

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

**Cálculo de la carga orgánica superficial en un reactor MBBR para
el tratamiento de desagüe doméstico pretratado en CITRAR**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Sanitario.

Elaborado por

Walter Enrique Yerba Pacompia

 [0009-0009-5267-0114](https://orcid.org/0009-0009-5267-0114)

Asesor

Dra. Rosa Elena Yaya Beas

 [0000-0002-6140-4266](https://orcid.org/0000-0002-6140-4266)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Yerba Pacompia [1]
Referencia/Reference	[1] W. Yerba Pacompia, " <i>Cálculo de la carga orgánica superficial en un reactor MBBR para el tratamiento de desagüe doméstico pretratado en CITRAR</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Yerba, 2025)
Referencia/Reference	Yerba, W. (2025). <i>Cálculo de la carga orgánica superficial en un reactor MBBR para el tratamiento de desagüe doméstico pretratado en CITRAR</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*Esta tesis está dedicada a
mis queridos padres, Sixto y Josefina,
y a mis queridos hermanos
Jhemmy, Nelly y Geraldine.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de desarrollar mi tesis la cual se realizó con mucho esfuerzo y estima para toda aquella persona que desee apoyarse en este documento.

Un agradecimiento muy especial a mi familia, padres y hermanos, por su apoyo constante y paciencia durante todo el periodo del desarrollo de mi tesis.

De igual manera, un agradecimiento muy especial e inmenso para mi asesora Ph.D Rosa Elena Yaya Beas por su apoyo constante durante desarrollo de mi tesis, muchas gracias Dra.

Agradezco al Centro de investigación en tratamiento de aguas residuales y residuos peligrosos (CITRAR) por brindarme las facilidades en instalaciones de infraestructura y equipos al desarrollar la parte experimental de mi tesis.

Agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por brindarme los conocimientos y la exigencia debida durante mi etapa universitaria.

Agradezco a todas aquellas personas que en su momento me apoyaron ya sea con la solvencia de una duda, o respuesta a una consulta puntual.

Resumen

Esta investigación evaluó la carga orgánica superficial en un reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR) de un desagüe doméstico pretratado en Citrar; planteando como hipótesis que aplicar carga orgánica inferior a 20 g DBO₅/m².d permite una eficiencia de remoción de la DBO₅ superior al 80% en un reactor MBBR. La evaluación de la carga orgánica fue en tres periodos: periodo puesta en marcha, primer periodo y segundo periodo con caudales de operación promedio de 200.75, 198.74 y 298.22 L/día respectivamente; y fue durante 25 semanas.

El reactor MBBR fue de dos etapas en serie, con volumen en cada etapa de 40 L, sección rectangular y usó un sistema aireado. El portador de biopelícula utilizado posee un área de superficie específica de 2166.47 m²/m³ y porcentaje de vacío del 84.19%; cada etapa del reactor MBBR consistió con un porcentaje de llenado del 32.55%.

Finalmente, se concluyó que en el primer periodo una carga orgánica superficial aplicada (SALR) promedio de 6.53 ± 0.79 g DBO₅/m².d obtiene una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR del $93.05 \pm 3.05\%$; y que en el segundo periodo una SALR promedio de 10.05 ± 1.56 g DBO₅/m².d obtiene una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR del $88.76 \pm 4.29\%$. Además, se concluye que el portador utilizado remueve la DBO y la DQO.

Palabras clave — Agua residual doméstico pretratado, reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil, carga orgánica superficial aplicada, portador de biopelícula.

Abstract

This study evaluated the surface organic loading in an aerobic moving bed biofilm reactor (MBBR) from a pretreated domestic sewage treatment plant in Citrar; it is being formulated that applying an organic loading of less than 20 g BOD₅/m²/d allows for a BOD₅ removal efficiency greater than 80% in an MBBR reactor. The evaluation of the organic load was over three periods: the start-up period, the first period, and the second period, with average operating flow rates of 200.75, 198.74, and 298.22 L/day, respectively; and it was during 25 weeks.

The MBBR reactor was a two-stage reactor in series, with a volume of 40 L per stage, a rectangular section, and an aerated system. The biofilm carrier used had a specific surface area of 2166.47 m²/m³ and an empty percentage of 84.19%; each stage of the MBBR reactor consisted of a fill percentage of 32.55%.

Finally, it was concluded that in the first period, an average applied organic surface loading (SALR) of 6.53 ± 0.79 g BOD₅/m².d obtained an average BOD₅ removal efficiency in the MBBR reactor of $93.05 \pm 3.05\%$; and that in the second period, an average SALR of 10.05 ± 1.56 g BOD₅/m².d obtained an average BOD₅ removal efficiency in the MBBR reactor of $88.76 \pm 4.29\%$. Furthermore, it was concluded that the carrier used removes BOD and COD.

Keywords — Pretreated domestic wastewater, aerobic moving bed biofilm reactor, applied surface organic load, biofilm carrier.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción	xvi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.3 Objetivos del estudio.....	1
1.3.1 Objetivo general	1
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Antecedentes investigativos	2
Capítulo II. Marco teórico y conceptual.....	6
2.1 Marco teórico.....	6
2.1.1 Procesos de tratamiento biológico de crecimiento adherido.....	6
2.1.1.1 Proceso de biopelículas.	6
2.1.2 Reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR).....	7
2.1.2.1 Portadores de biopelícula.	8
2.1.2.2 Remoción de la DBO.	9
2.1.2.3 Remoción de la DQO.	10
2.1.2.4 Ventajas y desventajas del reactor MBBR.	10
2.1.3 Consideraciones de diseño del reactor MBBR.....	11
2.1.3.1 Carga orgánica superficial.	11
2.1.3.2 Portadores de biopelículas.	11
2.1.3.3 Oxígeno disuelto.	12
2.1.4 Marco legal	12
2.2 Marco conceptual.....	12
2.3 Hipótesis de la investigación	13

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	14
3.1 Ubicación de la investigación	14
3.2 Descripción de las unidades de la etapa experimental.....	14
3.2.1 Unidad de pretratamiento.....	14
3.2.2 Cámara distribuidora de caudal	15
3.2.3 Sistema de bombeo de agua residual doméstica pretratado	15
3.2.4 Tanque de homogenización.....	16
3.2.5 Tanque distribuidor de caudal.....	17
3.2.6 Reactor MBBR.....	17
3.2.7 Portador de biopelícula	18
3.2.8 Sistema de aireación.....	19
3.2.9 Sedimentador secundario	20
3.3 Periodos de investigación	20
3.4 Puntos de monitoreo	20
3.5 Parámetros de análisis y de control	23
3.6 Parámetros de diseño del reactor MBBR	24
3.7 Determinación de carga orgánica superficial	25
3.8 Determinación del área de superficie específica	25
3.9 Determinación de análisis complementarios	25
3.9.1 Relación F/M equivalente.....	25
3.9.2 K_{La}	26
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	27
4.1 Presentación de resultados	27
4.1.1 Diseño del reactor MBBR.....	27
4.1.2 Área de superficie específica, porcentaje de vacío y porcentaje de llenado	28
4.1.3 Caudal de operación	29
4.1.4 Temperatura ambiental	30
4.1.5 Temperatura del agua residual	31

4.1.6	pH	33
4.1.7	Turbiedad	34
4.1.8	Oxígeno disuelto	36
4.1.9	Demanda bioquímica de oxígeno	38
4.1.10	Demanda bioquímica de oxígeno soluble.....	39
4.1.11	Demanda química de oxígeno	41
4.1.12	Sólidos sedimentables	42
4.1.13	Sólidos suspendidos volátiles	44
4.1.14	Sólidos suspendidos fijos.....	45
4.1.15	Sólidos suspendidos totales.....	47
4.1.16	F/M equivalente	48
4.1.17	K_{La}	49
4.2	Análisis y discusión de resultados	51
4.2.1	Verificación de hipótesis	51
4.2.2	Portador de biomasa.....	60
4.2.3	DBO_5 y DBO_5 soluble	61
4.2.4	Efecto del oxígeno disuelto en la remoción de la materia orgánica.....	62
4.2.5	Turbiedad y eficiencia de remoción	64
4.2.6	Efecto de la turbiedad en la remoción de la materia orgánica	65
4.2.7	Influencia del oxígeno disuelto en la turbiedad	68
4.2.8	Temperatura ambiental y temperatura del agua residual	69
4.2.9	pH	70
4.2.10	SSV y SSF.....	71
4.2.11	SST	72
4.2.12	Sólidos sedimentables	73
4.2.13	Relación F/M equivalente.....	74
4.2.14	K_{La}	75
4.2.15	Cumplimiento de los LMP	76

Conclusiones	78
Recomendaciones.....	81
Referencias bibliográficas	82
Anexos	84

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Criterios de la SALR para la remoción de la DBO.	9
Tabla 2: Especificación técnica de la bomba.....	16
Tabla 3: Características generales del portador utilizado – rulero.....	19
Tabla 4: Características del soplador 1 y del soplador 2.	19
Tabla 5: Periodos de la investigación.	20
Tabla 6: Puntos de monitoreo.	21
Tabla 7: Parámetros de análisis y de control.....	23
Tabla 8: Metodología de análisis que se utilizó para cada parámetro.....	23
Tabla 9: Diseño de la primera etapa del reactor MBBR.....	27
Tabla 10: Diseño de la segunda etapa del reactor MBBR.	27
Tabla 11: Área de superficie específica, porcentaje de vacío y porcentaje de llenado.....	28
Tabla 12: Resultados de caudal de operación promedio, máximo y mínimo.	29
Tabla 13: Resultados de temperatura ambiental promedio, máximo y mínimo.....	30
Tabla 14: Resultados de la temperatura del agua residual promedio, máxima y mínima.	31
Tabla 15: Resultados del pH promedio, máximo y mínimo.....	33
Tabla 16: Resultados de la turbiedad promedio, máxima y mínima.	35
Tabla 17: Resultados del oxígeno disuelto promedio, máximo y mínimo.....	36
Tabla 18: Resultados de la DBO ₅ promedio, máxima y mínima.	38
Tabla 19: Resultados de la DBO ₅ soluble promedio, máxima y mínima.....	39
Tabla 20: Resultados de la DQO promedio, máxima y mínima.	41
Tabla 21: Resultados de sólidos sedimentables promedio, máximo y mínimo.	42
Tabla 22: Resultados de los SSV promedio, máximo y mínimo.	44
Tabla 23: Resultados de los SSF promedio, máximo y mínimo.....	45
Tabla 24: Resultados de los SST promedio, máximo y mínimo.....	47
Tabla 25: Resultados de los SSV en la biopelícula promedio, máximo y mínimo.....	48
Tabla 26: Resultados de los SST y los SSV en el licor de mezcla del reactor MBBR.	49

Tabla 27: Datos de entrada para el cálculo del TRH, SALR y SARR.....	51
Tabla 28: Resumen de resultados del SALR y SARR para la DBO ₅ por periodo.....	53
Tabla 29: Resumen de resultados del SALR y SARR para la DBO ₅ soluble por periodo.	56
Tabla 30: Características principales de diseño del portador utilizado	60
Tabla 31: Resumen F/M equivalente en la primera y segunda etapa del reactor MBBR..	74
Tabla 32: Resumen del K _{La} en cada etapa del reactor MBBR.	76
Tabla 33: Comparación de resultados con los LMP.....	76

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Representación esquemática de biopelícula adherida al portador.....	7
Figura 2: Ejemplos de portadores de biomasa usados en reactores MBBR.	8
Figura 3: Tasa de carga de la DQO total y la DQO soluble y tasa remoción respectivo...10	
Figura 4: Unidad de pretratamiento.	15
Figura 5: Cámara distribuidora de caudal.	15
Figura 6: Cuadros de leyenda de la representación esquemática de las unidades de tratamiento.	21
Figura 7: Representación esquemática de las unidades principales de tratamiento de la investigación.	22
Figura 8: Rulero utilizado como portador de biomasa en la investigación.....	25
Figura 9: Perfil del portador de biomasa – rulero.	29
Figura 10: Resultados de caudal de operación promedio semanal.	30
Figura 11: Resultados de temperatura ambiental promedio semanal.	31
Figura 12: Resultados de la temperatura del agua residual promedio semanal.	33
Figura 13: Resultados del pH del agua residual promedio semanal.....	34
Figura 14: Resultados de la turbiedad del agua residual promedio semanal.	36
Figura 15: Resultados de oxígeno disuelto del agua residual promedio semanal.	37
Figura 16: Resultados de la DBO ₅	39
Figura 17: Resultados de DBO ₅ soluble.	41
Figura 18: Resultados de la DQO.	42
Figura 19: Resultados de los sólidos sedimentables.	43
Figura 20: Resultados de los SSV.	45
Figura 21: Resultados de los SSF.	46
Figura 22: Resultados de los SST.	48
Figura 23: SSV adheridos al portador en el primera y segunda etapa del reactor MBBR.	49

Figura 24: K_{La} de la primera etapa del reactor MBBR.	50
Figura 25: K_{La} de la segunda etapa del reactor MBBR.	50
Figura 26: Resumen de la DBO_5 promedio y eficiencia de remoción por periodo.	58
Figura 27: Resumen de la DBO_5 soluble promedio y eficiencia de remoción por periodo.	59
Figura 28: Resumen de la DQO promedio y eficiencia de remoción por periodo.	60
Figura 29: Resumen de la DBO_5 promedio y la DBO_5 soluble promedio por periodo.	61
Figura 30: Resumen del OD promedio y eficiencia de remoción promedio de la DBO_5	62
Figura 31: Resumen del OD promedio y eficiencia de remoción promedio de la DBO_5 soluble.....	63
Figura 32: Resumen del OD promedio y eficiencia de remoción promedio de la DQO. ...	64
Figura 33: Resumen de la turbiedad promedio y eficiencia de remoción promedio por periodo.....	65
Figura 34: Resumen de la turbiedad promedio y eficiencia de remoción promedio de la DBO_5	66
Figura 35: Resumen de turbiedad promedio y eficiencia de remoción promedio de la DBO_5 soluble.....	67
Figura 36: Resumen de la turbiedad promedio y eficiencia de remoción promedio de la DQO.....	68
Figura 37: Resumen del oxígeno disuelto promedio y turbiedad promedio por periodo. ...	69
Figura 38: Resumen de la temperatura ambiental y del agua residual promedio por periodo.	70
Figura 39: Resumen del pH promedio por periodo.	71
Figura 40: Resumen de los SSV y los SSF promedios por periodo.	72
Figura 41: Resumen de los SST y su eficiencia de remoción promedio por periodo.	73
Figura 42: Resumen de los SS promedio y eficiencia de remoción promedio por periodo.	74

Figura 43: Resumen de SSV adheridos y eficiencia de remoción de la DBO ₅ y DBO ₅ soluble.....	75
---	----

Introducción

Esta tesis titulada “Cálculo de la carga orgánica superficial en un reactor MBBR para el tratamiento de desagüe doméstico pretratado en CITRAR”, analiza (1) la carga orgánica superficial aplicada y removida en términos de la DBO_5 y de la DBO_5 soluble, (2) la remoción de la DBO_5 , de la DBO_5 soluble y de la DQO, (3) la remoción de los SST, de los SSF y de los SSV, y (4) de qué manera influyen los parámetros físico-químicos en el cálculo de la carga orgánica superficial.

En el Capítulo I se detalla las generalidades, la descripción del problema de investigación, los objetivos del estudio, y los antecedentes investigativos. En el Capítulo II conformada por (1) el marco teórico explica los procesos de tratamiento biológico de crecimiento adherido, el reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR), las consideraciones de diseño del reactor MBBR, y el marco legal vigente; por (2) el marco conceptual explica los conceptos claves que se utilizó en la investigación; y por (3) la hipótesis de la investigación.

En el Capítulo III se detalla el desarrollo del trabajo de investigación que comprende la ubicación de la investigación, la descripción de las unidades de la etapa experimental, los periodos de la investigación, los puntos de monitoreo, los parámetros de análisis y de control, los parámetros de diseño del reactor MBBR, la determinación de la carga orgánica superficial, la determinación del área de superficie específica, y la determinación de análisis complementarios. En el Capítulo IV se analiza y se discute los resultados obtenidos de los parámetros físico-químicos analizados, y cómo estos influyeron en la determinación de la carga orgánica superficial. Además, se menciona las conclusiones, y se brinda las recomendaciones de la presente tesis y para posteriores investigaciones.

Para finalizar, se menciona las referencias bibliográficas, y se presenta los anexos conformado por tabla de resultados, resultados de ensayos de laboratorio de la DQO, y evidencias del desarrollo de la parte experimental.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR) es un proceso de crecimiento adherido, es versátil y adaptable para la eliminación de la materia orgánica y nutrientes presentes en un agua residual; utiliza principalmente portadores de biopelículas con un área de superficie específica entre 500 y 700 m²/m³ y con una gravedad específica próxima y menor a 1 g/cm³, dichos portadores están dentro de un tanque aireado en constante movimiento; y existen diferentes configuraciones de reactores MBBR en función del objetivo de tratamiento del agua residual (Metcalf y Eddy, 2015).

Es así que, en la presente investigación se implementó un reactor MBBR para calcular la carga orgánica superficial, y para tal efecto se utilizó un desagüe doméstico pretratado. No cabe duda que los resultados obtenidos en esta investigación serán de gran aporte para futuras investigaciones de reactores MBBR.

1.2 Descripción del problema de investigación

Según Odegaard (2006), la principal ventaja de un reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR del inglés Moving Bed Biofilm Reactor) frente a otros procesos de tratamiento de aguas residuales, es su compacidad, la ausencia de necesidad de recirculación de lodos, y flexibilidad, esto último por el hecho que se puede utilizar en cualquier forma del reactor.

Por lo que, continuar con la investigación en el análisis de los parámetros de diseño del reactor MBBR en las condiciones medioambientales del Perú, y añadir conocimiento de una estimación cuantitativa para remover materia orgánica es necesario y pertinente en el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 *Objetivo general*

- Evaluar la carga orgánica superficial en un reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR) para el tratamiento de desagüe doméstico pretratado en Citrar.

1.3.2 Objetivos específicos

- Implementar un reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR) piloto de dos etapas en serie para la remoción de materia orgánica.
- Determinar el área de superficie específica y porcentaje de vacío del portador utilizado, y determinar el porcentaje de llenado de dichos portadores en cada etapa del reactor MBBR de dos etapas en serie.
- Evaluar el desempeño de un reactor MBBR de dos etapas en serie a diferentes caudales de operación.
- Determinar la temperatura ambiental, la temperatura del agua residual, el pH, la turbiedad, el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda bioquímica de oxígeno soluble (DBO soluble), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos sedimentables (SS), los sólidos suspendidos totales (SST), los sólidos suspendidos volátiles (SSV) y los sólidos suspendidos fijos (SSF) en un reactor MBBR de dos etapas en serie.
- Determinar la relación F/M equivalente y determinar el K_{La} de los difusores utilizados en un reactor MBBR de dos etapas en serie al final de la investigación.
- Comparar los parámetros obtenidos con los LMP para efluentes en las PTARs.

1.4 Antecedentes investigativos

Según Odegaard et al. (2000), se instalaron tres plantas pilotos idénticas como parte de una investigación experimental, dicha experimentación fue realizada en distintos periodos, en el primer periodo se usó tres tipos diferentes de portadores de superficies específicas efectivas del $190 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $310 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y $315 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bajo condiciones de cargas orgánicas superficiales altas es decir de 10 a $120 \text{ g DQO}/\text{m}^2.\text{d}$ y un porcentaje de llenado del 60%, resultó que el portador más pequeño ($190 \text{ m}^2/\text{m}^3$) tuvo mejor desempeño que los portadores más grandes ($310 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y $315 \text{ m}^2/\text{m}^3$); en el segundo periodo, usando los mismos portadores del primer periodo, se varió los porcentajes de llenado en cada reactor a 22%, 36% y 60% de manera que los reactores tengan una misma superficie específica

efectiva de $110 \text{ m}^2/\text{m}^3$ con la condición de incrementar la carga orgánica para alcanzar la tasa máxima de eliminación, con estas modificaciones, se observó que hubo poca diferencia en el rendimiento entre la tasa de remoción de SDQO y la tasa de carga orgánica en $\text{g SDQO}/\text{m}^2.\text{d}$ para los tres reactores diferentes. En base al primer y segundo periodo, se concluyó que el parámetro clave para diseños de reactores MBBR es el área de superficie específica efectiva y, que la forma y el tamaño de los portadores son menos importante cuando el área de superficie específica efectiva es la misma.

Según Odegaard et al. (1994), describen la aplicación de un reactor MBBR diseñada para 250 personas, en la cual la carga orgánica total en el reactor, en base a los portadores utilizados, fue de $18.8 \text{ g DQO total}/\text{m}^2.\text{d}$ y $10.3 \text{ g DQO sol}/\text{m}^2.\text{d}$. Los resultados, para un tiempo de investigación de 6 semanas, concluyeron una eficiencia de remoción promedio de la DQO total de 91.2%; y el resultado de la eficiencia de remoción promedio de muestras tomadas en un día para la DBO y DQO fueron del 96% y 94.5%, respectivamente. Por otro lado, describen, que al tratar aguas residuales del efluente de una fábrica en un reactor MBBR de tres etapas en serie, con una aplicación de carga orgánica superficial de $8.0 \text{ g DQO}/\text{m}^2.\text{d}$ en un primer periodo y $16 \text{ g DQO}/\text{m}^2.\text{d}$ en un segundo periodo, con portadores de una superficie específica efectiva de $250 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y con un porcentaje de llenado del 50% en el reactor, y se obtuvo bajo estas condiciones una eficiencia de remoción de la DQO del 95% en ambos periodos.

Según Minegatti de Oliveira (2008), para evaluar el desempeño del reactor MBBR, utilizó portadores de biomasa cilíndricos de material de polietileno ranurado de densidad $1 \text{ g}/\text{cm}^3$, superficie específica de $635 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y porcentaje de llenado de 20%, y tiempo de retención de 5,5 horas. Se concluyó que la eficiencia de remoción promedio de DBO y DQO fue del 84% y 81% respectivamente.

Según Rusten et al. (2004), describen la aplicación de un reactor MBBR en el tratamiento de desagüe doméstico utilizado en cuatro plantas con reactores MBBR de dos etapas en serie a escala real, entre los años 2000-2002, donde la tasa de carga orgánica de diseño estuvo entre $7 \text{ g DBO}_7/\text{m}^2.\text{d}$ y $10 \text{ g DBO}_7/\text{m}^2.\text{d}$, y a una temperatura de 10°C

resultando una eficiencia de remoción promedio superior al 95% y 85% para la DBO₇ y la DQO respectivamente.

Según Andreottola et al. (2000), realizaron un experimento en una planta piloto en aguas residuales pretratadas para comparar, de forma paralela, un reactor MBBR de dos etapas en serie con un proceso de lodos activados, para el reactor MBBR se usó portadores de biomasa de polipropileno de densidad 0.94 g/cm³, de forma cilíndrica corrugada, con superficie específica de 160 m²/m³, y con porcentaje de llenado del 70%; se observó una eficiencia de remoción promedio de la DQO total del 76%, y sugieren que para que los microorganismos puedan crecer en los portadores entonces la superficie específica debe ser mayor. Se concluyó que, para obtener mejores eficiencias en remoción del material orgánico, la superficie del portador de biomasa debe estar entre 200 m²/m³ y 250 m²/m³ para un porcentaje de llenado del 70%.

Según D. Daude y T. Stephenson (2003) evaluó la tecnología MBBR a pequeña escala, conformada por dos reactores en serie, donde el volumen de cada reactor fue de 3 m³, los portadores de biomasa fueron de polipropileno de densidad 0.94 g/cm³, de 10 mm de diámetro y 30 mm de longitud, y con porcentaje de llenado del 50% para ambos reactores; con concentraciones promedio de oxígeno disuelto (OD) en el primer y segundo reactor de 5.1 y 7.6 mg/L, respectivamente. En el primer reactor se observó eficiencias de remoción de DBO₅ y DQO del 72,8% y 56,7% respectivamente, y en el segundo reactor las eficiencias de remoción de DBO₅ y DQO fueron del 70.6% y 62.5% respectivamente, obteniéndose así una remoción total de DBO₅ y DQO del 94.7% y 88.3% respectivamente. Se concluyó que aplicar reactores MBBR en serie poseen un buen rendimiento en la eliminación de la DBO₅ y la DQO.

Según Aygun et al. (2008), evaluaron distintas cargas orgánicas superficiales aplicadas en un reactor MBBR a pequeña escala, el reactor MBBR consistía en un volumen de 2 litros, con portadores K1 con porcentaje de llenado del 50% y con cargas orgánicas superficiales aplicadas de 6, 12, 24, 48 y 96 g DQO/m².d obteniéndose una eliminación de carga orgánica del 95,1%, 94,9%, 89,3%, 68,7% y 45,2% respectivamente. El estudio

demostró que al incrementar la carga orgánica superficial aplicada entonces disminuye la eficiencia de remoción del material orgánico.

Según Rusten et al. (1998), construyeron una planta piloto que combina un reactor MBBR seguido de un reactor de contacto de sólidos por aireación (SCR, por sus siglas en ingles), el objetivo del reactor MBBR fue aplicar altas cargas orgánicas para producir un efluente de buena calidad; en el reactor MBBR utilizaron como portadores de biomasa polietileno de densidad 0.96 g/cm^3 de forma cilíndrica con diámetro y alto aproximados de 10 y 7 mm respectivamente, con un área de superficie específica y área de superficie específica efectiva de $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y $350 \text{ m}^2/\text{m}^3$ respectivamente, y el porcentaje de llenado máximo fue del 70%; las cargas orgánicas aplicadas durante el periodo de operación fueron de 8.1, 16.4, 27.6, 21.1, 21.2, 37.4 y 48.6 g DBO₅/m².d, obteniéndose una remoción de DBO₅ sedimentada del 70%, 72.5%, 66.8%, 79%, 70%, 54.8%, y 52.2%, respectivamente. Se concluye que una carga orgánica superficial aplicada hasta 30 g DBO₅/m².d remueve en promedio hasta un 70%, y que una carga orgánica superficial aplicada entre 35 y 50 g DBO₅/m².d disminuye la remoción a un 50%.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Procesos de tratamiento biológico de crecimiento adherido*

El proceso de tratamiento biológico de crecimiento adherido es aquel donde la biomasa se encuentra sujeto o adherido a algún medio de soporte para la conversión de los componentes orgánicos del agua residual a tratar, en otras palabras, es un proceso en la cual se forma una biopelícula en un medio de soporte, esta biopelícula se compone principalmente de microorganismos y material particulado, las cuales ocupan la superficie del medio de soporte ya mencionado; es preciso mencionar que en un proceso de crecimiento adherido el sustrato o alimento es consumido a través de la biopelícula; en particular, el proceso de crecimiento adherido aerobio posee como característica un crecimiento de biopelícula en un medio fijo, una remoción de sólidos por sedimentación, una inyección de oxígeno en el reactor, un contacto entre el agua residual a tratar y la biopelícula, y una recolección del agua residual tratada (Metcalf y Eddy, 2015).

2.1.1.1 Proceso de biopelículas. El proceso de formación de biopelículas para el tratamiento de las aguas residuales es de interés por distintas razones, primero porque las plantas de tratamiento requieren menos espacio lo que influye en costo del proyecto, segundo porque los sólidos en el efluente no están condicionados por la aplicación de alguna técnica de separación de los mismos ya que la presencia de sólidos en el licor de mezcla es mucho menor en comparación de otros procesos de tratamiento, y tercero porque la biopelícula adherida al portador se vuelve muy especializada es decir la biopelícula sintetiza la mayor cantidad de componentes presentes en el agua residual evitando así la necesidad de retorno de biomasa (Odegaard, 2006).

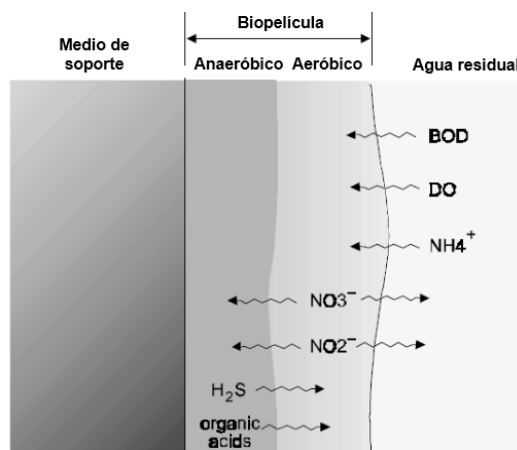
Dicho lo anterior, es muy importante entender cómo es el proceso de formación de biopelículas la cual es como se describe, el proceso de adherencia o de la biopelícula adherida el portador entra en contacto con el agua residual lo que ocasiona que en la superficie externa de la biopelícula se absorban los compuestos para el desarrollo de los

microorganismos, sin embargo, aquellos componentes que no pueden ser absorbidos primero tienen que pasar por un proceso de hidrólisis es decir mediante la presencia de enzimas se convierten los componentes complejos a compuestos más simples; posterior a la adherencia, los compuestos absorbidos son conducidos a través de la capa interna de la biopelícula por difusión para que de esta manera los compuestos absorbidos sean metabolizados por la microbiota en la biopelícula y obtener así productos aún más simples, en resumen, la biopelícula adherida al portador nos permite obtener compuestos muy simplificados a partir de compuestos muy complejos (Von Sperling, 2007).

En la figura 1 se muestra de forma esquemática la biopelícula adherida al portador.

Figura 1

Representación esquemática de biopelícula adherida al portador.



Nota: Adaptado de (Von Sperling, 2007).

2.1.2 Reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR)

El reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (del inglés Moving Bed Biofilm Reactor o MBBR) fue desarrollado inicialmente en Noruega, la razón primordial de su estudio fue crear un reactor que esté conformado por portadores de biopelícula, que no exista problemas con la obstrucción, que esté en continuo funcionamiento, y que el portador de biopelícula sea de una alta superficie específica, ya sea para el tratamiento de aguas residuales domésticas o industriales (Odegaard et al., 1994).

Producto del avance de las investigaciones, el reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR) se ha transformado en una alternativa tecnológica de renombre por la

característica de ser compacta y flexible para el tratamiento de las aguas residuales, ya que permite la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la oxidación del amoníaco, la remoción del nitrógeno y otras utilidades, con la finalidad de cumplir con los estándares de calidad ambiental para efluentes (WEF, 2010).

