3.77	26.73 ± 6.44	68.96 ± 7.00	75.34 ± 4.55
			Efl.	13.06 ± 1.03	9.75 ± 0.83	2.25 ± 1.30	1.48 ± 1.57	16.78 ± 2.17	
11.7 h (Etapa 2)	IV	4	Afl.	21.62 ± 2.04	14.50 ± 2.18	20.25 ± 1.48	23.58 ± 6.69	65.44 ± 6.41	79.61 ± 4.98
			Efl.	4.72 ± 0.57	2.75 ± 0.43	4.75 ± 1.48	3.60 ± 0.83	13.07 ± 2.42	
	V	4	Afl.	22.57 ± 1.46	13.25 ± 1.30	21.75 ± 3.27	21.48 ± 1.02	65.80 ± 4.24	81.18 ± 5.22
			Efl.	4.86 ± 2.39	1.50 ± 0.50	4.25 ± 1.30	3.48 ± 1.00	12.58 ± 4.14	
	VI	2	Afl.	25.29 ± 0.58	18.00 ± 2.00	20.00 ± 1.00	22.05 ± 2.45	67.34 ± 2.03	61.24 ± 5.33
			Efl.	16.15 ± 0.05	15.00 ± 0.00	6.50 ± 1.50	3.35 ± 1.25	26.00 ± 2.81	

“n” es el número de muestras analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el comportamiento de la variación de eficiencia en la primera etapa de investigación, es decir cuando el reactor opera con un HRT de 8.7 h y una AF comprendida en el rango de 0.22 a 0.67, la eficiencia de remoción de N total, NTK y NH₄ se incrementan a medida que se incrementa la AF.



Gráfica 6.29. Variación de eficiencias de N-total, NTK y N-NH₄⁺ por escenario.

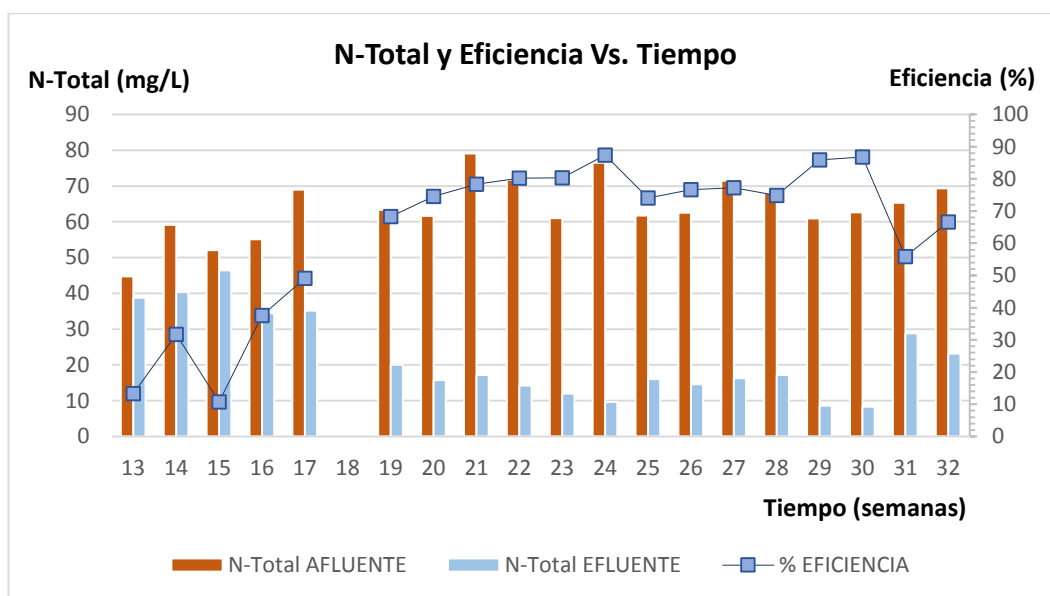
De la gráfica se observa que en cuanto al N-total en la primera etapa, los dos primeros escenarios registraron las eficiencias más bajas, alcanzando valores medios de $22.53 \pm 9.20\%$ y $32.46 \pm 16.05\%$ para el escenario I y II respectivamente, sin embargo, el escenario III alcanzó una eficiencia de $75.34 \pm 4.55\%$, lo cual, como ya se dijo anteriormente, es debido a la fracción aireada (AF) establecida en dichos escenarios, de manera que se puede establecer que un reactor IFAS que opera en condiciones ambientales similares a esta investigación, con un TRH de 8.7 h y fracciones aireadas menores a 0.28 alcanzará eficiencias menores al 35 %, por el contrario, si se incrementa la AF a 0.67, la eficiencia mejora notablemente. Lo cual coincide con la investigación realizada por Moura (2014), en la cual se operó con un TRH de 8 h y una AF de 0.67, se alcanzó una eficiencia de $70 \pm 14\%$. Se debe mencionar también que si se trabaja con AF de 0.28, es decir con un patrón de aireación y no aireación de 50/130 min, y TRH de 34 h se puede alcanzar eficiencias de remoción de N-total alrededor de 90%, tal como se puede verificar en la investigación realizada por Collí (2002).

En la gráfica 6.29 se visualiza que las eficiencias de remoción de NTK y N-NH_4^+ mantienen la misma tendencia al incremento que el N-total, mientras se incrementa la AF en la primera etapa, por otro lado, en los escenarios I y II se registraron eficiencias negativas en cuanto al N-NH_4^+ , lo cual ha sido por las zonas anaerobias que se generaron en las fases anóxicas de dichos escenarios, es por ello que no es conveniente trabajar con fracciones aireadas muy pequeñas cuando el TRH es de 8 h o muy próximos a dicho valor, considerando las mismas condiciones ambientales en las que se trabajó en esta investigación.

En la etapa 2 se visualiza que las eficiencias mejoraron, alcanzándose eficiencias de $79.61 \pm 4.98\%$, $81.18 \pm 5.22\%$ y $61.24 \pm 5.33\%$ en los escenarios IV, V y VI respectivamente, cabe resaltar que la eficiencia del escenario V es ligeramente mayor que la eficiencia del escenario IV a pesar que la AF en el escenario V ha sido disminuida, es decir, durante un día de operación normal, el tiempo de aireación total va ser menor en el escenario V que en el IV. Con el fin de aumentar aún más ese ahorro de energía se decidió disminuir todavía más la AF en el escenario VI, pero el resultado fue que la eficiencia disminuyó a $61.24 \pm 5.33\%$, encontrándose de esa manera que para un TRH de 11.7 la eficiencia de remoción de N-total decrece si se disminuye la AF por debajo de 0.33, sin embargo, es posible que incluso a mayores AF se muestren descensos en la eficiencia, para lo cual se tendría que evaluar más escenarios con AF entre 0.33 y 0.50.

Se debe mencionar también que los escenarios III y IV tienen la misma AF igual a 0.67, sin embargo, se obtuvo una eficiencia de remoción de N-total mayor en el escenario IV, esto fue debido a que a partir de dicho escenario se empezó a operar con un TRH mayor, es decir que este tipo de sistemas opera mejor cuanto menor es el caudal afluente, considerando que la carga del afluente se mantiene relativamente constante.

También veremos la variación detallada de la eficiencia y concentraciones afluente y efluente del N-total, NTK y N-NH_4^+ en cada escenario, para mostrar los picos máximos y mínimos, ver gráficos 6.30, 6.31 y 6.32.



Gráfica 6.30. Variación de la eficiencia de N-total y concentraciones afluente y efluente por semana.

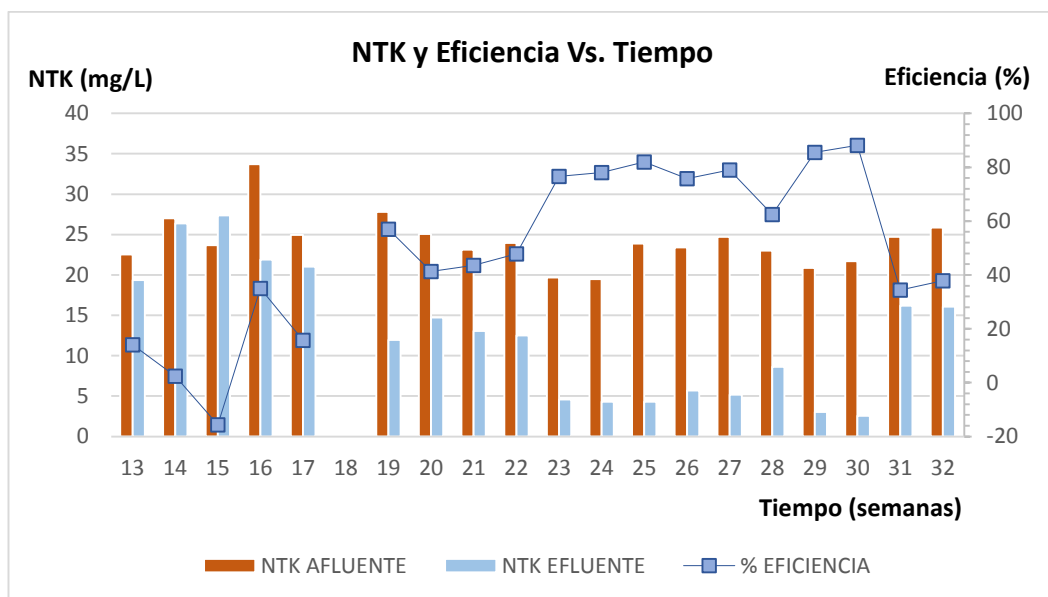
Podemos ver que las eficiencias de remoción de N-total en los escenarios I y II son muy bajas, alcanzando una eficiencia máxima de 31.73% en el primer escenario y una mínima de 13.32%. La primera semana del segundo escenario mostró una eficiencia aún menor que el escenario I, alcanzando tan solo una eficiencia de 10.75%, y una eficiencia máxima de 49.06% en la tercera semana de monitoreo, mostrando una tendencia hacia el incremento, sin embargo, no hubo una buena nitrificación, tal como se observó en los gráficos 6.23 y 6.24.

Del escenario III hasta el escenario V se registró un notable incremento en cuanto a la eficiencia de remoción de N-total registrándose una eficiencia mínima de 68.30% en el escenario III y una máxima de 87.33 % en el escenario IV, además, en los mencionados escenarios la eficiencia presenta poca variabilidad; posteriormente en el escenario VI se registró nuevamente un descenso en cuanto a la eficiencia, alcanzando un mínimo de 55.90% y un máximo de 66.57%.

La concentración media de N-total afluente que ingresó al reactor fue de 63.97 ± 8.02 mg/L, registrándose un máximo de 79.12 mg/L en la semana 21 y un mínimo de 44.73 mg/L en la semana 13, en general se registró poca variabilidad cuanto a este parámetro.

La concentración de N-total en el efluente de los escenarios I y II es alta, como se pudo visualizar, registrándose un valor mínimo de 34.41 mg/L; mientras que en los escenarios III, IV y V las concentraciones de N-total en el efluente no superan los 20.07 mg/L, y en el escenario VI vuelve a incrementarse ligeramente, registrándose un mínimo de 23.19 mg/L.

A continuación, mostramos todos los valores medidos en cuanto al NTK.



Gráfica 6.31. Variación de la eficiencia de NTK y concentraciones afluente y efluente por semana.

Las eficiencias de remoción de NTK en los escenarios I y II son bajas respecto a los escenarios III al V, registrándose una eficiencia mínima de 2.44% y una máxima de 14.03% en el primer escenario; en la primera semana de medición del segundo escenario se registró una eficiencia negativa de -15.63%, esto sucedió por un error al momento de tomar las muestras, perteneciendo la muestra del afluente al agua

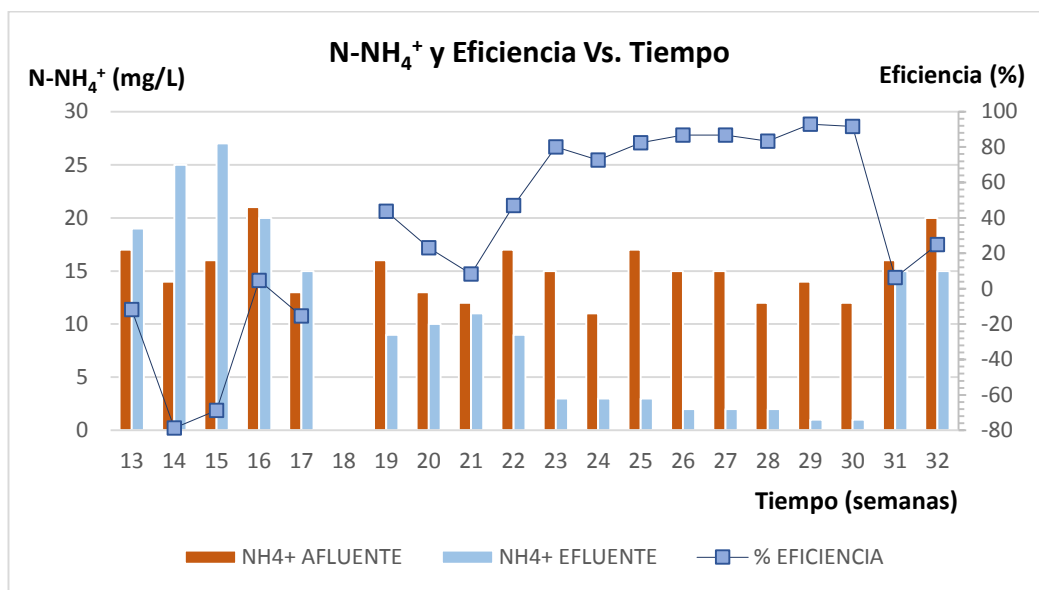
residual pre-tratada del día en que se tomó la muestra y la del efluente al agua residual pre-tratada del día anterior, debemos mencionar que el agua residual que alimenta el reactor tiene un volumen que permite abastecer al reactor por 24 h, es decir si el tanque de almacenamiento se llenó en rango de horario de 1 a 2 pm, este volumen durará hasta el día siguiente en el mismo rango. Normalmente la toma de muestras se hacía en las mañanas, para asegurar que la muestra del afluente y efluente pertenezcan al mismo lote, sin embargo, ese día se hizo el muestreo en la tarde, justo después de llenar el tanque de almacenamiento.

Excluyendo la primera semana de monitoreo del escenario II se registró una eficiencia mínima de remoción de NTK de 15.72% y una máxima de 35.00%. El escenario III registró una eficiencia de remoción de NTK mínima de 41.30% y una máxima de 56.96%. EL escenario IV y V presentan eficiencias de remoción de NTK poco variables, registrándose un valor mínimo de 62.49% en la semana 28 y un máximo de 88.11% en la semana 30. El escenario VI presentó una eficiencia de remoción de NTK mínima de 34.44% una máxima de 37.80%.

La concentración media de NTK afluente que ingresó al reactor fue de 24.17 ± 3.10 mg/L, registrándose un máximo de 33.71 mg/L en la semana 16 y un mínimo de 19.50 mg/L en la semana 24, en general también se registró poca variabilidad cuanto a este parámetro.

La concentración de NTK en el efluente de los escenarios I y II es alta, registrándose un valor mínimo de 19.37 mg/L; mientras que en el escenario III la concentración de NTK en el efluente no disminuye de 11.97 mg/L, en los escenarios IV y V no se supera los 8.63 mg/L y en el escenario VI vuelve a incrementarse, registrándose un mínimo de 16.09 mg/L.

A continuación, mostramos todos los valores medidos en cuanto al N-amoniaco.



Gráfica 6.32. Variación de la eficiencia de N-amoniaco y concentraciones afluente y efluente por semana.

Como era de esperarse, en los escenarios I y II las eficiencias son muy bajas, alcanzando una eficiencia máxima de remoción de N-NH_4^+ de 4.76%, y eficiencias negativas mínimas tanto en el escenario I y II de -78.57% y -68.75% respectivamente. En el escenario III se mejoró la eficiencia de remoción de N-NH_4^+ , pero aún se registraron valores bajos, con una mínima 8.33% y una máxima de 47.06%.

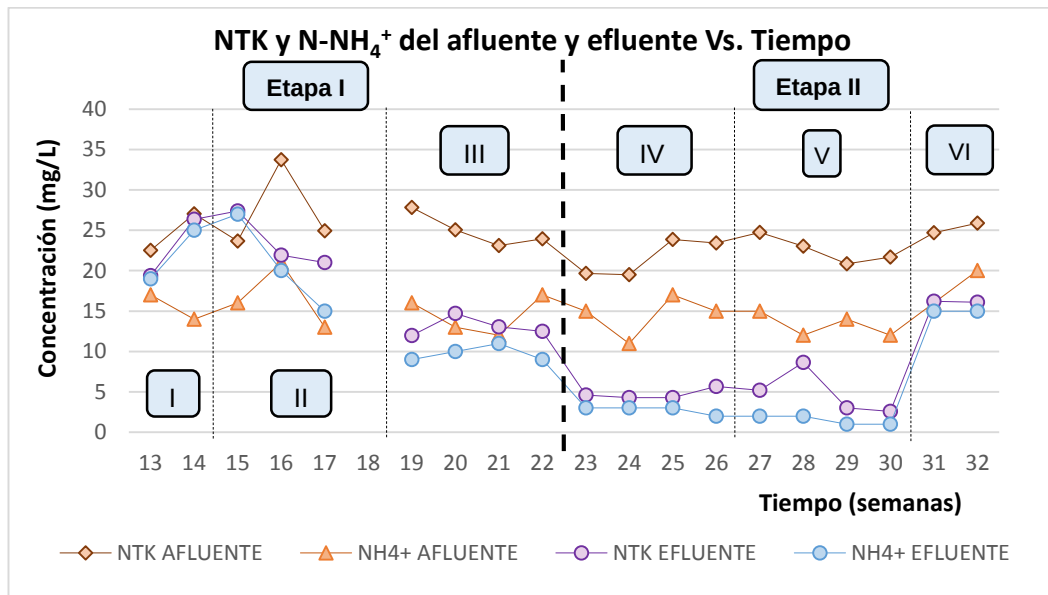
En el escenario IV y V las eficiencias fueron más estables, presentando poca variación, se alcanzó una máxima de 92.86% en la semana 29 y una mínima de 72.73% en la semana 24. En el escenario VI se volvió a registrar una caída de la eficiencia de remoción de N-NH_4^+ registrándose una máxima de 25.00% y una mínima de 6.25%.

La concentración media de N-NH_4^+ afluente que ingresó al reactor fue de 15.05 ± 2.61 mg/L, registrándose un máximo de 21.00 mg/L en la semana 16 y un mínimo de 11.00 mg/L en la semana 24.

La concentración de N-NH_4^+ en el efluente de los escenarios I y II es alta, registrándose un valor mínimo de 15.00 mg/L; mientras que en el escenario III la concentración de N-NH_4^+ en el efluente no disminuye de 9.00 mg/L, en los escenarios IV y V no se supera los 3.00 mg/L y

en el escenario VI vuelve a incrementarse, registrándose un mínimo de 15.00 mg/L.

A continuación, mostramos la variabilidad del NTK y N-NH_4^+ en el afluente y efluente durante todos los escenarios evaluados.



Gráfica 6.33. Variación de las concentraciones del NTK y N-NH_4^+ en el afluente y efluente durante los 6 escenarios evaluados.

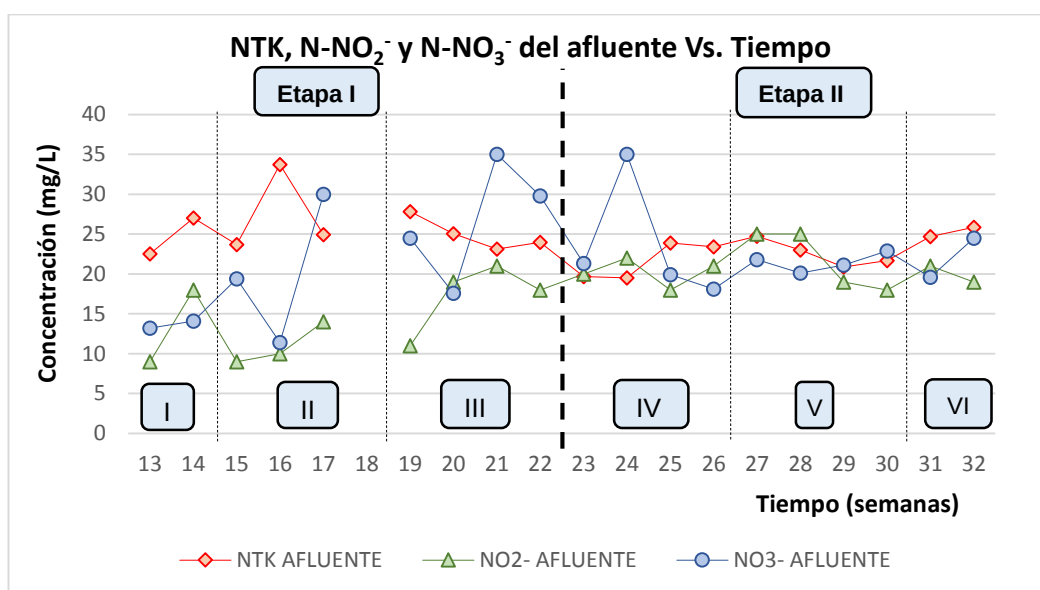
Como puede ser observado en la gráfica 6.33, en los escenarios I, II y VI las concentraciones de NTK y N-NH_4^+ en el efluente tienen valores muy cercanos, lo cual indica que la concentración nitrógeno orgánico en el efluente tuvo concentraciones muy bajas, alrededor de 1.05 mg/L. Esto fue recurrente en todos los escenarios que operaron con fracciones aireadas bajas (menores a 0.33), para un TRH en 8 h y 12 h.

En los escenarios III, IV y V se registró una concentración de N-orgánico alrededor de 2.88 mg/L, mostrando que fracciones aireadas entre 0.5 y 0.67 evitan que se generen un exceso de zonas anaerobias que fomenten la transformación de N-orgánico a N-amoniaco.

En el afluente se registró una concentración media de N-orgánico de 9.11 ± 2.53 mg/L, evidenciando de esta manera que hubo una eficiencia de remoción de alrededor de 68%.

Además, se observa que los escenarios III, IV, V y VI presentaron efluentes con concentraciones mucho más estables que los demás escenarios, cabe mencionar que en el escenario III se registró valores de concentraciones de NTK y N-NH_4^+ por encima de los escenarios IV y V, pero en el escenario VI se registró valores todavía mayores los registrados en el escenario III.

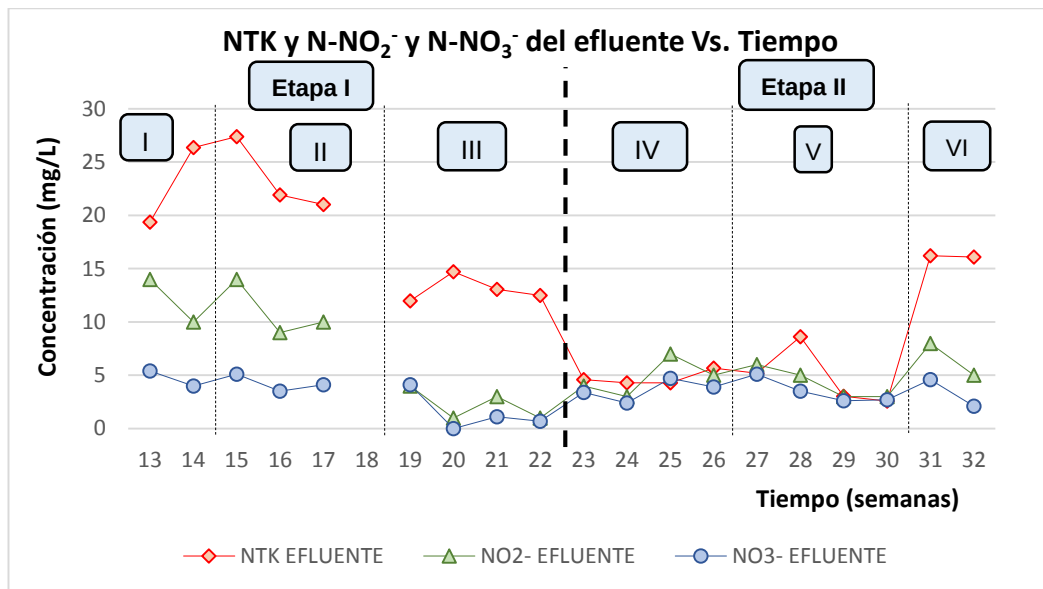
Ahora veremos la variación de las concentraciones de N-NO_2^- y N-NO_3^- en el afluente y efluente a lo largo de investigación, pero en gráficos separados para una mejor visualización.



Gráfica 6.34. Variación de las concentraciones del NTK, N-NO_2^- y N-NO_3^- en el afluente por semana.

En el afluente, las concentraciones de nitritos y nitratos fueron muy variables, registrándose una concentración media de N-NO_2^- y N-NO_3^- iguales a 17.74 ± 4.80 mg/L y 22.07 ± 6.43 mg/L respectivamente, lo cual es muy inusual en aguas residuales domésticas reales.

La concentración máxima de nitritos en el afluente fue de 25.00 mg/L y se registró una mínima de 9.00 mg/L, en el caso de nitratos se registró una concentración máxima de 35.00 mg/L y una mínima de 11.40 mg/L durante el periodo en que se realizó la investigación.



Gráfica 6.35. Variación de las concentraciones del NTK, N-NO_2^- y N-NO_3^- en el efluente por semana.

En los escenarios I y II las concentraciones de NTK, N-NO_2^- y N-NO_3^- en el efluente guardan cierta separación, diferenciándose claramente cada uno de ellos, es decir cada uno de los 3 parámetros mencionados presentan concentraciones medias que difieren uno de otro. Por otro lado, en el escenario III las concentraciones de N-NO_2^- y N-NO_3^- son bajas y muy cercanas entre estas, todas por debajo de 5 mg/L, pero las concentraciones de NTK todavía se mantuvieron altas, por encima de 10 mg/L.

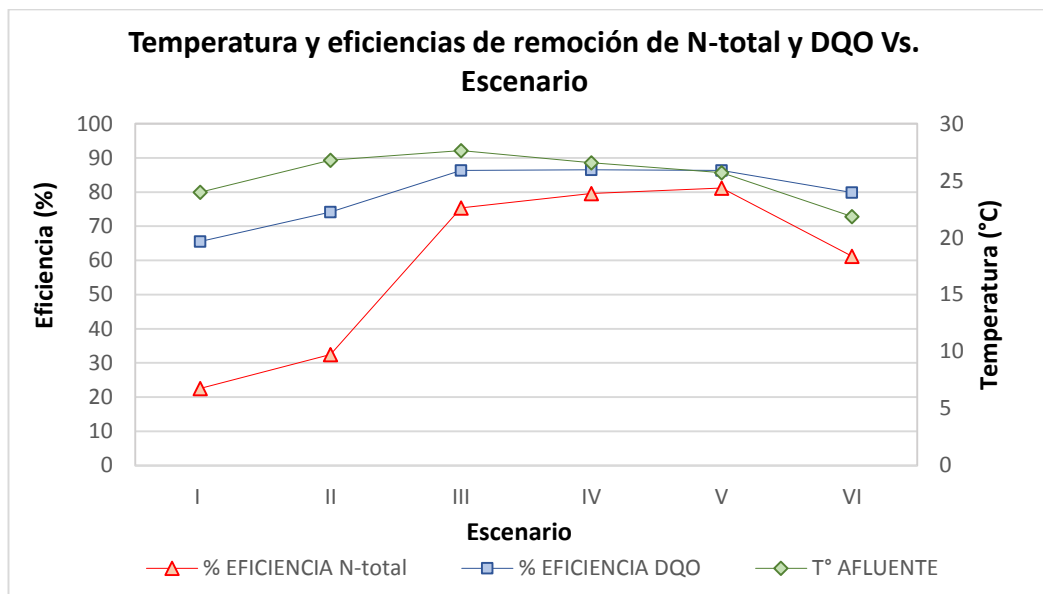
En el escenario IV y V las concentraciones de NTK, N-NO_2^- y N-NO_3^- se superponen entre ellas, oscilando todas alrededor de 5 mg/L, y en el escenario VI vuelve a incrementarse la concentración de NTK, registrándose valores por encima de 15 mg/L, mientras que las concentraciones de N-NO_3^- se mantienen relativamente estables y

menores a 5 mg/L y las concentraciones de N-NO_2^- sufren un ligero incremento tal como se puede visualizar.

En el gráfico 6.35 se observa claramente que los escenarios IV y V son los que presentan una mejor nitrificación y desnitrificación, consecuentemente presentan un efluente mucho más estable en cuanto a las concentraciones de NTK, N-NO_2^- y N-NO_3^- que los otros escenarios.

6.7.4. RELACIÓN DE TEMPERATURA Y EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE N-TOTAL Y DQO.

En este ítem veremos la relación que existe entre la temperatura y la eficiencia de remoción de N-total, y también la relación de esta última con la eficiencia de remoción de DQO.



Gráfica 6.36. Relación de la temperatura, la eficiencia de remoción de N-total y la eficiencia de remoción de DQO.

Del gráfico se observa que la temperatura media de operación del escenario II, III, IV y V presentaron muy poca variación, alrededor de 2 °C como máximo, lo cual no influye en gran medida en la tasa específica máxima de crecimiento de los organismos nitrificantes. Ekama & Wentzel (2017) sostienen que por cada 6°C que disminuye

la temperatura, el valor de la tasa específica máxima de crecimiento de los organismos nitrificantes se reduce a la mitad, lo que significa que la edad de lodos mínima para nitrificación se duplica. Sin embargo, se observa que la eficiencia de remoción de N-total del escenario II es menos del 50% de la eficiencia del escenario III, lo que nos indica que el incremento en la fracción aireada en el escenario III influye en mayor medida que la ligera variación de las tasas específicas máximas de crecimiento entre dichos escenarios.

Por otro lado, la diferencia de temperatura entre el escenario I y III es aproximadamente de 3.7°C , lo que cual significa que la tasa específica máxima de crecimiento de los organismos nitrificantes en el escenario III es aproximadamente 1.5 veces la tasa específica máxima de crecimiento de microorganismos del escenario I, esto ha podido repercutir de alguna manera en la baja eficiencia de remoción de N-total del escenario I.

La diferencia de temperatura entre el escenario III y VI fue de 6°C aproximadamente, lo que significa que hubo una relación de 2 a 1 en cuanto a las tasas específicas máximas de crecimiento de organismos nitrificantes del escenario III respecto del VI, lo que implica que posiblemente la caída de la eficiencia de remoción de N-total en el escenario VI se haya debido en parte a la disminución de la tasa específicas máximas de crecimiento de organismos nitrificantes.

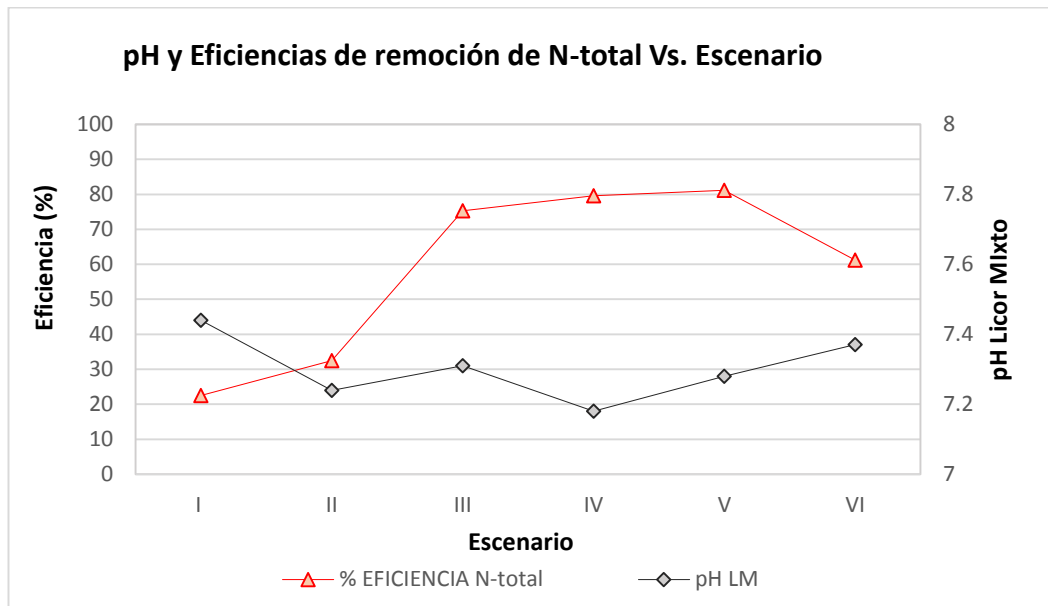
La eficiencia de remoción e DQO guardó una tendencia de comportamiento similar a la eficiencia de remoción de N-total, es decir, cuando la eficiencia de remoción de N-total se incrementó al incrementar la fracción aireada en la etapa 1 también se incrementó la eficiencia de remoción DQO, en la etapa 2, al mantener la misma fracción aireada en el escenario IV que en el III la eficiencia de remoción de N-total se incrementó ligeramente al disminuir el caudal afluente, pero la eficiencia de remoción de DQO se mantuvo prácticamente constante; en el escenario V la eficiencia de remoción

de DQO se siguió manteniendo constante mientras que la eficiencia de remoción de N-total se incrementó ligeramente pese a que la fracción aireada se disminuyó con respecto al escenario IV; se creyó conveniente seguir disminuyendo la fracción aireada para ver si se podía mejorar la eficiencia de remoción de N-total en el escenario VI siempre que no afectara a la eficiencia de remoción de DQO, sin embargo, se registró una caída de la eficiencia de remoción de ambos parámetros, más brusca en el caso del N-total.

Del análisis se pudo ver que la eficiencia de remoción de DQO es mucho más estable que la eficiencia de remoción de N-total, además, la eficiencia de remoción de DQO se mantuvo por encima del 65% a pesar de las bajas fracciones de aireación aplicadas en los escenarios I, II y VI, y la disminución del caudal afluente en la etapa 2 no afectó a la eficiencia de remoción de DQO tal como se pudo comparar entre el escenario III y IV, que mantienen la misma fracción aireada; en resumen, para esta investigación, fracciones aireadas por encima de 0.33 y menores a 0.67 no afectaron significativamente la eficiencia de remoción de DQO, lo que significa que no es necesario una aireación continua para lograr eficiencias de remoción de DQO alrededor de 85%, y además se tienen las ventajas de que al aplicar la aireación intermitente se logra remover N-total y una menor demanda de oxígeno, lo que se traduce en ahorro de energía.

6.7.5. RELACIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE N-TOTAL Y PH.

En este ítem veremos el rango de pH al que se operaron los diferentes escenarios, y la eficiencia de remoción de N-total.



Gráfica 6.37. Relación de la eficiencia de remoción de N-total y el pH en el licor mixto.

Se observa que la variación media de pH se mantuvo en el rango de 7.1 a 7.5, el cual se encuentra dentro del rango óptimo. Ekama & Wentzel (2017) sostienen que las tasas óptimas de nitrificación se encuentran entre $7.0 < \text{pH} < 8.5$, con una disminución abrupta fuera de ese rango. De manera que el pH en el que operaron los microorganismos en esta investigación fue el adecuado, mostrándose una vez más que la fracción aireada aplicada a cada escenario fue la que influyó en mayor medida en la variación de eficiencia de remoción de N-total.

De la ecuación general de la nitrificación, que indica que en el proceso de nitrificación se libera protones (H^+), lo cual disminuye la alcalinidad del licor mixto, por cada 1 mg N-NH_4^+ que se nitrifica se consumen 7.14 mg de alcalinidad como CaCO_3 , basados en el equilibrio químico del carbonato (Loewenthal & Marais, 1977), lo que al parecer no influye en esta investigación, debido a que el pH afluente se incrementa ligeramente en el licor mixto y todavía un poco más en el efluente, esto pudo deberse a las altas concentraciones de alcalinidad como CaCO_3 en el afluente, pero este parámetro no se pudo medir, sin embargo, existen antecedentes en los que también se trabajó con el agua

residual pre-tratada del CITRAR, por ejemplo tenemos la investigación de Paiz (2016), en la que se registró una alcalinidad bicarbonática media alrededor de 270 mg/L.

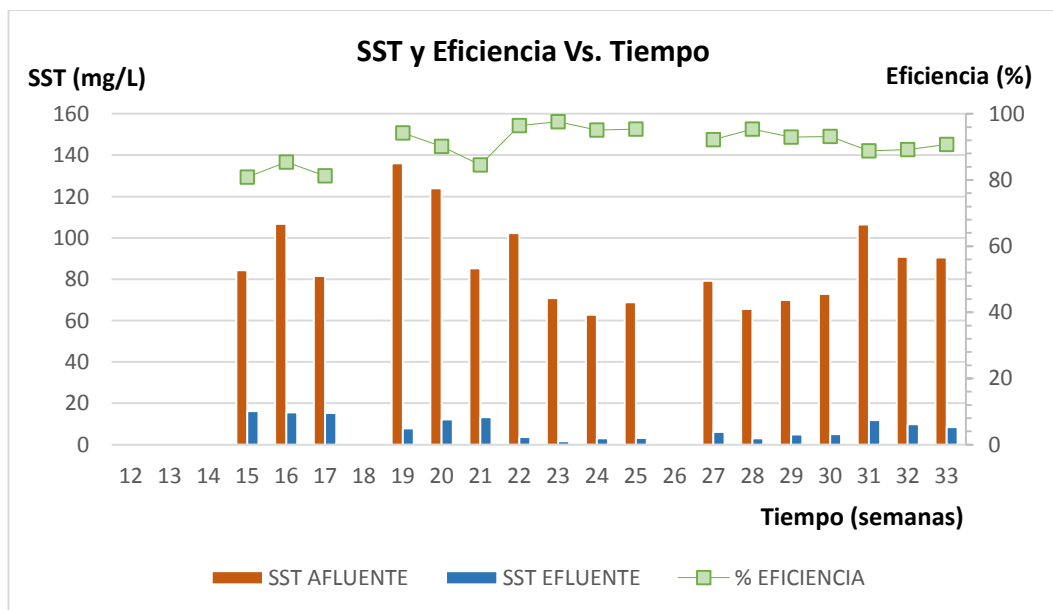
6.8. SÓLIDOS.

En este ítem se verán los valores registrados en cuanto a SST y SSV en el afluente, efluente y licor mixto durante los escenarios evaluados.

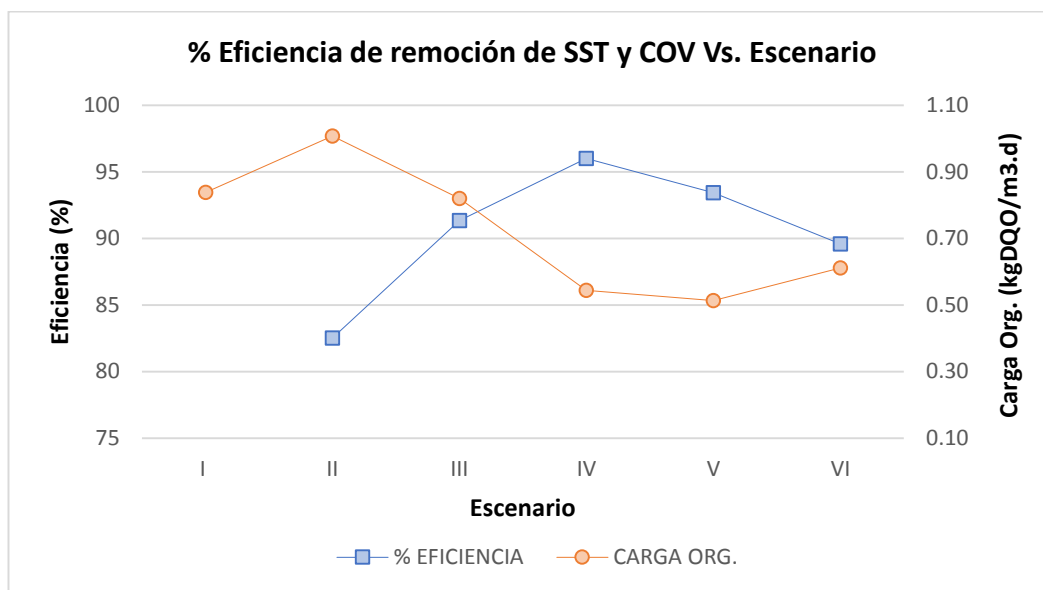
6.8.1. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

De los valores de SST semanales registrados para el afluente se obtuvo valor mínimo de 62.85 mg/L y un máximo de 136.00 mg/L durante el periodo de evaluación. Siendo el valor medio de las 17 semanas evaluadas igual a 88.12 ± 20.30 mg/L.