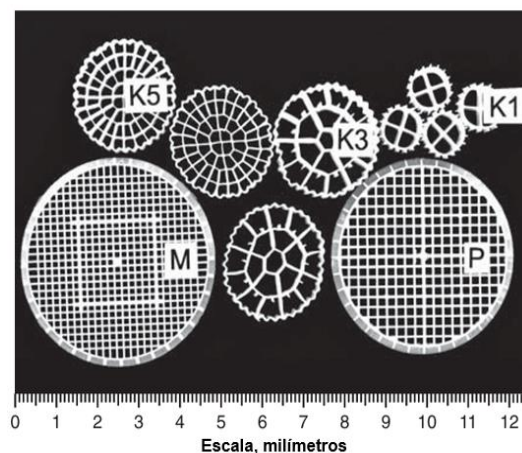
2.1.2.1 Portadores de biopelícula. Los portadores de biopelícula o también llamados soportes de biomasa son aquellos donde la biopelícula crece y queda adherido para la posterior síntesis de los componentes orgánicos presentes en el agua residual, originalmente fueron fabricados de polietileno con una densidad cercana a 1 g/cm^3 ya que de esta manera favorecía su movilidad al interior del reactor, además dichos portadores ocupaban una fracción de llenado en el reactor hasta del 70% (Odegaard et al., 2000).

En el pasado, los portadores de biomasa tenían la forma de una rueda con dimensiones aproximadas de 7 mm de alto y 10 mm de diámetro, sin embargo, con un diámetro de 25 mm es el más común en la actualidad; una de las características de los portadores de biopelícula es de poseer una superficie específica entre 500 y $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Metcalf y Eddy, 2015).

En la figura 2 se muestra ejemplos de portadores de biomasa que se usan en los reactores MBBR, dichos portadores son en su mayoría patentados.

Figura 2

Ejemplos de portadores de biomasa usados en reactores MBBR.



Nota: Adaptado de (Metcalf y Eddy, 2015).

2.1.2.2 Remoción de la DBO. La remoción de la DBO es de gran interés en procesos de tratamiento secundario por lo que es importante entender que la materia orgánica se puede dividir por un lado en materia orgánica soluble y biodegradable que posee una degradación rápida, y por otro lado a la materia orgánica particulada la cual, luego del proceso de hidrólisis, se biodegrada una porción de la materia orgánica; por lo mencionado, para eliminación de la materia orgánica es primordial realizar una caracterización del afluente en función de la materia orgánica soluble y particulada (Odegaard et al., 2018).

En los reactores MBBR, la remoción de la DBO está en función del diseño de la SALR (del inglés Surface Area Loading Rate o SALR) o también llamado carga orgánica superficial aplicada para remover el material orgánico carbonoso y que a su vez está en función del objetivo del tratamiento, es así que existe distintas tasas de diseño de la SALR, por ejemplo (1) se utiliza diseños de alta tasa cuando el objetivo principal del tratamiento es remover la DBO soluble pero afecta a la sedimentabilidad de la biomasa ya que dicha sedimentabilidad se ve disminuida; (2) se utiliza diseños de tasa normal cuando aparte de remover la DBO también se busca la eliminación de fósforo al adicionar una sustancia química, esto se logra cuando se tiene dos reactores MBBR en serie; y (3) se utiliza diseños de baja tasa cuando se busca remover la DBO y llevar a cabo el proceso de nitrificación esto se logra con reactores MBBR en serie secuencial en la cual los primeros reactores eliminan la materia carbonosa y en los últimos reactores se lleva a cabo el proceso de nitrificación (WEF, 2010).

En la tabla 1, se muestra los criterios de diseño de la SALR en función del objetivo.

Tabla 1

Criterios de la SALR para la remoción de la DBO.

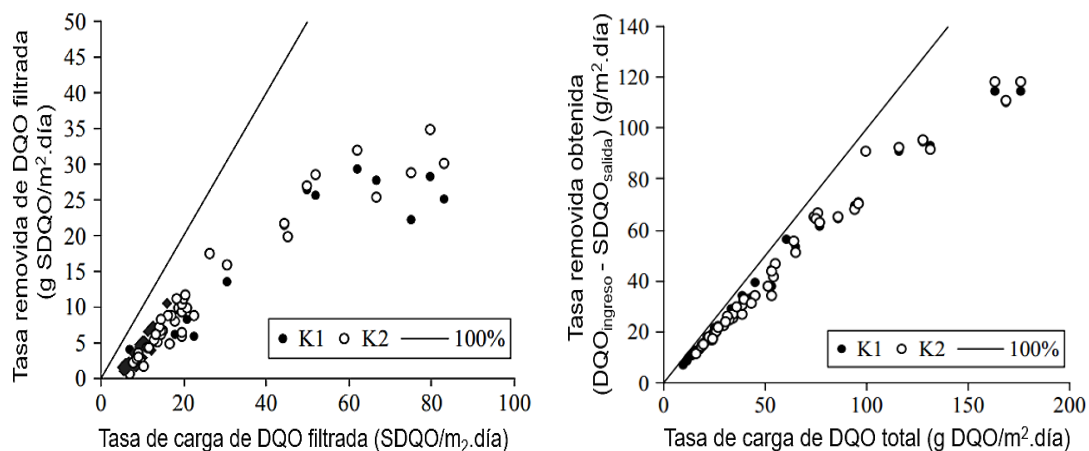
Aplicación (objetivo)	SALR (g DBO/m ² .d)
Alta tasa (remoción de DBO del 75 al 80%)	>20
Tasa normal (remoción de DBO del 80 al 90%)	5 a 20
Baja tasa (previa nitrificación)	5

Nota: Adaptado de (WEF, 2010).

2.1.2.3 Remoción de la DQO. La remoción de la DQO también es llevada a cabo en los reactores MBBR sin embargo hay que tener en consideración que existe la DQO soluble y la DQO particulada, es decir la DQO soluble es aquella que puede ser degradada fácilmente, y por otro lado, la DQO particulada es aquella que necesita ser hidrolizada para luego poder ser degradada, es por tal razón que para determinar la degradación de la materia orgánica usualmente se compara la tasa de remoción obtenida de la DQO con la tasa de carga de DQO aplicada, o también comparar la eliminación de la DQO soluble en función de la DQO soluble aplicada (Odegaard, 2006). Por lo descrito, es preciso mencionar que comúnmente se denomina SALR a la carga orgánica superficial aplicada, y se denomina SARR a la carga orgánica superficial removida, ambos con unidades de $\text{g DBO/m}^2\cdot\text{d}$ o $\text{g DQO/m}^2\cdot\text{d}$.

Figura 3

Tasa de carga de la DQO total y la DQO soluble y tasa remoción respectivo.



Nota: Adaptado de (Odegaard, 2006). La figura de la izquierda relaciona la SALR y la SARR de la DQO soluble cuando se utilizan dos tipos de portadores K1 y K2, y la línea continua indica la eficiencia de remoción de la DQO soluble; del mismo modo en la figura de la derecha relaciona la SALR y la SARR de la DQO total cuando se utilizan los dos mismos tipos de portadores K1 y K2, y la línea continua indica la eficiencia de remoción de la DQO total.

2.1.2.4 Ventajas y desventajas del reactor MBBR. El reactor MBBR es muy ventajoso ya que (1) no requiere de una recirculación de lodos en comparación de un sistema de lodos activados esto debido a que la biomasa no solo se encuentra en suspensión sino también se encuentra adherida en el portador manteniendo una población

de microorganismos constante para la degradación de la materia orgánica, (2) requiere un menor volumen del reactor en comparación a otros sistemas como el sistema de lodos activados disminuyendo así el costo de inversión del proyecto, y (3) es muy flexible es decir se puede seleccionar cualquier forma del reactor y elegir varias cargas de aplicación para un mismo volumen de reactor seleccionado (Odegaard, 2006).

Sin embargo, el reactor MBBR también posee desventajas como (1) necesidad de energía eléctrica esto debido al requerimiento del oxígeno disuelto para su operación, (2) necesidad de requerir bioportadores patentados, (3) necesidad de un buen afluente a los reactores MBBR y esto se logra mediante un buen pretratamiento, y (4) necesidad de usar productos químicos para la remoción del fósforo (Metcalf y Eddy, 2015).

2.1.3 Consideraciones de diseño del reactor MBBR

2.1.3.1 Carga orgánica superficial. La carga orgánica superficial relaciona carga orgánica aplicada respecto del área de superficie total del medio de soporte al interior del reactor, según la siguiente ecuación 1 (Minegatti de Oliveira, 2008).

$$COS = \frac{\text{Carga de DBO o DQO aplicada}}{m^2 \text{ del medio de soporte en el reactor}} \quad (1)$$

En reactores MBBR, es común denominar a la carga orgánica superficial aplicada como SALR (del inglés Surface Area Loading Rate) ya que es un parámetro de diseño importante para la remoción de DBO, y que a su vez el reactor MBBR está relacionada con la SALR en el reactor (Metcalf y Eddy, 2015).

2.1.3.2 Portadores de biopelículas. En general los portadores de biopelículas o portadores de biomasa son de plástico de material de polietileno de alta densidad, incluso se fabrican portadores con densidad aumentada cercanas a 0.98 g/cm³ en comparación de los portadores comerciales los cuales su densidad varía entre 0.94 y 0.96 g/cm³ (McQuarrie et al., 2011).

Los portadores de biopelículas se relacionan con el área de superficie específica del portador ya que relaciona el área superficial del portador con el volumen del portador y se expresa en m²/m³; a la vez, es importante mencionar que el tamaño y la forma de los

portadores no influye cuando se diseña con un área de superficie específica determinado (Odegaard et al., 2000).

2.1.3.3 Oxígeno disuelto. La presencia de oxígeno disuelto en el reactor MBBR va a depender de la finalidad u objetivo del tratamiento es así que para la remoción de materia orgánica es suficiente una concentración de oxígeno disuelto entre 2 y 3 mg/L (Odegaard et al., 2006).

Sin embargo, si se busca una remoción de la DBO y la nitrificación se requerirá una mayor concentración de oxígeno disuelto esto con la finalidad de que las bacterias heterotróficas encargadas de la remoción de la DBO no compitan con las bacterias oxidantes del amonio, en estas condiciones se podría optar por una concentración de oxígeno disuelto entre 4 a 6 mg/L (Metcalf y Eddy, 2015).

2.1.4 Marco legal

La normativa actual legal y divulgada por el gobierno peruano respecto a los efluentes de las PTARs domésticas o municipales es según el Decreto Supremo N° 003 - 2010 MINAM.

2.2 Marco conceptual

Se describirán los conceptos más importantes utilizados en la presente investigación.

- **Carga orgánica superficial:** Es un parámetro de diseño utilizado en reactores MBBR, cuya selección está en función de la finalidad del tratamiento y el flujo de eliminación del sustrato (Odegaard, 2006; Metcalf y Eddy, 2015). En esta investigación se expresa en unidades de $\text{g DBO}_5/\text{m}^2.\text{d}$ y $\text{g DBO}_{5\text{sol}}/\text{m}^2.\text{d}$.
- **Biopelícula:** Es aquella que se adhiere y cubre al portador de biopelícula, y en cuyo interior es consumido el sustrato; está conformada principalmente por microorganismos, materia particulada y componentes extracelulares (Metcalf y Eddy, 2015).
- **Área de superficie específica del portador:** Es la capacidad del portador de biopelícula de alojar y favorecer el crecimiento de la biopelícula adherida; está

definida como relación área – volumen del portador utilizado, se expresa en m^2/m^3 (Odegaard, 2006).

- **Porcentaje de llenado:** Es el volumen ocupado por los portadores de biopelículas al interior de un reactor MBBR vacío, es también denominado fracción de llenado; en reactores MBBR es recomendable un porcentaje de llenado inferior al 70% (Odegaard et al., 2000).

2.3 Hipótesis de la investigación

- Una aplicación de carga orgánica superficial inferior a $20 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2.\text{d}$ permite una eficiencia de remoción de la DBO_5 superior al 80% en un reactor MBBR de dos etapas en serie para el tratamiento de desagüe doméstico pretratado.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Ubicación de la investigación

La presente tesis de investigación se desarrolló en el Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR) en el área de módulos de investigación, la cual pertenece a la Universidad Nacional de Ingeniería; referencia Puerta N°07 en la Av. Túpac Amaru en el distrito de Independencia, Lima, Perú.

3.2 Descripción de las unidades de la etapa experimental

3.2.1 Unidad de pretratamiento

La unidad de pretratamiento de la etapa experimental es perteneciente a las instalaciones del CITRAR, la cual está conformada por captación, cámara de rejillas gruesas, cámara de rejillas finas y desarenador; de manera general, la captación reúne las aguas residuales domésticas de los Asentamiento Humanos (AA.HH.) El Milagro y El Ángel; la cámara de rejillas gruesas está conformado por 32 barras de acero inoxidable con un espesor de 5 mm, una separación de 25 mm y una inclinación de 30°, y se encarga de retener sólidos gruesos como papel, bolsas, vegetales y demás; la cámara de rejillas finas está conformado por 19 barras de acero inoxidable con un espesor de 5 mm, una separación de 15 mm y una inclinación de 55°, y se encarga de retener los sólidos que lograron atravesar la cámara de rejillas gruesas; y por último, el desarenador cuya función es remover grava, arena y sólidos pesados por sedimentación; además, la limpieza de la captación, la cámara de rejillas gruesas, la cámara de rejillas finas y el desarenador es diario.

Figura 4

Unidad de pretratamiento.



Nota: Izquierda la unidad de captación, del medio la cámara de rejillas finas y gruesas, y derecha desarenador.

3.2.2 Cámara distribuidora de caudal

La cámara distribuidora de caudal es aquella donde confluye el agua residual doméstica pretratada proveniente de la unidad de pretratamiento, cuya función es regular el caudal de ingreso al Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (RAMLFA) mediante la implementación de un vertedero rectangular.

Figura 5

Cámara distribuidora de caudal.



Nota: La cámara de distribución de caudal precede al RAMLFA del CITRAR.

3.2.3 Sistema de bombeo de agua residual doméstica pretratado

El sistema de bombeo de agua residual doméstico pretratado está conformado por una línea de succión, una línea de impulsión y una bomba centrífuga; la línea de succión

estuvo conformada por tubería y accesorios de PVC de Ø1", y una canastilla de succión de bronce de Ø1"; por otro lado, la línea de impulsión estuvo conformado por tuberías y accesorios de PVC de Ø1" y unido a ello se utilizó manguera de PVC flexible de Ø1/2" color verde que desplazó el agua residual desde la cámara distribuidora de caudal hasta el tanque de homogenización.

En la tabla 2 se muestra la especificación técnica de la bomba que se utilizó.

Tabla 2

Especificación técnica de la bomba.

Especificación técnica de la bomba	Detalle
Tipo de bomba	Centrífuga
Marca	DELCROSA
Caudal máximo de bombeo	80 L/min
Altura máxima de bombeo	21 m
Potencia	0.5 HP

Nota: La bomba fue de agua pero no hubo inconvenientes al usar con agua residual doméstico pretratado.

Es preciso mencionar que, el encendido y el apagado de la bomba fue de lunes a viernes a primeras horas de la mañana es decir entre las 8 am y 10 am ya que las actividades humanas a esas horas se inician y son mayores en comparación del resto del día.

3.2.4 Tanque de homogenización

El tanque de homogenización es aquel donde confluye el agua residual doméstica pretratada proveniente de la cámara distribuidora de caudal por medio de una línea de impulsión; y además es la unidad inicial de la presente investigación.

Consistió de un tanque Eternit de material polietileno, de 600 litros de capacidad, de dimensiones 0.96 m de diámetro y 1.11 m de altura y de color negro; posee un diámetro de salida de Ø3/4", un diámetro de purga de Ø3/4" y un visor externo la cual permite observar el nivel de agua residual almacenado cada día.

Apoyado y encima del tanque de homogenización se instaló un motor-reductor, la cual unido con un mezclador de PVC incorporado al interior del tanque, se encarga de mantener una mezcla homogénea y constante de componentes físicos y químicos

constituyentes del agua residual doméstica pretratada; el motor-reductor posee una frecuencia de giro de 15 RPM; el encendido y apagado del motor-reductor estuvo en función de un tablero eléctrico la cual consistía de un contactor marca Chint, un interruptor termomagnético marca Chint y un timer marca Alion que en conjunto permitían cada 15 minutos el encendido y el apagado del motor-reductor.

El llenado del tanque de homogenización fue diario y a primeras horas de la mañana según lo mencionado líneas arriba, además el volumen al interior del tanque estaba en función del periodo en la cual se operó en la presente investigación.

3.2.5 *Tanque distribuidor de caudal*

El tanque distribuidor de caudal es aquel que facilitó una constante carga hidráulica y posterior regulación de caudal del agua residual doméstica pretratada proveniente del tanque de homogenización mediante una válvula compuerta.

Consistió de una galonera color verde de 10 galones de capacidad dispuesto de forma horizontal, la cual se interconectó al tanque de homogenización mediante una tubería de abasto de Ø1/2" y 0.40 m de longitud. Además, al interior del tanque se instaló una válvula flotadora de Ø1/2" que posibilitó mantener un nivel de agua residual constante. Así mismo, en su exterior se instaló una válvula compuerta de bronce de Ø1/2" que permitió un control adecuado del caudal de ingreso al reactor MBBR según el periodo en la cual se operó en la presente investigación.

3.2.6 *Reactor MBBR*

El reactor MBBR consistió de dos etapas en serie, cada etapa (de aquí en adelante tanque de vidrio en este apartado) fue de forma rectangular de material de vidrio de espesor 5 mm y de dimensiones de base 0.30 x 0.45 m y una altura de 0.60 m; cada tanque de vidrio se reforzó exteriormente con perfiles de aluminio rectangulares para brindar hermeticidad y resistencia al estar en contacto con el agua residual, adicionalmente en la parte baja externa de cada tanque de vidrio se instaló espuma de látex de 4 mm de espesor color azul con la finalidad de dar protección ante cualquier movimiento fortuito.

Respecto a las instalaciones físicas, la primera etapa o primer tanque de vidrio, en una de las caras laterales de 0.45 m, se colocó dos válvulas de riego de Ø1/2" de material PVC que fueron instaladas a 0.10 m y 0.20 m respecto de la base, y en una de las caras laterales de 0.30 m de base se instaló una tubería roscada de Ø1/2" a una altura de 0.25 m respecto de la base; respecto a la segunda etapa o segundo tanque de vidrio, de igual manera, en una de las caras laterales de 0.45 m, se colocó dos válvulas de riego de Ø1/2" de material PVC que fueron instaladas a 0.10 m y 0.20 m respecto de la base, y en cada una de las caras laterales de 0.30 m de base se instaló una tubería roscada de Ø1/2" a una altura de 0.20 m y 0.15 m respecto de la base para cada cara lateral. Por último, la interconexión entre ambos tanques de vidrio fue mediante accesorio de material de PVC de Ø1/2".

Cada tanque de vidrio se diseñó con un borde libre de 0.30 m lo que permitió evitar las salpicaduras así mismo proteger a cada tanque de cualquier evento como por ejemplo posible presencia de espumas; la parte externa de cada tanque de vidrio se cubrió de plástico color negro para evitar o mitigar la presencia de organismos fotosintéticos al entrar en contacto con la radiación solar; y en la parte superior de cada tanque se acondicionó una tapa para evitar la presencia de mosquitos e ingreso de luz solar.

3.2.7 Portador de biopelícula

El portador de biopelícula o portador de biomasa fue aquella donde se adhirió y creció la biomasa para la posterior conversión de la materia orgánica. Según Metcalf y Eddy (2015) dicho portador de biomasa debe tener una gravedad específica entre 0.96 y 0.98 g/cm³, debe ser de plástico, debe poseer una capacidad específica entre 500 y 700 m²/m³, y deben ocupar un volumen dentro del reactor entre 30 y 60%.

A causa de ello, se buscó en el mercado peruano un producto que cumpla dichas condiciones, y se eligió el rulero con características generales según la tabla 3.

Tabla 3

Características generales del portador utilizado – ruler.

Características	Cantidad
Nombre comercial	Rulero
Peso	3.07 g / unidad
Material	Plástico
Espesor	4 mm
Color	Rojo, celeste, amarillo, rosado

Nota: En la investigación se utilizó un solo tipo de ruler que existe en el mercado nacional.

Así mismo, se utilizó el software de ingeniería AutoCAD para determinar el área de superficie específica y el porcentaje de vacío del portador; y para determinar el porcentaje de llenado de los portadores para cada etapa del reactor MBBR de dos etapas en serie, las cuales se muestran en el capítulo de presentación de resultados.

3.2.8 Sistema de aireación

El sistema de aireación se encargó de suministrar oxígeno a cada etapa del reactor MBBR con la finalidad que se lleve a cabo el proceso de oxidación aerobia y así asimilar la materia orgánica del agua residual doméstica pretratada.

El sistema de aireación consistió de dos sopladores, las cuales se referirá como soplador 1 y 2; así mismo en ambos sopladores la línea de impulsión y distribución consistió de mangueras de silicona de Ø3/8" y Ø1/8" respectivamente.

Tabla 4

Características del soplador 1 y del soplador 2.

Características	Soplador 1	Soplador 2
Marca	Sun Sun	Sun Sun
Modelo	ACO-006	ACO-003
Diámetro de impulsión	3/8"	3/8"
Manifold de distribución (N° entradas / N° salidas)	1/10	1/6
Diámetro de distribución	1/8"	1/8"
Potencia	105 W	45 W
Caudal de aire	85 L/min	50 L/min

Nota: El soplador 1 y el soplador 2 se instalaron en un nivel superior al reactor MBBR.

A todo esto, las líneas de distribución se conectaron a 8 difusores burbuja fina de material piedra porosa las cuales se instalaron en la parte inferior de cada etapa del reactor MBBR de dos etapas en serie es decir se utilizó 4 difusores para cada etapa.

3.2.9 Sedimentador secundario

El sedimentador secundario fue la unidad final del presente proyecto de investigación, además fue aquel donde se reunió el agua residual del efluente del reactor MBBR; la principal función fue retener los sólidos del agua residual por acción de la gravedad logrando obtener un efluente con una clarificación mejor.

El sedimentador secundario fue de forma rectangular de material de vidrio de dimensiones de base 0.30 x 0.20 m y una altura de 0.30 m, la altura útil fue de 0.14 m obteniendo así un volumen útil de 0.0084 m³.

3.3 Periodos de investigación

La presente investigación fue dividida en 3 periodos, en el periodo puesta en marcha el caudal promedio de operación fue de 200.75 ± 5.15 L/día, en el primer periodo consistió con un caudal promedio de operación de 198.74 ± 4.66 L/día, y el segundo periodo consistió en un caudal promedio de operación de 298.21 ± 4.31 L/día.

Tabla 5

Periodos de la investigación.

Periodo	Caudal (L/día)	Fecha inicio	Fecha final	Nº semanas
Puesta en marcha	200.75 ± 5.15	30/09/2024	1/11/2024	5
Primer periodo	198.74 ± 4.66	4/11/2024	10/01/2025	10
Segundo periodo	298.21 ± 4.31	13/01/2025	21/03/2025	10

Nota: El caudal en el periodo puesta en marcha se decidió que tuviera una similitud con el primer periodo.

3.4 Puntos de monitoreo

Los puntos de monitoreo para el análisis de parámetros físicos y químicos fueron 4, las cuales se detallan según la tabla 6.

Tabla 6*Puntos de monitoreo.*

Punto	Representación	Detalle
Punto 1	P1	Afluente al reactor MBBR de dos etapas en serie.
Punto 2	P2	Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
Punto 3	P3	Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
Punto 4	P4	Efluente del sedimentador secundario.

Nota: Por ejemplo, la representación de P1 se refiere al Punto 1, y así para los demás puntos de monitoreo.

Para un mejor entendimiento de la ubicación de los puntos de monitoreo mencionados, se muestra una representación esquemática del perfil longitudinal del reactor MBBR de dos etapas en serie según la figura 6 y 7.

Figura 6*Cuadros de leyenda de la representación esquemática de las unidades de tratamiento.*

LEYENDA		LEYENDA	
ITEM	DESCRIPCIÓN – SISTEMA DE BOMBEO	ITEM	DESCRIPCIÓN – UNIDADES DE TRATAMIENTO
B01	CÁMARA DISTRIBUIDORA DE CAUDAL	U1	TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN – 600L
B02	CODO 90° – Ø1"	U2	MOTOR – REDUCTOR
B03	TAPÓN MACHO – Ø1"	U3	TANQUE DISTRIBUIDOR DE CAUDAL
B04	VÁLVULA TIPO BOLA – Ø1"	U4	PRIMERA ETAPA DEL REACTOR MBBR
B05	REDUCCIÓN 1" A ½"	U5	SEGUNDA ETAPA DEL REACTOR MBBR
B06	TUBERÍA DE IMPULSIÓN – Ø½"	U6	PORTADORES DE BIOMASA
B07	BOMBA DE AGUA – 0.5HP	U7	SEDIMENTADOR SECUNDARIO

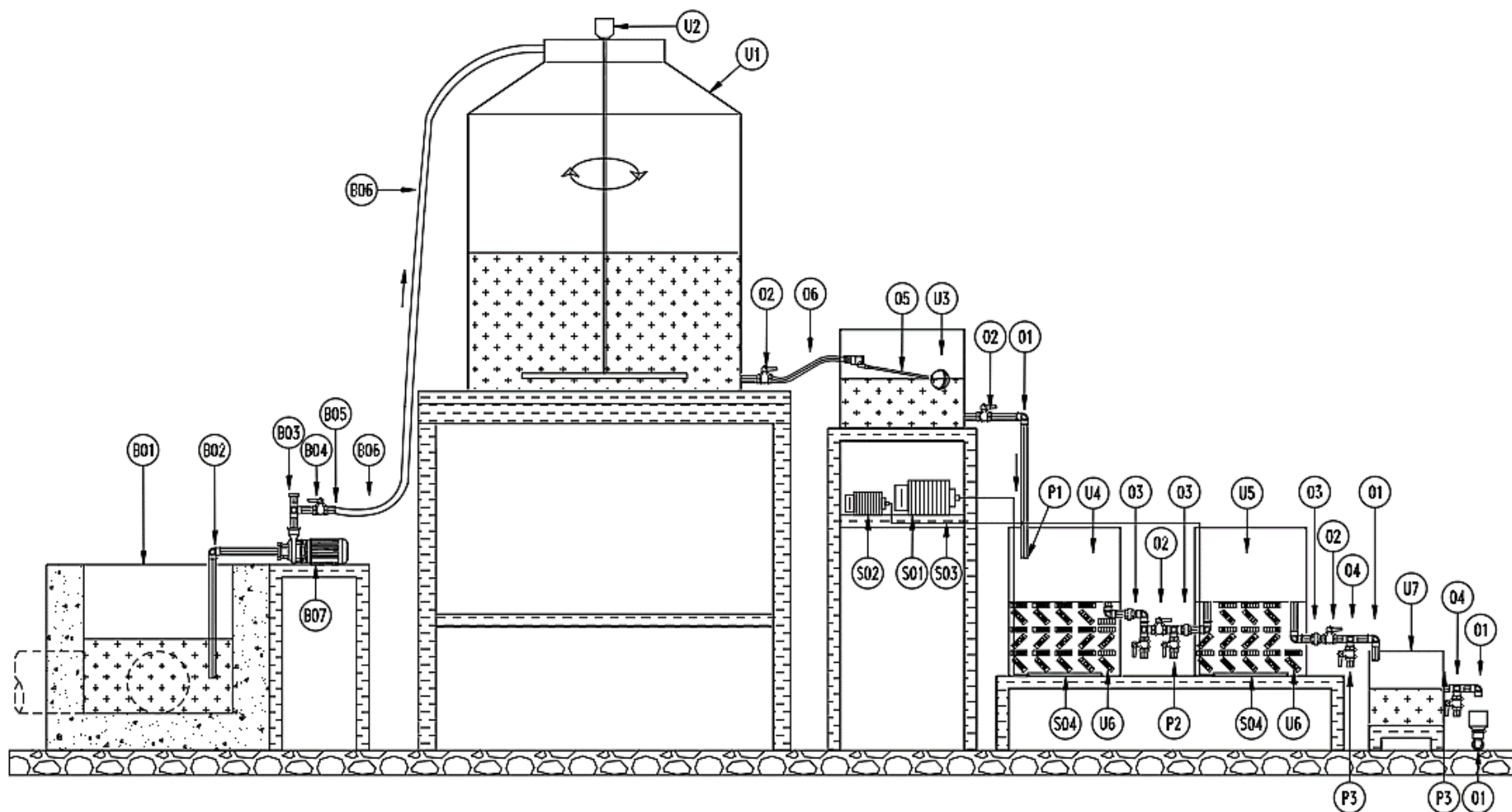
LEYENDA		LEYENDA	
ITEM	DESCRIPCIÓN – REACTOR MBBR	ITEM	DESCRIPCIÓN – SISTEMA DE AIREACIÓN
01	CODO 90° – Ø½"	A01	SOPLADOR 1
02	VÁLVULA TIPO BOLA – Ø½"	A02	SOPLADOR 2
03	UNIÓN UNIVERSAL – Ø½"	A03	MANGUERAS DE SILICONAS Ø1/8
04	TEE – Ø½"	A04	DIFUSOR DE BURBUJA FINA
05	VÁLVULA FLOTADORA – Ø½"		
06	TUBERÍA DE ABASTO – Ø½"		

LEYENDA	
ITEM	DESCRIPCIÓN – PUNTOS DE MONITOREO
P1	AFLUENTE AL REACTOR MBBR
P2	EFLUENTE DE LA PRIMERA ETAPA DEL REACTOR MBBR
P3	EFLUENTE DE LA SEGUNDA ETAPA DEL REACTOR MBBR
P4	EFLUENTE DEL SEDIMENTADOR SECUNDARIO

Nota: Cuadros de leyenda desarrollado en el software de ingeniería AutoCAD.

Figura 7

Representación esquemática de las unidades principales de tratamiento de la investigación.



Nota: Representación esquemática realizado en el software de ingeniería AutoCAD.

3.5 Parámetros de análisis y de control

Los parámetros de análisis y de control fueron principalmente aplicados según los constituyentes físicos y químicos presentes en el agua residual, para tal efecto se utilizó técnicas analíticas pertinentes para cada caso.

La tabla 7 detalla los parámetros según el tipo de constituyente y la frecuencia de análisis, y según el punto de monitoreo analizado según la tabla 6.

Tabla 7

Parámetros de análisis y de control.

Parámetro	Tipo de constituyente	Frecuencia de análisis	Punto de monitoreo
Temperatura ambiental	Físico	Diario	- (1)
Temperatura del agua residual	Físico	Diario	P1-P2-P3-P4
pH	Químico	Diario	P1-P2-P3-P4
Turbiedad	Físico	Diario	P1-P2-P3-P4
Oxígeno disuelto (O.D.)	Químico	Diario	P1-P2-P3-P4
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	Químico	Semanal	P1-P2-P3-P4
Demanda bioquímica de oxígeno soluble (DBO ₅ soluble)	Químico	Cada 02 semanas	P1-P2-P3-P4
Demanda química de oxígeno (DQO)	Químico	Cada 02 semanas	P1-P4
Sólidos sedimentables	Físico	Semanal	P1-P4
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	Físico	Semanal	P1-P2-P3-P4
Sólidos suspendidos fijos (SSF)	Físico	Semanal	P1-P2-P3-P4
Sólidos suspendidos totales (SST)	Físico	Semanal	P1-P2-P3-P4

Nota:

(1) No se aplicó en ningún punto de monitoreo.

Respecto al método de análisis que se utilizó en cada parámetro, se menciona que se tomó como referencia los lineamientos según los métodos estandarizados para análisis de calidad de aguas residuales, las cuales se detallan en la tabla 8.

Tabla 8

Metodología de análisis que se utilizó para cada parámetro.

Parámetro	Método utilizado	Detalle del método	Unidad
Temperatura	SMEWW ⁽¹⁾ Parte 2550 B	Uso de termómetro	°C
pH	SMEWW Parte 4500-H ⁺	Método electrométrico	- (2)
Turbiedad	SMEWW Parte 2130 B	Método nefelométrico	NTU
Oxígeno disuelto (OD)	SMEWW Parte 2550 G	Método del electrodo de membrana	mg/L

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	SMEWW Parte 5210 B	Método de prueba al 5to. Día - DBO	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno soluble (DBO ₅ soluble)	SMEWW Parte 5210 B	Previo filtrado de muestra en filtro de 0.45 µm, luego método de prueba al 5to Día - DBO	mg/L
Demanda química de oxígeno (DQO)	SMEWW Parte 5210 B	Método colorimétrico	mg/L
Sólidos sedimentables (SS)	SMEWW Parte 2540 F	Método del Cono Imhoff	ml/L.hr
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	SMEWW Parte 2540 E	Método de incineración a 550°C	mg/L
Sólidos suspendidos fijos (SSF)	SMEWW Parte 2540 E	Método de incineración a 550°C	mg/L
Sólidos suspendidos totales (SST)	SMEWW Parte 2540 D	Método de secado a 103 - 105°C	mg/L

Nota:

⁽¹⁾ Por las siglas en inglés de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

⁽²⁾ Se consideró así según lo establecido en el SWEWW.

La determinación del parámetro de la demanda química de oxígeno (DQO) fue realizado por un laboratorio acreditado por INACAL.

3.6 Parámetros de diseño del reactor MBBR

Para diseñar el reactor MBBR de dos etapas en serie para la remoción de DBO, se tomó en consideración lo descrito en Metcalf y Eddy (2015), donde para cada etapa se consideró las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

- El flujo de DBO₅ aplicado se determinó como:

$$\frac{\text{Flujo de remoción de DBO}_5 \text{ (g/m}^2 \cdot \text{d)}}{\text{Porcentaje de remoción de DBO}_5 \text{ (\%)}} \quad (2)$$

- El área superficial del portador se determinó como:

$$\frac{\text{Carga de DBO}_5 \text{ aplicada} = Q \text{ (m}^3/\text{d)} \times \text{DBO}_5 \text{ (gDBO}_5/\text{m}^3)}{\text{Flujo de DBO}_5 \text{ aplicado (gDBO}_5/\text{m}^2 \cdot \text{d)}} \quad (3)$$

- El volumen del medio portador se determinó como:

$$\frac{\text{Área superficial del portador (m}^2)}{\text{Área de superficie específica del portador (m}^2/\text{m}^3)} \quad (4)$$

- El volumen del tanque de la primera o segunda etapa del reactor MBBR se determinó como:

$$\frac{\text{Volumen del medio portador (m}^3)}{\text{Volumen de llenado del medio portador (m}^3/\text{m}^3)} \quad (5)$$

3.7 Determinación de carga orgánica superficial

Para determinar la carga orgánica superficial aplicada (SALR) fue necesario el caudal y los resultados de DBO₅ en el afluente del reactor MBBR del día en que se realizó la prueba; por otro lado, para determinar la carga orgánica superficial removida (SARR) fue necesario el caudal y los resultados de la DBO₅ en el efluente de la primera y segunda etapa del reactor MBBR del día en que se realizó la prueba. Así mismo, se utilizó la ecuación 6:

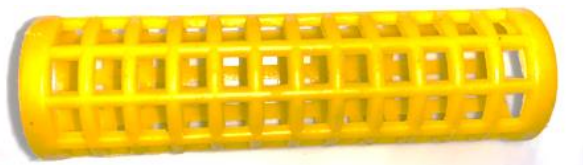
$$COS = \frac{\text{Carga de DBO o DQO aplicada}}{m^2 \text{ del medio de soporte en el reactor}} \quad (6)$$

3.8 Determinación del área de superficie específica

Para determinar el área de superficie específica del portador de biomasa, que para la investigación los portadores utilizados fueron los rúleros, se utilizó como herramienta el software de ingeniería AutoCAD ya que nos permitió obtener la geometría del portador y conocer de esa manera sus características físicas.

Figura 8

Rúler utilizado como portador de biomasa en la investigación.



Nota: Se utilizó portadores de la misma geometría y de diferentes colores.

3.9 Determinación de análisis complementarios

3.9.1 Relación F/M equivalente

La relación F/M equivalente se determinó mediante la metodología de hidróxido de sodio (NaOH) según lo establecido por Minegatti (2008), en dicha metodología cada portador se coloca en una solución de hidróxido de sodio al 1% en baño maría a una temperatura de 90°C para lograr desprender la biopelícula adherida al portador. La manera cómo se realizó es:

- Como primer paso, se tomó una muestra de 5 portadores de biopelícula de cada etapa del reactor MBBR.
- Como segundo paso, se colocó cada portador en una cápsula de porcelana de 100 ml, y se sumergió en una solución de hidróxido de sodio al 1% hasta cubrir la totalidad del portador.
- Como tercer paso, cada cápsula de porcelana se sometió a baño maría a 90°C durante un tiempo de 20 minutos aproximadamente o hasta lograr el desprendimiento de la biopelícula para tal efecto se utilizó una bagueta para ayudar en dicho desprendimiento.
- Como cuarto paso, se retiró los portadores de cada cápsula y a la mezcla contenida en la cápsula se le realizó la determinación de sólidos suspendidos volátiles.

3.9.2 K_La

Para determinar el coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) se utilizó el procedimiento de desoxigenación química según lo descrito en ASCE STANDARD (1992):

- Utilizar una concentración teórica de sulfito de sodio (Na_2SO_3) de 7.88 mg/L por cada 1 mg/L de concentración de oxígeno disuelto.
- Para agilizar la reacción, utilizar como catalizador cloruro de cobalto hidrolizado ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) hasta obtener una concentración de cobalto soluble entre 0.10 mg/L y 0.50 mg/L.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Presentación de resultados

4.1.1 Diseño del reactor MBBR

Se presenta los parámetros de diseño que se utilizó en cada etapa del reactor MBBR de dos etapas en serie.

Tabla 9

Diseño de la primera etapa del reactor MBBR.

Diseño del reactor MBBR de dos etapas en serie					
Primera etapa del reactor MBBR					
Descripción	Cantidad			Unidad	Detalle
	PPM ⁽¹⁾	PP ⁽²⁾	SP ⁽³⁾		
Caudal de ingreso diario	200.75	198.74	298.21	L/día	Ver tabla 12 (a)
Concentración de la DBO ₅ promedio	128.35	148.66	149.98	mg/L	Ver tabla 18 (b)
Tasa de remoción de la DBO ₅	15	15	15	g/m ² .d	Ver tabla 1 (c)
% de remoción de la DBO ₅	70	70	70	%	Asumido (d)
Tasa de la DBO ₅ aplicado	21.43	21.43	21.43	g/m ² .d	(e) = (c) / (d)
Tasa de carga de la DBO ₅	25.77	29.54	44.73	g/d	Q (m ³ /d) x DBO ₅ (mg/L) (f) = (a) x (b)
Área superficial requerido de los portadores	1.20	1.38	2.09	m ²	(g) = (f) / (e)
Área de superficie específica del portador	2166.47	2166.47	2166.47	m ² /m ³	Ver tabla 11 (h)
Volumen requerido de los portadores	0.56	0.64	0.96	L	(i) = (g) / (h)
Fracción de llenado	32.55	32.55	32.55	%	Ver tabla 11 (j)
Porcentaje de volumen de vacío en el tanque	67.45	67.45	67.45	%	Ver tabla 11 (k)
Volumen del tanque	5.24	6.01	9.09	L	(i) / [((j) x (1 – (k)))]
Volumen del reactor elegido	40	40	40	L	

Nota:

⁽¹⁾ Hace referencia al periodo puesta en marcha.

⁽²⁾ Hace referencia al primer periodo.

⁽³⁾ Hace referencia al segundo periodo.

Tabla 10

Diseño de la segunda etapa del reactor MBBR.

Diseño del reactor MBBR de dos etapas en serie					
Segunda etapa del reactor MBBR					
Descripción	Cantidad			Unidad	Detalle
	PPM ⁽¹⁾	PP ⁽²⁾	SP ⁽³⁾		

Caudal de ingreso diario	200.75	198.74	298.21	L/día	Ver tabla 12 (a)
Concentración de la DBO ₅ promedio	128.35	148.66	149.98	mg/L	Ver tabla 18 (b)
Tasa de remoción de la DBO ₅	5	5	5	g/m ² .d	Ver tabla 1 (c)
% de remoción de la DBO ₅	90	90	90	%	Asumido (d)
Tasa de la DBO ₅ aplicado	5.56	5.56	5.56	g/m ² .d	(e) = (c) / (d)
Tasa de carga de la DBO ₅	5.92	5.05	8.47	g/d	Q (m ³ /d) x DBO ₅ (mg/L) (f) = (a) x (b)
Área superficial requerido de los portadores	1.07	0.91	1.52	m ²	(g) = (f) / (e)
Área de superficie específica del portador	2166.47	2166.47	2166.47	m ² /m ³	Ver tabla 11 (h)
Volumen requerido de los portadores	0.49	0.42	0.70	L	(i) = (g) / (h)
Fracción de llenado	32.55	32.55	32.55	%	Ver tabla 11 (j)
Porcentaje de volumen de vacío en el tanque	67.45	67.45	67.45	%	Ver tabla 11 (k)
Volumen del tanque	4.64	3.96	6.64	L	(i) / [((j) x (1 – (k)))]
Volumen del reactor elegido	40	40	40	L	

Nota:

(1) Hace referencia al periodo puesta en marcha.

(2) Hace referencia al primer periodo.

(3) Hace referencia al segundo periodo.

Como se observa en la tabla 9 y 10, y considerando los parámetros de diseño de un reactor MBBR para remover la DBO₅ descritos en el inciso 3.6, se llegó a la conclusión de considerar un volumen útil elegido de 40 L para cada etapa del reactor MBBR.

4.1.2 Área de superficie específica, porcentaje de vacío y porcentaje de llenado

Se presenta el área de superficie específica y porcentaje de vacío del portador, el porcentaje de llenado de los portadores utilizados en cada etapa del reactor MBBR, y las características físicas principales de los portadores utilizados.

Tabla 11

Área de superficie específica, porcentaje de vacío y porcentaje de llenado.

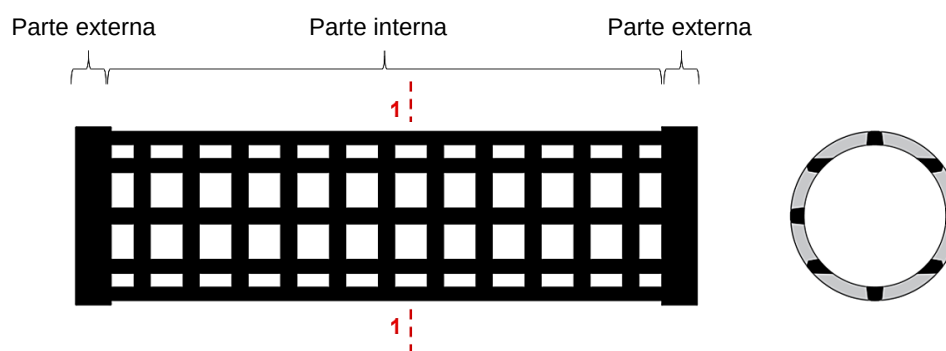
Descripción	Cantidad	Unidad	Detalle
Peso	3.07	g	Se utilizó balanza analítica
Longitud lateral	70	mm	Se utilizó pie de rey (a)
Diámetro externo - parte externa	20	mm	Se utilizó pie de rey
Diámetro interno - parte externa	16	mm	Se utilizó pie de rey
Diámetro externo - parte interna	19	mm	Se utilizó pie de rey
Diámetro interno - parte interna	16	mm	Se utilizó pie de rey
Área superficial - parte externa	1244.07	mm ²	Mediante AutoCAD (b)
Área superficial - parte interna	5638.27	mm ²	Mediante AutoCAD (c)
Área superficial total	6882.23	mm ²	(d) = (b) + (c)

Volumen - parte externa	904.78	mm ³	Mediante AutoCAD (e)
Volumen - parte interna	2271.97	mm ³	Mediante AutoCAD (f)
Volumen total del portador	3176.76	mm ³	(g) = (e) + (f)
Área de superficie específica	2166.47	m²/m³	(h) = (d) / (g)
Volumen neto – parte externa	2513.28	mm ³	Mediante AutoCAD (i)
Volumen neto – parte interna	17578.82	mm ³	Mediante AutoCAD (j)
Volumen neto	20092.10	mm ³	(k) = (i) + (j)
Volumen de portador	3176.76	mm ³	(g)
Porcentaje de vacío	84.19	%	(l) = [(k) – (g) / (k)] x 100
Número de portadores por etapa	648	un	(m)
Volumen de los portadores	13.02	L	(n) = (m) x (g)
Volumen del reactor	40	L	Ver tabla 9 y 10 (o)
Porcentaje de llenado	32.55	%	(p) = [(n) / (o)] x 100

Nota: Se tomó como muestra de análisis de características un solo portador (es decir un solo rulero).

Figura 9

Perfil del portador de biomasa – rulero.



Nota: Izquierda perfil longitudinal del portador, y derecha perfil transversal del portador (Corte 1-1).

4.1.3 Caudal de operación

Se presenta los resultados obtenidos de los caudales de operación promedio, máximo y mínimo para cada periodo en el reactor MBBR.

Tabla 12

Resultados de caudal de operación promedio, máximo y mínimo.

Periodo	Valor	Caudal de operación (L/día)	n ⁽¹⁾
Periodo puesta en marcha	Promedio	200.75 ± 5.15	20
	Máximo	209.36	
	Mínimo	189.37	
Primer periodo	Promedio	198.74 ± 4.66	41
	Máximo	210.73	
	Mínimo	191.65	
Segundo periodo	Promedio	298.22 ± 4.31	46
	Máximo	308.36	

Mínimo	289.58
--------	--------

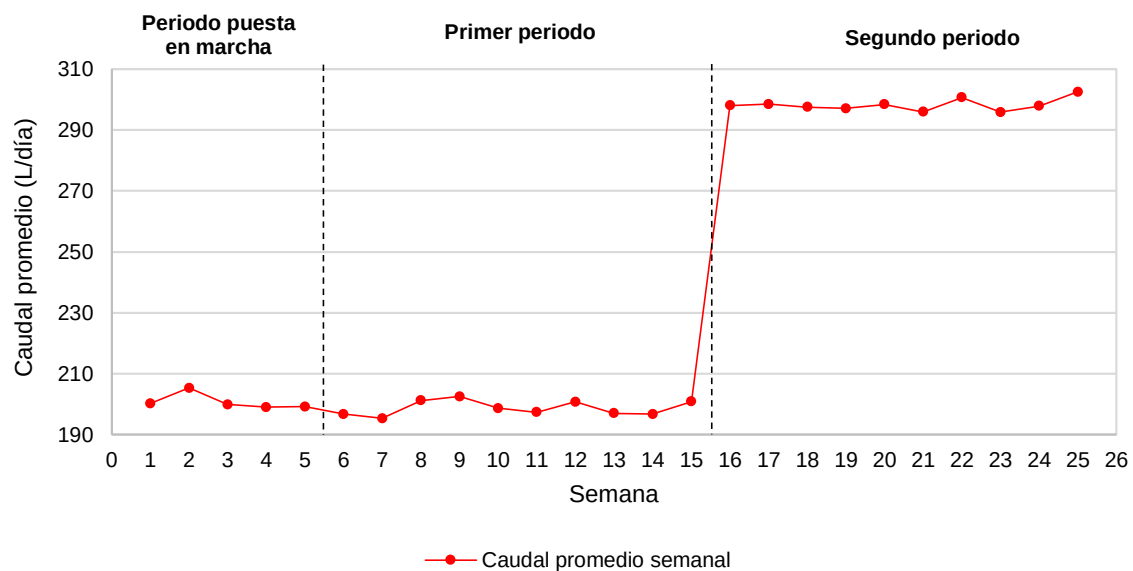
Nota: El caudal en el periodo puesta en marcha se decidió que tuviera una similitud con el primer periodo.

⁽¹⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 10 se muestra el caudal de operación promedio semanal para cada periodo de análisis, en el periodo puesta comprendió desde la semana 1 hasta la semana 5, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 10

Resultados de caudal de operación promedio semanal.



Nota: Variación del caudal promedio semanal durante 25 semanas de monitoreo.

4.1.4 Temperatura ambiental

Se presenta los resultados obtenidos de la temperatura ambiental promedio, máxima y mínima para cada periodo.

Tabla 13

Resultados de temperatura ambiental promedio, máximo y mínimo.

Periodo	Valor	Temperatura ambiental (°C)	n ⁽¹⁾
Periodo puesta en marcha	Promedio	22.53 ± 1.19	4
	Máxima	23.8	
	Mínima	21	
Primer periodo	Promedio	26.29 ± 1.62	42
	Máxima	29.5	
	Mínima	20.3	

	Promedio	28.83 ± 1.6	
Segundo periodo	Máxima	33.9	45
	Mínima	24.8	

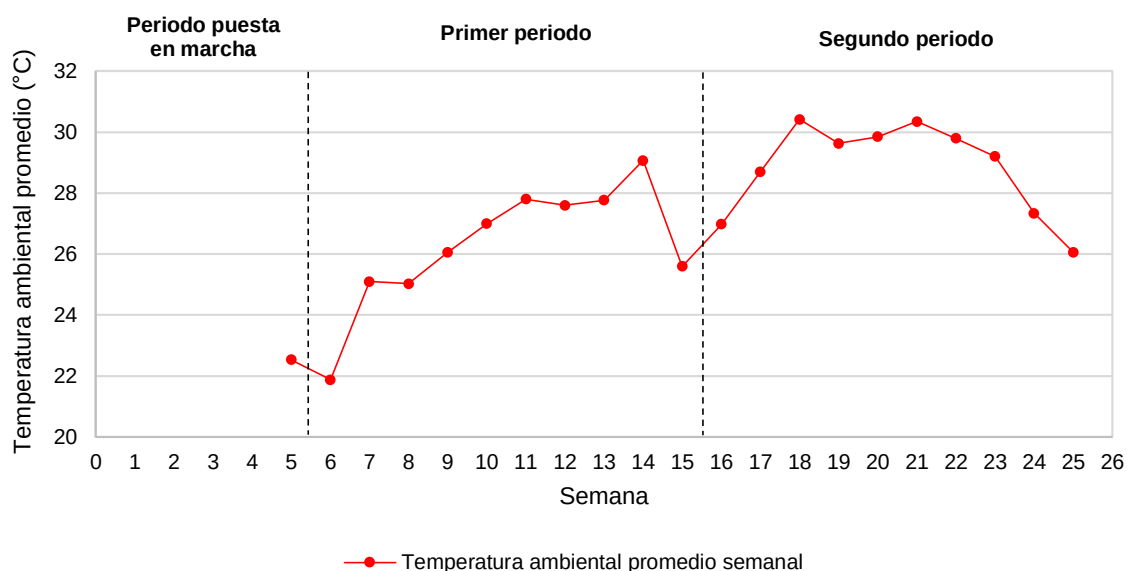
Nota: Para la determinación de la temperatura ambiental se utilizó un termohigrómetro.

⁽¹⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 11 se muestra la temperatura ambiental promedio semanal para cada periodo de análisis, en el periodo puesta en marcha sólo se monitoreo en la semana 5, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 11

Resultados de temperatura ambiental promedio semanal.



Nota: Variación de la temperatura ambiental promedio semanal durante 21 semanas de monitoreo.

4.1.5 Temperatura del agua residual

Se presenta los resultados obtenidos de la temperatura del agua residual promedio, máxima y mínima para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 14

Resultados de la temperatura del agua residual promedio, máxima y mínima.

Temperatura del agua residual (°C)					
Periodo puesta en marcha					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	21.81 ± 1.35	21.41 ± 1.11	21.48 ± 1.15	21.62 ± 1.27	20
Máxima	23.6	22.8	22.9	23.3	

Mínima	18.3	18.3	18.4	18.4	
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	24.22 ± 1.14	24.05 ± 1.08	24.2 ± 1.16	24.43 ± 1.36	41
Máxima	26.1	26.5	26.6	27	
Mínima	20.1	19.9	19.8	19.7	
Segundo periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	27.34 ± 1.59	27.31 ± 1.53	27.38 ± 1.47	27.63 ± 1.62	46
Máxima	29.4	29.5	29.4	29.9	
Mínima	23.4	23.4	23.4	23.3	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

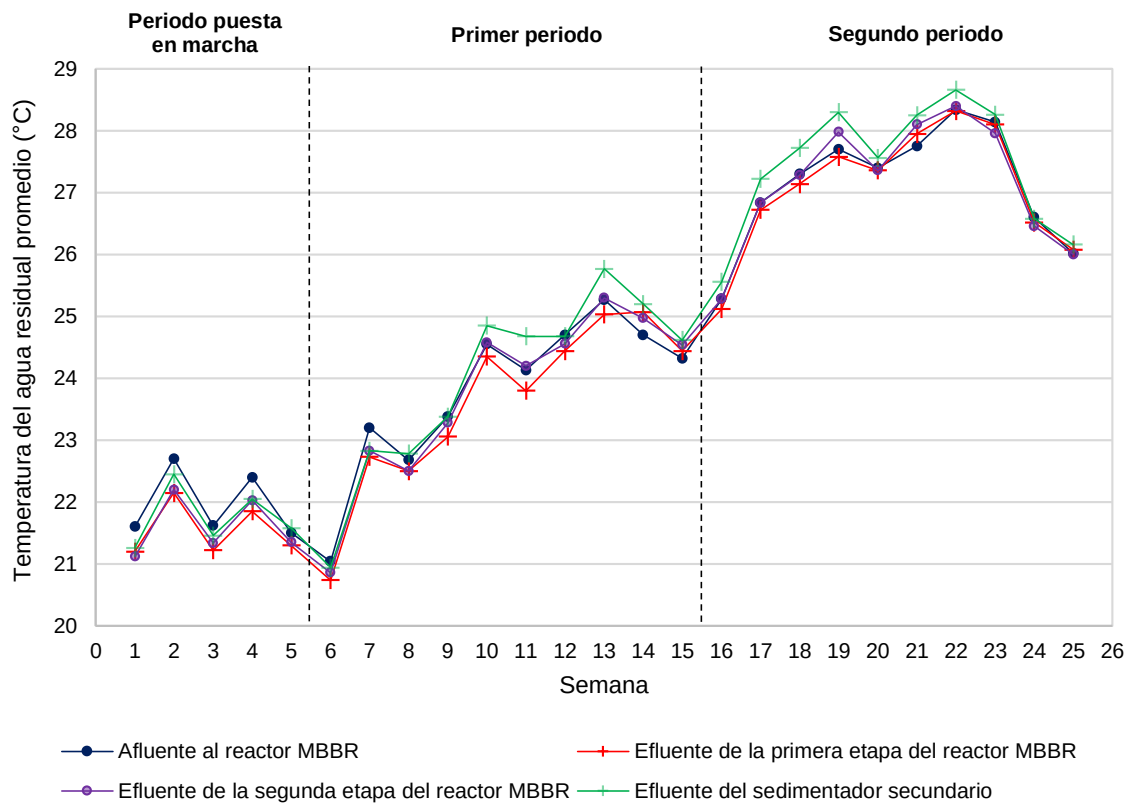
⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 12 se muestra la temperatura del agua residual promedio semanal para cada periodo de análisis, en el periodo puesta en marcha comprendió desde la semana 1 hasta la semana 5, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 12

Resultados de la temperatura del agua residual promedio semanal.



Nota: Variación de temperatura del agua residual promedio semanal durante 25 semanas de monitoreo.

4.1.6 pH

Se presenta los resultados obtenidos del pH promedio, máximo y mínimo para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 15

Resultados del pH promedio, máximo y mínimo.

pH					
Periodo puesta en marcha					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	7.61 ± 0.26	7.74 ± 0.12	7.5 ± 0.15	7.47 ± 0.17	20
Máximo	8.14	8.09	8.38	8.38	
Mínimo	6.92	7.38	7.22	7.05	
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	8.26 ± 0.21	8.16 ± 0.17	8.05 ± 0.21	8.08 ± 0.21	41
Máximo	9.6	8.9	8.79	8.82	
Mínimo	7.14	6.41	6.72	6.79	
Segundo periodo					

Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	8.31 ± 0.35	8.11 ± 0.24	8.11 ± 0.2	8.16 ± 0.2	46
Máximo	8.85	8.61	8.67	8.61	
Mínimo	7.43	7.2	6.81	6.74	

Nota:

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

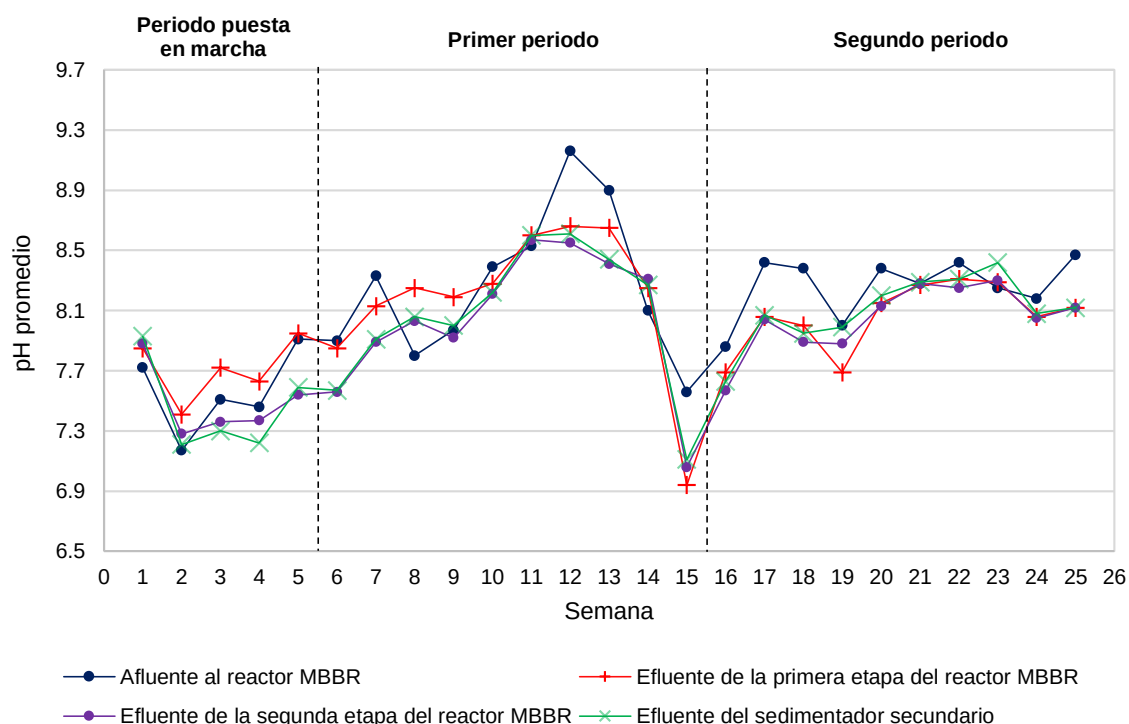
(4) Efluente del sedimentador secundario.

(5) Número de muestras.

Así mismo en la figura 13 se muestra el pH promedio semanal para cada periodo de análisis, en el periodo puesta en marcha comprendió desde la semana 1 hasta la semana 5, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 13

Resultados del pH del agua residual promedio semanal.



Nota: Variación del pH del agua residual promedio semanal durante 25 semanas de monitoreo.

4.1.7 Turbiedad

Se presenta los resultados obtenidos de la turbiedad promedio, máxima y mínima para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 16

Resultados de la turbiedad promedio, máxima y mínima.