Para el caso del efluente mencionaremos los valores medios por escenario, siendo estos de 15.67 ± 0.35 mg/L, 9.21 ± 3.82 mg/L, 2.67 ± 0.68 mg/L, 4.77 ± 1.15 mg/L y 10.03 ± 1.44 mg/L para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente.



Gráfica 6.38. Concentración y eficiencia de remoción de SST en el afluente y efluente por semana.



Gráfica 6.39. COV y eficiencia de remoción de SST por escenario.

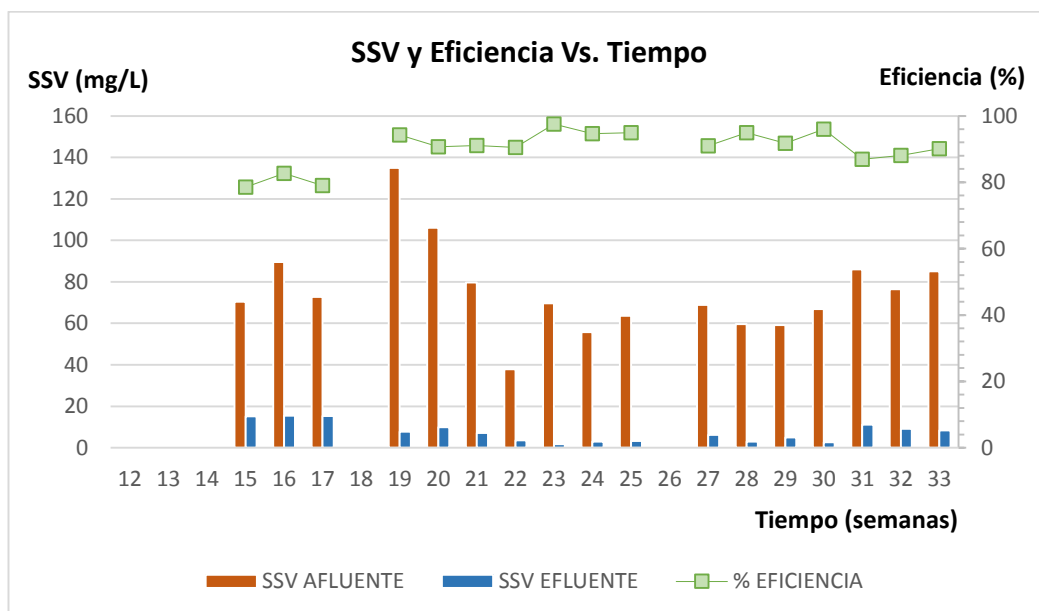
Se observa que las eficiencias variaron según el escenario, siendo estos valores de $82.51 \pm 2.04\%$, $91.35 \pm 4.56\%$, $96.01 \pm 1.13\%$, $93.44 \pm 1.21\%$ y $89.58 \pm 0.82\%$ para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente, para el caso de la remoción de SST el escenario IV fue el que alcanzó la mayor eficiencia.

De la gráfica 6.38 se observa que, a excepción del escenario II, todos los demás superan o son muy cercanos al 90% de eficiencia. Lo cual nos indica que cuanto mayor es la fracción aireada en un reactor de lecho fijo, mayor es la eficiencia de remoción de SST y se ve reflejado en la calidad del efluente. Además, para escenarios con la misma fracción aireada, la disminución de COV influencia de manera positiva la eficiencia de remoción de SST, tal como se observa entre el escenario III y IV.

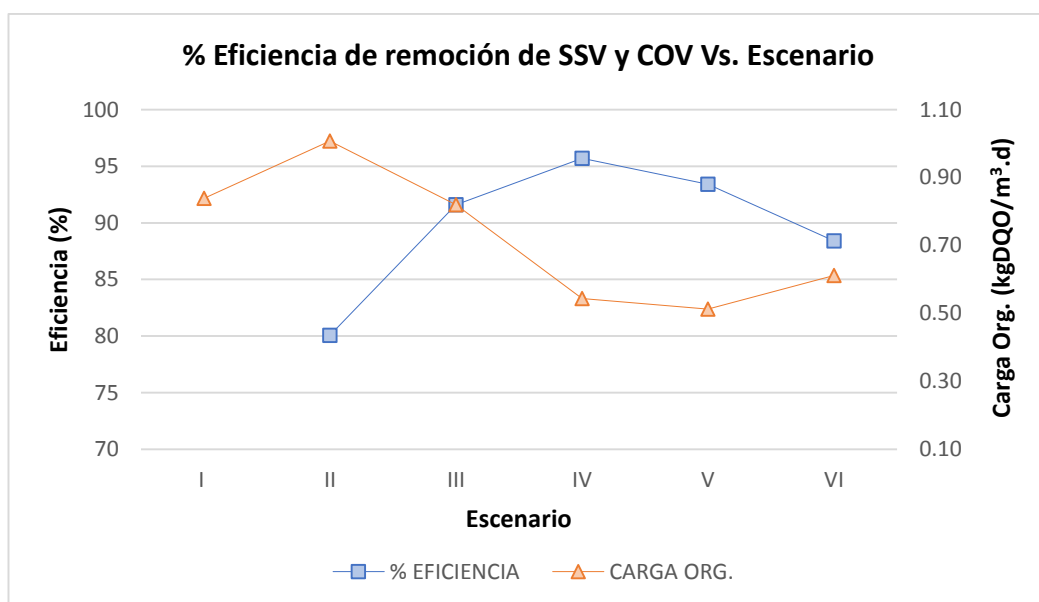
6.8.2. SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES

De los valores de SSV semanales registrados para el afluente se obtuvo valor mínimo de 37.78 mg/L y un máximo de 135.00 mg/L durante el periodo de evaluación. Siendo el valor medio de las 17 semanas evaluadas igual a 75.40 ± 21.07 mg/L.

Y para el efluente se registraron valores de 15.30 ± 0.15 mg/L, 7.10 ± 2.26 mg/L, 2.63 ± 0.66 mg/L, 4.20 ± 1.43 mg/L y 9.57 ± 1.19 mg/L para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente.



Gráfica 6.40. Concentración y eficiencia de remoción de SSV en el afluente y efluente por semana.



Gráfica 6.41. COV y eficiencia de remoción de SSV por escenario.

En cuanto a la eficiencia de remoción de SSV se alcanzó valores de $82.51 \pm 2.04\%$, $91.35 \pm 4.56\%$, $96.01 \pm 1.13\%$, $93.44 \pm 1.21\%$ y $89.58 \pm 0.82\%$ para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente, siendo el escenario IV el que alcanzó la mayor eficiencia.

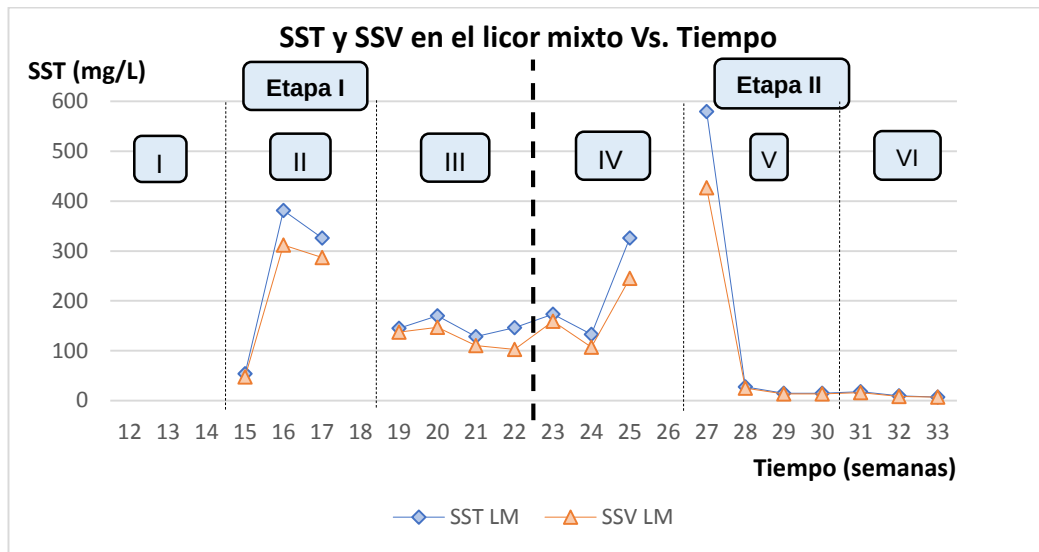
Se observa que el comportamiento es muy similar al de los SST, además, en la gráfica 6.40 se visualiza que la pérdida de biomasa en el efluente fue baja en los escenarios VI y V, lo cual coincide con que en dichos escenarios se alcanzó las mayores eficiencias en cuanto a remoción de DQO, DBO_5 y N-total.

6.8.3. BIOMASA EN EL LICOR MIXTO Y EN EL MEDIO DE ADHERENCIA.

En este ítem veremos la concentración de sólidos en suspensión, como SST y SSV en el licor mixto, y los adheridos al medio fijo de soporte. Cabe mencionar que la concentración de SST y SSV, mostradas en la gráfica 6.42 y 6.43, solo pertenecen a la porción que no está adherida al medio fijo, es decir pertenecen a los flocs suspendidos en el licor mixto, de manera independiente se determinó la concentración de sólidos adheridos, pero esta determinación se hizo al final de la investigación, por lo que no representa necesariamente la masa de lodos de cada escenario, sin embargo, nos brinda información de la masa de biopelícula adherida en el medio fijo dentro del volumen del reactor.

De la gráfica 6.42 y 6.43 se observa que los SST y SSV conservan la misma tendencia, además no pasan desapercibidos los valores picos que se visualizan en las semanas 16, 17, 25 y 27, los cuales pueden deberse a un mayor desprendimiento de la biomasa adherida dentro del tanque de aireación.

Por otro lado, entre la semana 19 y 24 se presenta una concentración de SST y SSV relativamente estable, lo que se observa también entre la semana 28 y 33 con una ligera tendencia a la disminución.



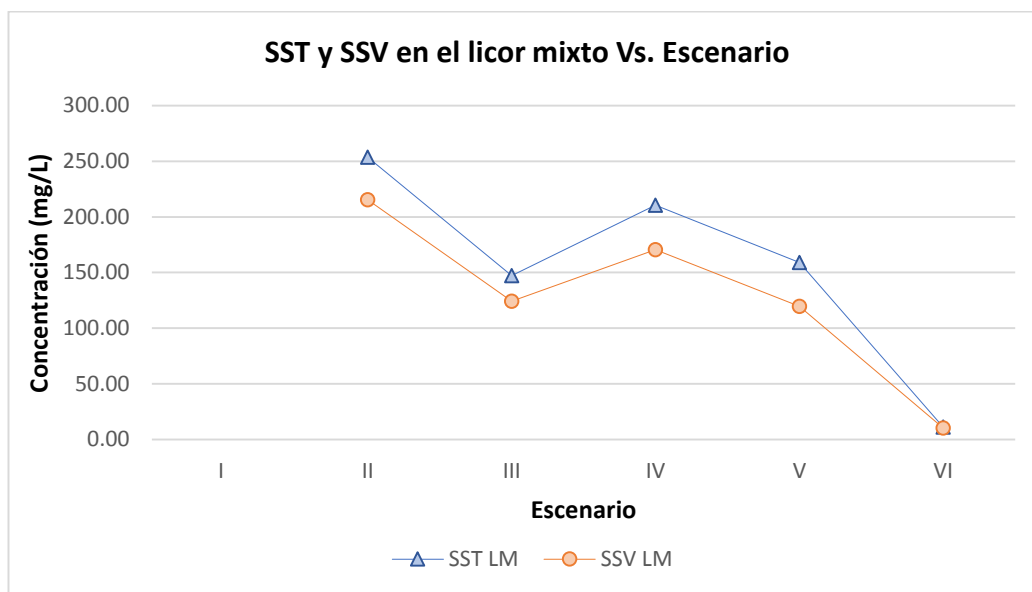
Gráfica 6.42. SST y SSV en el licor mixto durante 5 escenarios evaluados.

Las concentraciones medias por escenario de SST en el licor mixto son de 253.53 ± 143.15 mg/L, 147.18 ± 14.97 mg/L, 210.60 ± 83.14 mg/L, 159.17 ± 243.03 mg/L y 11.28 ± 4.61 mg/L para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente.

En el caso de los SSV en el licor mixto se registraron valores medios de 215.40 ± 119.37 mg/L, 124.29 ± 18.30 mg/L, 170.61 ± 56.83 mg/L, 119.72 ± 177.47 mg/L y 10.26 ± 4.01 mg/L para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente.

Se observa que cuanto menor es la concentración de SST, los SSV convergen hacia los valores de los SST, hasta prácticamente tener valores iguales en algunas mediciones, esto debido a que los sólidos suspendidos inorgánicos (sólidos fijos) del afluente son retenidos en mayor proporción por adsorción, en la biomasa adherida del reactor.

En la gráfica 6.43 se observa que existe una clara tendencia a la disminución en la concentración tanto de SST y SSV, sin embargo, la variabilidad de la biomasa en suspensión no tiene mucha influencia porque solamente representa un porcentaje muy bajo respecto de la biomasa adherida, alrededor de 7% como SST.



Gráfica 6.43. SST y SSV promedio por escenario en el licor mixto.

Para la determinación de la biomasa adherida en el medio se soportó fijo se utilizó la metodología del “Hidróxido de Sodio”, el cual por el principio de presencia de NaOH a elevada temperatura promueve la lisis de bacterias y consecuentemente permite la remoción de la biomasa adherida al medio (Cammarota, 1998) citado por (Minegatti, 2008 p. 58), en el anexo N° 4 se muestra a detalle la metodología del hidróxido de sodio.

Después de seguir el procedimiento establecido en la metodología se obtuvo una concentración media de **SST y SSV** iguales a **2286.65±123.89 mg/L y 1511.50±122.95 mg/L** respectivamente y una relación de SSV/SST de 0.66, lo cual indica que el 34% del lodo adherido al medio fijo estuvo compuesto por sólidos suspendidos inorgánicos (SSI), retenidos por adsorción. Para la determinación de dichas concentraciones se calculó la masa total de los sólidos adheridos al medio y se dividió entre el volumen útil (81.20 L) del tanque de aireación.

Es importante recalcar que no se presenta ningún gráfico para el caso de la biomasa adherida, porque solo se hizo una medición puntual y al finalizar la evaluación del escenario VI, dicha muestra se hizo extrayendo 6 columnas de hebras de las 40 implementadas.

Como algo adicional se determinó también la masa de sólidos acumulados en el decantador secundario, para la determinación se tuvo que cortar el afluente, luego se vació todo el volumen del decantador secundario (volumen de líquido clarificado + volumen de lodo decantado) y se mezcló para tomar una muestra homogénea, seguidamente se procedió a hacer los análisis respectivos y se obtuvo los valores mostrados en la tabla 6.13.

Tabla 6.13: Valores de sólidos registrados en el decantador secundario de 19.86 L.

Escenario	Fecha	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SS (mL/L/h)
IV	22/03/2018	516.00	389.00	20.20
V	05/04/2018	732.00	495.00	
	12/04/2018	97.33	77.33	1.40
	19/04/2018	85.50	67.00	
	26/04/2018	92.00	74.50	1.40
VI	17/05/2018	133.55	111.18	
	24/05/2018	121.71	98.68	0.70
	31/05/2018	97.50	85.00	1.10

Fuente: Elaboración propia.

Se debe mencionar que el lodo extraído del decantador para realizar las pruebas respectivas, es el lodo que se acumuló durante 4 días, es decir que después del mantenimiento (vaciado y limpieza del decantador) se operó por cuatro días, mientras se acumulaba el lodo, luego se procedía a vaciar nuevamente el decantador para la determinación de sólidos.

Considerar también que no hubo recirculación de biomasa debido a que el volumen de lodo acumulado diariamente en el decantador secundario era muy bajo.

Visualmente las características del lodo variaron en cada escenario, mostrándose un lodo marrón cuando se operó con una fracción aireada mayor a 0.5, y un lodo marrón blanquecino cuando las fracciones aireadas fueron pequeñas, ver el ítem E del anexo 10.5.

6.9. DEL CUMPLIMIENTO DEL MARCO LEGAL

Una vez evaluados los 6 escenarios de operación en la presente investigación, se procedió a compararlos con los valores establecidos en el marco legal vigente de nuestro país. (Ver tabla 10.1 y tabla 10.2 de anexos N° 1).

6.9.1. CON RESPECTO A LOS LMP.

De acuerdo con los límites máximos permisibles para efluentes de PTAR, establecido en el D.S. N° 003-2010-MINAM, y los resultados obtenidos durante los 6 escenarios evaluados se realizó el contraste para verificar su cumplimiento, sin embargo, los parámetros de aceites y grasas y coliformes termotolerantes serán excluidos de dicha comparación porque no se han medido.

- La temperatura en el efluente del reactor alcanzó un valor medio de $23.72 \pm 1.53^{\circ}\text{C}$, $26.41 \pm 1.21^{\circ}\text{C}$, $27.09 \pm 0.87^{\circ}\text{C}$, $25.84 \pm 1.20^{\circ}\text{C}$, $24.92 \pm 1.04^{\circ}\text{C}$ y $21.30 \pm 1.63^{\circ}\text{C}$ para los escenarios I, II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores promedio de temperatura del efluente en los 6 escenarios evaluados están por debajo de 35°C , que es el valor establecido en los LMP's para este parámetro.
- El pH en el efluente del reactor alcanzó un valor medio de 7.52 ± 0.11 , 7.40 ± 0.14 , 7.41 ± 0.12 , 7.32 ± 0.13 , 7.36 ± 0.08 y 7.47 ± 0.11 para los escenarios I, II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores medios de pH del efluente en los 6 escenarios evaluados están dentro del rango de 6.5 a 8.5, que es el rango establecido en los LMP's para este parámetro.
- La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en el efluente del reactor alcanzó un valor medio de 46.59 ± 10.39 mg/L, 31.77 ± 17.54 mg/L, 15.98 ± 8.09 mg/L, 11.59 ± 4.72 mg/L y 20.62 ± 5.13 mg/L para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores de DBO promedios del efluente en los 5 escenarios evaluados están por debajo de 100 mg/L, que es el valor establecido en los LMP's para este parámetro.

- La demanda química de oxígeno (DQO) en el efluente del reactor alcanzó un valor medio de 106.67 ± 27.18 mg/L, 91.67 ± 15.80 mg/L, 41.25 ± 15.24 mg/L, 34.25 ± 6.02 mg/L, 34.00 ± 5.92 mg/L y 60.33 ± 13.52 mg/L para los escenarios I, II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores de DQO promedios del efluente en los 6 escenarios evaluados están por debajo de 200 mg/L, que es el valor establecido en los LMP's para este parámetro.
- Los sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente del reactor alcanzaron un valor medio de 15.67 ± 0.35 mg/L, 9.21 ± 3.82 mg/L, 2.67 ± 0.68 mg/L, 4.77 ± 1.15 mg/L y 10.03 ± 1.44 mg/L para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores de los SST medios del efluente en los 5 escenarios evaluados están por debajo de 150 mg/L, que es el valor establecido en los LMP's para este parámetro.
- El D.S. N° 003-2010-MINAM, no establece LMP's para los parámetros tales como: Nitrógeno total, Nitrógeno total kjeldahl, Nitrógeno amoniacal, nitritos ni nitratos, por lo que el contraste para dichos parámetros se hizo con respecto a los ECA.

6.9.2. CON RESPECTO A LOS ECA.

De acuerdo con la categoría 4, conservación del ambiente acuático, de los estándares de calidad ambiental, establecido en el D.S. N° 004-2017-MINAM, y los resultados obtenidos durante los 6 escenarios evaluados se realizó el contraste para verificar su cumplimiento, sin embargo, dicho contraste no es el adecuado, porque los valores de los parámetros del efluente del reactor no representan los valores de los parámetros después de la longitud de la zona de mezcla; o en su defecto se estará asumiendo que la descarga se realiza en una quebrada seca de categoría 4, simulando de esa manera las condiciones más desfavorables.