Turbiedad (NTU)					
Periodo puesta en marcha					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	118.95 ± 37.93	20.76 ± 8.59	4.84 ± 1.98	4.33 ± 1.71	20
Máxima	211	58.7	16.7	14.2	
Mínima	36.5	7.48	2.1	2.14	
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	99.65 ± 27.68	15.28 ± 6.51	2.82 ± 1.62	2.19 ± 1.16	41
Máxima	195	54.3	18.6	12	
Mínima	26.4	2.59	0.89	0.82	
Segundo periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	114.61 ± 28.29	9.08 ± 3.93	3.47 ± 1.59	3.2 ± 1.43	46
Máxima	205	20.2	11.4	10.4	
Mínima	34.5	3.1	1.03	1.15	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

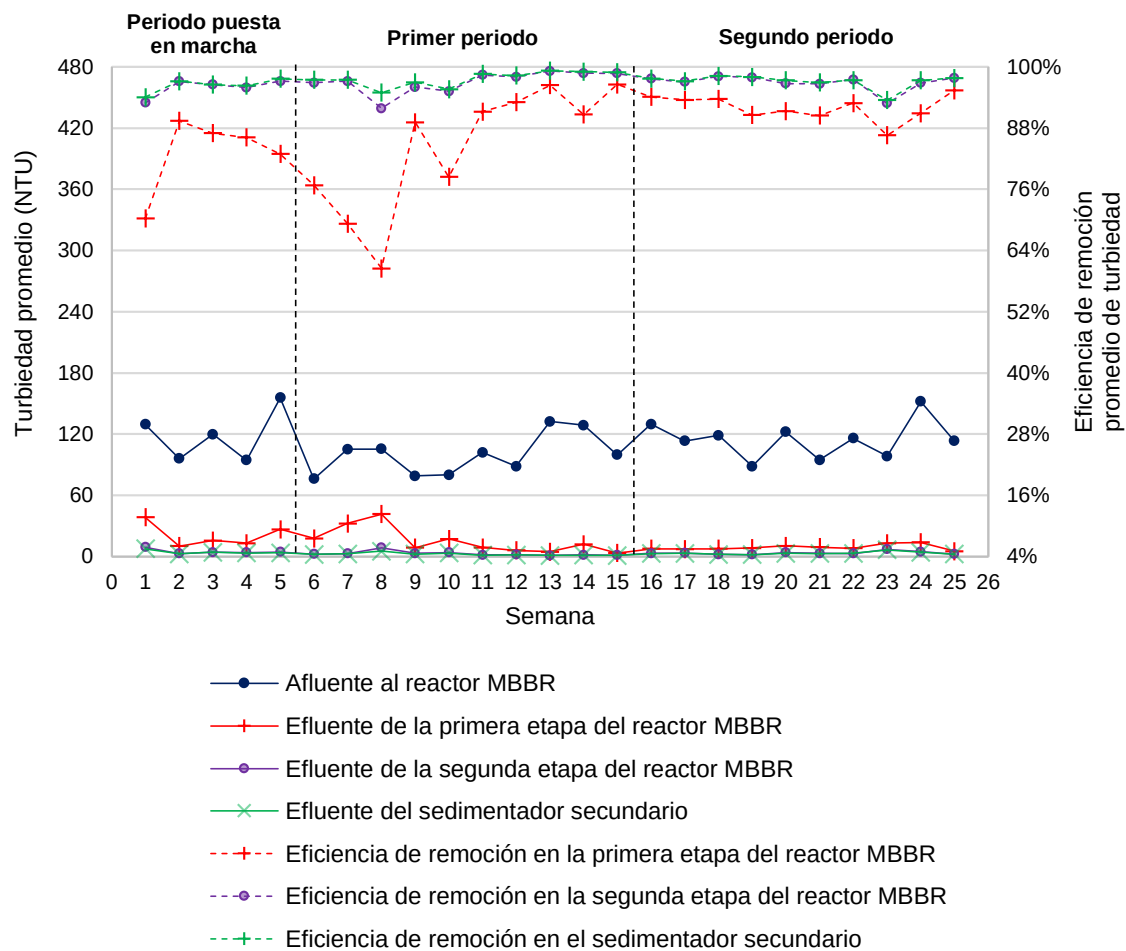
⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 14 se muestra la turbiedad promedio semanal para cada periodo de análisis, en el periodo puesta en marcha comprendió desde la semana 1 hasta la semana 5, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 14

Resultados de la turbiedad del agua residual promedio semanal.



Nota: Variación de la turbiedad del agua residual promedio semanal durante 25 semanas de monitoreo.

4.1.8 Oxígeno disuelto

Se presenta los resultados obtenidos del oxígeno disuelto promedio, máximo y mínimo para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 17

Resultados del oxígeno disuelto promedio, máximo y mínimo.

Oxígeno disuelto (mg O ₂ /L)					
Periodo puesta en marcha					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	0.58 ± 0.42	3.15 ± 0.97	5.64 ± 0.61	5.77 ± 0.6	20
Máximo	2.22	6.81	9.13	8.6	
Mínimo	0.05	0.52	3.71	4.35	
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾

Promedio	0.39 ± 0.32	3.08 ± 0.57	4.74 ± 0.39	4.71 ± 0.41	41
Máximo	1.44	5.41	6.58	6.12	
Mínimo	0.05	0.79	3.83	3.29	
Segundo periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	0.12 ± 0.07	3.08 ± 0.85	3.69 ± 0.68	4.22 ± 0.65	46
Máximo	0.85	5.25	6.37	6.83	
Mínimo	0.05	0.89	1.82	2.82	

Nota:

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

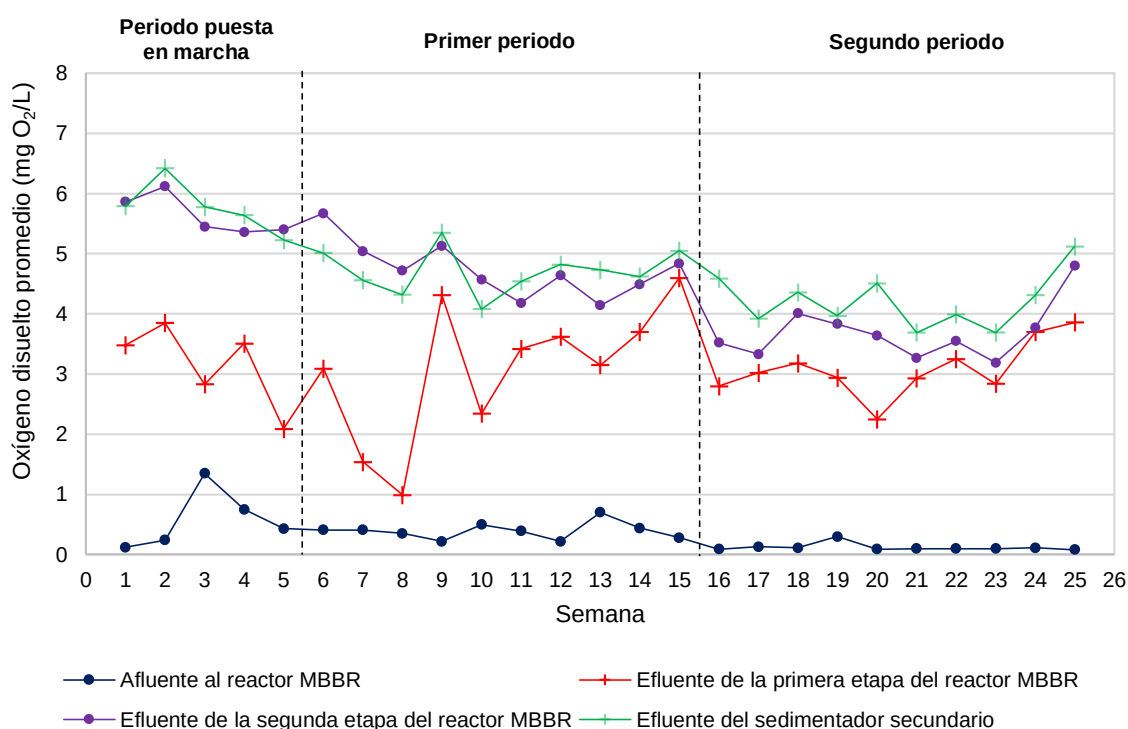
(4) Efluente del sedimentador secundario.

(5) Número de muestras.

Así mismo en la figura 15 se muestra el oxígeno disuelto promedio semanal para cada periodo de análisis, en el periodo puesta en marcha comprendió desde la semana 1 hasta la semana 5, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 15

Resultados de oxígeno disuelto del agua residual promedio semanal.



Nota: Variación del oxígeno disuelto del agua residual promedio semanal durante 25 semanas de monitoreo.

4.1.9 Demanda bioquímica de oxígeno

Se presenta los resultados obtenidos de la DBO₅ promedio, máxima y mínima para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 18

Resultados de la DBO₅ promedio, máxima y mínima.

DBO ₅ (mg O ₂ /L)					
Periodo puesta en marcha					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	128.35 ± 57.47	29.5 ± 0.36	13.24 ± 2.7	12.5 ± 1.73	2
Máxima	168.99	29.75	15.15	13.72	
Mínima	87.71	29.25	11.33	11.28	
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	148.66 ± 17.26	25.43 ± 11.72	10.41 ± 4.85	11.77 ± 4.48	10
Máxima	181.17	47.03	22.44	18.95	
Mínima	127.46	9.42	2.91	4.36	
Segundo periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	149.98 ± 23.58	28.4 ± 8.06	16.69 ± 6.8	16.25 ± 8.41	10
Máxima	178.40	42.30	29.06	28.96	
Mínima	96.78	18.11	9.36	7.50	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

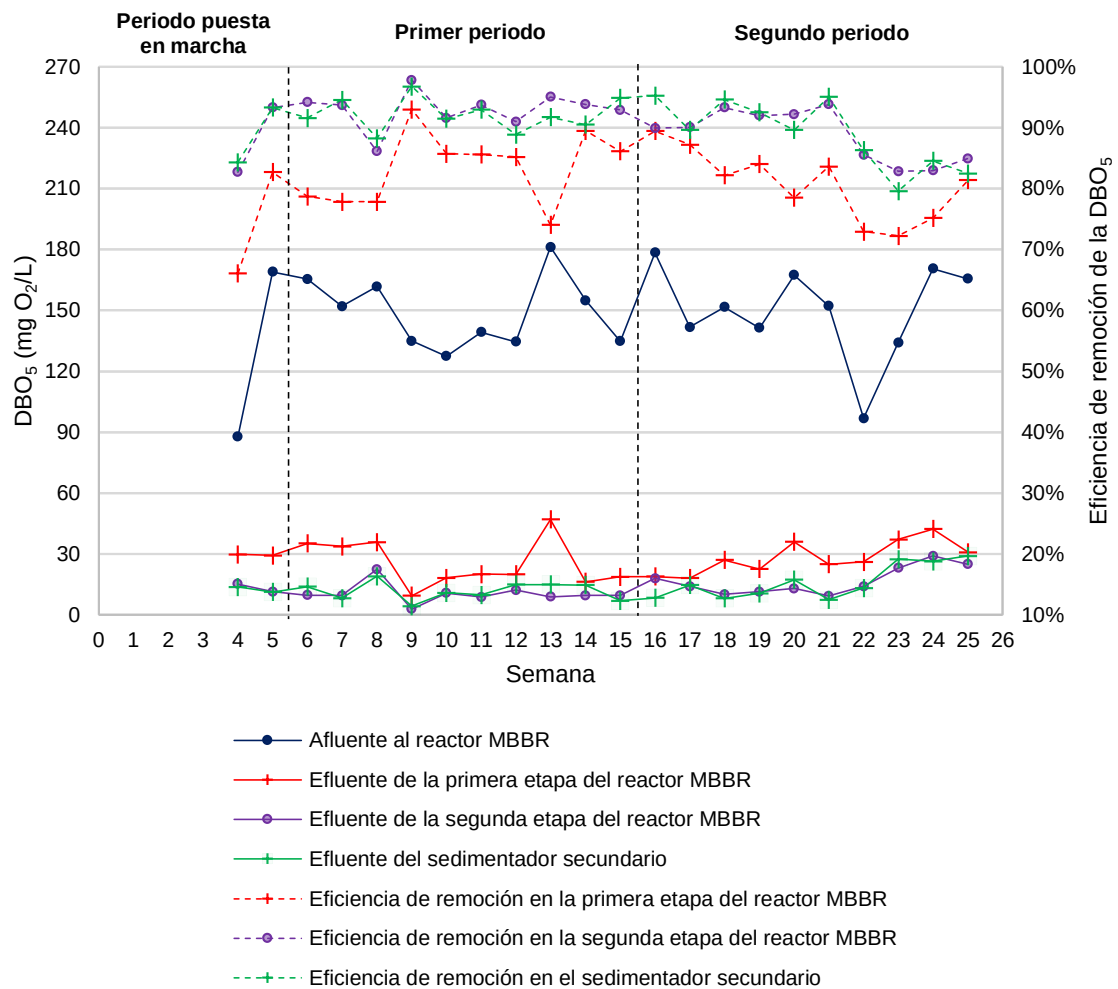
⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 16 se muestra la DBO₅ para cada periodo de análisis, en el periodo puesta en marcha comprendió las semanas 4 y 5, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 16

Resultados de la DBO₅.



Nota: En el periodo puesta en marcha se realizó solo dos veces la DBO₅.

4.1.10 Demanda bioquímica de oxígeno soluble

Se presenta los resultados obtenidos de la DBO₅ soluble promedio, máxima y mínima para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 19

Resultados de la DBO₅ soluble promedio, máxima y mínima.

DBO ₅ soluble (mg O ₂ /L)					
Periodo puesta en marcha					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Obtenido	93.37	19.60	8.02	5.97	1
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	84.8 ± 15.98	12.31 ± 2.63	6 ± 2.06	6.37 ± 1.21	5

Máxima	100.23	15.08	8.39	8.12	
Mínima	60.28	8.59	3.41	5.39	
Segundo periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	85.52 ± 23.48	12.91 ± 2.99	8.25 ± 2.93	7.6 ± 2.58	
Máxima	112.96	17.32	11.80	11.10	6
Mínima	50.77	9.01	4.19	5.06	

Nota: En el periodo puesta en marcha se realizó una vez la DBO₅ soluble, de ahí el nombre de valor obtenido.

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

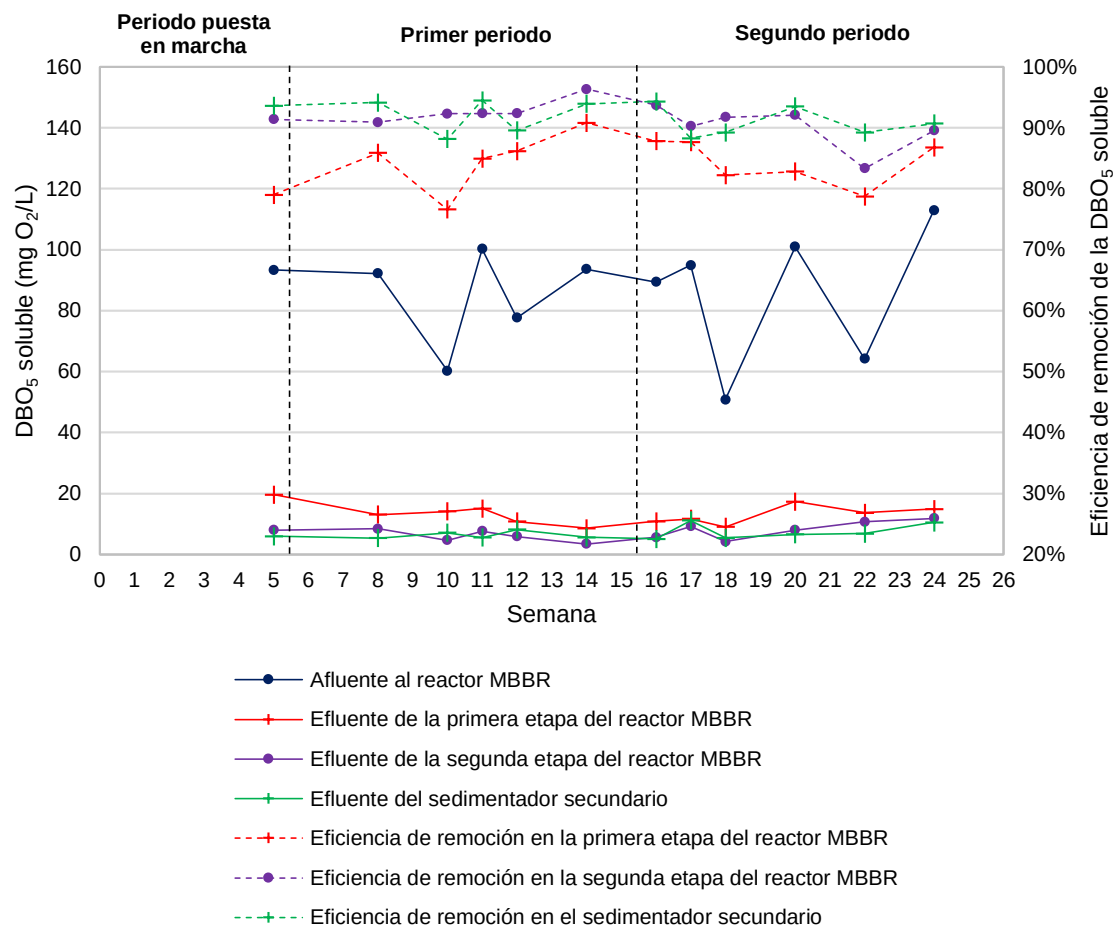
⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 17 se muestra la DBO₅ soluble para cada periodo de análisis, en el periodo puesta en marcha comprendió solo la semana 5, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 17

Resultados de DBO₅ soluble.



Nota: En el periodo puesta en marcha se realizó una sola vez la DBO₅ soluble.

4.1.11 Demanda química de oxígeno

Se presenta los resultados obtenidos de la DQO promedio, máxima y mínima según punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 20

Resultados de la DQO promedio, máxima y mínima.

DQO (mg O ₂ /L)			
Primer periodo			
Valor	P1 ⁽¹⁾	P4 ⁽²⁾	n ⁽³⁾
Promedio	359 ± 98.16	72.5 ± 50.55	4
Máxima	501.00	138.00	
Mínima	289.00	27.00	
Segundo periodo			
Valor	P1 ⁽¹⁾	P4 ⁽²⁾	n ⁽³⁾

Promedio	342.67 ± 65.44	43.67 ± 16.05	6
Máxima	437.00	74.00	
Mínima	242.00	28.00	

Nota: Las mediciones de la DQO solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

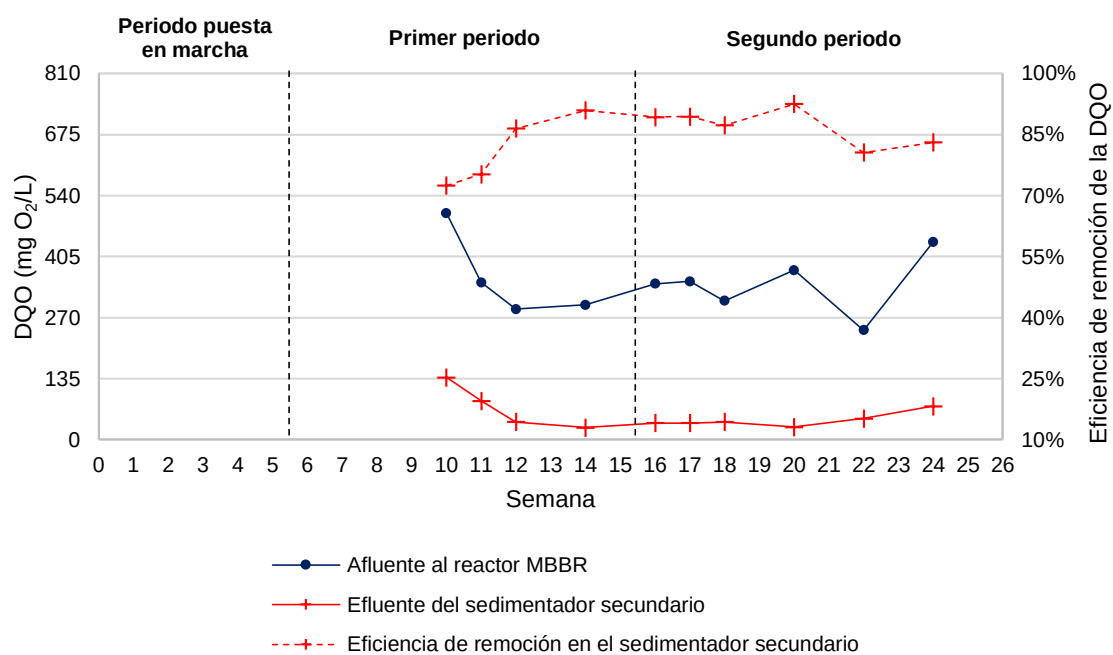
⁽²⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽³⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 18 se muestra la DQO según periodo de análisis y según la frecuencia de monitoreo, en el primer periodo fue desde la semana 10 hasta la semana 15 y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 18

Resultados de la DQO.



Nota: Las mediciones de la DQO solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

4.1.12 Sólidos sedimentables

Se presenta los resultados obtenidos de los sólidos sedimentables (SS) promedio, máximo y mínimo según punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 21

Resultados de sólidos sedimentables promedio, máximo y mínimo.

SS (ml/L.hr)
Primer periodo

Valor	P1 ⁽¹⁾	P4 ⁽²⁾	n ⁽³⁾
Promedio	0.6 ± 0.48	0 ± 0	10
Máximo	1.50	0.00	
Mínimo	0.10	0.00	
Segundo periodo			
Valor	P1 ⁽¹⁾	P4 ⁽²⁾	n ⁽³⁾
Promedio	0.71 ± 0.55	0 ± 0	10
Máximo	1.50	0.00	
Mínimo	0.20	0.00	

Nota: Las mediciones de los SS solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

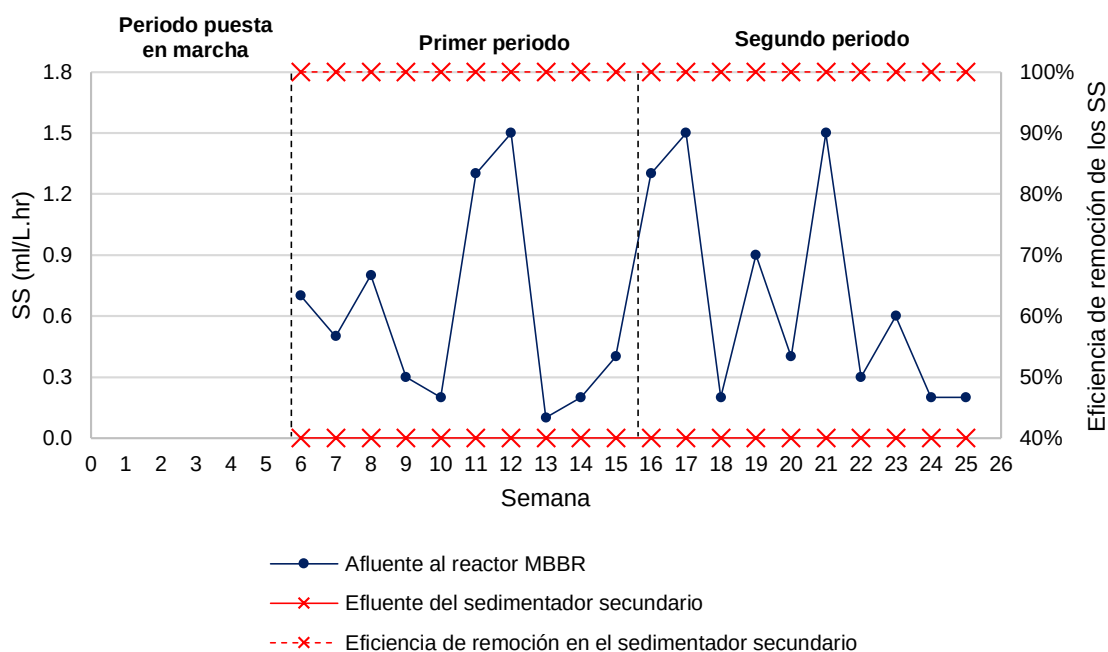
⁽²⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽³⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 19 se muestra los sólidos sedimentables según el periodo de análisis, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15 y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 19

Resultados de los sólidos sedimentables.



Nota: Las mediciones de los SS solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

4.1.13 Sólidos suspendidos volátiles

Se presenta los resultados obtenidos de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) promedio, máximo y mínimo para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 22

Resultados de los SSV promedio, máximo y mínimo.

SSV (mg/L)					
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	79.53 ± 15.4	10.88 ± 3.95	0.91 ± 0.36	0.66 ± 0.33	10
Máximo	100.00	17.00	1.80	1.25	
Mínimo	53.33	4.27	0.49	0.21	
Segundo periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	85.1 ± 15.74	14.26 ± 9.06	4.30 ± 3.73	3.89 ± 3.49	10
Máximo	103.00	28.95	11.56	11.80	
Mínimo	56.67	4.91	0.86	0.77	

Nota: Las mediciones de los SSV solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

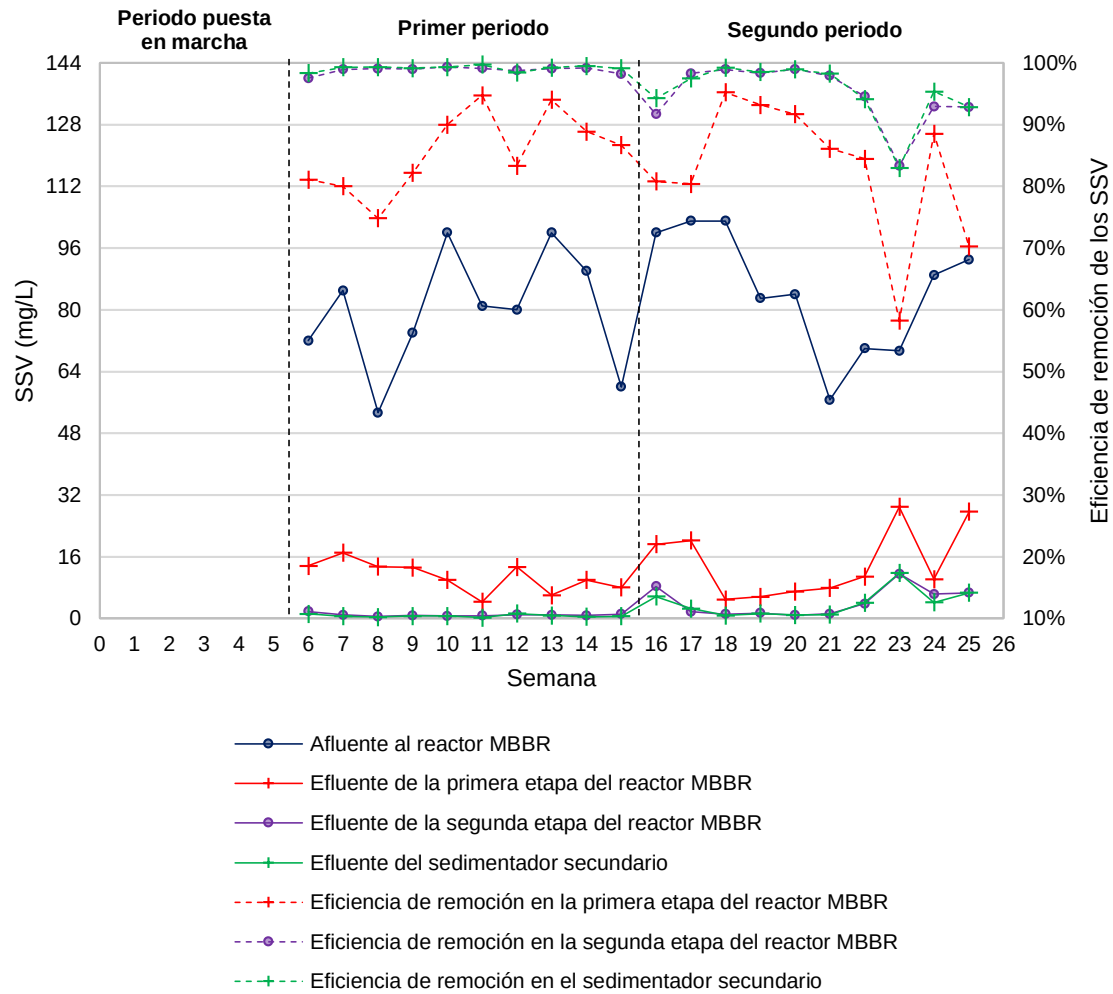
⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 20 se muestra los SSV según el periodo de análisis, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 20

Resultados de los SSV.



Nota: Las mediciones de los SSV solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

4.1.14 Sólidos suspendidos fijos

Se presenta los resultados obtenidos de los sólidos suspendidos fijos (SSF) promedio, máximo y mínimo para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 23

Resultados de los SSF promedio, máximo y mínimo.

SSF (mg/L)					
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	10 ± 5.33	1.85 ± 1.2	0.45 ± 0.4	0.49 ± 0.54	10
Máximo	20.00	3.78	1.40	1.80	

Mínimo	2.00	0.27	0.15	0.10	
Segundo periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	18.9 ± 5.29	2.24 ± 1.44	0.67 ± 0.72	0.61 ± 0.7	10
Máximo	27.00	3.85	1.78	1.80	
Mínimo	12.00	0.36	0.08	0.09	

Nota: Las mediciones de los SSF solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

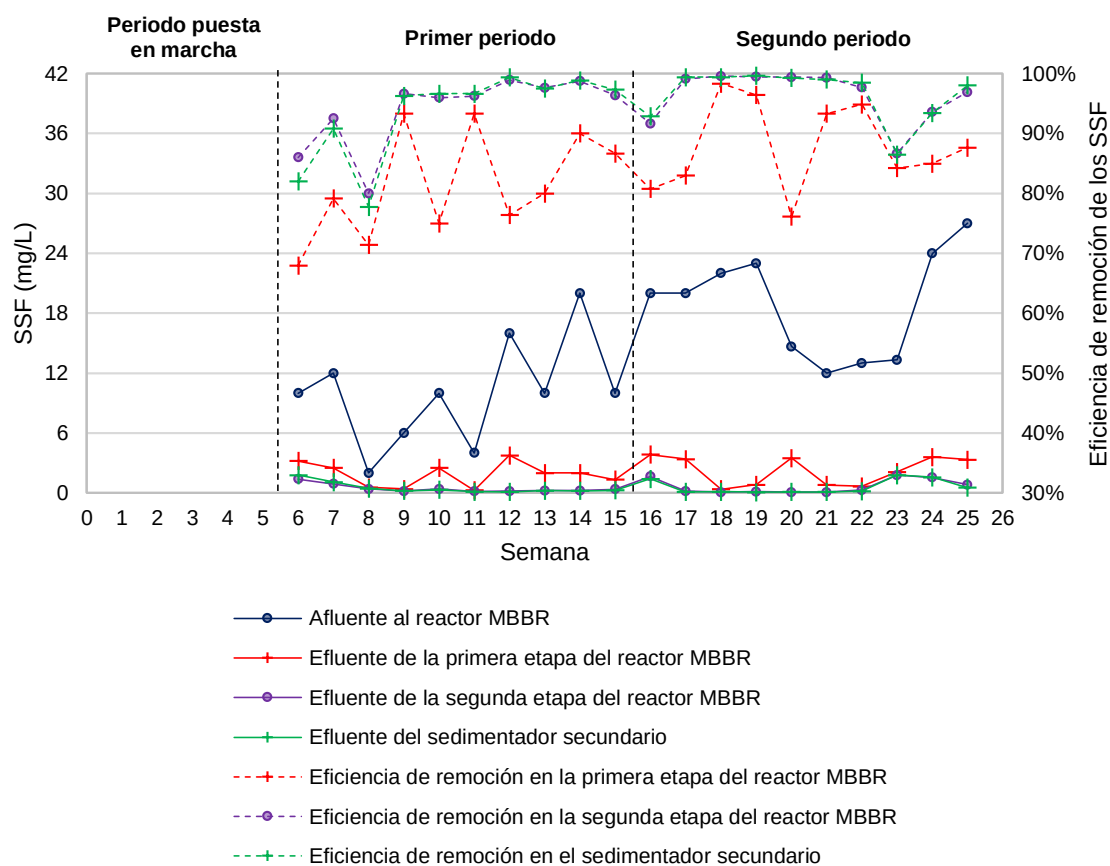
(4) Efluente del sedimentador secundario.