- El pH en el efluente del reactor alcanzó un valor medio de 7.52 ± 0.11 , 7.40 ± 0.14 , 7.41 ± 0.12 , 7.32 ± 0.13 , 7.36 ± 0.08 y 7.47 ± 0.11 para los escenarios I, II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores medios de pH del efluente en los 6 escenarios evaluados están dentro del rango de 6.5 a 9.0, que es el rango establecido para las subcategorías E1 y E2.
- El oxígeno disuelto en el efluente del reactor alcanzó un valor medio de 1.21 ± 1.69 mg/L, 1.54 ± 1.72 mg/L, 3.38 ± 1.30 mg/L, 4.47 ± 0.73 mg/L, 4.71 ± 0.85 mg/L y 4.12 ± 0.70 mg/L para los escenarios I, II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores medios de O.D. del efluente en los 6 escenarios evaluados no cumplen con los ECA porque están por debajo de 5 mg/L, que es el valor mínimo establecido para las subcategorías E1 y E2.
- La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en el efluente del reactor alcanzó un valor medio de 46.59 ± 10.39 mg/L, 31.77 ± 17.54 mg/L, 15.98 ± 8.09 mg/L, 11.59 ± 4.72 mg/L y 20.62 ± 5.13 mg/L para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores promedio de DBO del efluente en los 5 escenarios evaluados no cumplen con la normativa, porque están por encima del valor máximo establecido en los ECA, 5 mg/L y 10 mg/L para las subcategorías E1 y E2 respectivamente.
- Los sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente del reactor alcanzaron un valor medio de 15.67 ± 0.35 mg/L, 9.21 ± 3.82 mg/L, 2.67 ± 0.68 mg/L, 4.77 ± 1.15 mg/L y 10.03 ± 1.44 mg/L para los escenarios II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores promedio de SST del efluente en los 5 escenarios evaluados cumplen con la normativa, porque están por debajo del valor máximo establecido en los ECA, 25 mg/L y 100 mg/L para las subcategorías E1 y E2 respectivamente.
- Los nitratos (NO_3^-) en el efluente del reactor alcanzaron un valor medio de 4.70 ± 0.64 mg/L, 4.23 ± 0.66 mg/L, 1.48 ± 1.57 mg/L, 3.60 ± 0.83 mg/L, 3.48 ± 1.00 mg/L y 3.35 ± 1.25 mg/L para los escenarios I, II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores promedio de nitratos del efluente en los 6 escenarios evaluados cumplen con la

normativa, porque están por debajo del valor máximo establecido en los ECA, 13 mg/L para las subcategorías E1 y E2.

- Los valores de amoníaco total (NH_3) en el efluente del reactor alcanzaron un valor medio de 22.00 ± 3.74 mg/L, 20.67 ± 6.28 mg/L, 9.75 ± 0.83 mg/L, 2.75 ± 0.43 mg/L, 1.50 ± 0.50 mg/L y 15.00 ± 0.00 mg/L para los escenarios I, II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, tomando en cuenta la Tabla N° 1, Estándar de calidad de amoníaco total en función de pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce, se verificó que el valor promedio de amoníaco total para los escenarios I, V y VI no cumplen con la normativa, puesto que superan el valor máximo de 1.08 mg/L, establecido en la tabla en mención, sin embargo, el escenario V es el que presenta mejor calidad del efluente; para los escenarios II, III y IV se verifica que también se supera el valor máximo establecido de 0.767 mg/L de acuerdo los valores de pH y temperatura para dichos escenarios; se debe tener en cuenta que este contraste se realiza con las subcategorías E1 y E2 de la categoría 4 de los ECA.
- Los valores de nitrógeno total en el efluente del reactor alcanzaron un valor medio de 39.57 ± 0.80 mg/L, 38.67 ± 5.53 mg/L, 16.78 ± 2.17 mg/L, 13.07 ± 2.42 mg/L, 12.58 ± 4.14 mg/L y 26.00 ± 2.81 mg/L para los escenarios I, II, III, IV, V y VI respectivamente. Por lo tanto, se verificó que los valores promedio de nitrógeno total del efluente en los 6 escenarios evaluados no cumplen con la normativa, porque superan ampliamente el valor máximo establecido en los ECA, 0.315 mg/L para las subcategorías E1, lagos y lagunas.

7. CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

- En la presente investigación se constató que la aireación intermitente influye positivamente en un sistema de lodos activados con medio de adherencia fijo, lográndose remover simultáneamente el nitrógeno total y materia orgánica carbonácea (DBO_5 y DQO) en un solo sistema, cuyas eficiencias más altas se alcanzaron en el escenario V, de 90 minutos de aireación y 90 minutos de mezclado, obteniéndose eficiencias de remoción de nitrógeno total, DBO_5 y DQO del $81.18 \pm 5.22\%$, $91.12 \pm 3.17\%$ y $86.37 \pm 1.31\%$ respectivamente.
- Para alcanzar eficiencias de remoción de DBO_5 altas en un sistema de lodos activados con medio de adherencia fijo no es necesaria una fracción aireada alta o la aplicación de aireación continua, ya que se ha demostrado experimentalmente que con un patrón de aireación y no aireación de 50/130 min y un TRH de 8.7 h se logró una eficiencia de remoción mínima de $75.44 \pm 6.49\%$, por otro lado, se logró alcanzar una eficiencia de remoción mínima de $87.75 \pm 1.78\%$ con un patrón de aireación y no aireación de 60/120 min y un TRH de 11.7 h.
- El sistema presentó elevadas eficiencias de remoción de DQO para los TRH's de 8.7 h y 11.7 h, presentándose valores de eficiencias de remoción muy parecidos, alrededor de 86%, cuando la fracción aireada es superior a 0.5.
- Con un TRH de 8.7 h y manteniendo un patrón de aireación y no aireación de 120/60 min se logró alcanzar una eficiencia de remoción de nitrógeno total de $75.34 \pm 4.55\%$, mientras que con un TRH de 11.7 h y manteniendo un patrón de aireación y no aireación de 90/90 min se alcanzó una eficiencia de $81.18 \pm 5.22\%$, los cuales representaron los escenarios de mayor eficiencia de remoción de nitrógeno total durante ambas etapas evaluadas, evidenciándose experimentalmente que los mejores resultados se obtienen para un TRH de 11.7 h y un patrón de aireación y no aireación de 90/90 min (Escenario V).
- Con un TRH de 8.7 h y patrones de aireación y no aireación de 40/140 min y 50/130 min se lograron eficiencias de remoción de nitrógeno total de

22.53±9.20% y 32.46±16.05% respectivamente, evidenciándose experimentalmente que fracciones aireadas muy pequeñas no son adecuadas para la remoción de nitrógeno total porque se generan condiciones que favorecen la conversión del nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal, consecuentemente se tendrán valores altos de nitrógeno total en el efluente.

- Con un TRH de 8.7 h se alcanzaron eficiencias de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) de 91.35±4.56% y 91.61±1.52% respectivamente, por otro lado, con un TRH de 11.7 h se alcanzó eficiencias de remoción de SST y SSV de 96.01±1.13% y 95.71±1.31% respectivamente, dichas eficiencias máximas para ambas etapas se lograron con un patrón de aireación y no aireación de 120/60 min, lo cual indica que para lograr eficiencias de remoción de SST y SSV por encima del 90% en este tipo de sistemas se requiere una fracción aireada de 0.67.
- Para lograr eficiencias de remoción de turbiedad por encima del 90% se requiere operar con fracciones aireadas por encima de 0.33, sin embargo, para asegurar también un buen desempeño en la remoción de los demás parámetros se recomienda operar con una fracción aireada de 0.5.
- A lo largo de toda la investigación los valores de pH resultaron ligeramente básicos con una tendencia al incremento de pH del efluente con respecto al afluente.
- La variación de temperatura dentro del rango de 21°C a 27°C, en el cual operó el sistema, no influenció significativamente en la remoción de nitrógeno total, DBO₅ ni DQO.
- Con fracciones aireadas pequeñas, es decir con patrones de aireación de 40/140 min, 50/130 min y 60/120 min, se manifiesta el desarrollo de algas que cubren la biopelícula, en el tercio superior del medio fijo, lo cual impide la transferencia del sustrato hacia las bacterias adheridas al medio fijo, alterando y disminuyendo de esta manera la eficiencia del sistema.

8. CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

En cada investigación que se realiza siempre hay algunas sugerencias que pueden enriquecer y contribuir al desarrollo de la línea de investigación del estudio, de tal forma que el estudio pueda completarse con las variables que no pudieron ser medidas o en caso de ser necesario, aplicar mejoras al diseño y operación de las unidades.

- Se recomienda evaluar el sistema con más patrones de aireación, preferiblemente con incrementos de 10 minutos en la fase aerobia, con la finalidad de obtener una mejor acotación en cuanto a la determinación del patrón de aireación óptimo.
- Además de los parámetros evaluados se recomienda hacer la medición de fósforo total, con la finalidad de determinar el parámetro que limita el desarrollo de las algas que causan la eutroficación y opcionalmente realizar mediciones de coliformes termotolerantes y aceites y grasas.
- Realizar el diseño de la tolva del decantador secundario con una adecuada geometría, con la finalidad de facilitar la recirculación.
- Realizar ensayos que permitan determinar la cinética de la nitrificación y desnitrificación.
- En cada escenario evaluado se recomienda realizar más perfiles de variación de O.D. con la finalidad de hacer una mejor diferenciación de la fase aerobia con respecto a la fase anóxica.
- En cuanto a la estructura del reactor, podemos recomendar que se cubran todos los elementos transparentes que están expuestos, como por ejemplo: el reactor de vidrio, las mangueras de ingreso del afluente, el sedimentador secundario, entre otros, con la finalidad de evitar el paso de la luz solar, que genera condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo de algas.
- Para realizar las mediciones de los parámetros objetivo, se debe tener en cuenta que los equipos e instrumentos deben estar calibrados, en caso contrario los resultados serán erróneos y no permitirán una buena interpretación de los resultados.

- Realizar más estudios que permitan conocer el comportamiento de otros tipos de medio de soporte, de modo que se encuentren alternativas más económicas que tengan un buen desempeño.
- Aumentar la escala del reactor para verificar su comportamiento en cuanto a la eficiencia de remoción simultánea de nitrógeno total y DQO.
- Para mejorar la mezcla en la fase anóxica, se deben mejorar las paletas del mezclador, para producir una mezcla más homogénea del licor mixto.

9. CAPÍTULO IX

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Ahn, Y.H. (2006). Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. *Process Biochemistry*, 41, 1709-1721.

Amorocho, E. y Sánchez, D. (2013). *Sistema de lodos activados para la reducción de nitrógeno amoniacal efluente de un sistema de estabilización por contacto*. Tesis de Pregrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.

APHA, AWWA, WEF (2012). *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater* (22nd ed.). Washington D.C.: APHA.

Cheng, J., Liu, B. (2001). Nitrification/denitrification in intermittent aeration process for swine wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 127, (8), 705-711.

Collí, J., Sugita, H., Yamaoka, M., Ruíz, H. (2002). Aireación Intermitente para la remoción biológica de nitrógeno en sistemas de tratamiento de aguas residuales de una sola etapa. En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Ed.), *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS*. Cancún, México: CEPIS.

Copithorn, R., Boltz, J., deBarbadillo, C., Dombrowski, P., Harrison, J., Hubbell, S., Husband, J., Jeyanayagam, S., Kaya, I., Koch, C., Krichen, D., Kulich, F., McQuarrie, J., Nerenberg, R., Phillips, H., Rippon, D., Rogalla, F., Schroeder, E., Sen, D., Snowling, S., Sprouse, G., Tabor, C., Tarallo, S., Venner, I., Wilson, T., Wuertz, S. (2010). *Biofilms Reactors – WEF Manual of Practice N° 35*. Alexandria, Virginia: Water Environment Federation® (WEF®).

Daniel. L.M.C. (2005). *Remoção de nitrogênio via nitrito em reator em batelada seqüencial contendo biomassa imobilizada e aeração intermitente*. Tesis de Doctorado. Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil.

Gebara, F. (1999). Activated sludge biofilm wastewater treatment system. *Water Research*, 33, (1) 230-238.

Gómez, Y. (2014). *Comparación del desempeño de dos configuraciones de lodos activados para la reducción de materia orgánica carbonácea y nitrógeno amoniacal total*. Tesis de Pregrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.

Lamego, L.G. (2008). *Tratamento de esgoto urbano em reator híbrido operado em bateladas seqüenciais (RHBS) submetido a variações de cargas*. Tesis de Posgrado en Ingeniería Ambiental. Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

López, C.M., Buitrón, G., García, H.A., Cervantes, F.J. (Eds). (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales – Principios, modelación y diseño*. London: IWA Publishing.

Mesa, L. y Ponce, L.A. (2004). *Diseño y evaluación de un reactor híbrido de biopelícula sumergida (Bio-Net) y comparación con un sistema convencional de los lodos activados, para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Tesis de Pregrado en Ingeniería Química. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Metcalf & Eddy (2003) *Wastewater Engineering – Treatment and Reuse* (4th ed.). New York: McGraw-Hill, Inc.

Minegatti, D.V. (2015). *Avaliação da remoção de nitrogênio via nitrificação e desnitrificação simultânea em um reator biológico com leito móvel (IFAS)*. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil.

Moura, R. (2014). *Remoção de matéria orgânica e nitrogênio de esgoto sanitário em reator de leito estruturado submetido à aeração intermitente e recirculação do efluente*. Tesis de Doctorado. Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil.

Muller, N. (1998). Implementing biofilm carriers into activated process-15 years of experience. *Water Science Technology*, 37, (9) 167-174.

Munch, E.V., Lant, P., Keller, J. (1996). Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors. *Water Research*, 30, (2), 277-284.

Orozco, A. (2005). *Bioingeniería de aguas residual: Teoría y diseño*. Bogotá: Acodal.

Paiz, L. (2012). *Determinación del tiempo de retención hidráulico óptimo en un reactor UASB con una altura del 46% al 54% (60-70 cm) de manto de lodos*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales – Edición Revisada*. España: Reverté, S.A.

Romero, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales – Teoría y principios de diseño* (Tercera ed.). Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Santos, V. (2007). *Utilização de reatores híbridos de fluxo contínuo e em bateladas seqüenciais para remoção conjunta de carbono e nitrogênio de esgoto urbano*. Tesis de Posgrado en Ingeniería Ambiental. Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Schmidt, I., Sliekers, O., Schmid, M., Bock, E., Fuerst, J., Kuenen, J.G., Jetten, M., Strous, M. (2003). New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. *FEMS Microbiology Reviews*, 27, 481-492.

Van Haandel, A. y Marais, G. (1999). *O comportamento do sistema de lodo activado: teoria e aplicações para projectos e operação*. Campina Grande: Epgraf.

Von Sperling, M. y Chernicharo, C.A.L. (2007). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. Department of Sanitary and Environmental Engineering. Federal University of Minas Gerais, Brazil. London: IWA Publishing.

Yoo, H., Ahn, K., Lee, H., Lee, K., Kwak, Y., Song, K. (1999). Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor. *Water Research*, 33, (1), 145-154.

Zhu, G.B., Peng, Y.Z., Wu, S., Wang, S., Xu, S. (2007). Simultaneous nitrification and denitrification in step feeding biological nitrogen removal process. *Journal of Environmental Sciences*, 19, 1043-1048.

10. CAPÍTULO X ANEXOS

10.1. ANEXO N° 1: MARCO LEGAL.

A) LEY GENERAL DE LA SALUD: LEY N° 28642

Artículo 96° y 104°.

Los residuos procedentes de establecimientos donde se manipulen sustancias o productos peligrosos, deben ser sometidos a tratamiento y disposición que señalan las normas correspondientes. Estos residuos no deben ser vertidos directamente a fuentes, cursos o reservorios de agua, bajo responsabilidad.

Toda persona natural o jurídica está impedida de efectuar descargas de desechos o sustancias contaminantes en el agua, aire, suelo, sin haber adoptado las precauciones de depuración en la forma que señalan las normas sanitarias y de protección del medio ambiente.

B) LEY GENERAL DEL AMBIENTE: LEY N° 28611

Artículo 29° De las normas transitorias de calidad ambiental de carácter especial.

La autoridad ambiental nacional en coordinación con sus autoridades competentes, pueden dictar las normas ambientales transitorias, de aplicación específica en zonas ambientalmente críticas o afectadas por desastres, con el propósito de contribuir a su recuperación o superar las situaciones de emergencia. Su establecimiento, no excluye la aprobación de otras normas, parámetros, guías o directrices, orientados a prevenir el deterioro ambiental, proteger la salud o la conservación de los recursos naturales y la diversidad biológica y no altera vigencia de los ECA y LMP que sean aplicables.

Artículo 31° Del estándar de calidad ambiental

El estándar de calidad ambiental-ECA, es la medida que establece el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias, parámetros físicos,

químicos, biológicos, presentes en el agua en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresado en máximos, mínimos o rangos. El ECA es obligatorio en el diseño de normas legales y políticas públicas.

Artículo 32° Del límite máximo permisible

El Límite Máximo Permisible - LMP, es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

El LMP guarda coherencia entre el nivel de protección ambiental establecido para una fuente determinada y los niveles generales que se establecen en los ECA. La implementación de estos instrumentos debe asegurar que no se exceda la capacidad de carga de los ecosistemas, de acuerdo con las normas sobre la materia.

Artículo 120° De la protección de la calidad de aguas

El estado, a través de las entidades señaladas en la ley, está a cargo de la protección de la calidad del recurso hídrico del país; promueve el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización, considerando como premisa la obtención de la calidad necesaria para su reusó, sin afectar la salud humana, el ambiente o las actividades en las que se reutilizarán.

Artículo 121° Del vertimiento de aguas residuales

El estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas domésticas, industriales o cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales

o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de aguas como cuerpo receptor, ni que se afecte la reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los estándares de calidad ambiental correspondientes y normas legales vigentes.

Artículo 122° Del tratamiento de residuos líquidos

Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a través de terceros debidamente autorizados a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia.

C) LEY DE RECURSOS HÍDRICOS: LEY N° 29338.

Artículo 73° De la clasificación de los cuerpos de agua

Los cuerpos de agua pueden ser clasificados por la Autoridad Nacional teniendo en cuenta la cantidad y calidad del agua, consideraciones hidrográficas, las necesidades de las poblaciones locales y otras razones técnicas que establezca.

Artículo 75° De la protección del agua

La Autoridad Nacional, con opinión del Consejo de Cuenca, debe velar por la protección del agua, que incluye la conservación y protección de sus fuentes, de los ecosistemas y de los bienes naturales asociados a ésta en el marco de la Ley y demás normas aplicables. Para dicho fin, puede coordinar con las instituciones públicas competentes y los diferentes usuarios. La Autoridad Nacional, a través del Consejo de Cuenca correspondiente, ejerce funciones de vigilancia y fiscalización con el fin de prevenir y combatir los efectos de la contaminación del mar, ríos y lagos en lo que le corresponda. Puede coordinar, para tal efecto, con los sectores

de la administración pública, los gobiernos regionales y los gobiernos locales.

El Estado reconoce como zonas ambientalmente vulnerables las cabeceras de cuenca donde se originan los cursos de agua de una red hidrográfica. La Autoridad Nacional, con opinión del Ministerio del Ambiente, puede declarar zonas intangibles en las que no se otorga ningún derecho para uso, disposición o vertimiento de agua. Asimismo, debe elaborar un Marco Metodológico de Criterios Técnicos para la Identificación, Delimitación y Zonificación de las Cabeceras de Cuenca de las Vertientes Hidrográficas del Pacífico, Atlántico y Lago Titicaca.

Artículo 79° Del vertimiento de agua residual

La Autoridad Nacional autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marítima sobre la base del cumplimiento de los ECA-Agua y los LMP. Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización. En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua, que puedan incluir tecnologías superiores, pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas. Corresponde a la autoridad sectorial competente la autorización y el control de las descargas de agua residual a los sistemas de drenaje urbano o alcantarillado.

**D) ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AGUA:
DECRETO SUPREMO N° 004-2017 MINAM.**

Artículo 3° De las Categorías de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua

Para la aplicación de los ECA para Agua se debe considerar las siguientes precisiones sobre sus categorías:

3.1 Categoría 1: Poblacional y recreacional

...

3.2 Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales

...

3.3 Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

...

3.4 Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

Entiéndase como aquellos cuerpos naturales de agua superficiales que forman parte de ecosistemas frágiles, áreas naturales protegidas y/o zonas de amortiguamiento, cuyas características requieren ser protegidas.

a) Subcategoría E1: Lagunas y lagos

Entiéndase como aquellos cuerpos naturales de agua lénticos, que no presentan corriente continua, incluyendo humedales.

b) Subcategoría E2: Ríos

Entiéndase como aquellos cuerpos naturales de agua lóticos, que se mueven continuamente en una misma dirección:

- Ríos de la costa y sierra

Entiéndase como aquellos ríos y sus afluentes, comprendidos en la vertiente hidrográfica del Pacífico y del Titicaca, y en la parte alta de la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, por encima de los 600 msnm.

- Ríos de la selva

Entiéndase como aquellos ríos y sus afluentes, comprendidos en la parte baja de la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, por debajo de los 600 msnm, incluyendo las zonas meándricas.

c) Subcategoría E3: Ecosistemas costeros y marinos

- Estuarios

Entiéndase como aquellas zonas donde el agua de mar ingresa en valles o cauces de ríos hasta el límite superior del nivel de marea. Esta clasificación incluye marismas y manglares.

- Marinos

Entiéndase como aquellas zonas del mar comprendidas desde la línea paralela de baja marea hasta el límite marítimo nacional.

Precísese que no se encuentran comprendidas dentro de las categorías señaladas, las aguas marinas con fines de potabilización, las aguas subterráneas, las aguas de origen minero - medicinal, aguas geotermales, aguas atmosféricas y las aguas residuales tratadas para reúso.

(Ver Tabla N° 10.1)

Artículo 5° De los Estándares de Calidad Ambiental para Agua como referente obligatorio

Los parámetros de los ECA para Agua que se aplican como referente obligatorio en el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, se determinan considerando las siguientes variables, según corresponda:

- a) Los parámetros asociados a los contaminantes que caracterizan el efluente del proyecto o la actividad productiva, extractiva o de servicios.
- b) Las condiciones naturales que caracterizan el estado de la calidad ambiental de las aguas superficiales que no han sido alteradas por causas antrópicas.
- c) Los niveles de fondo de los cuerpos naturales de agua; que proporcionan información acerca de las concentraciones de sustancias o agentes físicos, químicos o biológicos presentes en el agua y que pueden ser de origen natural o antrópico.
- d) El efecto de otras descargas en la zona, tomando en consideración los impactos ambientales acumulativos y sinérgicos que se presenten aguas arriba y aguas debajo de la descarga del efluente, y que influyan

en el estado actual de la calidad ambiental de los cuerpos naturales de agua donde se realiza la actividad.

- e) Otras características particulares de la actividad o el entorno que pueden influir en la calidad ambiental de los cuerpos naturales de agua.

La aplicación de los ECA para Agua como referente obligatorio está referida a los parámetros que se identificaron considerando las variables del numeral anterior, según corresponda sin incluir necesariamente todos los parámetros establecidos para la categoría o subcategoría correspondiente.

E) LÍMITES MÁXIMO PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PTAR DOMÉSTICA O MUNICIPALES: DECRETO SUPREMO N° 003-2010 MINAM.

Artículo 3 ° Del cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles de Efluentes de PTAR

3.1 Los LMP de efluentes de PTAR que se establecen en la presente norma entran en vigencia y son de cumplimiento obligatorio a partir del día siguiente de su publicación en el Diario Oficial El Peruano.

3.2 Los LMP aprobados mediante el presente Decreto Supremo, no serán de aplicación a las PTAR con tratamiento preliminar avanzado o tratamiento primario que cuenten con disposición final mediante emisario submarino.

3.3 Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que no cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de dos (02) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento su Programa de Adecuación y Manejo Ambiental; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

3.4 Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de tres (03) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, la actualización de los Planes de Manejo Ambiental de los Estudios Ambientales; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

(Ver Tabla N° 10.2)

Tabla 10.1. Estándares de Calidad Ambiental - Categoría 4

CATEGORIA 4: CONSERVACIÓN DEL AMBIENTE ACUÁTICO

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos
FÍSICO- QUÍMICOS						
Aceites y Grasas (MEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Cianuro Libre	mg/L	0,0052	0,0052	0,0052	0,001	0,001
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	20 (a)	20 (a)	20 (a)	**	**
Clorofila A	mg/L	0,008	**	**	**	**
Conductividad	(µS/cm)	1 000	1 000	1 000	**	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	5	10	10	15	10
Fenoles	mg/L	2,50	2,50	2,50	5,0	5,0
Fósforo total	mg/L	0,035	0,05	0,05	0,124	0,002
Nitratos (NO ₃ ⁻) (C)	mg/L	13	13	13	200	200
Amoníaco Total (NH ₄ ⁺)	mg/L	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
Nitrógeno Total	mg/L	0,315	**	**	**	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,8 – 8,5	6,8 – 8,5
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30
Sulfuros	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 2	Δ 2
INORGÁNICOS						
Antimonio	mg/L	0,04	0,04	0,04	**	**
Arsénico	mg/L	0,15	0,15	0,15	0,030	0,030
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	1	**
Cadmio Disuelto	mg/L	0,00025	0,00025	0,00025	0,0008	0,0008
Cobre	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05
Cromo VI	mg/L	0,011	0,011	0,011	0,05	0,05
Mercurio	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Níquel	mg/L	0,052	0,052	0,052	0,0002	0,0002
Plomo	mg/L	0,0025	0,0025	0,0025	0,0001	0,0001
Selenio	mg/L	0,005	0,005	0,005	0,071	0,071
Talio	mg/L	0,0008	0,0008	0,0008	**	**
Zinc	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,081	0,081
ORGÁNICOS						
<u>Compuestos Orgánicos Volátiles</u>						
Hidrocarburos Totales de Petróleo	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
<u>BTEX</u>						
Benceno	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<u>Hidrocarburos Aromáticos</u>						
Benzo(a)Pireno	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Antraceno	mg/L	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Fluoranteno	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
<u>Bifenilos Policlorados</u>						
Bifenilos Policlorados (PCB)	mg/L	0,000014	0,000014	0,000014	0,00003	0,00003
PLAGUICIDAS						
<u>Organofosforados</u>						
Malatión	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

Fuente: DS N° 004-2017 MINAM.

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y sierra	Selva	Estuarios	Marinos
Heptacloro Epóxido	mg/L	0,0000038	0,0000038	0,0000038	0,0000036	0,0000036
Lindano	mg/L	0,00095	0,00095	0,00095	**	**
Pentaclorofenol (PCP)	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Carbamato						
Aldicarb	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,00015	0,00015
MICROBIOLÓGICO						
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	2 000	1 000	2 000

- (a) 100 (para aguas claras). Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).
 (b) Después de la filtración simple.
 (c) En caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Nitratos-N ($\text{NO}_3\text{-N}$), multiplicar el resultado por el factor 4.43 para expresarlo en las unidades de Nitratos (NO_3).
 Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

Nota 5:

- El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.
 - Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.
- (1) Aplicar la Tabla N° 1 sobre el estándar de calidad de concentración de Amoníaco Total en función del pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce (mg/L de NH_3) que se encuentra descrita en la Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales.
- (2) Aplicar la Tabla N° 2 sobre Estándar de calidad de Amoníaco Total en función del pH, la temperatura y la salinidad para la protección de la vida acuática en agua de mar y estuarios (mg/L de NH_3).

Tabla N° 1: Estándar de calidad de Amoníaco Total en función de pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce (mg/L de NH_3)

Temperatura (°C)	pH							
	6	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	10,0
0	231	73,0	23,1	7,32	2,33	0,749	0,250	0,042
5	153	48,3	15,3	4,84	1,54	0,502	0,172	0,034
10	102	32,4	10,3	3,26	1,04	0,343	0,121	0,029
15	69,7	22,0	6,98	2,22	0,715	0,239	0,089	0,026
20	48,0	15,2	4,82	1,54	0,499	0,171	0,067	0,024
25	33,5	10,6	3,37	1,08	0,354	0,125	0,053	0,022
30	23,7	7,50	2,39	0,767	0,256	0,094	0,043	0,021

Tabla 10.2. Límites Máximos Permisibles para efluentes de PTAR

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: DS N° 003-2010 MINAM.

10.2. ANEXO N° 2: TABLAS DE MONITOREOS DIARIOS

Tabla 10.3. Valores registrados diariamente según fecha y hora del muestreo durante la etapa de puesta en marcha.

PUESTA EN MARCHA																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO														
			AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
07/09/2017	11:00		19.20	7.13		0.09	1.59	18.30	7.61		6.47	14.17	18.50	7.57		4.88	1.60
11/09/2017	11:00	18.00	17.60	7.15		0.21	1.59	16.70	7.94		8.20	14.17	17.50	7.50		0.64	1.60
	3:00	18.80	17.80	7.36		0.25	1.59	17.50	8.17		9.53	14.17	17.40	7.89		6.76	1.60
12/09/2017	10:00	17.60	17.00	7.48		0.18	1.59	16.40	8.29		8.12	14.17	16.50	8.03		4.36	1.60
	3:00	17.20	17.00	7.67		0.17	1.59	16.60	8.68		9.05	14.17	16.70	8.11		6.93	1.60
13/09/2017	10:00	17.10	16.80	7.50		0.14	1.59	16.80	8.20		9.63	14.17	16.80	7.94		4.62	1.60
14/09/2017	9:00	17.10	16.80	7.66		0.16	1.59	16.60	8.37		9.60	14.17	16.40	8.10		5.24	1.60
15/09/2017	10:00	18.30	17.40	8.90		0.15	1.59	16.50	8.46		9.50	14.17	16.70	8.31		6.13	1.60
	2:00	17.70	17.70	8.27		0.18	1.59	17.30	8.76		9.41	14.17	17.30	8.49		7.47	1.60
21/09/2017	9:00	17.30	16.80	7.33	118.00	0.33	2.95	16.50	7.79	47.00	6.17	7.65	16.30	7.75	55.00	2.13	2.33
	1:00	17.50	17.20	7.23		0.36	2.95	16.90	7.83		7.91	7.65	16.70	7.53		0.70	2.33
22/09/2017	9:00	17.90	16.80	7.84		0.19	2.95	16.40	8.31		9.89	7.65	16.30	8.41		4.13	2.33
	3:00	21.10	19.60	7.06		0.13	2.95	19.20	7.56		0.62	7.65	18.70	7.70		1.24	2.33
25/09/2017	10:00	21.80	18.50	7.25		0.13	2.95	18.60	7.93		6.48	7.65	18.10	7.56		0.44	2.33
03/10/2017	11:00	20.40	19.50	7.31		0.15	2.50	19.10	7.55		4.34	9.02	19.00	7.51		2.51	2.42
04/10/2017	9:00	18.90	18.40	6.99	62.90	0.17	2.50	18.60	7.59	9.29	7.43	9.02	18.10	7.14	14.90	3.75	2.33
	2:00	24.80	21.80	6.88	62.20	0.14	2.50	21.40	7.39	60.10	4.81	9.02	20.90	7.33	15.30	1.25	2.33
05/10/2017	9:35	22.20	19.90	7.04	57.80	0.16	2.50	19.40	7.74	8.82	8.50	9.02	19.40	7.58	15.70	2.12	2.33
	1:12	24.00	21.30	7.17	46.20	0.14	2.50	20.80	7.62	8.00	6.23	9.02	20.80	7.39	9.32	2.94	2.33
06/10/2017	10:15	19.80	18.80	7.28	56.20	0.19	2.50	18.60	7.78	11.70	6.89	9.02	18.20	7.61	20.30	2.26	2.33
	3:49	21.50	20.40	7.16	38.40	0.15	2.50	20.50	7.58	25.00	6.40	9.02	19.90	7.51	20.20	1.97	2.33
09/10/2017	2:00	20.20	19.40	7.37	97.90	0.16	2.67	19.00	7.43	18.70	4.28	8.46	18.80	7.56	41.70	2.60	2.50
10/10/2017	9:08	17.80	17.20	7.49	80.50	0.19	2.67	17.10	7.74	20.20	7.02	8.46	16.90	7.67	17.20	4.36	2.50
11/10/2017	10:52	19.10	18.00	7.10	85.00	0.13	2.67	18.30	7.34	43.30	1.18	8.46	17.60	7.23	19.90	3.18	2.50
	1:40	19.80	18.70	6.96	64.30	0.15	2.67	18.80	7.47	25.50	2.98	8.46	17.70	7.17	12.60	5.22	2.50
12/10/2017	10:03	23.30	20.90	7.14	63.30	0.15	2.67	20.40	7.43	30.80	4.15	8.46	20.20	7.26	30.80	4.36	2.50
	1:50	24.30	21.80	7.21	48.30	0.13	2.67	21.70	7.47	17.20	3.42	8.46	21.50	7.41	22.70	5.07	2.50

PUESTA EN MARCHA																	
REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
13/10/2017	10:15	23.10	21.10	7.16	36.20	0.15	2.67	21.20	7.34	12.90	2.23	8.46	21.10	7.48	12.20	2.27	2.50
	1:50	25.30	23.10	7.11	83.00	0.15	2.67	22.00	7.41	11.50	2.77	8.46	21.80	7.37	13.80	1.84	2.50
16/10/2017	12:30	23.30	21.50	7.44		0.18	2.67	20.50	7.73		7.41	8.46	20.00	7.58		3.20	2.50
17/10/2017	10:33	18.60	18.50	7.12		0.19	2.58	18.10	7.21		1.68	8.73	18.40	7.50		2.97	2.57
	2:10	22.50	20.90	7.11		0.15	2.58	20.40	7.47		3.65	8.73	20.60	7.46		1.01	2.57
18/10/2017	11:25	19.70	18.60	7.17		0.17	2.58	18.60	7.39		0.62	8.73	18.30	7.45		2.57	2.57
	12:40	22.10	20.20	7.09		0.14	2.58	20.50	7.39		5.17	8.73	19.80	7.39		1.70	2.57
19/10/2017	10:15	18.80	18.30	7.09		0.17	2.58	18.70	7.39		2.32	8.73	17.80	7.26		1.06	2.57
	4:34	20.70	20.00	7.37	34.20	0.24	2.58	19.80	7.53	9.04	4.33	8.73	19.80	7.72	32.40	3.04	2.57
20/10/2017	11:18	20.70	20.00	7.11	27.70	0.00	2.58	19.60	7.20	26.60	1.17	8.73	19.50	7.41	13.40	4.39	2.57
23/10/2017	2:57	24.30	23.60	6.99	61.20	0.00	2.58	22.50	7.17	37.50	0.14	8.73	23.30	7.39	41.00	2.99	2.57
24/10/2017	10:37	23.00	21.50	7.04	40.00	0.08	2.58	20.60	7.04	11.20	2.19	8.73	20.80	7.28	12.00	4.82	2.57
	12:15	21.80	21.50	7.06	37.00	0.00	2.58	20.60	7.45	9.72	6.90	8.73	20.80	7.37	14.70	4.29	2.57
25/10/2017	11:08	19.80	19.70	7.14	25.30	0.00	2.58	19.40	7.17	16.00	1.08	8.73	19.30	7.35	7.75	5.23	2.57
	12:37	21.30	20.80	7.09	38.50	0.00	2.58	19.50	7.50	17.90	7.81	8.73	19.60	7.41	15.20	5.06	2.57
26/10/2017	10:22	22.90	21.70	6.93	32.40	0.06	2.58	20.60	7.08	11.30	3.50	8.73	20.70	7.23	17.00	4.63	2.57
	12:25	24.80	23.40	6.96	31.20	0.00	2.58	22.00	7.38	8.66	7.22	8.73	22.20	7.35	19.10	4.40	2.57
27/10/2017	11:08	20.30	20.20	7.00	38.10	0.00	2.58	19.60	6.97	12.00	1.46	8.73	19.70	7.29	9.98	5.88	2.57
	2:15	22.60	21.40	6.95	44.60	0.00	2.58	20.40	7.21	7.05	3.98	8.73	20.90	7.38	17.60	4.42	2.57
30/10/2017	2:10	23.80	21.90	7.02	87.90	0.00	2.58	20.40	7.26	7.02	4.15	8.73	21.40	7.48	17.80	5.78	2.57
31/10/2017	10:35	20.60	19.70	6.98	52.70	0.00	2.58	18.90	7.07	23.70	2.90	8.73	19.00	7.28	11.70	4.98	2.57
	4:53	20.90	20.60	6.59	32.10	0.00	2.58	20.60	6.94	13.00	4.65	8.73	20.60	7.06	18.80	4.21	2.57
02/11/2017	11:45	22.70	21.20	7.17	27.20	0.00	2.58	20.60	7.23	11.30	1.52	8.73	20.70	7.47	7.63	5.92	2.57
03/11/2017	2:00	22.40	21.90	7.48	72.50	3.28	2.58	20.50	7.16	3.82	4.95	8.73	21.00	7.57	11.80	5.97	2.57

Fuente: Elaboración propia.