(5) Número de muestras.

Así mismo en la figura 21 se muestra los SSF según el periodo de análisis, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 21

Resultados de los SSF.



Nota: Las mediciones de los SSF solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

4.1.15 Sólidos suspendidos totales

Se presenta los resultados obtenidos de los sólidos suspendidos totales (SST) promedio, máximo y mínimo para cada punto de muestreo y según el periodo en el reactor MBBR.

Tabla 24

Resultados de los SST promedio, máximo y mínimo.

SST (mg/L)					
Primer periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	89.53 ± 18.48	12.74 ± 4.54	1.36 ± 0.71	1.15 ± 0.75	10
Máximo	110.00	19.50	3.20	3.00	
Mínimo	55.33	4.53	0.88	0.35	
Segundo periodo					
Valor	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
Promedio	104 ± 19.92	16.50 ± 9.84	4.96 ± 4.42	4.5 ± 4.06	10
Máximo	125.00	31.05	13.33	13.60	
Mínimo	68.67	5.27	0.94	0.90	

Nota: Las mediciones de los SST solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

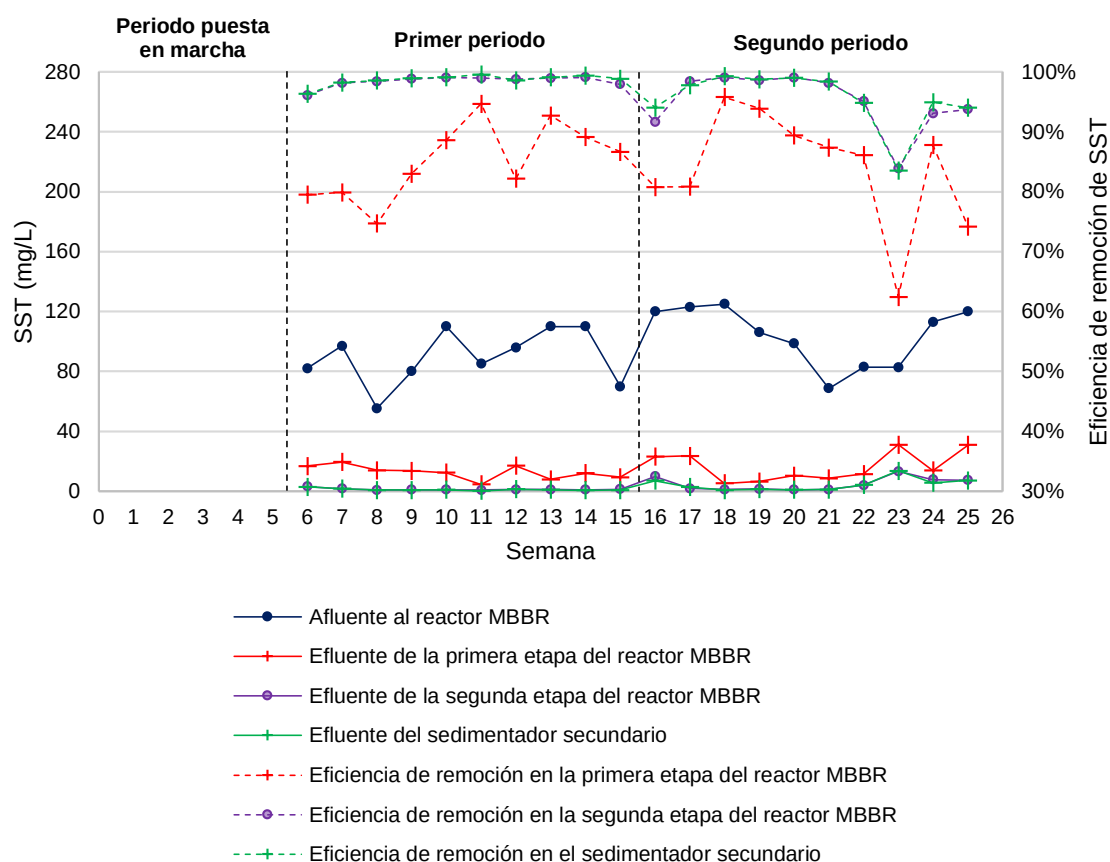
⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Así mismo en la figura 22 se muestra los SST según el periodo de análisis, en el primer periodo fue desde la semana 6 hasta la semana 15, y en el segundo periodo fue desde la semana 16 hasta la semana 25.

Figura 22

Resultados de los SST.



Nota: Las mediciones de los SST solo se realizaron en el primer y segundo periodo.

4.1.16 F/M equivalente

Para el análisis de la relación F/M equivalente al final del segundo periodo con un caudal de operación promedio de 298.21 ± 4.31 L/día, fue necesario realizar la determinación de los SSV en la biopelícula adherida al portador, para tal efecto se escogió 5 portadores al azar del licor de mezcla de cada etapa del reactor MBBR, y es así que se muestran los SSV promedio, máximo y mínimo.

Tabla 25

Resultados de los SSV en la biopelícula promedio, máximo y mínimo.

SSV en la biopelícula (mg/L)	Primera etapa del reactor MBBR	Segunda etapa del reactor MBBR
Promedio	1583.79 ± 516.89	283.77 ± 40.33
Máximo	2054.40	324.57
Mínimo	757.33	232.00

Nota: La F/M equivalente se realizó al finalizar la parte experimental de la investigación.

Así mismo, fue necesario determinar el análisis de los SST y los SSV en el licor de mezcla, para determinar la relación F/M equivalente en cada etapa del reactor MBBR.

Tabla 26

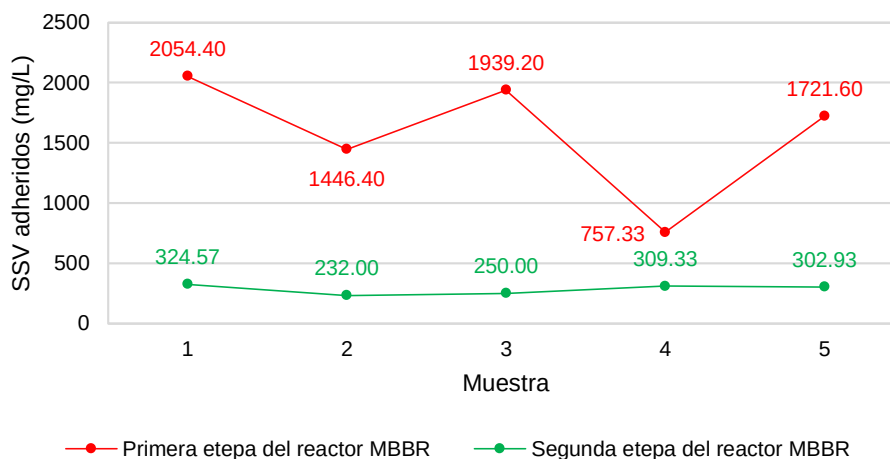
Resultados de los SST y los SSV en el licor de mezcla del reactor MBBR.

	SST en el licor de mezcla (mg/L)	SSV en el licor de mezcla (mg/L)
Primera etapa del reactor MBBR	72.67	60.00
Segunda etapa del reactor MBBR	11.00	9.67

Nota: Se determinó los SST y los SSV al final de la investigación.

Figura 23

SSV adheridos al portador en el primera y segunda etapa del reactor MBBR.



Nota: Los SSV adheridos se determinó en el segundo periodo de la investigación.

4.1.17 K_{La}

Para el análisis del K_{La} de los difusores del reactor MBBR se realizó la prueba para cada etapa del reactor MBBR, en la cual se desoxigenó la muestra de agua a analizar y se procedió a medir la concentración de oxígeno disuelto durante cada intervalo de tiempo hasta llegar a la saturación de oxígeno. Luego de ello, se procedió a realizar la gráfica que nos permita obtener el K_{La} , a partir de ello se realizaron las figuras 24 y 25 donde la pendiente de la recta es el K_{La} .

Figura 24

K_La de la primera etapa del reactor MBBR.

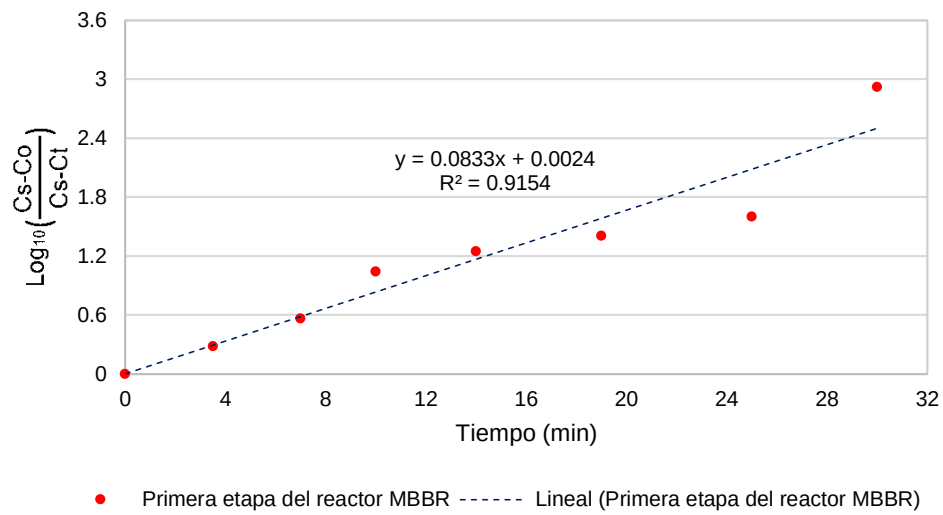
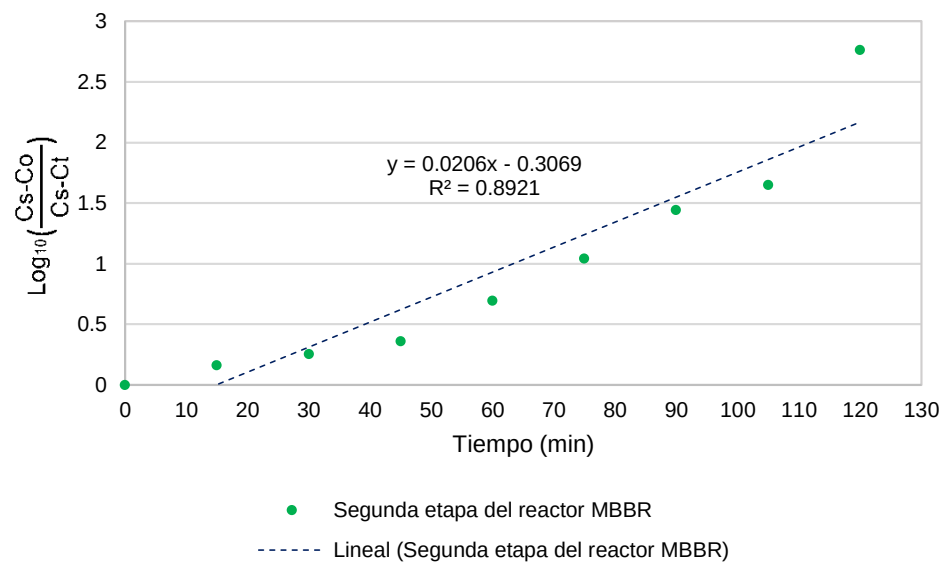


Figura 25

K_La de la segunda etapa del reactor MBBR.



4.2 Análisis y discusión de resultados

4.2.1 Verificación de hipótesis

Para el cálculo de la carga orgánica superficial aplicada (SALR) y la carga orgánica superficial removida (SARR) fue necesario considerar la tabla 27.

Tabla 27

Datos de entrada para el cálculo del TRH, SALR y SARR.

Descripción	Cantidad		Unidad	Detalle
	PE-MBBR	SE-MBBR		
Área superficial de un portador	6882.35	6882.35	mm ²	(a)
Número de los portadores	648	648	unidad	(b)
Área total de los portadores	4.46	4.46	mm ²	(c) = (a) x (b)
Volumen	40	40	L	Ver tabla 9 y 10 (d)
Porcentaje de llenado	32.55	32.55	%	Ver tabla 11 (e)
Volumen del líquido	26.98	26.98	L	(f) = (d) x [(100 – (e)) / 100]

Nota: PE-MBBR y SE-MBBR hacen referencia a la primera y segunda etapa del reactor MBBR.

En las tablas 28 y 29 se muestra los resultados de la SALR, la SARR y las eficiencias de remoción de la DBO₅ y de la DBO₅ soluble en cada etapa y de forma global en el reactor MBBR; del mismo modo se muestra el caudal de operación y el tiempo de retención hidráulico (TRH) del día en que se hizo la prueba para cada periodo.

De la tabla 28 se menciona lo siguiente:

Se encontró que en el periodo puesta en marcha, la máxima eficiencia de remoción de la DBO₅ fue de 93.27%, esto resultó cuando se le aplicó una SALR de 7.58 g DBO₅/m².d y la SARR resultante en el reactor MBBR fue de 7.07 g DBO₅/m².d; por otro lado, la mínima eficiencia de remoción de la DBO₅ fue del 82.62% esto resultó cuando se le aplicó una SALR de 3.74 g DBO₅/m².d y la SARR resultante en el reactor MBBR fue de 3.09 g DBO₅/m².d.

Se encontró que en el primer periodo, la máxima eficiencia de remoción de la DBO₅ fue de 97.85%, esto se dio cuando se le aplicó una SALR de 6.05 g DBO₅/m².d y la SARR obtenida en el reactor MBBR fue de 5.92 g DBO₅/m².d; por otro lado, la mínima eficiencia de remoción de la DBO₅ fue de 86.21% esto se dio cuando se le aplicó una SALR de 6.89 g DBO₅/m².d y la SARR obtenida en el reactor MBBR fue de 5.94 g DBO₅/m².d. Además

en el primer periodo la SALR máxima y mínima fue de 8.12 y 5.72 g DBO₅/m².d respectivamente.

Se encontró que en el segundo periodo, la máxima eficiencia de remoción de la DBO₅ fue de 93.84%, esto resultó cuando se le aplicó una SALR de 9.90 g DBO₅/m².d y la SARR resultante en el reactor MBBR fue de 9.29 g DBO₅/m².d; por otro lado, la mínima eficiencia de remoción de la DBO₅ fue de 82.80% esto resultó cuando se le aplicó una SALR de 8.72 g DBO₅/m².d y la SARR resultante en el reactor MBBR fue de 7.22 g DBO₅/m².d. Además en el segundo periodo, la SALR máxima y mínima fue de 12.00 y 6.73 g DBO₅/m².d respectivamente.

Por lo mencionado, en los tres periodos la eficiencia de remoción de la DBO₅ fue superior al 80% en el reactor MBBR de dos etapas en serie aplicándose una SALR inferior a 20 g DBO₅/m².d.

Tabla 28

Resumen de resultados del SALR y SARR para la DBO₅ por periodo.

Periodo	S ⁽¹⁾	DBO ₅										
		Caudal ⁽²⁾ m ³ /d	TRH-1 ⁽³⁾ horas	TRH-2 ⁽⁴⁾ horas	TRH-MBBR ⁽⁵⁾ horas	SALR ⁽⁶⁾ gDBO ₅ /m ² .d	SARR-1 ⁽⁷⁾ gDBO ₅ /m ² .d	SARR-2 ⁽⁸⁾ gDBO ₅ /m ² .d	SARR-MBBR ⁽⁹⁾ gDBO ₅ /m ² .d	E-1 ⁽¹⁰⁾ %	E-2 ⁽¹¹⁾ %	E-MBBR ⁽¹²⁾ %
PM ⁽¹³⁾	4	0.19	3.41	3.41	6.82	3.74	2.47	0.62	3.09	66.04	48.82	82.62
	5	0.20	3.24	3.24	6.48	7.58	6.27	0.80	7.07	82.72	61.07	93.27
PP ⁽¹⁴⁾	6	0.20	3.24	3.24	6.48	7.42	5.84	1.15	6.99	78.71	72.78	94.2
	7	0.20	3.24	3.24	6.48	6.82	5.31	1.08	6.39	77.86	71.52	93.7
	8	0.19	3.41	3.41	6.82	6.89	5.37	0.57	5.94	77.94	37.5	86.21
	9	0.20	3.24	3.24	6.48	6.05	5.63	0.29	5.92	93.06	69.05	97.85
	10	0.20	3.24	3.24	6.48	5.72	4.90	0.34	5.24	85.66	41.46	91.61
	11	0.19	3.41	3.41	6.82	5.93	5.08	0.48	5.56	85.67	56.47	93.76
	12	0.20	3.24	3.24	6.48	6.03	5.14	0.35	5.49	85.24	39.33	91.04
	13	0.20	3.24	3.24	6.48	8.12	6.02	1.71	7.73	74.14	81.43	95.20
	14	0.19	3.41	3.41	6.82	6.60	5.91	0.29	6.2	89.55	42.03	93.94
	15	0.19	3.41	3.41	6.82	5.74	4.95	0.39	5.34	86.24	49.37	93.03
SP ⁽¹⁵⁾	16	0.30	2.16	2.16	4.32	12.00	10.73	0.06	10.79	89.42	4.72	89.92
	17	0.30	2.16	2.16	4.32	9.54	8.32	0.27	8.59	87.21	22.13	90.04
	18	0.30	2.16	2.16	4.32	10.20	8.38	1.14	9.52	82.16	62.64	93.33
	19	0.30	2.16	2.16	4.32	9.51	7.99	0.76	8.75	84.02	50	92.01
	20	0.30	2.16	2.16	4.32	11.26	8.84	1.54	10.38	78.51	63.64	92.18
	21	0.29	2.23	2.23	4.47	9.90	8.28	1.01	9.29	83.64	62.35	93.84
	22	0.31	2.09	2.09	4.18	6.73	4.91	0.85	5.76	72.96	46.7	85.59
	23	0.29	2.23	2.23	4.47	8.72	6.30	0.92	7.22	72.25	38.02	82.8
	24	0.30	2.16	2.16	4.32	11.47	8.62	0.89	9.51	75.15	31.23	82.91
	25	0.30	2.16	2.16	4.32	11.14	9.07	0.40	9.47	81.42	19.32	85.01

Nota: La SALR es la carga orgánica superficial aplicada, y la SARR es carga orgánica superficial removida.

- (1) Se refiere a la semana en que realizó la prueba de la DBO₅.
- (2) Se refiere al caudal de operación del día en que se hizo la prueba de la DBO₅.
- (3) Se refiere al tiempo de retención hidráulico (TRH) en la primera etapa del reactor MBBR.
- (4) Se refiere al tiempo de retención hidráulico (TRH) en la segunda etapa del reactor MBBR.
- (5) Se refiere al tiempo de retención hidráulico (TRH) en el reactor MBBR.
- (6) Se refiere a la SALR en el reactor MBBR.
- (7) Se refiere a la SARR en la primera etapa del reactor MBBR.
- (8) Se refiere a la SARR entre la primera y la segunda etapa del reactor MBBR.
- (9) Se refiere a la SARR en el reactor MBBR.
- (10) Se refiere a la eficiencia de remoción de la primera etapa del reactor MBBR.
- (11) Se refiere a la eficiencia de remoción entre la primera y segunda etapa del reactor MBBR.
- (12) Se refiere a la eficiencia de remoción del reactor MBBR.
- (13) Se refiere al periodo puesta en marcha de la investigación.
- (14) Se refiere al primer periodo de la investigación.
- (15) Se refiere al segundo periodo de la investigación.

De igual forma, de la tabla 29 se menciona lo siguiente:

Se encontró que en el periodo puesta en marcha, la eficiencia de remoción de la DBO₅ soluble fue de 91.41%, que se dio cuando se le aplicó una SALR de 4.19 g DBO₅sol/m².d y la SARR obtenida en el reactor MBBR fue de 3.83 g DBO₅sol/m².d.

Se encontró que en el primer periodo, la máxima eficiencia de remoción de la DBO₅ soluble fue de 96.24%, que resultó cuando se le aplicó una SALR de 3.99 g DBO₅sol/m².d y la SARR obtenida en el reactor MBBR fue de 3.84 g DBO₅sol/m².d; por otro lado, la mínima eficiencia de remoción de la DBO₅ soluble fue de 90.84% que resultó cuando se le aplicó una SALR de 3.93 g DBO₅sol/m².d y la SARR obtenida en el reactor MBBR fue de 3.57 g DBO₅sol/m².d. Además en el primer periodo, la SALR máxima y mínima fue de 4.27 y 2.70 g DBO₅sol/m².d respectivamente.

Se encontró que en el segundo periodo, la máxima eficiencia de remoción de la DBO₅ soluble fue de 93.52%, esto se dio cuando se le aplicó una SALR de 6.02 g DBO₅sol/m².d y la SARR resultante en el reactor MBBR fue de 5.63 g DBO₅sol/m².d; por otro lado, la mínima eficiencia de remoción de la DBO₅ soluble fue de 83.41% esto se dio cuando se le aplicó una SALR de 4.46 g DBO₅sol/m².d y la SARR resultante en el reactor MBBR fue de 3.72 g DBO₅sol/m².d. Además en el segundo periodo, la SALR máxima y mínima fue de 7.60 y 3.42 g DBO₅sol/m².d respectivamente.

Por lo mencionado, en los tres periodos la eficiencia de remoción de la DBO_5 soluble fue superior al 80% en el reactor MBBR de dos etapas en serie aplicándose una SALR inferior a $20 \text{ g DBO}_{5\text{sol}}/\text{m}^2.\text{d.}$

Tabla 29

Resumen de resultados del SALR y SARR para la DBO₅ soluble por periodo.

Periodo	S ⁽¹⁾	DBO ₅ soluble										
		Caudal ⁽²⁾ m ³ /d	TRH-1 ⁽³⁾ horas	TRH-2 ⁽⁴⁾ horas	TRH-MBBR ⁽⁵⁾ horas	SALR ⁽⁶⁾	SARR-1 ⁽⁷⁾	SARR-2 ⁽⁸⁾	SARR-MBBR ⁽⁹⁾ gDBO ₅ sol/m ² .d	E-1 ⁽¹⁰⁾ %	E-2 ⁽¹¹⁾ %	E-MBBR ⁽¹²⁾ %
PM ⁽¹³⁾	5	0.20	3.24	3.24	6.48	4.19	3.31	0.52	3.83	79	59.09	91.41
	8	0.19	3.41	3.41	6.82	3.93	3.37	0.20	3.57	85.75	35.71	90.84
	10	0.20	3.24	3.24	6.48	2.7	2.07	0.42	2.49	76.67	66.67	92.22
PP ⁽¹⁴⁾	11	0.19	3.41	3.41	6.82	4.27	3.63	0.32	3.95	85.01	50	92.51
	12	0.20	3.24	3.24	6.48	3.48	3.00	0.22	3.22	86.21	45.83	92.53
	14	0.19	3.41	3.41	6.82	3.99	3.62	0.20	3.84	90.73	59.46	96.24
SP ⁽¹⁵⁾	16	0.30	2.16	2.16	4.32	6.02	5.28	0.35	5.63	87.71	47.3	93.52
	17	0.30	2.16	2.16	4.32	6.38	5.6	0.17	5.77	87.77	21.79	90.44
	18	0.30	2.16	2.16	4.32	3.42	2.81	0.32	3.13	82.16	52.46	91.52
	20	0.30	2.16	2.16	4.32	6.79	5.62	0.63	6.25	82.77	53.85	92.05
	22	0.31	2.09	2.09	4.18	4.46	3.51	0.21	3.72	78.7	22.11	83.41
	24	0.30	2.16	2.16	4.32	7.60	6.6	0.21	6.81	86.84	21	89.61

Nota: La SALR es la carga orgánica superficial aplicada, y la SARR es la carga orgánica superficial removida.

⁽¹⁾ Se refiere a la semana en que realizó la prueba de la DBO₅ soluble.

⁽²⁾ Se refiere al caudal de operación del día en que se hizo la prueba de la DBO₅ soluble.

⁽³⁾ Se refiere al tiempo de retención hidráulico (TRH) en la primera etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Se refiere al tiempo de retención hidráulico (TRH) en la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁵⁾ Se refiere al tiempo de retención hidráulico (TRH) en el reactor MBBR.

⁽⁶⁾ Se refiere a la SALR en el reactor MBBR, en g DBO₅sol/m².d.

⁽⁷⁾ Se refiere a la SARR en la primera etapa del reactor MBBR, en g DBO₅sol/m².d.

⁽⁸⁾ Se refiere a la SARR entre la primera etapa y la segunda etapa del reactor MBBR, en g DBO₅sol/m².d.

⁽⁹⁾ Se refiere a la SARR en el reactor MBBR.

⁽¹⁰⁾ Se refiere a la eficiencia de remoción de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽¹¹⁾ Se refiere a la eficiencia de remoción entre la primera y segunda etapa del reactor MBBR.

⁽¹²⁾ Se refiere a la eficiencia de remoción del reactor MBBR.

⁽¹³⁾ Se refiere al periodo puesta en marcha de la investigación.

⁽¹⁴⁾ Se refiere al primer periodo de la investigación.

⁽¹⁵⁾ Se refiere al segundo periodo de la investigación.

RESPECTO A LA DBO₅

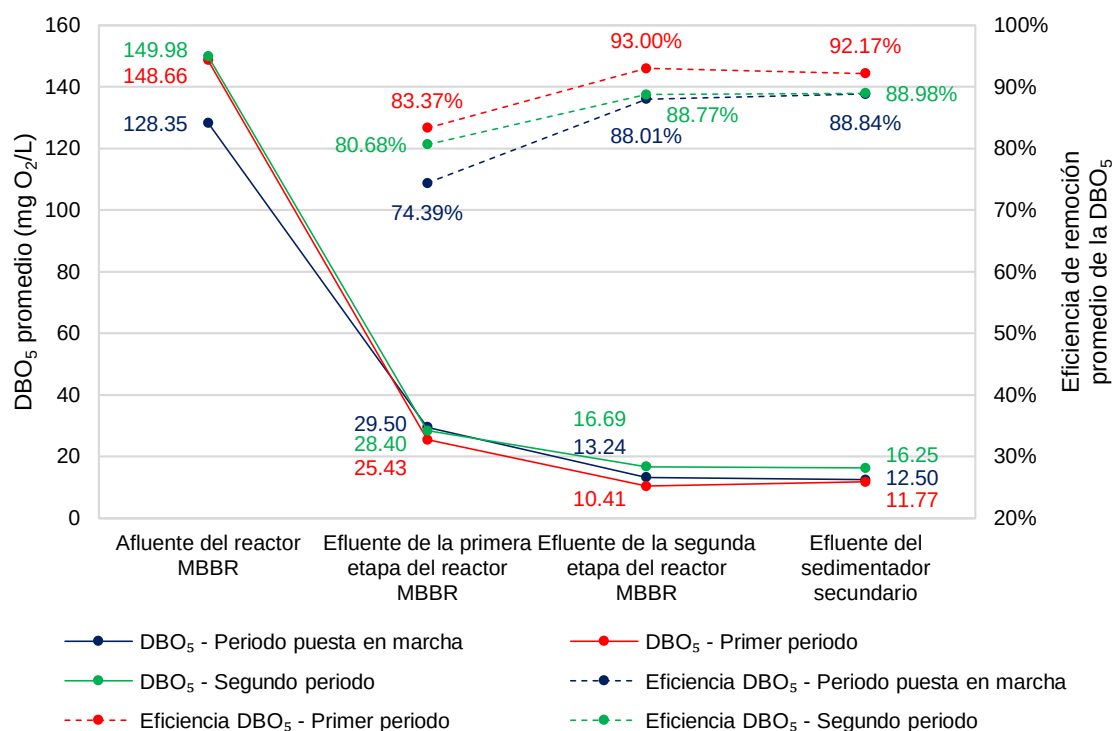
Se encontró que, la mayor reducción de la DBO₅ promedio fue entre el afluente y el efluente de la primera etapa del reactor MBBR es decir en el periodo puesta en marcha, en el primer periodo y en el segundo periodo la disminución fue desde 128.35 a 29.50 mg O₂/L, 148.66 a 25.43 mg O₂/L, y 149.98 a 28,40 mg O₂/L respectivamente, que conllevó a que la mayor eficiencia de remoción de la DBO₅ promedio se presente entre el efluente de la primera etapa y afluente del reactor MBBR ya que en el periodo puesta en marcha, en el primer periodo y en el segundo periodo la eficiencia de remoción promedio fue de 74.39%, 83.37% y 80.68% respectivamente.

Por otro lado, entre el primer y el segundo periodo se observó una disminución en la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ hasta el efluente del sedimentador secundario con valores del 92.17% y 88.98% respectivamente; dicha reducción está relacionada con el incremento del caudal de operación entre el primer y el segundo periodo con caudales promedios de 198.74 ± 4.66 y 298 ± 4.31 L/día, existiendo para éste estudio una relación inversa entre la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ y el caudal de operación promedio.

Dado que la cantidad de biomasa adherida a los portadores fue mayor en la primera etapa respecto de la segunda etapa del reactor MBBR (según análisis del inciso 4.2.13) conllevó a que la mayor remoción de la DBO₅ predominara en la primera etapa del reactor MBBR.

Figura 26

Resumen de la DBO₅ promedio y eficiencia de remoción por periodo.



Nota: Las mediciones de la DBO₅ fueron en cada periodo.