PUESTA EN MARCHA																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO														
			AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
06/11/2017	11:13	21.30	20.80	7.41	116.00	0.10	2.58	19.70	7.54	7.41	1.14	8.73	19.80	7.63	6.64	3.76	2.57
	2:03	23.80	22.50	6.99	113.00	0.00	2.58	21.10	7.49	3.95	2.80	8.73	21.60	7.44	11.10	4.67	2.57
07/11/2017	9:59	19.70	19.90	7.38	170.00	0.00	2.58	19.20	7.70	5.35	4.79	8.73	19.20	7.68	8.10	4.32	2.57
	2:59	23.60	22.00	7.23	114.00	0.00	2.58	21.40	7.38	22.70	0.81	8.73	22.10	7.56	14.10	3.48	2.57
08/11/2017	10:57	22.90	22.10	7.29	171.00	0.00	2.58	20.90	7.28	33.80	0.43	8.73	21.10	7.47	12.60	3.69	2.57
	1:05	24.40	23.20	7.22	169.00	0.00	2.58	21.70	7.18	13.20	2.93	8.73	21.60	7.36	17.20	2.98	2.57
09/11/2017	10:21	21.50	20.70	7.53	218.00	0.00	2.58	19.70	7.58	14.60	1.27	8.73	19.80	7.69	14.20	3.76	2.57
10/11/2017	10:26	19.60	19.90	7.18	196.00	0.00	2.58	19.40	7.21	20.50	0.81	8.73	19.40	7.44	19.30	3.89	2.57
15/11/2017	9:39	20.80	20.90	7.46	145.00	0.00	2.58	20.40	7.73	15.70	5.96	8.73	20.30	7.71	11.80	4.46	2.57
	2:22	24.30	23.60	7.35	113.00	0.00	2.58	22.90	7.69	31.60	0.05	8.73	22.70	7.64	13.20	3.05	2.57
16/11/2017	10:45	22.80	21.70	7.91	142.00	1.78	2.58	20.90	7.60	149.00	0.64	8.73	20.90	7.77	20.20	2.89	2.57
	12:25	24.00	22.60	7.81	119.00	0.30	2.58	21.70	7.76	58.50	4.43	8.73	21.80	7.81	27.60	2.94	2.57
17/11/2017	10:35	21.10	21.60	7.46	92.20	0.00	2.58	20.90	7.74	55.30	0.00	8.73	20.90	7.88	39.30	2.46	2.57
	12:33	24.60	23.80	6.82	83.80	0.00	2.58	22.90	7.06	73.60	3.84	8.73	23.10	7.15	44.10	0.80	2.57
20/11/2017	10:01	19.90	21.00	6.85	167.00	0.00	2.58	20.10	7.05	11.20	5.27	8.73	20.40	6.91	29.30	1.01	2.57
	12:37	24.40	23.20	7.29	118.00	0.12	2.58	22.10	7.35	12.70	5.86	8.73	21.90	7.29	26.40	3.97	2.57
21/11/2017	9:35	20.60	20.50	7.56	337.00	0.05	2.58	20.20	7.92	34.60	5.05	8.73	20.40	7.81	33.80	1.94	2.57
	3:35	24.20	24.10	6.81	125.00	0.00	2.58	23.90	7.18	70.70	1.21	8.73	23.80	7.27	43.00	0.37	2.57
22/11/2017	9:37	20.50	20.80	7.05	186.00	0.00	2.58	20.40	7.27	469.00	3.99	8.73	20.50	7.37	58.32	0.00	2.57
28/11/2017	4:34	22.80	22.60	7.36	102.00	2.95	2.58	22.80	7.40	119.00	1.61	8.73	22.50	7.70	9.22	6.61	2.57
29/11/2017	1:10	25.40	26.00	6.87	105.00	0.00	2.58	24.80	7.42	72.20	0.25	8.73	24.50	7.51	21.90	2.47	2.57
	3:39	26.20	25.40	6.90	98.00	0.37	2.58	24.90	7.65	129.00	3.26	8.73	24.60	7.41	28.70	1.03	2.57
30/11/2017	11:50	24.70	24.40	7.06	141.00	0.00	2.58	22.80	7.37	120.00	0.00	8.73	24.20	7.45	35.70	0.00	2.57

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.4. Valores registrados diariamente según fecha y hora del muestreo durante la primera etapa

ESCENARIO I																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO														
			AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
05/12/2017	9:43	20.70	21.40	7.13	88.20	0.00	2.58	20.90	7.64	47.00	5.16	8.73	20.90	7.56	22.50	4.74	2.57
	1:30	22.40	22.40	7.13	94.70	0.00	2.58	21.90	7.39	37.90	0.10	8.73	21.80	7.53	19.40	2.86	2.57
06/12/2017	9:59	21.90	21.60	7.26	128.00	0.00	2.58	21.20	7.64	37.30	2.91	8.73	21.00	7.54	30.20	3.47	2.57
	2:19	24.30	24.00	6.92	95.00	0.00	2.58	23.90	7.22	39.00	0.00	8.73	23.70	7.37	28.20	0.00	2.57
07/12/2017	11:00	21.30	21.60	7.13	114.00	0.00	2.58	21.20	7.50	57.40	0.00	8.73	21.40	7.53	52.90	2.17	2.57
	1:55	25.70	24.60	7.12		0.00	2.58	23.70	7.52		0.00	8.73	24.40	7.38		0.00	2.57
11/12/2017	1:50	23.40	23.10	7.11	119.00	0.00	2.58	22.40	7.26	33.30	1.11	8.73	22.40	7.41	18.50	4.80	2.57
12/12/2017	9:50	24.90	23.60	7.11	113.00	0.00	2.58	22.90	7.70	28.20	2.39	8.73	24.40	7.51	31.30	2.66	2.57
	2:05	26.40	25.30	6.94	129.00	0.00	2.58	24.70	7.25	46.50	0.00	8.73	24.70	7.36	37.10	0.45	2.57
13/12/2017	10:20	25.80	23.90	7.14	152.00	0.00	2.58	23.40	7.56	64.90	0.00	8.73	24.80	7.64	59.70	0.00	2.57
	3:02	25.90	24.60	7.01	89.40	0.00	2.58	24.40	7.20	140.00	0.00	8.73	24.10	7.43	83.40	0.00	2.57
14/12/2017	9:55	26.10	25.10	7.44	205.00	0.00	2.58	24.00	7.55	202.00	0.00	8.73	25.20	7.72	107.00	0.00	2.57
	1:25	27.70	26.20	7.07	95.00	0.00	2.58	25.30	7.44	165.00	0.00	8.73	25.20	7.74	101.00	0.00	2.57
15/12/2017	10:37	22.70	23.10	7.39	118.00	0.00	2.58	22.60	7.47	106.00	0.00	8.73	22.90	7.53	80.90	0.00	2.57
	3:25	25.90	24.80	7.02	94.50	0.00	2.58	24.40	7.73	286.00	0.00	8.73	24.20	7.63	104.00	0.00	2.57
19/12/2017	1:55	26.80	25.50	7.01	187.00	0.00	2.58	24.70	7.26	416.00	0.00	8.73	25.10	7.52	92.00	0.71	2.57
20/12/2017	4:40	27.20	25.30	7.31	94.50	0.00	2.58	24.90	7.30	403.00	0.00	8.73	24.90	7.55	70.10	0.00	2.57
21/12/2017	11:30	27.80	25.80	7.40	164.00	0.00	2.58	25.20	7.32	592.00	0.00	8.73	25.80	7.44	83.20	0.00	2.57

Fuente: Elaboración propia.

ESCENARIO II																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO														
			AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
08/01/2018	2:20	29.80	27.90	7.16	107.00	0.41	2.58	27.30	7.35	54.20	0.68	8.73	27.10	7.48	12.50	4.72	2.57
09/01/2018	11:55	28.80	27.60	6.98	373.00	0.00	2.58	26.30	7.26	170.00	0.00	8.73	26.90	7.56	26.70	1.43	2.57
	2:20	30.10	28.10	7.02	76.80	0.00	2.58	27.20	7.24	151.00	0.00	8.73	27.10	7.45	25.70	1.11	2.57
10/01/2018	10:16	24.30	24.30	7.23	165.00	0.00	2.58	23.70	7.34	275.00	0.00	8.73	23.80	7.64	54.10	1.46	2.57
	2:56	28.30	26.00	7.04	116.00	0.00	2.58	25.80	7.14	723.00	0.00	8.73	25.50	7.46	67.00	0.00	2.57
11/01/2018	10:15	27.30	25.70	7.07	119.00	0.00	2.58	25.60	7.37	151.00	0.00	8.73	26.30	7.21	34.00	0.21	2.57
12/01/2018	2:40	28.30	26.90	6.65	97.60	0.00	2.58	26.60	6.95	369.00	0.00	8.73	26.20	7.34	80.60	0.00	2.57
15/01/2018	10:40	27.20	26.20	7.04	137.00	0.00	2.58	25.80	7.15	376.00	0.00	8.73	26.10	7.67	37.10	1.56	2.57
	1:42	28.00	26.50	6.84	94.00	0.00	2.58	26.20	7.06	446.00	0.00	8.73	26.30	7.11	43.20	1.81	2.57
16/01/2018	10:45	28.90	27.30	6.91	125.00	0.00	2.58	26.60	7.27	507.00	0.00	8.73	27.50	7.35	54.20	0.00	2.57
	1:32	29.60	27.50	6.39	96.60	0.00	2.58	27.40	7.23	453.00	0.00	8.73	26.90	7.31	51.20	0.82	2.57
17/01/2018	11:29	26.10	25.40	7.24	135.00	0.00	2.58	24.90	7.27	491.00	0.00	8.73	25.10	7.43	67.40	0.00	2.57
18/01/2018	11:55	28.10	26.40	7.06	124.00	0.00	2.58	25.20	6.95	498.00	0.00	8.73	25.60	7.19	74.50	0.00	2.57
19/01/2018	10:50	26.20	24.90	6.93	131.00	0.00	2.58	24.50	7.14	521.00	0.00	8.73	25.00	7.37	82.50	0.00	2.57
22/01/2018	10:40	23.30	24.10	7.30	168.00	0.00	2.58	24.00	7.38	322.00	0.00	8.73	23.70	7.63	22.60	3.20	2.57
	2:26	26.10	25.40	7.21	145.00	0.00	2.58	24.90	7.35	356.00	0.00	8.73	25.10	7.58	28.70	1.06	2.57
23/01/2018	10:45	28.90	26.60	7.01	143.00	0.00	2.58	26.30	7.20	636.00	0.00	8.73	26.70	7.27	28.40	0.30	2.57
	1:55	31.40	28.40	6.82	125.00	0.00	2.58	27.50	7.12	493.00	0.00	8.73	27.50	7.32	37.00	0.00	2.57
25/01/2018	12:30	30.80	29.10	7.18	113.00	0.00	2.58	27.80	7.35	299.00	4.46	8.73	28.40	7.28	25.60	0.00	2.57
26/01/2018	2:47	28.70	27.30	6.92	112.00	0.00	2.58	27.80	7.16	282.00	0.00	8.73	27.50	7.44	63.70	0.00	2.57
29/01/2018	11:15	28.00	26.70	7.04	163.00	0.00	2.58	25.80	7.18	45.60	1.13	8.73	26.20	7.42	5.88	4.48	2.57
30/01/2018	9:50	27.60	26.10	6.94	158.00	0.00	2.58	26.00	7.38	315.00	4.76	8.73	26.50	7.41	11.50	4.32	2.57
	2:15	31.70	29.10	7.00	160.00	0.00	2.58	28.70	7.26	704.00	1.09	8.73	28.60	7.43	8.53	3.88	2.57
31/01/2018	10:55	28.90	27.80	6.98	167.00	0.00	2.58	26.80	7.44	110.00	5.16	8.73	27.00	7.35	8.82	4.36	2.57
	1:09	29.70	28.40	7.09	128.00	0.00	2.58	27.60	7.38	87.10	4.29	8.73	27.60	7.39	8.30	3.82	2.57

Fuente: Elaboración propia.

ESCENARIO III																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO														
			AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
01/02/2018	10:03	26.80	25.30	7.21	126.00	0.00	2.58	25.10	7.64	71.00	5.41	8.73	25.60	7.37	7.68	4.48	2.57
02/02/2018	10:57	26.90	25.30	7.08	124.00	0.00	2.58	24.90	7.32	166.00	5.26	8.73	25.40	7.42	7.79	4.34	2.57
05/02/2018	2:10	28.40	27.20	6.89	99.80	0.56	2.58	27.00	7.02	32.40	2.08	8.73	26.50	7.21	7.34	5.17	2.57
06/02/2018	11:40	29.00	27.00	7.07	70.50	0.00	2.58	26.80	7.24	33.80	0.44	8.73	26.50	7.34	5.26	4.24	2.57
07/02/2018	11:20	29.50	27.70	7.07	200.00	0.00	2.58	27.10	7.23	125.00	0.46	8.73	27.00	7.36	7.38	3.30	2.57
	1:50	30.10	28.10	6.90	183.00	0.00	2.58	28.10	7.21	104.00	3.74	8.73	27.60	7.24	6.29	3.11	2.57
08/02/2018	1:10	30.40	28.30	7.09	168.00	0.00	2.58	28.60	7.29	99.40	3.81	8.73	28.20	7.36	11.20	2.39	2.57
09/02/2018	10:40	28.40	26.80	6.90	113.00	0.00	2.58	26.50	7.24	239.00	4.03	8.73	26.40	7.33	20.60	3.20	2.57
	2:55	30.40	28.40	6.71	135.00	0.00	2.58	25.90	7.25	593.00	0.00	8.73	28.00	7.17	16.80	0.96	2.57
13/02/2018	12:48	30.80	29.00	7.15	165.00	0.00	2.58	27.90	7.18	101.00	3.91	8.73	27.70	7.37	5.82	4.25	2.57
	3:43	30.60	28.60	6.94	115.00	0.00	2.58	28.40	7.48	16.40	3.76	8.73	27.80	7.49	5.89	4.15	2.57
14/02/2018	11:35	29.50	28.00	7.28	173.00	0.00	2.58	27.50	7.40	57.40	0.26	8.73	27.50	7.39	6.45	2.49	2.57
	2:56	29.30	27.80	7.14	125.00	0.00	2.58	27.30	7.35	151.00	0.25	8.73	27.10	7.49	8.13	2.43	2.57
15/02/2018	3:17	29.00	27.20	7.17	188.00	0.00	2.58	27.30	7.53	99.40	3.03	8.73	27.00	7.59	12.90	1.72	2.57
16/02/2018	3:43	30.10	28.20	7.35	71.50	0.00	2.58	28.50	7.50	95.20	2.53	8.73	27.80	7.53	9.26	2.54	2.57
19/02/2018	3:06	31.00	29.00	7.31	93.50	0.67	2.58	28.40	7.47	5.14	0.71	8.73	28.20	7.65	6.89	5.47	2.57
20/02/2018	10:50	30.10	27.90	7.27	105.00	0.00	2.58	27.60	7.45	403.00	1.58	8.73	27.50	7.55	6.39	4.93	2.57
	2:23	31.40	29.20	7.07	110.00	0.00	2.58	28.70	7.40	152.00	0.55	8.73	28.60	7.55	3.53	3.85	2.57
21/02/2018	11:41	29.30	28.50	7.00	106.00	0.00	2.58	28.30	7.11	306.00	0.51	8.73	28.10	7.29	4.57	3.30	2.57
22/02/2018	2:15	28.30	27.10	7.02	97.20	0.00	2.58	26.70	7.38	426.00	1.08	8.73	26.70	7.47	6.08	4.51	2.57
23/02/2018	10:58	28.00	26.80	6.87	81.20	0.00	2.58	26.30	7.24	237.00	1.48	8.73	26.10	7.32	6.45	4.67	2.57
	3:10	29.20	27.60	6.89	105.00	0.00	2.58	27.60	7.21	242.00	0.73	8.73	27.40	7.27	16.70	2.46	2.57
26/02/2018	2:48	29.50	28.80	6.95	141.00	0.71	2.58	27.70	7.10	999.00	0.35	8.73	27.50	7.46	9.60	5.44	2.57
27/02/2018	1:50	30.00	28.70	7.00	146.00	0.00	2.58	27.80	7.15	951.00	0.43	8.73	27.30	7.45	9.04	4.17	2.57
28/02/2018	11:20	28.80	27.30	7.08	152.00	0.00	2.58	27.20	7.26	455.00	0.84	8.73	27.00	7.47	8.78	3.07	2.57
	3:12	29.30	28.00	7.02	125.00	0.00	2.58	27.50	7.34	56.40	0.87	8.73	27.10	7.44	20.00	1.64	2.57
01/03/2018	9:20	26.10	25.80	7.05	121.00	0.00	2.58	25.60	7.29	355.00	1.24	8.73	25.40	7.41	18.70	1.37	2.57
02/03/2018	9:40	26.40	26.00	7.17	166.00	0.00	2.58	25.40	7.47	395.00	1.26	8.73	25.60	7.60	20.20	1.09	2.57

Tabla 10.5. Valores registrados diariamente según fecha y hora del muestreo durante la segunda etapa

ESCENARIO IV																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO														
			AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
05/03/2018	4:10	28.50	26.70	6.91	63.50	1.42	1.93	26.50	7.33	697.00	1.57	11.67	26.10	7.52	9.01	5.77	1.90
06/03/2018	9:00	23.70	24.60	6.94	142.00	0.00	1.93	24.60	7.22	471.00	1.65	11.67	24.30	7.34	4.34	4.12	1.90
	3:10	28.80	27.00	7.13	111.00	0.00	1.93	26.30	7.40	117.00	1.47	11.67	26.50	7.55	7.73	2.92	1.90
07/03/2018	11:56	29.00	27.10	7.24	180.00	0.00	1.93	26.60	7.49	196.00	0.32	11.67	26.10	7.55	3.19	4.30	1.90
	3:15	29.00	27.20	7.16	118.00	0.03	1.93	26.50	7.27	298.00	1.17	11.67	26.10	7.39	6.22	3.69	1.90
08/03/2018	10:56	28.60	27.60	7.14	120.00	0.00	1.93	26.90	7.34	123.00	1.59	11.67	26.70	7.37	2.89	4.22	1.90
12/03/2018	2:05	30.20	28.50	7.32	93.00	1.03	1.93	27.20	7.31	25.20	2.39	11.67	27.40	7.28	16.90	5.77	1.90
13/03/2018	9:20	26.00	25.40	7.24	161.00	0.00	1.93	24.70	7.40	47.10	2.92	11.67	24.60	7.44	3.17	4.11	1.90
	2:25	30.20	28.40	6.83	84.30	0.00	1.93	28.20	7.14	102.00	0.88	11.67	27.30	7.28	4.16	4.39	1.90
14/03/2018	9:40	26.80	26.10	7.02	75.60	0.00	1.93	25.50	7.16	130.00	2.20	11.67	25.30	7.24	3.04	4.11	1.90
	4:21	28.90	27.40	6.96	78.70	0.00	1.93	27.20	7.11	999.00	1.37	11.67	26.60	7.23	3.88	3.72	1.90
15/03/2018	9:35	26.90	26.30	6.90	71.50	0.00	1.93	25.30	7.06	999.00	1.59	11.67	25.40	7.36	3.38	4.76	1.90
16/03/2018	9:28	26.80	26.30	6.95	92.80	0.00	1.93	25.40	6.79	133.00	1.40	11.67	25.70	7.32	3.48	4.01	1.90
	12:08	31.10	28.60	6.84	104.00	0.05	1.93	27.80	7.01	321.00	1.10	11.67	27.80	7.19	3.55	3.92	1.90
19/03/2018	8:45	24.80	24.90	7.13	141.00	0.45	1.93	24.20	6.98	647.00	1.35	11.67	24.20	7.48	3.88	5.68	1.90
	2:24	28.90	27.80	6.89	132.00	0.17	1.93	27.30	7.10	170.00	0.92	11.67	27.00	7.46	4.21	4.80	1.90
20/03/2018	9:35	25.60	25.40	7.11	141.00	0.55	1.93	24.70	7.05	416.00	1.67	11.67	24.70	7.35	3.39	4.26	1.90
	3:44	29.00	26.90	6.96	125.00	0.20	1.93	26.80	7.08	356.00	1.83	11.67	26.80	7.11	3.43	3.88	1.90
21/03/2018	9:44	24.00	24.20	6.98	90.30	0.00	1.93	23.60	7.11	749.00	3.26	11.67	23.60	7.12	3.33	4.69	1.90
22/03/2018	9:15	24.80	24.80	7.04	83.30	0.04	1.93	24.10	7.08	890.00	3.65	11.67	24.00	7.11	3.32	4.10	1.90
23/03/2018	9:14	25.20	25.10	7.49	172.00	0.00	1.93	24.30	7.36	7.25	3.56	11.67	24.60	7.31	4.96	4.36	1.90
	1:52	29.80	27.60	6.92	113.00	0.00	1.93	26.90	7.19	437.00	3.57	11.67	26.90	7.29	4.57	5.10	1.90
26/03/2018	2:46	30.40	28.40	7.09	80.00	0.93	1.93	27.80	7.21	999.00	0.77	11.67	27.70	7.27	16.80	5.56	1.90
27/03/2018	10:43	27.40	26.20	7.10	132.00	0.52	1.93	25.40	7.19	909.00	4.28	11.67	25.40	7.34	5.25	5.58	1.90
28/03/2018	9:49	26.70	25.90	7.09	131.00	0.00	1.93	25.20	7.19	383.00	4.50	11.67	25.20	7.20	3.04	4.00	1.90

Fuente: Elaboración propia.

ESCENARIO V																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO														
			AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
03/04/2018	10:00	26.60	25.60	7.30	233.00	0.75	1.93	24.60	7.59	294.00	6.56	11.67	24.70	7.57	5.04	4.61	1.90
	2:59	28.30	26.40	7.25	113.00	1.06	1.93	26.00	7.15	590.00	1.36	11.67	25.80	7.43	4.16	5.03	1.90
04/04/2018	9:42	25.30	25.00	7.10	143.00	0.00	1.93	24.20	7.23	999.00	5.52	11.67	24.40	7.32	2.92	4.15	1.90
05/04/2018	9:46	24.60	24.40	6.96	347.00	0.00	1.93	23.70	7.24	999.00	6.01	11.67	23.90	7.32	3.18	3.52	1.90
06/04/2018	11:07	28.30	27.00	7.15	237.00	0.00	1.93	25.70	7.22	494.00	1.84	11.67	26.20	7.35	3.48	4.32	1.90
10/04/2018	10:46	27.90	26.30	7.22	274.00	0.00	1.93	25.70	7.20	220.00	4.21	11.67	25.50	7.49	4.30	6.02	1.90
	3:06	28.80	27.60	6.82	129.00	0.20	1.93	26.40	7.08	817.00	1.81	11.67	26.40	7.22	5.91	3.82	1.90
11/04/2018	10:04	26.00	25.70	6.99	200.00	0.28	1.93	24.40	7.40	530.00	6.70	11.67	24.30	7.32	3.66	4.21	1.90
12/04/2018	9:58	24.40	24.00	6.99	151.00	0.03	1.93	23.50	7.41	134.00	6.81	11.67	23.50	7.34	3.40	4.21	1.90
	2:41	28.40	27.00	7.49	88.50	0.00	1.93	26.40	7.00	112.00	1.99	11.67	26.50	7.36	7.83	3.36	1.90
17/04/2018	10:00	25.40	24.80	7.34	134.00	0.23	1.93	24.10	7.33	143.00	7.05	11.67	23.80	7.28	1.41	5.32	1.90
19/04/2018	11:15	26.60	25.50	7.10	85.60	0.10	1.93	24.60	7.12	387.00	2.03	11.67	24.70	7.38	1.60	4.95	1.90
20/04/2018	10:47	26.10	25.40	7.15	154.00	0.06	1.93	24.60	7.19	562.00	4.95	11.67	24.80	7.34	1.18	4.91	1.90
	2:53	28.50	26.90	7.04	77.00	0.00	1.93	26.30	7.18	6.50	1.09	11.67	26.00	7.25	1.11	3.43	1.90
23/04/2018	3:57	28.80	26.60	7.19	102.00	1.50	1.93	25.60	7.18	7.99	6.84	11.67	25.50	7.22	4.40	6.27	1.90
25/04/2018	9:58	24.70	24.80	7.15	110.00	0.00	1.93	24.00	7.50	190.00	6.70	11.67	23.90	7.45	1.31	5.23	1.90
	2:53	29.00	26.70	7.13	161.00	0.00	1.93	26.50	7.14	4.84	0.77	11.67	26.30	7.36	1.63	3.82	1.90
26/04/2018	10:13	25.10	24.90	7.10	101.00	0.00	1.93	24.10	7.51	6.26	6.82	11.67	24.20	7.42	1.19	4.95	1.90
27/04/2018	10:19	26.10	25.70	7.02	74.10	0.00	1.93	25.10	7.45	9.93	6.89	11.67	25.00	7.35	0.92	5.02	1.90
02/05/2018	2:04	28.10	26.00	7.12	88.70	0.00	1.93	25.10	7.33	27.20	4.07	11.67	25.30	7.44	3.88	5.72	1.90
03/05/2018	10:01	23.80	23.20	7.20	154.00	0.00	1.93	22.70	7.37	24.40	7.00	11.67	22.70	7.33	2.78	6.03	1.90

Fuente: Elaboración propia.

ESCENARIO VI																	
FECHA	HORA	T° Amb. (°C)	REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON MEDIO DE ADHERENCIA FIJO														
			AFLUENTE					TANQUE DE AIREACIÓN					EFLUENTE				
			T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D.(mg/L)	Q (mL/s)	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D (mg/L)	TRH	T (°C)	pH	Turb. (UNT)	O.D. (mg/L)	Q (mL/s)
11/05/2018	11:50	22.40	22.60	7.04	206.00	0.45	1.93	21.70	7.07	15.40	1.23	11.67	21.90	7.30	7.27	4.92	1.90
	3:10	25.10	23.70	7.10	111.00	0.47	1.93	23.40	7.32	12.60	6.21	11.67	23.20	7.32	7.03	4.92	1.90
15/05/2018	12:10	26.80	25.20	7.12	439.00	0.26	1.93	25.20	7.29	52.10	4.18	11.67	24.50	7.30	5.46	4.42	1.90
16/05/2018	11:10	25.50	24.60	7.10	182.00	0.00	1.93	24.00	7.24	29.20	0.75	11.67	23.70	7.41	7.42	4.01	1.90
17/05/2018	11:07	22.10	22.60	7.13	215.00	0.00	1.93	21.30	7.19	49.40	0.65	11.67	21.50	7.35	11.70	3.30	1.90
18/05/2018	10:19	20.30	21.20	7.23	156.00	0.00	1.93	20.70	7.48	64.50	2.81	11.67	21.00	7.50	11.90	2.78	1.90
22/05/2018	10:29	21.30	22.20	7.35	208.00	1.78	1.93	21.90	7.42	29.40	2.84	11.67	21.70	7.50	4.65	5.34	1.90
23/05/2018	10:58	22.30	22.20	7.18	122.00	0.23	1.93	21.30	7.43	60.40	0.69	11.67	21.60	7.53	8.60	3.04	1.90
	2:02	23.90	22.80	7.11	124.00	0.11	1.93	22.20	7.40	21.00	0.93	11.67	22.40	7.51	6.44	3.97	1.90
24/05/2018	10:20	20.60	21.00	7.17	102.00	0.03	1.93	20.40	7.49	13.30	4.17	11.67	20.40	7.54	8.34	3.96	1.90
25/05/2018	3:30	20.90	21.30	7.27	43.00	0.00	1.93	21.20	7.59	10.40	6.21	11.67	21.10	7.62	10.60	4.64	1.90
39/05/2018	1:49	22.20	21.20	7.30	339.00	0.39	1.93	20.90	7.30	15.60	2.22	11.67	20.80	7.51	8.75	4.42	1.90
30/05/2018	10:56	19.90	20.10	7.33	176.00	0.00	1.93	19.60	7.31	14.60	1.89	11.67	19.60	7.47	9.44	4.53	1.90
	3:05	20.40	20.90	7.34	161.00	0.00	1.93	20.30	7.47	31.00	3.04	11.67	20.50	7.54	9.02	3.23	1.90
31/05/2018	9:59	18.10	18.60	7.21	244.00	0.00	1.93	18.40	7.57	26.10	6.43	11.67	18.20	7.49	11.20	4.26	1.90
01/06/2018	10:45	19.00	19.20	7.30	106.00	0.00	1.93	18.60	7.41	27.90	2.48	11.67	18.70	7.68	14.00	4.10	1.90

Fuente: Elaboración propia.

10.3. ANEXO N° 3: TABLAS DE VALORES PROMEDIO POR SEMANA.

Tabla 10.6. Resultados obtenidos por semana durante la puesta en marcha.

SEMANA N° 1					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.59	-	1.60	-
Tiempo de retencion hidráulica (TRH)	horas	14.17			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	17.73			-
Temperatura de la muestra	°C	17.48	16.97	17.09	-
pH	-	7.68	8.28	7.99	-
Turbiedad	UNT	-	-	-	-
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.17	8.83	5.23	-
DBO ₅	mg/L	162.36	-	134.65	17.07
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.45	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 2					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.95	-	2.33	-
Tiempo de retencion hidráulica (TRH)	horas	7.65			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	19.12			-
Temperatura de la muestra	°C	17.78	17.52	17.22	-
pH	-	7.34	7.88	7.79	-
Turbiedad	UNT	118.00	47.00	55.00	53.39
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.23	6.21	1.73	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 3					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.50	-	2.42	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	9.02			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	21.66			-
Temperatura de la muestra	°C	20.01	19.77	19.47	-
pH	-	7.12	7.61	7.44	-
Turbiedad	UNT	53.95	20.49	15.95	70.43
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.16	6.37	2.40	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 4					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.67	-	2.50	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.46			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	21.61			-
Temperatura de la muestra	°C	20.03	19.81	19.45	-
pH	-	7.19	7.45	7.39	-
Turbiedad	UNT	69.81	22.51	21.36	69.40
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.15	3.50	3.61	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 5					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	20.80			-
Temperatura de la muestra	°C	19.75	19.53	19.28	-
pH	-	7.19	7.41	7.47	-
Turbiedad	UNT	30.95	17.82	22.90	26.01
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.16	3.29	2.49	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 6					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	22.31			-
Temperatura de la muestra	°C	21.53	20.58	20.81	-
pH	-	7.02	7.22	7.34	-
Turbiedad	UNT	38.70	14.59	17.15	55.69
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.02	3.81	4.64	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 7					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	22.08			-
Temperatura de la muestra	°C	21.06	20.20	20.54	-
pH	-	7.05	7.13	7.37	-
Turbiedad	UNT	54.48	11.77	13.55	75.14
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.66	3.63	5.37	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 8					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	22.10			-
Temperatura de la muestra	°C	21.39	20.39	20.58	-
pH	-	7.28	7.42	7.53	-
Turbiedad	UNT	158.38	15.19	12.91	91.85
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.01	1.87	3.82	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	278.00	-	59.00	78.78
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 9					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	22.93			-
Temperatura de la muestra	°C	22.37	21.62	21.62	-
pH	-	7.47	7.60	7.66	-
Turbiedad	UNT	115.83	63.95	26.03	77.53
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.35	2.49	2.77	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	20.00	-	12.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	26.30	-	4.20	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 10					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	21.92			-
Temperatura de la muestra	°C	21.92	21.34	21.40	-
pH	-	7.11	7.35	7.33	-
Turbiedad	UNT	186.60	119.64	38.16	79.55
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.03	4.28	1.46	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	16.00	-	1.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	11.90	-	6.60	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 11					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	1.00			-
Patrón de aireación	min	180/180 (Aireación Continua)			-
Temperatura Ambiental	°C	24.78			-
Temperatura de la muestra	°C	24.60	23.83	23.95	-
pH	-	7.05	7.46	7.52	-
Turbiedad	UNT	111.50	110.05	23.88	78.58
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.83	1.28	2.53	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

Tabla 10.7. Resultados obtenidos por semana durante la primera etapa (TRH = 8.7 h).

SEMANA N° 12					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retencion hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.22			-
Patrón de aireación	min	40/140 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	22.72			-
Temperatura de la muestra	°C	22.60	22.13	22.20	-
pH	-	7.12	7.49	7.49	-
Turbiedad	UNT	103.98	43.72	30.64	70.53
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.00	-	2.21	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	263.00	-	70.00	73.38
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 13					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retencion hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.22			-
Patrón de aireación	min	40/140 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	25.42			-
Temperatura de la muestra	°C	24.41	23.79	24.21	-
pH	-	7.14	7.46	7.55	-
Turbiedad	UNT	123.88	119.10	69.21	44.13
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.00	-	0.88	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	325.00	-	135.00	58.46
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	22.53	-	19.37	14.03
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	17.00	-	19.00	-11.76
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	9.00	-	14.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	13.20	-	5.40	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	44.73	-	38.77	13.32

SEMANA N° 14					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.22			-
Patrón de aireación	min	40/140 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	27.27			-
Temperatura de la muestra	°C	25.53	24.93	25.27	-
pH	-	7.24	7.29	7.50	-
Turbiedad	UNT	148.50	470.33	81.77	44.94
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.00	-	0.24	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	327.00	-	115.00	64.83
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	27.03	-	26.37	2.44
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	14.00	-	25.00	-78.57
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	18.00	-	10.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	14.10	-	4.00	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	59.13	-	40.37	31.73

SEMANA N° 15					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.28			-
Patrón de aireación	min	50/130 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	28.13			-
Temperatura de la muestra	°C	26.64	26.07	26.13	-
pH	-	7.02	7.24	7.45	-
Turbiedad	UNT	150.63	270.46	42.94	71.49
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.06		1.28	-
DBO ₅	mg/L	144.03	-	39.08	72.87
DQO	mg/L	306.00	-	80.00	73.86
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.40	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	84.33	53.60	16.13	80.88
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	70.33	47.20	15.13	78.50
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	23.67	-	27.37	-15.63
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	16.00	-	27.00	-68.75
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	9.00	-	14.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	19.40	-	5.10	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	52.07	-	46.47	10.75

SEMANA N° 16					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.28			-
Patrón de aireación	min	50/130 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	27.73			-
Temperatura de la muestra	°C	26.31	25.80	26.07	-
pH	-	6.92	7.15	7.35	-
Turbiedad	UNT	120.37	470.29	58.59	51.33
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.00	-	0.60	-
DBO ₅	mg/L	247.74	-	39.41	84.09
DQO	mg/L	451.00	-	81.00	82.04
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.68	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	106.80	381.00	15.60	85.39
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	89.60	312.00	15.50	82.70
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	33.71	-	21.91	35.00
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	21.00	-	20.00	4.76
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	10.00	-	9.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	11.40	-	3.50	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	55.11	-	34.41	37.56

SEMANA N° 17					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.28			-
Patrón de aireación	min	50/130 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	28.20			-
Temperatura de la muestra	°C	26.82	26.38	26.48	-
pH	-	7.07	7.26	7.42	-
Turbiedad	UNT	134.33	398.00	34.33	74.44
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.00	-	0.76	-
DBO ₅	mg/L	199.95	-	61.29	69.35
DQO	mg/L	342.00	-	114.00	66.67
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.55	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	81.60	326.00	15.29	81.27
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	72.80	287.00	15.29	79.00
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	24.94	-	21.02	15.72
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	13.00	-	15.00	-15.38
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	14.00	-	10.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	30.00	-	4.10	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	68.94	-	35.12	49.06

SEMANA N° 18					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.28			-
Patrón de aireación	min	50/130 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	29.18			-
Temperatura de la muestra	°C	27.62	26.98	27.18	-
pH	-	7.01	7.33	7.40	-
Turbiedad	UNT	155.20	252.34	8.61	94.45
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.00	-	4.17	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	-	-	-	-
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

SEMANA N° 19					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.67			-
Patrón de aireación	min	120/60 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	28.88			-
Temperatura de la muestra	°C	27.12	26.67	26.80	-
pH	-	6.99	7.27	7.31	-
Turbiedad	UNT	135.48	162.62	10.04	92.59
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.06	-	3.47	-
DBO ₅	mg/L	123.09	-	34.30	72.13
DQO	mg/L	222.00	-	38.00	82.88
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.34	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	136.00	144.74	7.80	94.26
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	135.00	137.50	7.80	94.22
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	27.81	-	11.97	56.96
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	16.00	-	9.00	43.75
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	11.00	-	4.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	24.50	-	4.10	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	63.31	-	20.07	68.30

SEMANA N° 20					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.67			-
Patrón de aireación	min	120/60 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	29.88			-
Temperatura de la muestra	°C	28.13	27.82	27.48	-
pH	-	7.17	7.41	7.48	-
Turbiedad	UNT	139.58	86.73	8.08	94.21
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.00	-	2.93	-
DBO ₅	mg/L	202.58	-	59.28	70.74
DQO	mg/L	397.00	-	61.00	84.63
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.56	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	124.00	170.00	12.22	90.14
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	106.00	146.67	9.89	90.67
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	25.06	-	14.71	41.30
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	13.00	-	10.00	23.08
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	19.00	-	1.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	17.60	-	0.00	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	61.66	-	15.71	74.52

SEMANA N° 21					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.67			-
Patrón de aireación	min	120/60 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	29.61			-
Temperatura de la muestra	°C	28.01	27.66	27.51	-
pH	-	7.06	7.32	7.44	-
Turbiedad	UNT	99.70	253.02	7.23	92.75
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.10	-	4.17	-
DBO ₅	mg/L	169.13	-	19.59	88.42
DQO	mg/L	325.00	-	47.00	85.54
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.46	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	85.20	128.00	13.20	84.51
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	79.60	110.50	7.10	91.08
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	23.12	-	13.05	43.56
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	12.00	-	11.00	8.33
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	21.00	-	3.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	35.00	-	1.10	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	79.12	-	17.15	78.32

SEMANA N° 22					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	2.58	-	2.57	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	8.73			-
Fracción aireada (AF)	-	0.67			-
Patrón de aireación	min	120/60 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	28.35			-
Temperatura de la muestra	°C	27.43	26.87	26.65	-
pH	-	7.05	7.27	7.47	-
Turbiedad	UNT	141.83	535.23	14.39	89.86
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.12	-	2.80	-
DBO ₅	mg/L	141.67	-	13.90	90.19
DQO	mg/L	249.00	-	19.00	92.37
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.39	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	102.22	146.00	3.60	96.48
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	37.78	102.50	3.60	90.47
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	23.95	-	12.50	47.81
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	17.00	-	9.00	47.06
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	18.00	-	1.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	29.80	-	0.70	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	71.75	-	14.20	80.21

Tabla 10.8. Resultados obtenidos por semana durante la segunda etapa (TRH = 11.7 h).

SEMANA N° 23					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.67			-
Patrón de aireación	min	120/60 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	27.93			-
Temperatura de la muestra	°C	26.70	26.23	25.97	-
pH	-	7.09	7.34	7.45	-
Turbiedad	UNT	122.42	317.00	5.56	95.46
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.24	-	4.17	-
DBO ₅	mg/L	145.84	-	26.32	81.95
DQO	mg/L	295.00	-	28.00	90.51
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.30	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	70.80	173.33	1.70	97.60
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	69.60	159.33	1.70	97.56
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	19.67	-	4.60	76.61
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	15.00	-	3.00	80.00
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	20.00	-	4.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	21.30	-	3.40	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	60.97	-	12.00	80.32

SEMANA N° 24					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retencion hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.67			-
Patrón de aireación	min	120/60 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	28.36			-
Temperatura de la muestra	°C	27.13	26.41	26.26	-
pH	-	7.01	7.12	7.29	-
Turbiedad	UNT	95.11	344.54	5.20	94.54
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.14		4.35	-
DBO ₅	mg/L	130.87	-	6.56	94.99
DQO	mg/L	246.00	-	34.00	86.18
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.27	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	62.85	132.67	3.10	95.07
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	55.73	107.33	3.00	94.62
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	19.50	-	4.29	78.00
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	11.00	-	3.00	72.73
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	22.00	-	3.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	35.00	-	2.40	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	76.50	-	9.69	87.33

SEMANA N° 25					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retencion hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.67			-
Patrón de aireación	min	120/60 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	26.51			-
Temperatura de la muestra	°C	25.84	25.24	25.23	-
pH	-	7.07	7.12	7.28	-
Turbiedad	UNT	124.70	459.03	3.89	96.88
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.18	-	4.61	-
DBO ₅	mg/L	113.90	-	15.07	86.77
DQO	mg/L	216.00	-	44.00	79.63
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.23	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	68.80	325.81	3.20	95.35
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	63.60	245.16	3.20	94.97
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	23.87	-	4.30	81.99
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	17.00	-	3.00	82.35
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	18.00	-	7.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	19.90	-	4.70	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	61.77	-	16.00	74.10

SEMANA N° 26					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.67			-
Patrón de aireación	min	120/60 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	28.17			-
Temperatura de la muestra	°C	26.83	26.13	26.10	-
pH	-	7.09	7.20	7.27	-
Turbiedad	UNT	114.33	763.67	8.36	92.69
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.48	-	5.05	-
DBO ₅	mg/L	-	-	-	-
DQO	mg/L	301.00	-	31.00	89.70
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	-	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	-	-	-	-
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	23.42	-	5.68	75.75
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	15.00	-	2.00	86.67
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	21.00	-	5.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	18.10	-	3.90	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	62.52	-	14.58	76.68

SEMANA N° 27					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.50			-
Patrón de aireación	min	90/90 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	26.62			-
Temperatura de la muestra	°C	25.68	24.84	25.00	-
pH	-	7.15	7.29	7.40	-
Turbiedad	UNT	214.60	675.20	3.76	98.25
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.36	-	4.33	-
DBO ₅	mg/L	158.00	-	8.30	94.75
DQO	mg/L	287.00	-	35.00	87.80
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.33	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	79.20	580.00	6.20	92.17
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	68.80	427.00	6.20	90.99
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	24.72	-	5.19	79.00
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	15.00	-	2.00	86.67
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	25.00	-	6.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	21.80	-	5.10	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	71.52	-	16.29	77.22

SEMANA N° 28					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.50			-
Patrón de aireación	min	90/90 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	27.10			-
Temperatura de la muestra	°C	26.12	25.28	25.24	-
pH	-	7.10	7.22	7.35	-
Turbiedad	UNT	168.50	362.60	5.02	97.02
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.10	-	4.32	-
DBO ₅	mg/L	147.00	-	19.08	87.02
DQO	mg/L	273.00	-	43.00	84.25
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.30	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	65.60	27.67	3.00	95.43
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	59.60	24.67	3.00	94.97
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	23.01	-	8.63	62.49
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	12.00	-	2.00	83.33
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	25.00	-	5.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	20.10	-	3.50	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	68.11	-	17.13	74.85

SEMANA N° 29					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.50			-
Patrón de aireación	min	90/90 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	26.65			-
Temperatura de la muestra	°C	25.65	24.90	24.83	-
pH	-	7.16	7.21	7.31	-
Turbiedad	UNT	112.65	274.63	1.33	98.82
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.10	-	4.65	-
DBO ₅	mg/L	110.99	-	12.09	89.11
DQO	mg/L	236.00	-	31.00	86.86
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.23	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	70.00	14.40	4.90	93.00
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	59.20	13.60	4.90	91.72
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	20.86	-	3.02	85.52
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	14.00	-	1.00	92.86
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	19.00	-	3.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	21.10	-	2.60	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	60.96	-	8.62	85.86