RESPECTO A LA DBO₅ SOLUBLE

Se encontró que la mayor reducción de la DBO₅ soluble promedio fue entre el afluente y el efluente de la primera etapa del reactor MBBR es decir en el primer periodo y en el segundo periodo la reducción fue desde 84.80 a 12.31 mg O₂/L y 85.52 a 12.91 mg O₂/L respectivamente, que conllevó a que la mayor eficiencia de remoción de la DBO₅ soluble promedio se presente entre el efluente de la primera etapa y afluente del reactor MBBR ya que en el primer periodo y en el segundo periodo la eficiencia de remoción fue del 85.37% y 83.66% respectivamente.

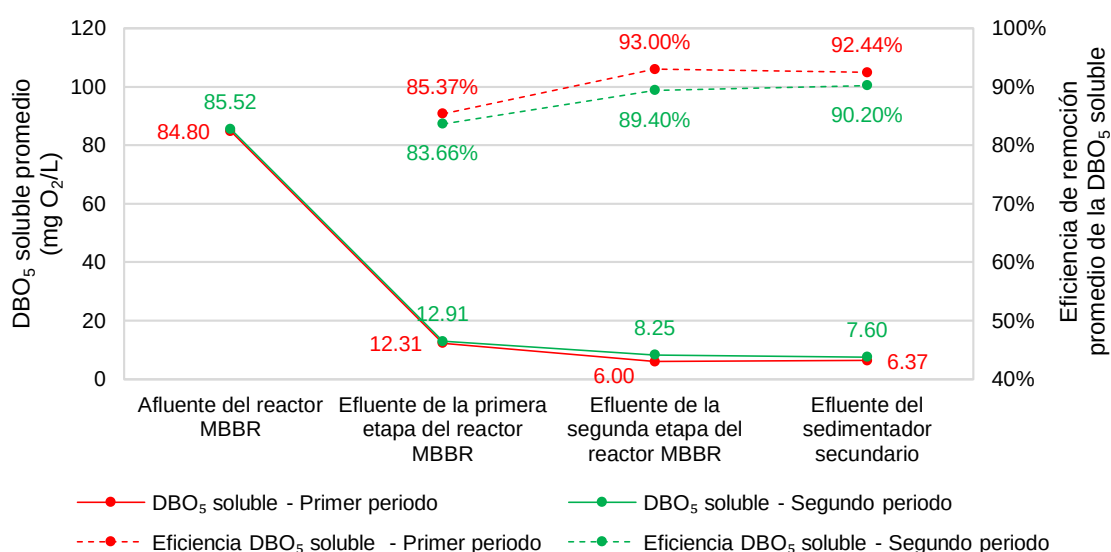
Por otro lado, entre el primer y el segundo periodo se observó una disminución en la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble hasta el efluente del sedimentador secundario con valores del 92.44% y 90.20% respectivamente; dicha disminución está relacionada con el incremento del caudal de operación entre el primer y el segundo periodo con caudales promedios de 198.74 ± 4.66 y 298 ± 4.31 L/día, existiendo para este estudio

una relación inversa entre la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble y el caudal de operación promedio.

Dado que la cantidad de biomasa adherida a los portadores fue mayor en la primera etapa respecto de la segunda etapa del reactor MBBR (según análisis del inciso 4.2.13) conllevó a que la mayor remoción de la DBO₅ soluble predominara en la primera etapa del reactor MBBR.

Figura 27

Resumen de la DBO₅ soluble promedio y eficiencia de remoción por periodo.



Nota: Se muestra solo las mediciones de la DBO₅ soluble del primer y segundo periodo.

RESPECTO A LA DQO

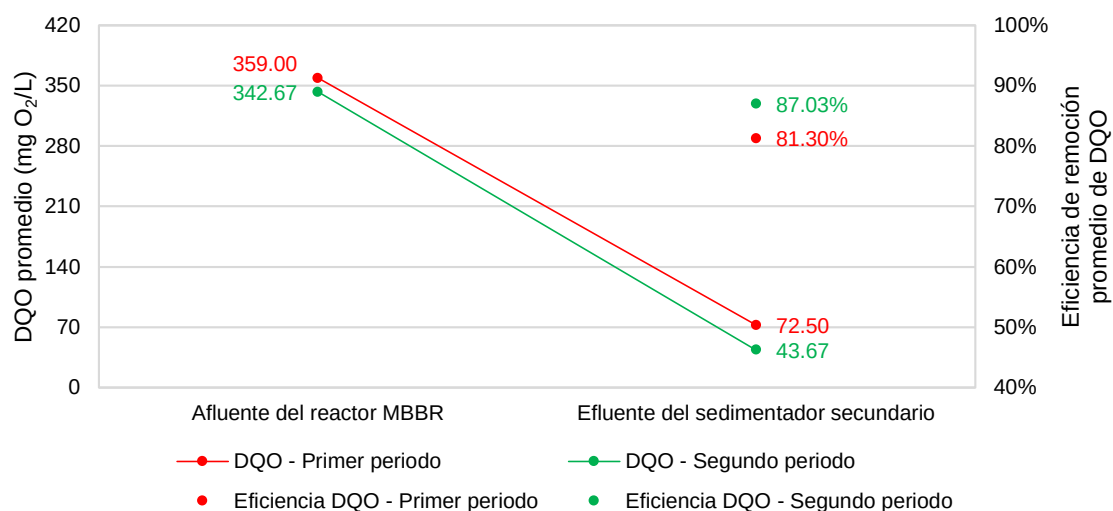
Se encontró que la reducción de la DQO promedio entre el afluente del reactor MBBR y el efluente del sedimentador secundario, en el primer periodo y en el segundo periodo, fue desde 359 a 72.50 mg O₂/L y de 342.67 a 43.67 mg O₂/L respectivamente, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de la DQO, en la primera y segunda etapa, hasta el efluente del sedimentador secundario del 81.30% y 87.03% respectivamente.

Debido a que la cantidad de biomasa adherida a los portadores fue superior en la primera etapa respecto de la segunda etapa del reactor MBBR (según análisis del inciso

4.2.13) conllevó a que la mayor remoción de la DQO predominara en la primera etapa del reactor MBBR.

Figura 28

Resumen de la DQO promedio y eficiencia de remoción por periodo.



Nota: Las mediciones de DQO fueron solo en el primer y segundo periodo.

4.2.2 Portador de biomasa

El portador de biopelícula, utilizado para la digestión aeróbica, debe poseer un área de superficie específica entre 500 y 700 m²/m³, y debe poseer un porcentaje de llenado, respecto del volumen del reactor, entre 30% y 60% (Metcalf y Eddy, 2015).

El factor clave en el diseño de un reactor MBBR es el área de superficie específica del portador, de tal modo que su tamaño y su forma no influye cuando el área de superficie específica fue determinado (Odegaard et al., 2000).

En ese sentido, se encontró que el portador utilizado posee un área de superficie específica de 2166.47 m²/m³ y posee un porcentaje de vacío del 84.19%; y el porcentaje de llenado de los portadores, en cada etapa del reactor MBBR, fue del 32.55%.

Tabla 30

Características principales de diseño del portador utilizado

Características	Unidad	Portador utilizado
Área de superficie específica	m ² /m ³	2166.47
Porcentaje de vacío	%	84.19
Porcentaje de llenado	%	32.55

Nota: Para determinar el área de superficie específica y el porcentaje de vacío del portador se utilizó el software de ingeniería AutoCAD.

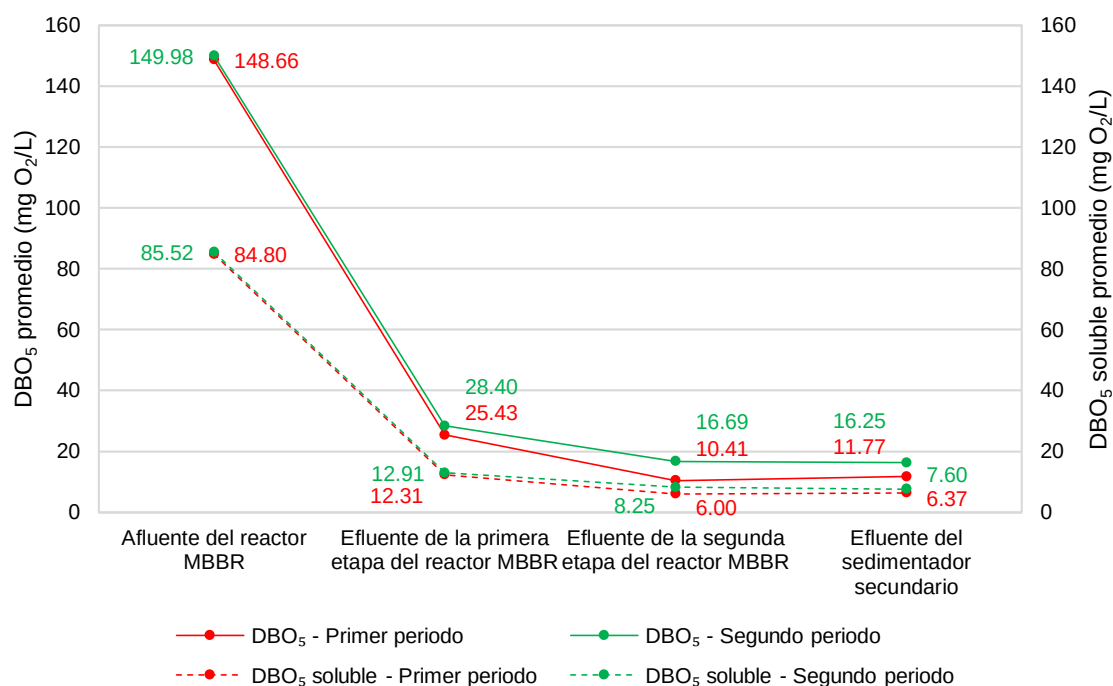
4.2.3 DBO₅ y DBO₅ soluble

Se encontró que la DBO₅ siempre fue superior a la DBO₅ soluble en el primer y segundo periodo; así mismo se observó que la reducción de la DBO₅ y la DBO₅ soluble fue mayor en el efluente de la primera etapa del reactor MBBR en comparación del efluente de la segunda etapa y del efluente del sedimentador secundario.

Ya que la cantidad de biomasa adherida a los portadores fue mayor en la primera etapa respecto de la segunda etapa del reactor MBBR (según análisis del inciso 4.2.13) conllevó a que la mayor remoción de la DBO₅ y la DBO₅ soluble predominaran en la primera etapa del reactor MBBR.

Figura 29

Resumen de la DBO₅ promedio y la DBO₅ soluble promedio por periodo.



Nota: Se muestra las mediciones promedio de la DBO₅ y la DBO₅ soluble del primer y segundo periodo.

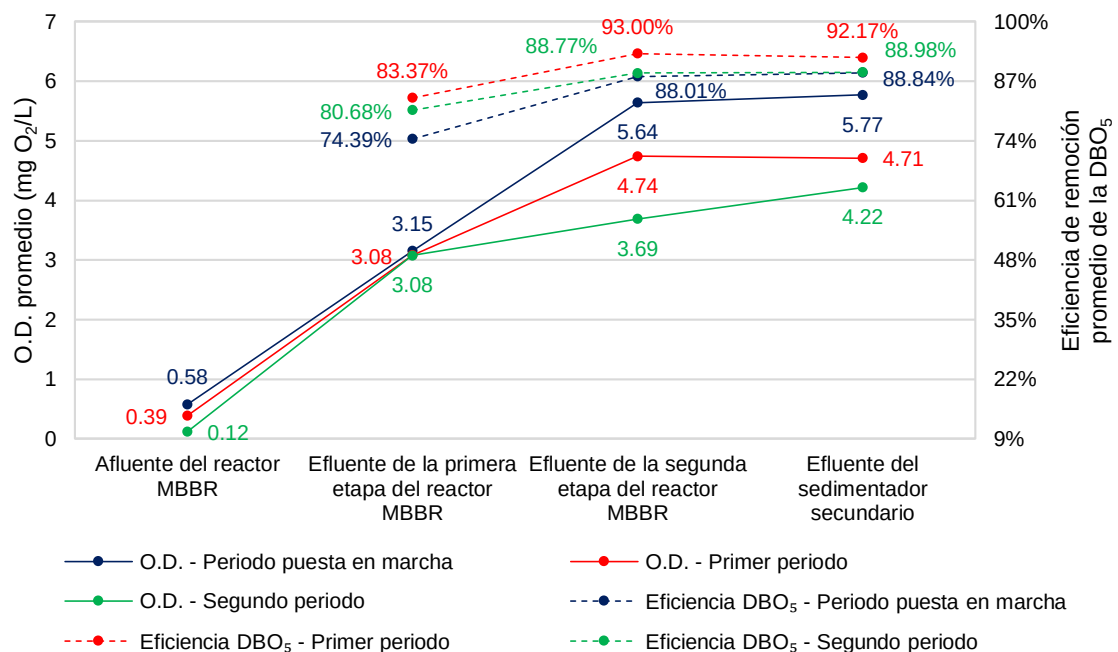
4.2.4 Efecto del oxígeno disuelto en la remoción de la materia orgánica

El oxígeno disuelto contribuye a la conversión de la materia orgánica; una concentración entre 2 y 3 mg O₂/L es suficiente en reactores MBBR (Odegaard et al., 2006).

Se encontró que, respecto de la DBO₅, en el periodo puesta en marcha, la concentración de oxígeno disuelto promedio aumentó desde 0.58 mg O₂/L en el afluente del reactor MBBR hasta 5.77 mg O₂/L del efluente del sedimentador secundario, y la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR fue del 88.84%; en el primer periodo, la concentración de oxígeno disuelto promedio aumentó desde 0.39 mg O₂/L hasta 4.74 mg O₂/L del efluente de la segunda etapa del reactor MBBR, y la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR fue del 92.17%; y en el segundo periodo, la concentración de oxígeno disuelto promedio aumentó desde 0.12 mg O₂/L hasta 4.22 mg O₂/L del efluente del sedimentador secundario, y la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR fue del 88.98%.

Figura 30

Resumen del OD promedio y eficiencia de remoción promedio de la DBO₅.

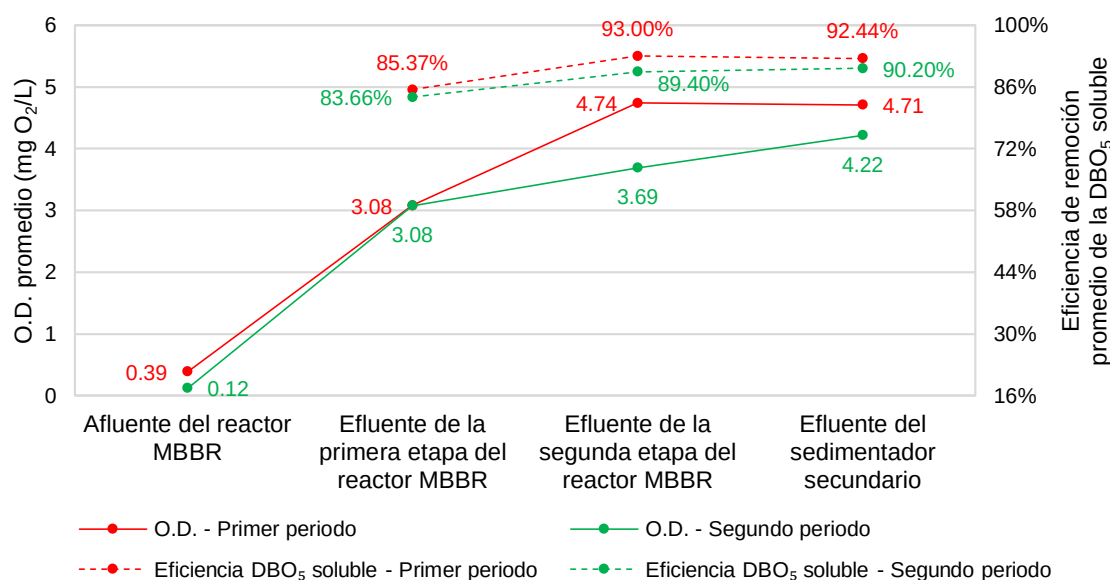


Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

Se encontró que, respecto de la DBO₅ soluble, en el primer periodo, la concentración de oxígeno disuelto promedio se incrementó desde 0.39 mg O₂/L en el afluente del reactor MBBR hasta 4.74 mg O₂/L del efluente de la segunda etapa del reactor MBBR, y la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble en el reactor MBBR fue del 92.44%; y en el segundo periodo, la concentración de oxígeno disuelto promedio se incrementó desde 0.12 mg O₂/L en el afluente del reactor MBBR hasta 4.22 mg O₂/L del efluente del sedimentador secundario, y la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble en el reactor MBBR fue del 90.20%.

Figura 31

Resumen del OD promedio y eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble.

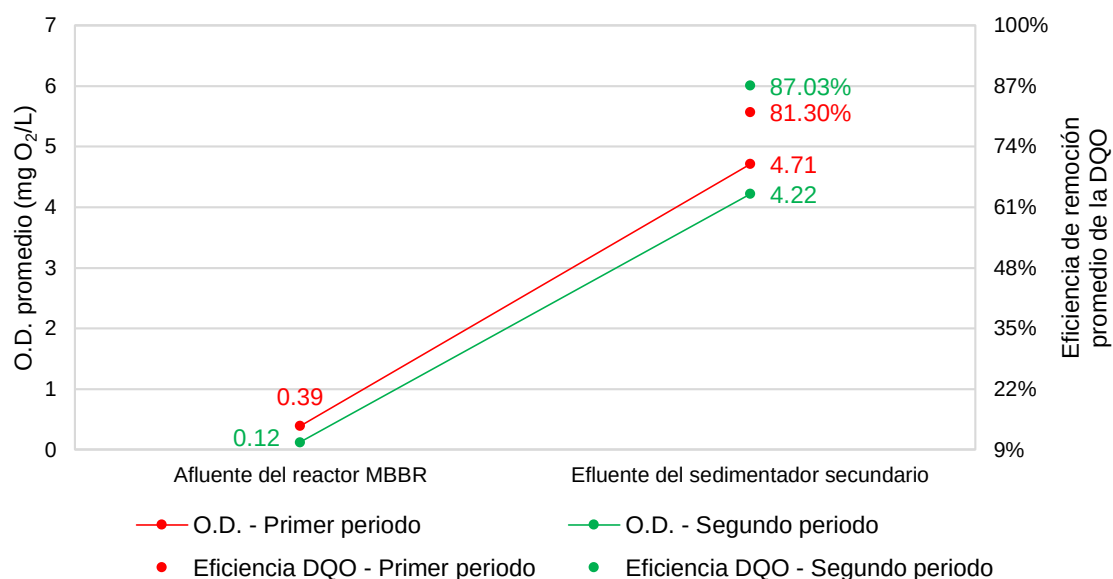


Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

Se encontró que, respecto de la DQO, en el primer periodo una variación de la concentración de oxígeno disuelto promedio desde 0.39 mg O₂/L en el afluente del reactor MBBR hasta 4.71 mg O₂/L del efluente del sedimentador secundario, permitió una eficiencia de remoción promedio de la DQO en el reactor MBBR del 81.30%; y en el segundo periodo, una variación de la concentración de oxígeno disuelto promedio desde 0.12 mg O₂/L en el afluente del reactor MBBR hasta 4.22 mg O₂/L del efluente del sedimentador secundario, permitió una eficiencia de remoción promedio de la DQO en el reactor MBBR del 87.03%.

Figura 32

Resumen del OD promedio y eficiencia de remoción promedio de la DQO.



Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

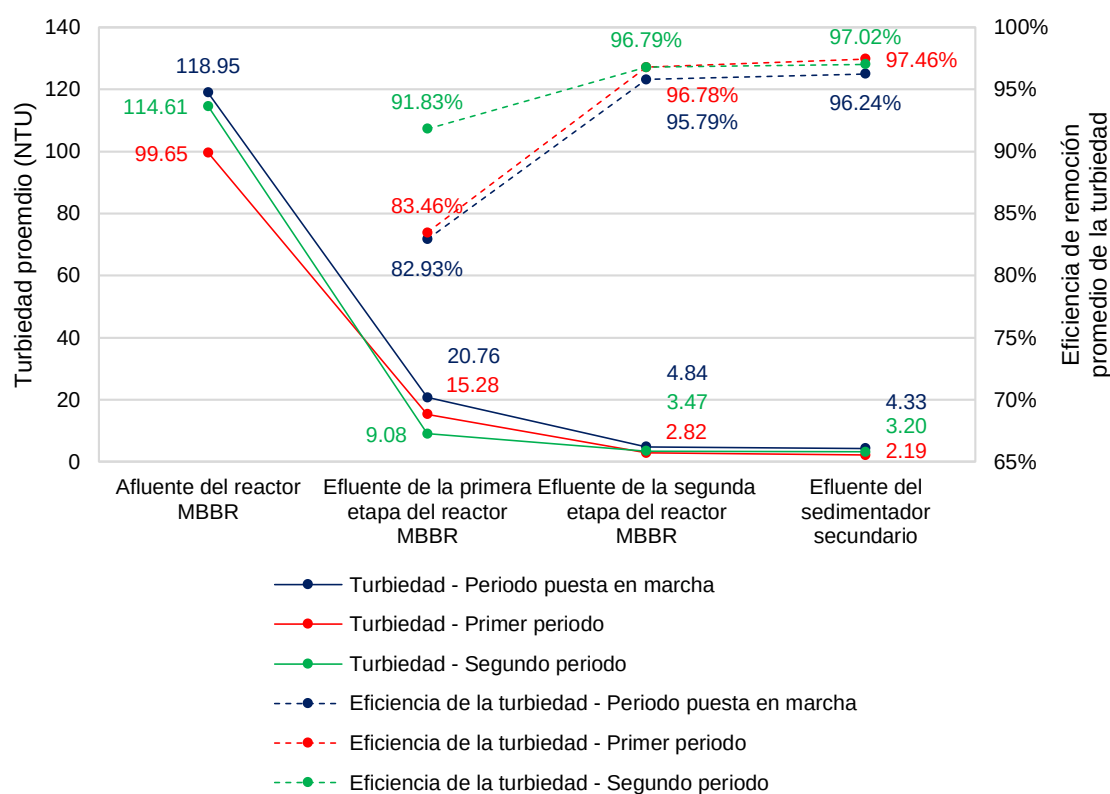
4.2.5 Turbiedad y eficiencia de remoción

La turbiedad es un parámetro de control de calidad en los procesos de tratamiento ya que es una medición óptica de la cantidad de partículas suspendidas presente en una muestra de agua residual (Romero, 2004).

Se encontró que en el periodo puesta en marcha la disminución de la turbiedad promedio fue desde 118.95 NTU en el afluente del reactor MBBR hasta 4.33 NTU en el efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio del 96.24%; en el primer periodo se redujo la turbiedad promedio desde 99.65 NTU en el afluente del reactor MBBR a 2.19 NTU del efluente del sedimentador secundario, generando una eficiencia de remoción promedio del 97.46%; y en el segundo periodo la reducción de la turbiedad promedio fue desde 114.61 NTU a 3.20 NTU en el afluente del reactor MBBR y el efluente del sedimentador secundario respectivamente, con una eficiencia de remoción promedio del 97.02%.

Figura 33

Resumen de la turbiedad promedio y eficiencia de remoción promedio por periodo.



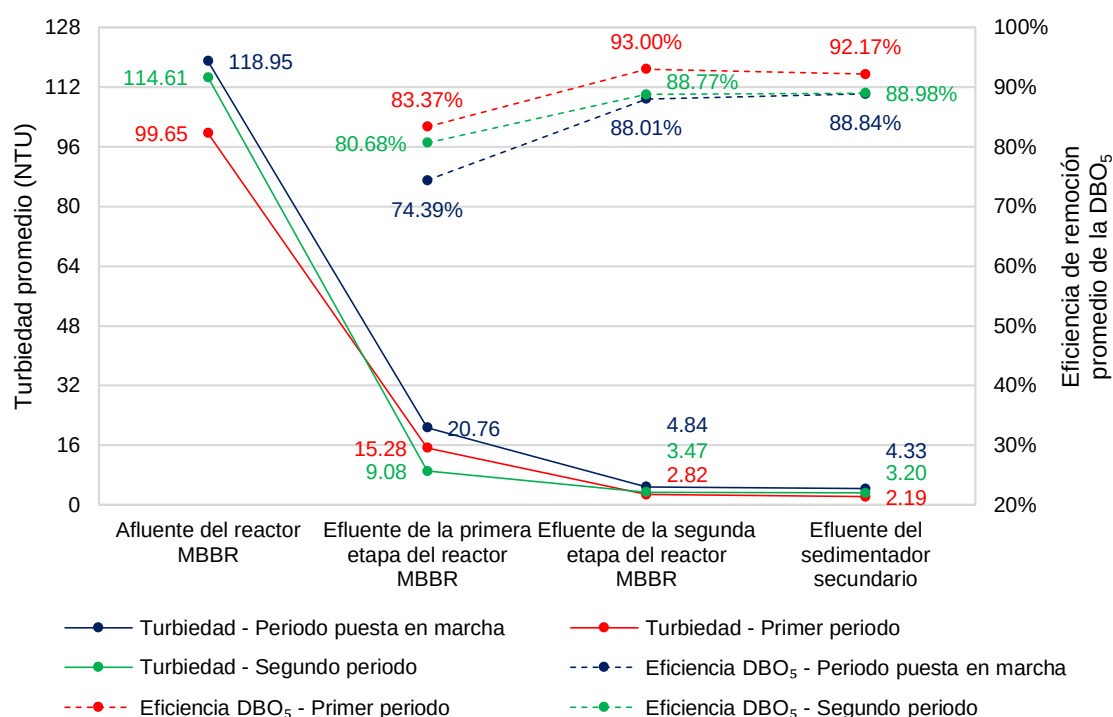
Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

4.2.6 Efecto de la turbiedad en la remoción de la materia orgánica

Se encontró que, respecto de la DBO₅, en el periodo puesta en marcha, la turbiedad promedio disminuyó desde 118.95 NTU del afluente del reactor MBBR a 4.33 NTU del efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR del 88.84%; en el primer periodo, la turbiedad promedio se redujo desde 99.65 NTU del afluente del reactor MBBR a 2.19 NTU del efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR del 92.17%; y en el segundo periodo, la reducción de la turbiedad promedio fue desde 114.61 NTU del afluente del reactor MBBR a 3.20 NTU del efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR fue del 88.98%.

Figura 34

Resumen de la turbiedad promedio y eficiencia de remoción promedio de la DBO₅.

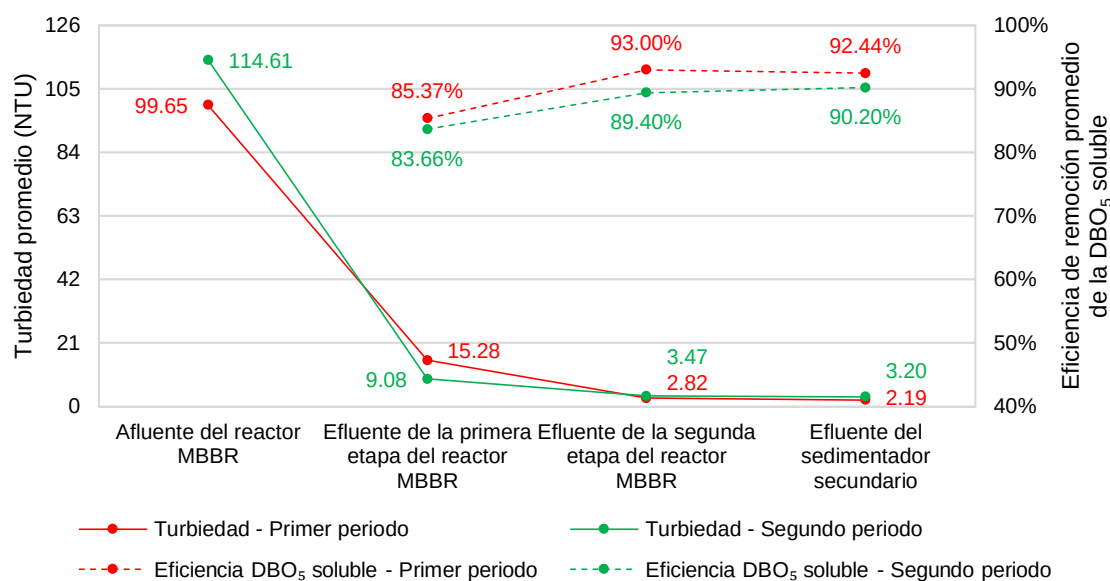


Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

Se encontró que, respecto de la DBO₅ soluble, en el primer periodo, la turbiedad promedio se redujo desde 99.65 NTU del afluente del reactor MBBR a 2.19 NTU del efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble en el reactor MBBR del 92.44%; y en el segundo periodo, la turbiedad promedio disminuyó desde 114.61 NTU del afluente del reactor MBBR a 3.20 NTU del efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble en el reactor MBBR fue del 90.20%.

Figura 35

Resumen de turbiedad promedio y eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble.

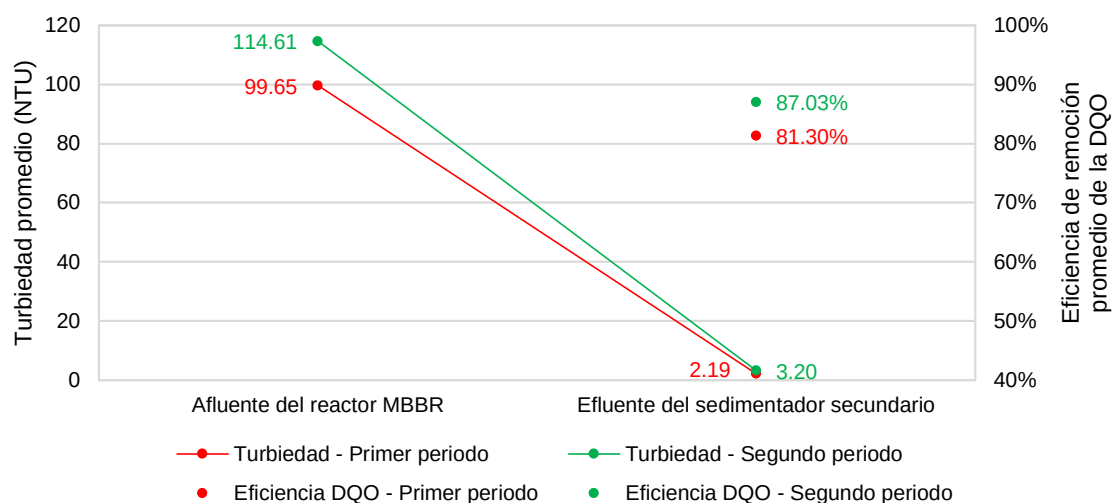


Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

Se encontró que, respecto de la DQO, la turbiedad promedio en el primer periodo disminuyó desde 99.65 NTU en el afluente del reactor MBBR a 2.19 NTU en el efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de la DQO en el reactor MBBR del 81.30%; y en el segundo periodo, la turbiedad promedio se redujo desde 114.61 NTU en el afluente del reactor MBBR a 3.20 NTU en el efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de la DQO en el reactor MBBR del 87.03%.

Figura 36

Resumen de la turbiedad promedio y eficiencia de remoción promedio de la DQO.



Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

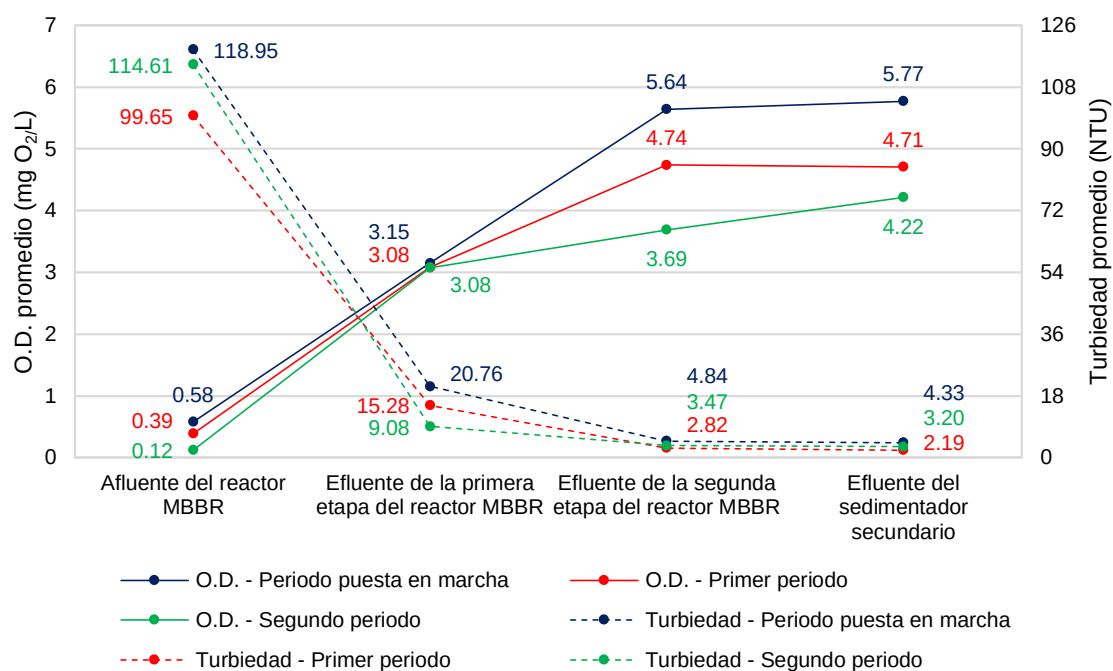
4.2.7 Influencia del oxígeno disuelto en la turbiedad

Se encontró que en el primer periodo cuando el oxígeno disuelto promedio aumentó desde 0.39 mg O₂/L del afluente del reactor MBBR hasta 4.71 mg O₂/L en el efluente del sedimentador secundario, la turbiedad promedio disminuyó desde 99.65 NTU del afluente del reactor MBBR a 2.19 NTU en el efluente del sedimentador secundario, por lo que ambos parámetros poseen una relación inversa para cada punto de monitoreo.

Del mismo modo, se encontró que en el segundo periodo cuando el oxígeno disuelto promedio se incrementó desde 0.12 mg O₂/L del afluente del reactor MBBR hasta 4.22 mg O₂/L en el efluente del sedimentador secundario, la turbiedad promedio se redujo desde 114.61 NTU del afluente del reactor MBBR a 3.20 NTU en el efluente del sedimentador secundario.

Figura 37

Resumen del oxígeno disuelto promedio y turbiedad promedio por periodo.



Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

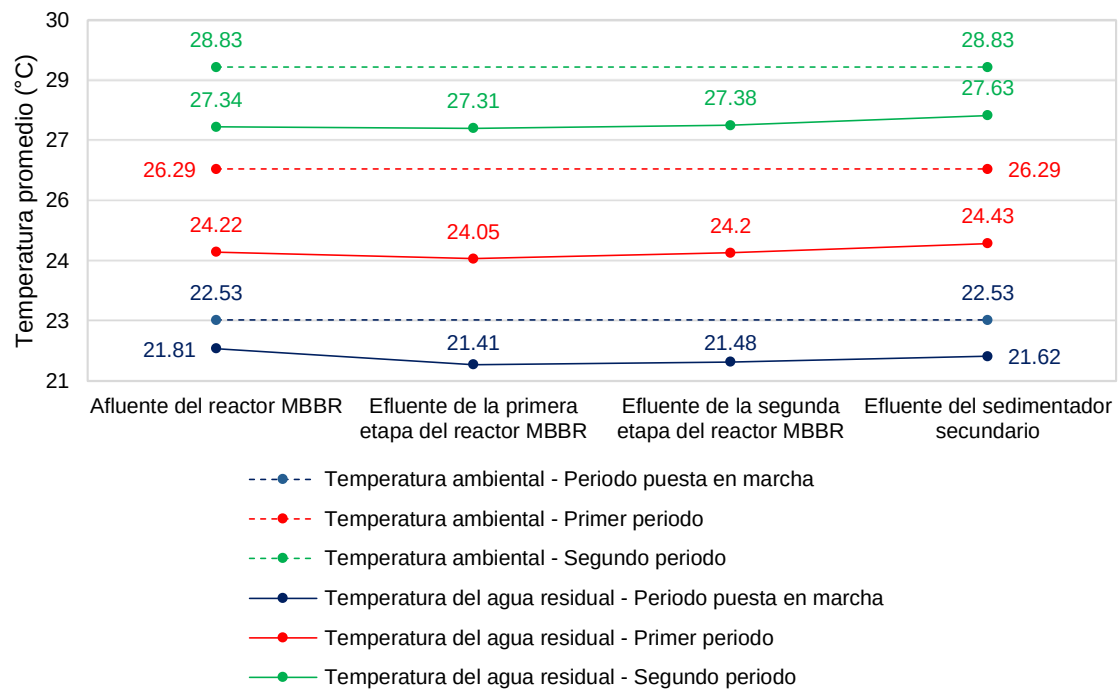
4.2.8 Temperatura ambiental y temperatura del agua residual

Se encontró que la temperatura ambiental siempre fue mayor que la temperatura del agua residual; además se observa que durante el desarrollo de la investigación la temperatura tanto ambiental como del agua residual fue incrementando.

La temperatura del agua residual es óptima para el metabolismo de los microorganismos y para la remoción de la materia orgánica entre los 25 y 35°C (Romero, 2004), por lo descrito, se encontró que la temperatura promedio del agua residual estuvo en el rango de 21.41 y 27.63 °C en el reactor MBBR de dos etapas en serie.

Figura 38

Resumen de la temperatura ambiental y del agua residual promedio por periodo.



Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

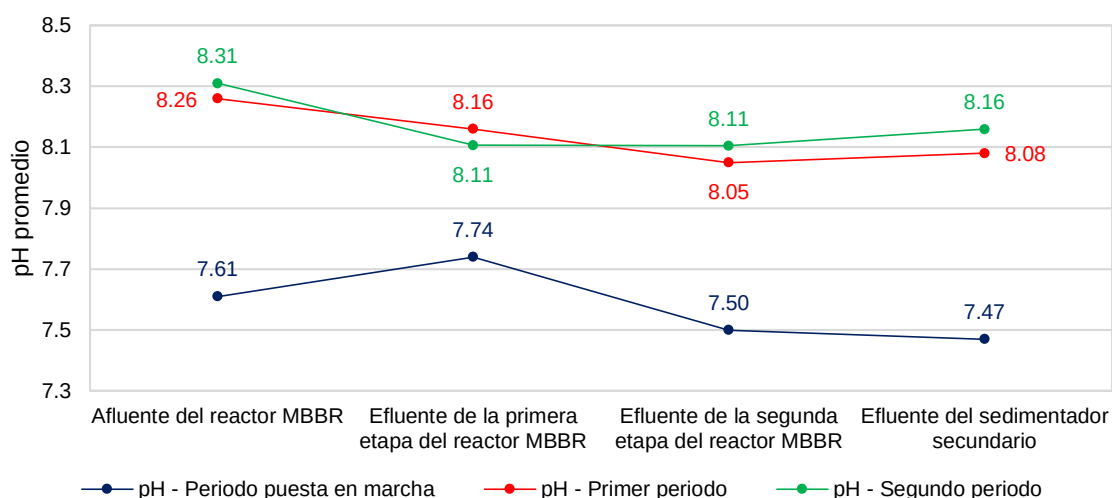
4.2.9 pH

El pH óptimo para el tratamiento de aguas residuales es generalmente en el rango de 6.5 a 8.5, y para la descarga de efluentes el pH debe estar entre 6 y 9 (Romero, 2004).

Se encontró que el pH promedio, en cada punto de monitoreo, estuvo en el rango de 7.47 y 8.31 en el reactor MBBR de dos etapas en serie.

Figura 39

Resumen del pH promedio por periodo.



Nota: El eje horizontal de la figura hace referencia a los puntos de monitoreo según tabla 6.

4.2.10 SSV y SSF

Por lo general, los SSV son la materia orgánica y los SSF son la materia inorgánica resultantes, ambos, luego del proceso de incineración a 500 ± 50 °C, la relación de dichos parámetros permite estimar la cantidad de materia orgánica e inorgánica presente en una muestra de agua residual (Metcalf y Eddy, 2015).

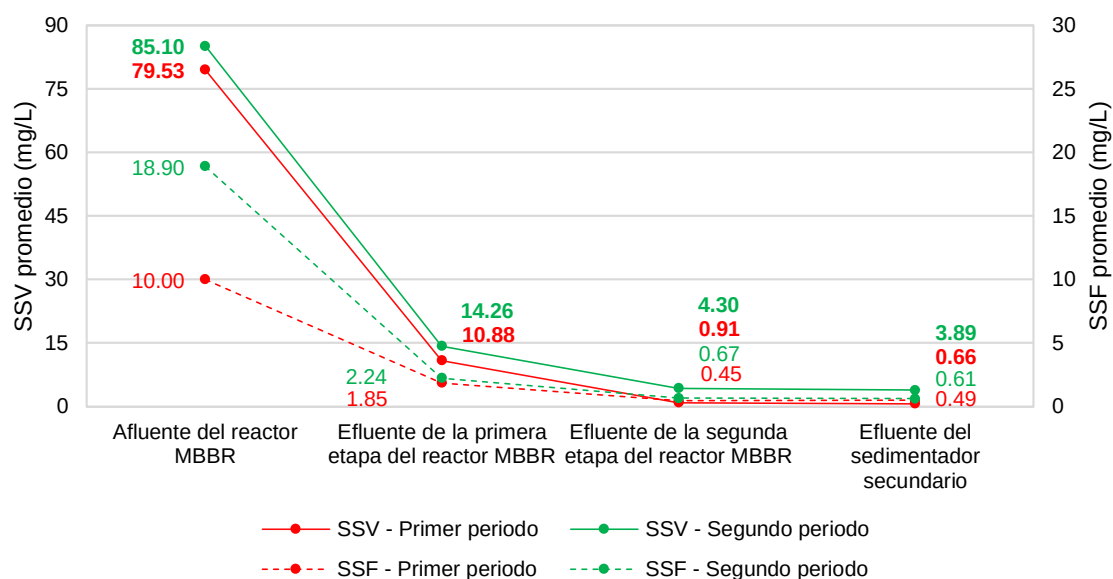
Se encontró que, los SSV y los SSF promedios, la mayor cantidad disminuyó en la primera etapa respecto de la segunda etapa del reactor MBBR en el primer y en el segundo periodo; además en ambos periodos de análisis, los SSV promedio (materia orgánica) fueron superiores respecto a los SSF promedio (materia inorgánica).

En el primer periodo, los SSV promedio se redujeron desde 79.53 mg/L en el afluente del reactor MBBR a 0.66 mg/L en el efluente del sedimentador secundario; y los SSF promedio se redujeron desde 10 mg/L en el afluente del reactor MBBR a 0.49 mg/L en el efluente del sedimentador secundario.

En el segundo periodo, los SSV promedio disminuyó desde 85.10 mg/L en el afluente del reactor MBBR a 3.89 mg/L en el efluente del sedimentador secundario; y los SSF promedio disminuyó desde 18.90 mg/L en el afluente del reactor MBBR a 0.61 mg/L en el efluente del sedimentador secundario.

Figura 40

Resumen de los SSV y los SSF promedios por periodo.



Nota: Los SSV y los SSF se midieron en el primer y segundo periodo.

4.2.11 SST

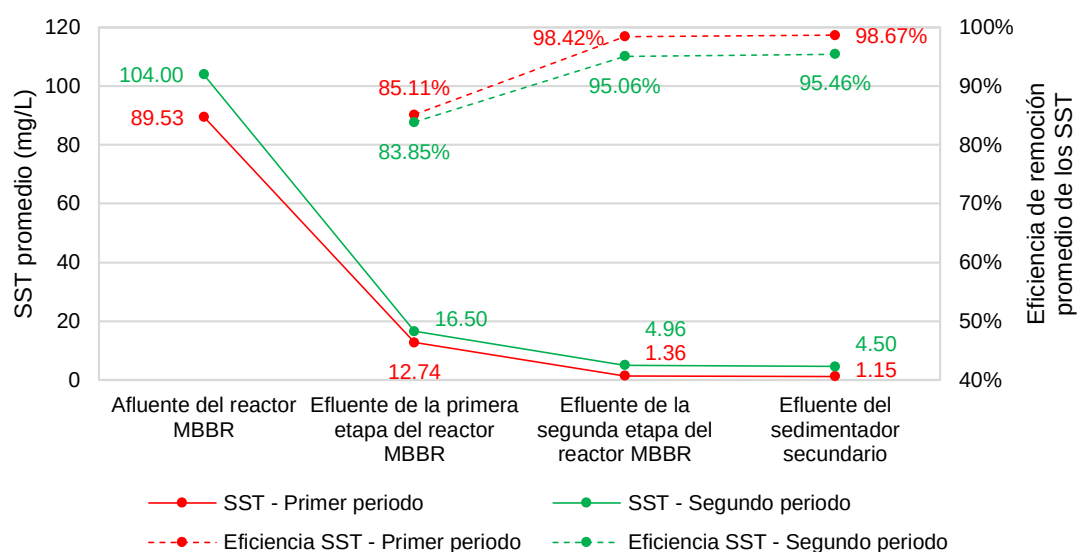
Los SST se utilizan para monitorear y evaluar el desempeño de los procesos de tratamiento, y contemplar así la necesidad de filtración de efluentes de acuerdo a las distintas formas de reutilización (Metcalf y Eddy, 2015).

Se encontró que la mayor remoción de los SST fue en la primera etapa del reactor MBBR con una eficiencia de remoción promedio del 85.11% y 83.85% en el primer y segundo periodo, respectivamente. Por otro lado, se encontró que los SST promedio en el segundo periodo fue superior respecto del primer periodo.

En el primer periodo, los SST promedio se redujo desde 89.53 mg/L en el afluente del reactor MBBR a 1.15 mg/L en el efluente del sedimentador secundario; y se obtuvo una eficiencia de remoción promedio de los SST del 98.67%; del mismo modo, en el segundo periodo, los SST promedio se redujo desde 104 mg/L en el afluente del reactor MBBR a 4.50 mg/L en el efluente del sedimentador secundario; y se obtuvo una eficiencia de remoción promedio de los SST del 98.67%.

Figura 41

Resumen de los SST y su eficiencia de remoción promedio por periodo.



Nota: Los SST solo se midieron en el primer y segundo periodo.

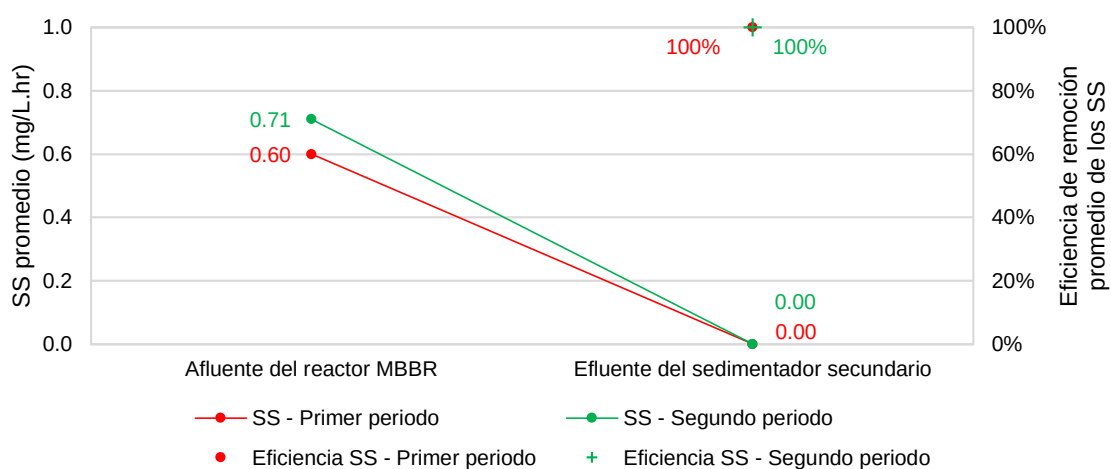
4.2.12 Sólidos sedimentables

Expresa la cantidad de sólidos o lodos que se pueden remover por simple sedimentación (Romero, 2004).

Se encontró, que los sólidos sedimentables (SS) fueron removidos totalmente en el reactor MBBR, es decir los SS promedio en el afluente del reactor MBBR en el primer y segundo periodo fueron de 0.60 y 0.71 mg/L.hr respectivamente, lograron ser removidos hasta el efluente del sedimentador secundario, obteniéndose una eficiencia de remoción promedio de los SS del 100% para cada periodo de análisis.

Figura 42

Resumen de los SS promedio y eficiencia de remoción promedio por periodo.



Nota: Los SS solo se midieron en el primer y segundo periodo.

4.2.13 Relación F/M equivalente

La biomasa conformada generalmente de bacterias y protozoarios prevalecen en una depuración aerobia, y el parámetro más utilizado para la medición del crecimiento de la biomasa (conformado principalmente de materia orgánica) son los SSV debido a su simplicidad y por el mínimo tiempo de análisis requerido (Metcalf y Eddy, 2015).

Se encontró que la relación F/M equivalente fue mayor en la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR, es decir que en la primera etapa y en la segunda etapa del reactor MBBR la relación F/M equivalente fue de 1.10 y 1.16 kg DBO/kg SSV_{eq.d} respectivamente.

Tabla 31

Resumen F/M equivalente en la primera y segunda etapa del reactor MBBR.

Descripción	Cantidad		Unidad	Detalle
	PE-MBBR ⁽¹⁾	SE-MBBR ⁽²⁾		
Caudal de operación ⁽³⁾	298.21	298.21	L/día	(a)
Volumen del líquido en el tanque	24.75	24.75	litros	(b)
Tiempo de retención hidráulica	1.99	1.99	horas	(c) = (b) / (a)
DBO ₅ promedio en el afluente	149.95	28.11	mg/L	(d)
SSV en el licor de mezcla	60.00	9.67	mg/L	(e)
SSV adheridos en el portador	1583.79	283.77	mg/L	(f)
SSV equivalente	1643.79	293.43	mg/L	(g) = (e) + (f)
Relación F/M equivalente	1.10	1.16	kg DBO/kg SSV _{eq.d}	(h) = (d) / [(g) x (c)]

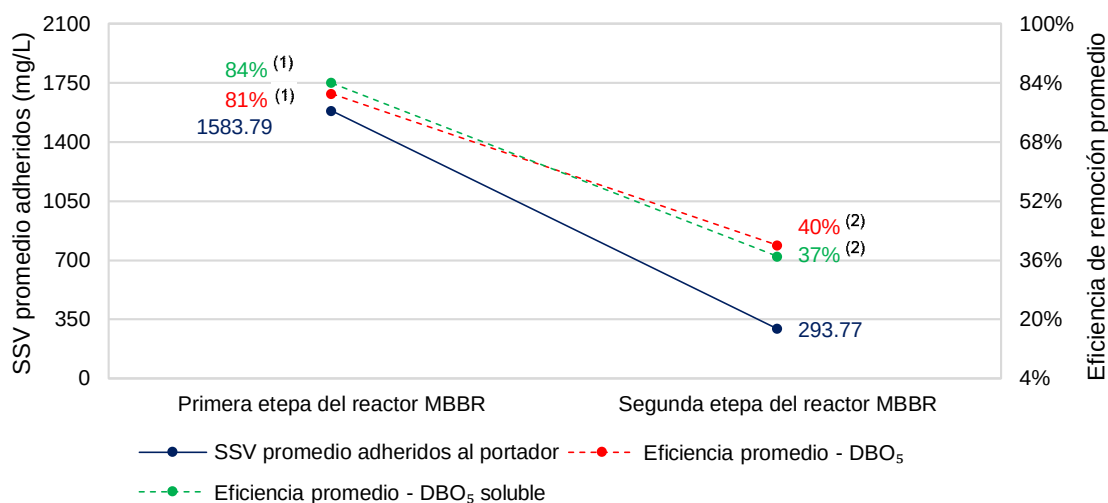
Nota:

- (1) Hace referencia a la primera etapa del reactor MBBR.
- (2) Hace referencia a la segunda etapa del reactor MBBR.
- (3) Caudal de operación promedio correspondiente al segundo periodo de la investigación.

Para analizar los SSV adheridos se seleccionó 5 portadores de cada etapa del reactor MBBR, y se encontró que la mayor concentración de los SSV adheridos promedio fue de 1583.79 mg/L en la primera etapa respecto de los 293.77 mg/L de los SSV promedio en la segunda etapa del reactor MBBR es decir la mayor cantidad de biomasa adherida para remover la materia orgánica prevaleció en la primera etapa del reactor MBBR; de ahí que existió una mayor eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ y DBO₅ soluble en la primera etapa en comparación de la segunda etapa del reactor MBBR, según se observa en la figura 43.

Figura 43

Resumen de SSV adheridos y eficiencia de remoción de la DBO₅ y DBO₅ soluble.



Nota:

- (1) Eficiencia de remoción promedio del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (2) Eficiencia de remoción promedio del efluente de la segunda etapa respecto del efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

4.2.14 K_La

Se encontró que el K_La fue mayor en la primera etapa respecto de la segunda etapa del reactor MBBR, es decir en la primera etapa el K_La fue de 0.0014 s⁻¹ y en la segunda etapa el K_La fue de 0.0003 s⁻¹.

Tabla 32

Resumen del K_{La} en cada etapa del reactor MBBR.

Descripción	Cantidad		Unidad
	PE-MBBR ⁽¹⁾	SE-MBBR ⁽²⁾	
Volumen	40	40	L
Temperatura	22.81	23.33	°C
Concentración de saturación	8.92	8.92	mg/L
K_{La} a T°C	0.0833	0.0206	min ⁻¹
	0.0014	0.0003	s ⁻¹

Nota:

⁽¹⁾ Hace referencia a la primera etapa del reactor MBBR.

⁽²⁾ Hace referencia a la segunda etapa del reactor MBBR.

El coeficiente global de transferencia de gases es decir K_{La} es dependiente de la resistencia entre el gas y el líquido, y si la concentración de saturación del gas en la solución es mayor que la concentración del gas en fase líquida entonces existe transferencia del gas de la fase gaseosa a la fase líquida (Romero, 2004); por lo descrito, se genera transferencia del oxígeno gaseoso de la fase gaseosa a la fase líquida.

4.2.15 Cumplimiento de los LMP

En esta investigación se encontró que los parámetros de la DBO, la DQO, el pH, los sólidos sedimentables y la temperatura en el efluente de la primera etapa, en el efluente de la segunda etapa, y en el efluente del sedimentador secundario no superan los LMP.

Tabla 33

Comparación de resultados con los LMP.

Parámetro	Unidad	LMP	Primer periodo			Segundo periodo		
			P2 ⁽¹⁾	P3 ⁽²⁾	P4 ⁽³⁾	P2 ⁽¹⁾	P3 ⁽²⁾	P4 ⁽³⁾
Aceites y grasas	mg/L	20	-	-	-	-	-	-
Coliformes termotolerantes	NMP/100ml	10000	-	-	-	-	-	-
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100	25.43	10.41	11.77	28.40	16.69	16.25
Demanda química de oxígeno	mg/L	200	-	-	72.50	-	-	43.37
pH	unidad	6.5-8.5	8.16	8.05	8.08	8.11	8.11	8.16
Sólidos totales en suspensión	ml/L	150	-	-	0	-	-	0
Temperatura	°C	<35	24.05	24.20	24.43	27.31	27.38	27.63

Nota:

- (1) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
- (2) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
- (3) Efluente del sedimentador secundario.

Por lo descrito, se demuestra que descargar el efluente de un reactor MBBR de dos etapas en serie a un cuerpo receptor cumpliría con los LMP según los parámetros analizados en esta investigación lo que nos garantiza que no se genere contaminación a dicho cuerpo receptor evitando así daños a la salud y al medio ambiente.

Conclusiones

- La hipótesis sí se cumplió al aplicar un reactor MBBR de dos etapas en serie.
En el primer periodo, una aplicación de la SALR promedio de 6.53 ± 0.79 g DBO₅/m².d se obtiene una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR del $93.05 \pm 3.05\%$; y una aplicación de la SALR promedio de 3.68 ± 0.61 g DBO₅sol/m².d, la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ soluble fue de $92.87 \pm 2.00\%$.
En el segundo periodo, una aplicación de la SALR promedio de 10.05 ± 1.56 g DBO₅/m².d se obtiene una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ en el reactor MBBR del $88.76 \pm 4.29\%$; y una aplicación de la SALR promedio de 5.78 ± 1.55 g DBO₅sol/m².d, la eficiencia de remoción de la DBO₅ soluble fue de $90.09 \pm 3.54\%$.
- La DBO₅ logró ser removida en el periodo puesta en marcha, en el primer periodo y en el segundo periodo con una eficiencia de remoción promedio del $89 \pm 6\%$, $92 \pm 3\%$, y $89 \pm 6\%$ respectivamente.
- La DBO₅ soluble se removió en el periodo puesta en marcha con una eficiencia de remoción del 94%; así mismo, en el primer periodo y en el segundo periodo se logró una eficiencia de remoción promedio del $92 \pm 3\%$ y $90 \pm 2\%$ respectivamente.
- La DQO logró ser removida en el primer periodo y en el segundo periodo con una eficiencia de remoción promedio del $81 \pm 9\%$ y $87 \pm 4\%$ respectivamente.
- Los resultados de la investigación demuestran que el portador de biomasa utilizado remueve la DBO y la DQO ya que posee un área de superficie específica de 2166 m²/m³ y posee un porcentaje de vacío del 84.19%; además el porcentaje de llenado de los portadores al interior de cada etapa del reactor MBBR fue del 32.55%; por lo que el portador utilizado cumplió su función de forma similar a los portadores patentados.
- La DBO₅ fue mayor que la DBO₅ soluble en la primera y en la segunda etapa del reactor MBBR y en cada periodo de la investigación.

- La concentración del oxígeno disuelto superó el rango requerido entre 2 y 3 mg O₂/L en reactores aerobios, sin embargo, cumple con lo mínimo requerido por los microorganismos heterotróficos para estabilizar los compuestos orgánicos.
- La turbiedad logró ser removida con una eficiencia de remoción promedio en el efluente del sedimentador secundario del $96.24 \pm 1.06\%$, $97.46 \pm 1.57\%$ y $97.02 \pm 1.27\%$ en el periodo puesta en marcha, en el primer periodo y en el segundo periodo respectivamente.
- La concentración del oxígeno disuelto y la turbiedad influyeron en el primer y segundo periodo hasta el efluente del sedimentador secundario con eficiencias de remoción promedio de la DBO₅ del 92.17% y 88.98% respectivamente; con eficiencias de remoción promedio de la DBO₅ soluble del 92.44% y 90.20% respectivamente; y con eficiencias de remoción promedio de la DQO del 81.30% y 87.03% respectivamente,
- La concentración de oxígeno disuelto y la turbiedad poseen una relación inversa en cada punto de monitoreo del reactor MBBR.
- Los rangos de variación de la temperatura ambiental, de la temperatura del agua residual y del pH en el periodo puesta en marcha, en el primer periodo y en el segundo periodo permitieron que el reactor MBBR de dos etapas en serie logre remover la DBO y la DQO.
- Los SSV predominó sobre los SSF en el primer y segundo periodo es decir los sólidos suspendidos estuvieron conformados principalmente por materia orgánica respecto de materia inorgánica.
- Los SST fueron removidos en el primer periodo y en el segundo periodo con una eficiencia de remoción promedio del $99 \pm 1\%$ y $95 \pm 5\%$ respectivamente.
- Los sólidos sedimentables (SS) fueron removidos totalmente ya que en el primer periodo y en el segundo periodo la eficiencia de remoción promedio fue del 100%.

- Un caudal de operación promedio en el periodo puesta en marcha y en el primer periodo de 200.75 ± 5.15 y 198.74 ± 4.66 L/día respectivamente, y luego incrementar en el segundo periodo a un caudal promedio de 298.22 ± 4.31 L/día corrobora la capacidad del reactor MBBR de dos etapas en serie ya que permitió remover la materia orgánica con eficiencias superiores al 80%.
- El análisis de la relación F/M equivalente nos indicó que existe suficiente alimento disponible para los microorganismos en cada etapa del reactor MBBR; producto de dicho análisis, los SSV adheridos al portador en la primera etapa fue mayor que en la segunda etapa del reactor MBBR por lo que la cantidad de biomasa adherida para remover la DBO y la DQO fue mayor en la primera etapa.
- La transferencia de gases de la fase gaseosa a la fase líquida existió ya que el K_{La} en la primera etapa y segunda etapa del reactor MBBR fue de 0.0014 y 0.0003 s^{-1} respectivamente, es decir en la primera etapa hubo una mayor velocidad de transferencia respecto de la segunda etapa del reactor MBBR.
- Los parámetros analizados de la DBO, la DQO, el pH, los sólidos sedimentables y la temperatura en los efluentes del reactor MBBR de dos etapas en serie cumplen con los LMP por lo tanto se puede verter hacia un cuerpo receptor.