SEMANA N° 30					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.50			-
Patrón de aireación	min	90/90 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	26.51			-
Temperatura de la muestra	°C	25.41	24.73	24.70	-
pH	-	7.13	7.35	7.37	-
Turbiedad	UNT	112.97	38.66	2.30	97.96
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.21	-	5.29	-
DBO ₅	mg/L	107.64	-	6.91	93.58
DQO	mg/L	201.00	-	27.00	86.57
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.22	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	72.87	14.61	4.99	93.15
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	66.80	13.60	2.70	95.96
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	21.69	-	2.58	88.11
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	12.00	-	1.00	91.67
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	18.00	-	3.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	22.90	-	2.70	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	62.59	-	8.28	86.77

SEMANA N° 31					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retencion hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.33			-
Patrón de aireación	min	60/120 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	23.70			-
Temperatura de la muestra	°C	23.32	22.72	22.63	-
pH	-	7.12	7.27	7.36	-
Turbiedad	UNT	218.17	37.20	8.46	96.12
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.20	-	4.06	-
DBO ₅	mg/L	189.55	-	27.77	85.35
DQO	mg/L	345.00	-	76.00	77.97
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.39	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	106.50	17.63	11.90	88.83
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	86.00	15.88	11.20	86.98
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	24.71	-	16.20	34.44
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	16.00	-	15.00	6.25
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	21.00	-	8.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	19.60	-	4.60	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	65.31	-	28.80	55.90

SEMANA N° 32					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.33			-
Patrón de aireación	min	60/120 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	21.80			-
Temperatura de la muestra	°C	21.90	21.40	21.44	-
pH	-	7.22	7.47	7.54	-
Turbiedad	UNT	119.80	26.90	7.73	93.55
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.43	-	4.19	-
DBO ₅	mg/L	153.22	-	15.94	89.60
DQO	mg/L	271.00	-	43.00	84.13
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.32	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	90.80	9.40	9.80	89.21
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	76.40	8.10	9.10	88.09
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	25.87	-	16.09	37.80
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	20.00	-	15.00	25.00
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	19.00	-	5.00	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	24.50	-	2.10	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	69.37	-	23.19	66.57

SEMANA N° 33					
Parámetros	Unidad	Punto Evaluado			Eficiencia (%)
		Afluente	LM	Efluente	
Caudal promedio	mL/s	1.93	-	1.90	-
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	horas	11.67			-
Fracción aireada (AF)	-	0.33			-
Patrón de aireación	min	60/120 (Aireación Intermitente)			-
Temperatura Ambiental	°C	19.92			-
Temperatura de la muestra	°C	20.00	19.56	19.56	-
pH	-	7.30	7.41	7.54	-
Turbiedad	UNT	205.20	23.04	10.48	94.89
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	0.08	-	4.11	-
DBO ₅	mg/L	155.31	-	18.16	88.31
DQO	mg/L	276.00	-	62.00	77.54
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	KgDBO/m ³ *día	0.32	-	-	-
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	90.50	6.80	8.40	90.72
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/L	85.00	6.80	8.40	90.12
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	mg/L	-	-	-	-
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	-	-	-	-
Nitrógeno total (N _{Total})	mg/L	-	-	-	-

10.4. ANEXO N° 4: METODOLOGÍA DEL HIDRÓXIDO DE SODIO PARA LA DETERMINACIÓN DE SST Y SSV.

La metodología "Hidróxido de Sodio" emplea el principio de que la presencia de NaOH a elevada temperatura promueve la lisis de las bacterias y por lo tanto permite la remoción de la biomasa adherida al medio de soporte (CAMMAROTA, 1998). En este sentido, se adopta el siguiente protocolo:

- Retirar 6 piezas del interior del tanque de aireación, y colocarlas en cápsulas de porcelana, independientemente, cada una conteniendo una solución de 1% de NaOH en volumen que permita la total sumersión de la pieza, que en el presente caso correspondió a 150 ml.
- Someter las cápsulas al baño María, a una temperatura de 90 ° C, durante aproximadamente 20 minutos, revisándolas frecuentemente para incentivar el desprendimiento y extracción de la biomasa;
- Después del enfriamiento de las cápsulas, retirar las piezas del recipiente, y someter la masa líquida remanente a la determinación de SST y SSV de la forma como recomienda (APHA, 2012).

Se resalta que en este caso no es adecuada la determinación de ST, SF y SV, por el hecho de que la presencia del NaOH podría influenciar la cuantificación de los mismos.

La Figura 10.0 ilustra la masa líquida remanente después del baño de María y la extracción del medio de soporte.



Figura 10.0. Biomasa extraída de las hebras de polipropileno, antes de la determinación de SST y SSV.

10.5. ANEXO N° 5: PANEL FOTOGRÁFICO.

A) COMPONENTES DEL SISTEMA

Tanque de almacenamiento.



Figura 10.1. Tanque de almacenamiento y piezómetro, tanque eternit de 600 L con las válvulas de control, de descarga y distribución al sistema, acopladas en la parte inferior.

Mezclador de homogenizado.



Figura 10.2. Motor de ventilador, adaptado para utilizarlo como mezclador homogenizador del tanque de almacenamiento, ubicado sobre la tapa del tanque, operó a 30 rpm.

Tablero de control.

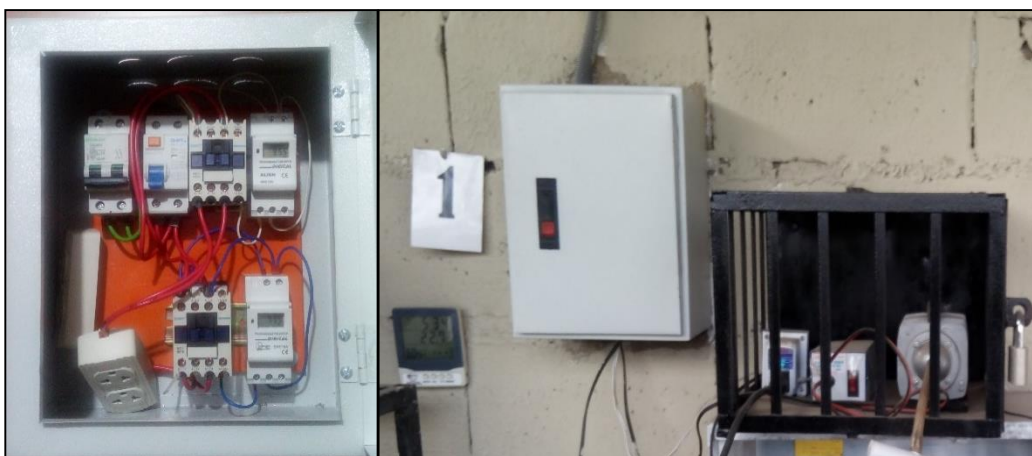


Figura 10.3. Se muestra el tablero de control empotrado a la pared y en la izquierda de la figura se muestra los elementos internos del tablero compuesto por una llave termomagnética, diferencial, dos contactores, dos timer digitales y dos tomacorrientes.

Tuberías de succión.



Figura 10.4. Mangueras siliconadas de Ø 3/8 pulg. forradas con cinta aislante negra para evitar el desarrollo de algas en su pared interna. Va hacia la bomba peristáltica.

Sistema de impulsión.



Figura 10.5. Bomba peristáltica Cole-Parmer con dos cabezales para mangueras masterflex de Ø 3/8 pulg. La imagen de la derecha muestra su ubicación en la caja de concreto.

Tuberías de impulsión y zona de ingreso al reactor.



Figura 10.6. En la derecha de la imagen se muestra las dos mangueras de impulsión de Ø 3/8 pulg. con sus respectivas válvulas de paso y purga, además, se muestra la zona de ingreso en la que se aprecia las tuberías sumergidas.

Zona de ingreso al reactor.



Figura 10.7. Tuberías de CPVC de $\varnothing$ 1/2 pulg. y 42 cm de longitud, de ingreso sumergido.

Reactor de lodos activados con medio de adherencia fijo.



Figura 10.8. Reactor de vidrio de 6 mm de espesor con medio de adherencia fijo de hebras de polipropileno ancladas al soporte de acero inoxidable y tuberías de CPVC.

Difusores en el tanque de aireación.



Figura 10.9. Disposición de los 6 difusores de piedra de burbuja fina, pegados en la base del reactor de vidrio.

Zona de salida del reactor.



Figura 10.10. Vertedero de aluminio de 30 cm de largo por 5 cm de ancho y alto, además, se observa la tubería de PVC de paso hacia el decantador secundario.

Mezclador.

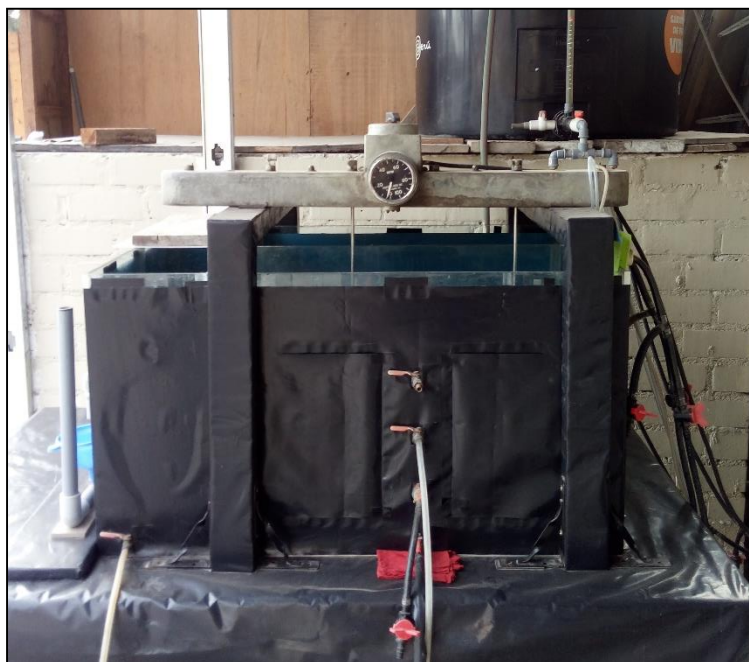


Figura 10.11. Mezclador de dos paletas apoyado en los arcos de soporte, ubicado por encima del reactor. El mezclador fue adaptado de un equipo de prueba de jarras y operó a 55 rpm.

Paletas del Mezclador.



Figura 10.12. Detalle de paletas de acero inoxidable, operó con una longitud sumergida de 35 cm, por debajo del medio fijo y por encima de los difusores.

Sistema de aireación.



Figura 10.13. La imagen de la derecha muestra el compresor de aire marca ACO de 60 L/min, y la imagen de la izquierda muestra la canastilla donde se ubicó.

Sedimentador.



Figura 10.14. Sedimentador secundario, en la imagen de la izquierda se observa el interior del sedimentador donde está el vertedero de embudo y la tubería de ingreso sumergido al sedimentador, en la imagen de la derecha se observa una vista de perfil del sedimentador vacío.

Sistema de recolección y salida del sedimentador secundario.



Figura 10.15. Salida del sedimentador y sistema de recolección conformado por un embudo y tuberías de PVC de Ø 1 pulg.

B) ETAPAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MEDIO DE ADHERENCIA.

Selección y corte del medio de adherencia fijo.



Figura 10.16. Cuerdas de polipropileno de $\varnothing$ 3/8 pulg. y 35.5 cm de longitud, en la imagen de la izquierda se aprecia las cuerdas seccionadas y en la imagen de la derecha una cuerda deshilachada en hebras.

Armado del marco de soporte del medio de adherencia fijo.



Figura 10.17. Marco de soporte compuesto de varillas de acero inoxidable dentro de mangueras siliconadas de $\varnothing$ 3/8 pulg. y conectadas con codos (horizontales), estos unidos mediante cuatro secciones de tubería de CPVC de $\varnothing$ 1/2 pulg. y 35 cm de longitud (verticales).

Proceso de probado y encaje del soporte del medio de adherencia fijo en el reactor de vidrio.



Figura 10.18. Encaje de prueba del marco de soporte apoyado sobre las cuñas de vidrio y dentro del reactor.

Proceso de tejido y fijación de las hebras de polipropileno en el marco de soporte.



Figura 10.19. Elaboración del medio de adherencia fijo, que consistió en el tendido de cuerdas de manera horizontal en la parte superior e inferior del marco de soporte, luego se procedió a fijar las hebras de polipropileno de manera transversal, mediante el cosido manual con las cuerdas horizontales.

Proceso de encaje del medio de adherencia fijo en el reactor.



Figura 10.20. Medio de adherencia fijo instalado dentro del reactor de vidrio.

Vista superior del medio de adherencia.



Figura 10.21. Vista superior del medio de adherencia fijo donde se aprecia los espacios dejados para las dos paletas del mezclador.

C) EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS.**Medición de potencial de Hidrógeno (pH).**

Figura 10.22. La imagen de la izquierda muestra el potenciómetro HACH AQ11D con el cual se midió el pH, y en la derecha se muestra en turbidímetro HACH 2100Q, equipo utilizado para la medición de turbiedad.

Medición de oxígeno disuelto y temperatura de la muestra.

Figura 10.23. En la izquierda se observa el equipo HACH HQ40D, utilizado para la medición de oxígeno disuelto y temperatura de la muestra, en la derecha el proceso de medición.

Medición de DQO, Nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos



Figura 10.24. En la imagen de la de izquierda se observa en colorímetro HACH 890 en la cual se midió la DQO, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos, en la derecha se aprecia en digestor de viales HACH DRB 200, el cual se utilizó para digerir los viales de DQO.



Figura 10.25. En la izquierda se aprecia el proceso de medición con el colorímetro y en la derecha los viales para la determinación de nitrógeno amoniacal y las celdas usadas para la determinación de nitritos y nitratos.

Medición de DBO_5 .



Figura 10.26. En la imagen de la izquierda se observa la aireación del agua de dilución, en la derecha los 12 frascos winkler, de los cuales 2 de ellos fueron usados como blancos y 5 frascos para las diferentes diluciones del afluente y otros 5 para el efluente.



Figura 10.27. Proceso de adición de los 4 nutrientes al agua de dilución, 1 mL de cada uno por litro de agua destilada saturada en oxígeno.

Medición de SST y SSV.

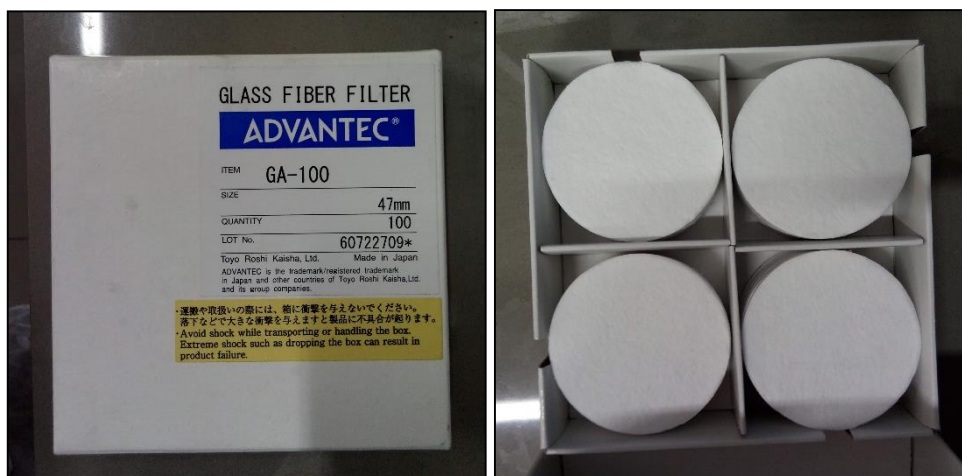


Figura 10.28. Filtros de fibra de vidrio de 45 mm, usados para determinar los SST y SSV de las muestras del agua residual afluyente, efluente y del tanque de aireación.



Figura 10.29. Compresor y tubo de vacío para el proceso de filtrado de las muestras.



Figura 10.30. Plancha de evaporación de las muestras, calienta hasta 300 °C.



Figura 10.31. A la izquierda se observa el horno mufla que calcina a 550 °C y a la derecha se puede apreciar la estufa que calienta a 105° C.



Figura 10.32. A la izquierda se observa el desecador con las muestras en proceso de secado, y a la derecha se aprecia las muestras secas y enfriadas, listos para su pesado correspondiente.

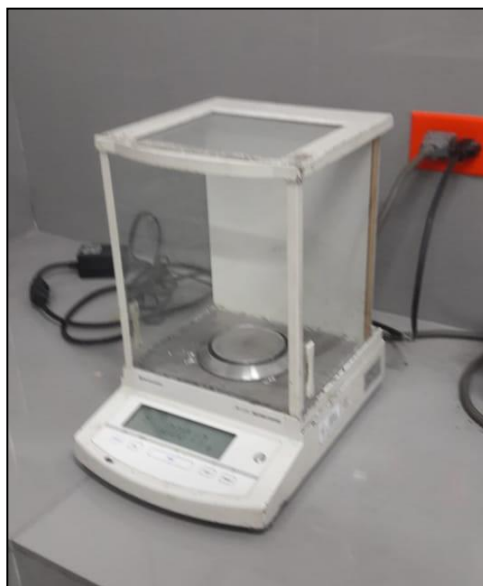


Figura 10.33. La balanza analítica usada para el proceso de pesado de las muestras de sólidos (SST y SSV).

D) VISTA DE LAS MUESTRAS A SER ANALIZADAS.

Figura 10.34. Muestras tomadas en el primer escenario evaluado, de izquierda a derecha se observa la muestra del afluente, tanque de aireación y efluente respectivamente, alta concentración de SST en el tanque de aireación, es decir alta biomasa suspendida y efluente regularmente clarificado.



Figura 10.35. Muestras tomadas en el quinto escenario evaluado, se observa la baja concentración de SST en el tanque de aireación, es decir hubo poca biomasa suspendida y efluente muy clarificado.



Figura 10.36. Muestras del afluente y efluente tomadas para la determinación de NTK, estas muestras se midieron en un laboratorio acreditado (Servicios Analítico Generales S.A.C).

E) VISTA DEL MEDIO DE SOPORTE EN CADA ESCENARIO EVALUADO.

Escenario I



Figura 10.37. Fotografía del medio de adherencia fijo en el primer escenario evaluado, tomada durante la primera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón blanquecina durante todo el mes de evaluación y además se presentó el desarrollo de algas en el medio fijo.

Escenario II



Figura 10.38. Fotografía del medio de adherencia fijo en el segundo escenario evaluado, tomada en la primera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón al inicio del escenario, sin embargo, las 2 últimas semanas evaluadas la biopelícula se tornó blanquecina y hubo desarrollo de algas.

Escenario III



Figura 10.39. Fotografía del medio de adherencia fijo en el tercer escenario evaluado, tomada en la segunda semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón durante todo el periodo evaluado.

Escenario IV



Figura 10.40. Fotografía del medio de adherencia fijo en el cuarto escenario evaluado, tomada en la tercera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón durante todo el periodo evaluado.

Escenario V

Figura 10.41. Fotografía del medio de adherencia fijo en el quinto escenario evaluado, tomada en la tercera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón durante las 3 primeras semanas.



Figura 10.42. Fotografía del medio de adherencia fijo en el quinto escenario evaluado, tomada en la cuarta semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón ligeramente blanquecina en la última semana evaluada.

Escenario VI

Figura 10.43. Fotografía del medio de adherencia fijo en el sexto escenario evaluado, tomada en la tercera semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón medianamente blanquecina y con ligero desarrollo de algas en el medio fijo.



Figura 10.44. Fotografía del medio de adherencia fijo en el sexto escenario evaluado, tomada en la cuarta semana, se caracterizó por presentar una biopelícula marrón medianamente blanquecina y con alto desarrollo de algas en el medio fijo.

Biopelícula adherida al medio fijo al terminar la evaluación del reactor.



Figura 10.45. Fotografías del medio de adherencia fijo después de haber culminado los seis escenarios evaluados, donde se visualiza la biopelícula desarrollada.