Recomendaciones

- Se recomienda analizar la conversión y la eficiencia de remoción de nutrientes como nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos.
- Variar la geometría del portador utilizado, por ejemplo, dividir transversalmente en tres partes iguales, y evaluar así la remoción de la materia orgánica.
- Incrementar los caudales de operación y evaluar la capacidad máxima que puede soportar el sistema.
- Utilizar equipos que den como resultados la temperatura ambiental promedio diario, por ejemplo, el termohigrómetro.
- Registrar la temperatura y el pH del agua residual varias veces al día, mínimo en la mañana, al medio día y al atardecer.
- Respecto a la turbiedad, se recomienda mantener condiciones aerobias ya que en esta investigación se demostró que la turbiedad disminuye cuando las condiciones aerobias prevalecen.
- Mantener una concentración de oxígeno disuelto en el rango de 2 y 3 mg O₂/L ya que concentraciones menores a 1 mg O₂/L la turbiedad aumenta.
- Evaluar la DBO₅, la DBO₅ soluble y la DQO en la misma frecuencia y en cada punto de monitoreo elegido.
- Respecto de los SS, los SSV y los SSF se recomienda evaluarlo en cada punto de monitoreo determinado, e incrementar la carga orgánica en términos de DBO o DQO ya que permitirá mejorar el dimensionamiento de los reactores MBBRs.
- Incrementar la frecuencia de análisis de la relación F/M equivalente al variar el caudal de operación o al variar la carga orgánica.
- Analizar los parámetros Aceites y grasas, y Coliformes termotolerantes en cada etapa del reactor MBBR de dos etapas en serie.

Referencias bibliográficas

- American Society of Civil Engineers. (1993). *Measurement of oxygen transfer in clean water*. American Society of Civil Engineers.
- Aygun, A., Nas, B., & Berkay, A. (2008). *Influence of high organic loading rates on COD removal and sludge production in moving bed biofilm reactor*. *Environmental Engineering Science*, 25(9), 1311-1316.
- Andreottola, G., Foladori, P., Ragazzi, M., & Tatàno, F. (2000). *Experimental comparison between MBBR and activated sludge system for the treatment of municipal wastewater*. *Water science and technology*, 41(4-5), 375-382.
- McQuarrie, J. P., & Boltz, J. P. (2011). *Moving bed biofilm reactor technology: process applications, design, and performance*. *Water environment research*, 83(6), 560-575.
- Metcalf y Eddy (2015). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse (Cuarta Edición)*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Odegaard, H. (2006). *Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process*. *Water science and technology*, 53(9), 17-33.
- Odegaard, H. (2018). *MBBR and IFAS systems*. *Advances in Wastewater Treatment*.
- Odegaard, H., Gisvold, B., & Strickland, J. (2000). *The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process*. *Water Science and Technology*, 41(4-5), 383-391.
- Odegaard, H., Rusten, B., & Westrum, T. J. W. S. (1994). *A new moving bed biofilm reactor-applications and results*. *Water Science and Technology*, 29(10-11), 157.
- Odegaard, H. (2006). *Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process*. *Water science and technology*, 53(9), 17-33.
- Odegaard, H; Gisvold, B; Helness, H; Sjøvold, F; Zuliang, L. (2000). *High rate biological/chemical treatment based on the moving bed biofilm process combined*

with coagulation. Chemical Water and Wastewater Treatment VI. London: IWA Publishing.

Odegaard, H. (2018). *MBBR and IFAS systems. Advances in Wastewater Treatment.*

Oliveira, D. V. M. (2008). *Caracterização dos parâmetros de controle e avaliação de desempenho de um reator biológico com leito móvel (MBBR). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 6.*

Rojas Floreano, J. M. *Evaluación de la remoción de carga orgánica en un reactor aerobio de lecho móvil utilizando tubería de pvc corrugada como portador.*

Rusten, B., & Wessman, F. (2004, January). *State of the art in Europe of the moving bed biofilm reactor (MBBR) process. In WEFTEC 2004 (pp. 348-354). Water Environment Federation.*

Von Sperling, M., & Chernicharo, C. (2007). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. (IWA, Ed.), Department of Sanitary and Environmental Engineering Federal University of Minas Gerais, Brazil. (Volumen 1). Brazil.*

Von Sperling, M. (2007). *Basic principles of wastewater treatment (p. 210). IWA publishing*
Water Environment Federation (WEF, 2010). *Biofilms reactors.*

Anexos

Anexo 1: Tabla de resultados.....	1
Anexo 2: Resultados de ensayos de laboratorio de la DQO	20
Anexo 3: Evidencias de desarrollo de la parte experimental	31

Anexo 1: Tabla de resultados

Resultado 1

Caudal de operación promedio semanal del periodo puesta en marcha.

Caudal de operación (L/día)		
Semana	Caudal	n ⁽¹⁾
1	200.24 ± 5.93	5
2	205.31 ± 1.39	2
3	199.96 ± 4.57	5
4	199 ± 5.63	4
5	199.23 ± 8.25	4
Promedio	200.75 ± 5.15	
Máximo	209.36	
Mínimo	189.37	

Nota:

⁽¹⁾ Número de muestras.

Resultado 2

Caudal de operación promedio semanal del primer periodo.

Caudal de operación (L/día)		
Semana	Caudal	n ⁽¹⁾
6	196.78 ± 4.16	5
7	195.35 ± 2.9	3
8	201.27 ± 7.06	4
9	202.51 ± 7.41	5
10	198.69 ± 4.54	4
11	197.36 ± 5.88	4
12	200.83 ± 6.05	5
13	196.99 ± 1.91	3
14	196.79 ± 2.56	3
15	200.87 ± 4.19	5
Promedio	198.74 ± 4.66	
Máximo	210.73	
Mínimo	191.65	

Nota:

⁽¹⁾ Número de muestras.

Resultado 3

Caudal de operación promedio semanal del segundo periodo.

Caudal de operación (L/día)		
Semana	Caudal	n ⁽¹⁾
16	298.01 ± 4.31	5
17	298.44 ± 5.65	5

18	297.47 ± 3.17	5
19	297.08 ± 5.55	4
20	298.41 ± 1.7	5
21	295.96 ± 1.9	2
22	300.62 ± 5.84	5
23	295.86 ± 3.91	5
24	297.84 ± 6.45	5
25	302.54 ± 4.66	5
Promedio	298.22 ± 4.31	
Máximo	308.36	
Mínimo	289.58	

Nota:

⁽¹⁾ Número de muestras.

Resultado 4

Temperatura ambiental promedio semanal del periodo puesta en marcha.

Temperatura ambiental (°C)		
Semana	Temperatura	n ⁽¹⁾
5	22.53 ± 1.19	4
Promedio	22.53 ± 1.19	
Máximo	23.8	
Mínimo	21	

Nota:

⁽¹⁾ Número de muestras.

Resultado 5

Temperatura ambiental promedio semanal del primer periodo.

Temperatura ambiental (°C)		
Semana	Temperatura	n ⁽¹⁾
6	21.88 ± 2.36	5
7	25.1 ± 1.28	3
8	25.03 ± 1.56	4
9	26.06 ± 1.15	5
10	27 ± 1.45	4
11	27.8 ± 1.44	4
12	27.6 ± 1.62	5
13	27.77 ± 2.19	3
14	29.07 ± 0.58	4
15	25.6 ± 2.53	5
Promedio	26.29 ± 1.62	
Máximo	29.5	
Mínimo	20.3	

Nota:

⁽¹⁾ Número de muestras.

Resultado 6

Temperatura ambiental promedio semanal del segundo periodo.

Temperatura ambiental (°C)		
Semana	Temperatura	n ⁽¹⁾
16	26.98 ± 1.69	5
17	28.7 ± 1.45	5
18	30.42 ± 2.09	5
19	29.63 ± 2.09	4
20	29.85 ± 2.22	4
21	30.35 ± 1.06	2
22	29.8 ± 1.27	5
23	29.2 ± 1.32	5
24	27.34 ± 1.77	5
25	26.06 ± 0.98	5
Promedio	28.83 ± 1.6	
Máximo	33.9	
Mínimo	24.8	

Nota:

⁽¹⁾ Número de muestras.

Resultado 7

Temperatura promedio semanal del agua residual del periodo puesta en marcha.

Temperatura del agua residual (°C)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
1	21.6 ± 1.97	21.2 ± 1.69	21.12 ± 1.58	21.26 ± 1.67	5
2	22.7 ± 1.27	22.15 ± 0.92	22.2 ± 0.99	22.45 ± 1.2	2
3	21.62 ± 1.26	21.22 ± 1.05	21.34 ± 1.18	21.46 ± 1.22	5
4	22.4 ± 1.01	21.85 ± 0.76	22.03 ± 0.75	22.05 ± 0.7	4
5	21.5 ± 1.36	21.3 ± 1.26	21.35 ± 1.31	21.58 ± 1.48	4
Promedio	21.81 ± 1.35	21.41 ± 1.11	21.48 ± 1.15	21.62 ± 1.27	
Máximo	23.6	22.8	22.9	23.3	
Mínimo	18.3	18.3	18.4	18.4	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 8

Temperatura promedio semanal del agua residual del primer periodo.

Temperatura del agua residual (°C)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾

6	21.04 ± 1.21	20.74 ± 0.99	20.86 ± 1.11	20.94 ± 1.34	5
7	23.2 ± 0.82	22.73 ± 0.64	22.83 ± 0.64	22.83 ± 0.75	3
8	22.68 ± 1.03	22.5 ± 0.91	22.5 ± 1.21	22.78 ± 1.35	4
9	23.38 ± 0.97	23.06 ± 0.95	23.28 ± 1.1	23.38 ± 1.3	5
10	24.55 ± 1.34	24.35 ± 1.35	24.58 ± 1.49	24.85 ± 1.81	4
11	24.13 ± 0.93	23.8 ± 0.98	24.2 ± 0.98	24.68 ± 1.14	4
12	24.7 ± 1	24.44 ± 0.8	24.56 ± 0.93	24.68 ± 1.28	5
13	25.27 ± 1.36	25.03 ± 1.15	25.3 ± 1.28	25.77 ± 1.63	3
14	24.7 ± 1.49	25.07 ± 1.83	24.97 ± 1.62	25.2 ± 1.73	3
15	24.32 ± 1.17	24.44 ± 1.08	24.54 ± 1.2	24.62 ± 1.34	5
Promedio	24.22 ± 1.14	24.05 ± 1.08	24.2 ± 1.16	24.43 ± 1.36	
Máximo	26.1	26.5	26.4	27	
Mínimo	20.1	19.9	19.8	19.7	

Nota:

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

(4) Efluente del sedimentador secundario.

(5) Número de muestras.

Resultado 9

Temperatura promedio semanal del agua residual del segundo periodo.

Temperatura del agua residual (°C)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
16	25.28 ± 1.31	25.12 ± 1.06	25.28 ± 1.15	25.56 ± 1.32	5
17	26.84 ± 1.53	26.72 ± 1.52	26.84 ± 1.46	27.22 ± 1.63	5
18	27.3 ± 1.37	27.14 ± 1.22	27.28 ± 1.2	27.72 ± 1.13	5
19	27.7 ± 1.69	27.58 ± 1.48	27.98 ± 1.46	28.3 ± 1.74	4
20	27.4 ± 2.17	27.36 ± 2.27	27.36 ± 2.22	27.56 ± 2.27	5
21	27.75 ± 1.48	27.95 ± 1.34	28.1 ± 1.27	28.25 ± 1.34	2
22	28.34 ± 1.36	28.32 ± 1.34	28.4 ± 1.25	28.66 ± 1.58	5
23	28.14 ± 0.99	28.1 ± 1	27.96 ± 0.91	28.26 ± 1.09	5
24	26.6 ± 1.69	26.52 ± 1.56	26.46 ± 1.53	26.58 ± 1.69	5
25	26.02 ± 2	26.08 ± 2.04	26 ± 1.96	26.16 ± 2.1	5
Promedio	27.34 ± 1.59	27.31 ± 1.53	27.38 ± 1.47	27.63 ± 1.62	
Máximo	29.4	29.5	29.4	29.9	
Mínimo	23.4	23.4	23.4	23.3	

Nota:

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

(4) Efluente del sedimentador secundario.

(5) Número de muestras.

Resultado 10

pH promedio semanal del periodo puesta en marcha.

pH					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
1	7.72 ± 0.26	7.85 ± 0.2	7.88 ± 0.3	7.93 ± 0.29	5
2	7.17 ± 0.35	7.41 ± 0.04	7.28 ± 0.04	7.21 ± 0.07	2
3	7.51 ± 0.08	7.72 ± 0.12	7.36 ± 0.15	7.3 ± 0.15	5
4	7.46 ± 0.27	7.63 ± 0.12	7.37 ± 0.11	7.22 ± 0.12	4
5	7.91 ± 0.25	7.95 ± 0.14	7.54 ± 0.19	7.59 ± 0.2	4
Promedio	7.61 ± 0.26	7.74 ± 0.12	7.5 ± 0.15	7.47 ± 0.17	
Máximo	8.14	8.09	8.38	8.38	
Mínimo	6.92	7.38	7.22	7.05	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 11

pH promedio semanal del primer periodo.

pH					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
6	7.9 ± 0.31	7.85 ± 0.12	7.56 ± 0.12	7.57 ± 0.16	5
7	8.33 ± 0.08	8.13 ± 0.1	7.89 ± 0.19	7.91 ± 0.13	3
8	7.8 ± 0.21	8.25 ± 0.16	8.03 ± 0.12	8.06 ± 0.14	4
9	7.97 ± 0.21	8.19 ± 0.09	7.92 ± 0.14	8 ± 0.09	5
10	8.39 ± 0.17	8.28 ± 0.12	8.21 ± 0.2	8.22 ± 0.18	4
11	8.53 ± 0.17	8.6 ± 0.08	8.57 ± 0.06	8.6 ± 0.09	4
12	9.16 ± 0.26	8.66 ± 0.06	8.55 ± 0.14	8.61 ± 0.12	5
13	8.9 ± 0.29	8.65 ± 0.27	8.41 ± 0.2	8.44 ± 0.2	3
14	8.1 ± 0.18	8.25 ± 0.28	8.31 ± 0.27	8.27 ± 0.27	3
15	7.56 ± 0.28	6.94 ± 0.35	7.06 ± 0.37	7.11 ± 0.37	5
Promedio	8.26 ± 0.21	8.16 ± 0.17	8.05 ± 0.21	8.08 ± 0.21	
Máximo	9.6	8.9	8.79	8.82	
Mínimo	7.14	6.41	6.72	6.79	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 12

pH promedio semanal del segundo periodo.

pH					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
16	7.86 ± 0.23	7.69 ± 0.17	7.57 ± 0.43	7.63 ± 0.5	5
17	8.42 ± 0.42	8.06 ± 0.24	8.04 ± 0.19	8.07 ± 0.19	5
18	8.38 ± 0.35	8 ± 0.19	7.89 ± 0.09	7.95 ± 0.12	5
19	8 ± 0.4	7.69 ± 0.35	7.88 ± 0.06	7.99 ± 0.11	4
20	8.38 ± 0.29	8.15 ± 0.2	8.13 ± 0.17	8.2 ± 0.16	5
21	8.28 ± 0.35	8.27 ± 0.23	8.28 ± 0.26	8.29 ± 0.23	2
22	8.42 ± 0.42	8.31 ± 0.24	8.25 ± 0.29	8.31 ± 0.28	5
23	8.25 ± 0.15	8.29 ± 0.18	8.3 ± 0.15	8.42 ± 0.1	5
24	8.18 ± 0.33	8.06 ± 0.4	8.05 ± 0.39	8.08 ± 0.39	5
25	8.47 ± 0.46	8.12 ± 0.18	8.12 ± 0.17	8.12 ± 0.19	5
Promedio	8.31 ± 0.35	8.11 ± 0.24	8.11 ± 0.2	8.16 ± 0.2	
Máximo	8.85	8.61	8.67	8.61	
Mínimo	7.43	7.2	6.81	6.74	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 13

Turbiedad promedio semanal del periodo puesta en marcha.

Turbiedad (NTU)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
1	129.3 ± 54.4	38.42 ± 18.64	9.12 ± 6.35	7.65 ± 5.26	5
2	95.85 ± 27.08	10.14 ± 0.66	2.74 ± 0.9	2.69 ± 0.81	2
3	119.68 ± 20.22	15.56 ± 5.81	4.17 ± 0.81	4.19 ± 1.04	5
4	94.38 ± 26.92	13.07 ± 5.7	3.81 ± 0.56	3.46 ± 0.31	4
5	155.55 ± 61.02	26.6 ± 12.15	4.37 ± 1.26	3.64 ± 1.14	4
Promedio	118.95 ± 37.93	20.76 ± 8.59	4.84 ± 1.98	4.33 ± 1.71	
Máximo	211	58.7	16.7	14.2	
Mínimo	36.5	7.48	2.1	2.12	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 14

Turbiedad promedio semanal del primer periodo.

Turbiedad (NTU)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
6	76.1 ± 29.77	17.66 ± 4.55	2.39 ± 0.22	1.95 ± 0.18	5
7	105.17 ± 10.28	32.33 ± 6.49	2.96 ± 0.4	2.66 ± 0.31	3
8	105.35 ± 17.35	41.65 ± 12.65	8.58 ± 6.78	5.3 ± 4.47	4
9	78.84 ± 6.72	8.54 ± 4.4	3.13 ± 2.92	2.38 ± 1.5	5
10	80.05 ± 35.54	17.26 ± 19.03	3.85 ± 4.04	3.48 ± 3.68	4
11	101.95 ± 27.43	8.95 ± 1.39	1.63 ± 0.25	1.4 ± 0.39	4
12	88.3 ± 35.6	6.12 ± 1.38	1.72 ± 0.56	1.51 ± 0.44	5
13	132.33 ± 8.62	4.78 ± 1.13	1.09 ± 0.22	0.99 ± 0.07	3
14	128.73 ± 64.03	12.05 ± 13.31	1.59 ± 0.46	1.2 ± 0.34	3
15	99.68 ± 41.48	3.42 ± 0.81	1.3 ± 0.3	1.08 ± 0.2	5
Promedio	99.65 ± 27.68	15.28 ± 6.51	2.82 ± 1.62	2.19 ± 1.16	
Máximo	195	54.3	18.6	12	
Mínimo	26.4	2.59	0.89	0.82	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 15

Turbiedad promedio semanal del segundo periodo.

Turbiedad (NTU)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
16	129.8 ± 22.82	7.66 ± 2.81	3.01 ± 1.28	2.95 ± 1.42	5
17	113.2 ± 22.21	7.3 ± 5.33	3.33 ± 1.64	3.18 ± 1.64	5
18	118.78 ± 28.05	7.51 ± 3.67	2.2 ± 0.77	2.11 ± 0.7	5
19	88.4 ± 31.12	8.36 ± 5.02	1.84 ± 0.74	1.74 ± 0.64	4
20	122.1 ± 61.02	10.55 ± 3.23	3.99 ± 2.06	3.23 ± 1.66	5
21	94.7 ± 14.57	9.04 ± 5.6	3.15 ± 2.03	2.88 ± 1.7	2
22	115.78 ± 56.79	8.21 ± 2.73	2.91 ± 1.49	3.03 ± 1.39	5
23	98.18 ± 19.93	13.18 ± 5.85	7 ± 2.94	6.42 ± 2.42	5
24	152 ± 19.27	13.84 ± 2.91	4.79 ± 1.94	4.04 ± 1.82	5
25	113.2 ± 7.09	5.19 ± 2.11	2.45 ± 1.02	2.44 ± 0.94	5
Promedio	114.61 ± 28.29	9.08 ± 3.93	3.47 ± 1.59	3.2 ± 1.43	
Máximo	205	20.2	11.4	10.4	
Mínimo	34.5	3.1	1.03	1.15	

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 16

Eficiencia de remoción de turbiedad promedio semanal del periodo puesta en marcha.

Eficiencia de remoción de la turbiedad (%)					
Semana	E-1 ⁽¹⁾	E-2 ⁽²⁾	E-3 ⁽³⁾	E-4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
1	70 ± 6	93 ± 4	94 ± 3	76 ± 10	5
2	89 ± 4	97 ± 0	97 ± 0	73 ± 11	2
3	87 ± 5	96 ± 1	96 ± 1	69 ± 19	5
4	86 ± 4	96 ± 1	96 ± 1	68 ± 11	4
5	83 ± 4	97 ± 1	97 ± 1	82 ± 6	4
Promedio	82.93 ± 4.58	95.79 ± 1.28	96.24 ± 1.06	73.44 ± 11.31	
Máximo	94	98	99	91	
Mínimo	63	90	92	35	

Nota:

⁽¹⁾ Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

⁽²⁾ Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

⁽³⁾ Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 17

Eficiencia de remoción de turbiedad promedio semanal del primer periodo.

Eficiencia de remoción de la turbiedad (%)					
Semana	E-1 ⁽¹⁾	E-2 ⁽²⁾	E-3 ⁽³⁾	E-4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
6	74 ± 11	96 ± 2	97 ± 1	85 ± 6	5
7	69 ± 5	97 ± 0	97 ± 0	91 ± 1	3
8	58 ± 20	92 ± 6	95 ± 4	77 ± 21	4
9	89 ± 7	96 ± 4	97 ± 2	65 ± 20	5
10	77 ± 24	94 ± 5	95 ± 5	76 ± 9	4
11	91 ± 4	98 ± 0	99 ± 0	82 ± 3	4
12	93 ± 1	98 ± 1	98 ± 1	71 ± 14	5
13	96 ± 1	99 ± 0	99 ± 0	77 ± 4	3
14	92 ± 5	98 ± 1	99 ± 1	74 ± 22	3
15	96 ± 3	98 ± 2	98 ± 1	64 ± 8	5
Promedio	83.46 ± 8.1	96.78 ± 2.14	97.46 ± 1.57	76.14 ± 10.84	
Máximo	98	99	99	93	
Mínimo	33	84	89	32	

Nota:

⁽¹⁾ Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

⁽²⁾ Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(3) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

(4) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

(5) Número de muestras.

Resultado 18

Eficiencia de remoción de turbiedad promedio semanal del segundo periodo.

Eficiencia de remoción de la turbiedad (%)					
Semana	E-1 ⁽¹⁾	E-2 ⁽²⁾	E-3 ⁽³⁾	E-4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
16	94 ± 2	98 ± 1	98 ± 1	59 ± 11	5
17	94 ± 3	97 ± 1	97 ± 1	50 ± 8	5
18	93 ± 4	98 ± 1	98 ± 1	69 ± 8	5
19	91 ± 2	98 ± 1	98 ± 0	75 ± 12	4
20	90 ± 3	96 ± 2	97 ± 2	63 ± 13	5
21	91 ± 4	97 ± 2	97 ± 1	66 ± 1	2
22	92 ± 2	97 ± 2	97 ± 2	64 ± 15	5
23	87 ± 5	93 ± 4	93 ± 3	43 ± 21	5
24	91 ± 1	97 ± 1	97 ± 1	66 ± 10	5
25	95 ± 2	98 ± 1	98 ± 1	51 ± 15	5
Promedio	91.83 ± 3.04	96.79 ± 1.42	97.02 ± 1.27	60.54 ± 11.32	
Máximo	98	99	99	87	
Mínimo	79	87	88	10	

Nota:

(1) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(2) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(3) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

(4) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

(5) Número de muestras.

Resultado 19

Oxígeno disuelto promedio semanal del periodo puesta en marcha.

Oxígeno disuelto (mg O ₂ /L)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
1	0.12 ± 0.05	3.48 ± 2.44	5.86 ± 2.07	5.79 ± 1.71	5
2	0.24 ± 0.09	3.85 ± 0.16	6.12 ± 0.11	6.42 ± 0.1	2
3	1.35 ± 0.48	2.83 ± 0.84	5.45 ± 0.26	5.78 ± 0.4	5
4	0.75 ± 1.02	3.51 ± 0.4	5.36 ± 0.17	5.64 ± 0.14	4
5	0.43 ± 0.46	2.09 ± 1.03	5.4 ± 0.43	5.23 ± 0.65	4
Promedio	0.58 ± 0.42	3.15 ± 0.97	5.64 ± 0.61	5.77 ± 0.6	
Máximo	2.22	6.81	9.13	8.6	
Mínimo	0.05	0.52	3.71	4.35	

Nota:

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 20

Oxígeno disuelto promedio semanal del primer periodo.

Oxígeno disuelto (mg O ₂ /L)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
6	0.41 ± 0.31	3.09 ± 1.41	5.67 ± 0.67	5.01 ± 0.43	5
7	0.41 ± 0.45	1.54 ± 0.45	5.04 ± 0.2	4.56 ± 0.2	3
8	0.35 ± 0.45	0.99 ± 0.21	4.72 ± 0.45	4.32 ± 0.44	4
9	0.22 ± 0.07	4.31 ± 0.77	5.13 ± 0.45	5.35 ± 0.63	5
10	0.5 ± 0.41	2.34 ± 1.06	4.57 ± 0.56	4.08 ± 0.58	4
11	0.39 ± 0.17	3.42 ± 0.13	4.18 ± 0.19	4.54 ± 0.15	4
12	0.22 ± 0.14	3.62 ± 0.32	4.64 ± 0.53	4.82 ± 0.63	5
13	0.7 ± 0.68	3.15 ± 0.64	4.14 ± 0.21	4.73 ± 0.04	3
14	0.44 ± 0.31	3.7 ± 0.42	4.49 ± 0.41	4.62 ± 0.38	3
15	0.28 ± 0.16	4.6 ± 0.31	4.84 ± 0.27	5.05 ± 0.61	5
Promedio	0.39 ± 0.32	3.08 ± 0.57	4.74 ± 0.39	4.71 ± 0.41	
Máximo	1.44	5.41	6.58	6.12	
Mínimo	0.05	0.79	3.83	3.29	

Nota: Oxígeno disuelto promedio semanal del primer periodo.

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Número de muestras.

Resultado 21

Oxígeno disuelto promedio semanal del segundo periodo.

Oxígeno disuelto (mg O ₂ /L)					
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	n ⁽⁵⁾
16	0.09 ± 0.04	2.8 ± 0.76	3.52 ± 0.46	4.59 ± 0.49	5
17	0.13 ± 0.04	3.02 ± 1.14	3.33 ± 0.57	3.92 ± 0.61	5
18	0.11 ± 0.03	3.18 ± 0.39	4.01 ± 0.47	4.36 ± 0.25	5
19	0.3 ± 0.37	2.94 ± 0.82	3.83 ± 0.79	3.97 ± 0.78	4
20	0.09 ± 0.03	2.25 ± 0.91	3.64 ± 1.4	4.51 ± 1.24	5
21	0.1 ± 0.04	2.93 ± 0.16	3.27 ± 0.28	3.69 ± 0.11	2
22	0.1 ± 0.04	3.25 ± 0.89	3.55 ± 0.41	3.99 ± 0.52	5
23	0.1 ± 0.05	2.84 ± 1.33	3.19 ± 0.5	3.69 ± 0.57	5
24	0.11 ± 0.01	3.7 ± 0.84	3.77 ± 0.45	4.31 ± 0.44	5
25	0.08 ± 0.02	3.86 ± 1.22	4.8 ± 1.47	5.12 ± 1.52	5
Promedio	0.12 ± 0.07	3.08 ± 0.85	3.69 ± 0.68	4.22 ± 0.65	
Máximo	0.85	5.25	6.37	6.83	

Mínimo	0.05	0.89	1.82	2.82
--------	------	------	------	------

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
(4) Efluente del sedimentador secundario.
(5) Número de muestras.

Resultado 22

DBO₅ en el periodo puesta en marcha.

DBO ₅ (mg O ₂ /L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
4	87.71	29.75	15.15	13.72	66%	83%	84%	49%
5	168.99	29.25	11.33	11.28	83%	93%	93%	61%
Promedio	128.35±57.47	29.5±0.36	13.24±2.7	12.5±1.73	74±12%	88±7%	89±6%	55±9%
Máximo	168.99	29.75	15.15	13.72	83%	93%	93%	61%
Mínimo	87.71	29.25	11.33	11.28	66%	83%	84%	49%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
(4) Efluente del sedimentador secundario.
(5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
(6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
(7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.
(8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 23

DBO₅ en el primer periodo.

DBO ₅ (mg O ₂ /L)								
Sem.	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
6	165.50	35.21	9.65	13.93	79%	94%	92%	73%
7	152.04	33.69	9.55	8.25	78%	94%	95%	72%
8	161.82	35.84	22.44	18.95	78%	86%	88%	37%
9	134.96	9.42	2.91	4.36	93%	98%	97%	69%
10	127.46	18.18	10.71	10.88	86%	92%	91%	41%
11	139.29	20.04	8.71	9.78	86%	94%	93%	57%
12	134.55	19.88	12.14	14.95	85%	91%	89%	39%
13	181.17	47.03	8.92	14.95	74%	95%	92%	81%
14	154.95	16.26	9.53	14.70	90%	94%	91%	41%
15	134.83	18.71	9.57	6.92	86%	93%	95%	49%
Prom.	148.66±17.26	25.43±11.72	10.41±4.85	11.77±4.48	83±6%	93±3%	92±3%	56±16%
Máx.	181.17	47.03	22.44	18.95	93%	98%	97%	81%
Mín.	127.46	9.42	2.91	4.36	74%	86%	88%	37%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
- (2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
- (3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
- (4) Efluente del sedimentador secundario.
- (5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.
- (8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 24

DBO₅ en el segundo periodo.

DBO ₅ (mg O ₂ /L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
16	178.40	18.84	17.96	8.38	89%	90%	95%	5%
17	141.81	18.11	14.08	14.71	87%	90%	90%	22%
18	151.60	27.02	10.14	8.12	82%	93%	95%	62%
19	141.35	22.58	11.34	10.58	84%	92%	93%	50%
20	167.40	35.97	13.01	17.37	79%	92%	90%	64%
21	152.21	24.92	9.36	7.50	84%	94%	95%	62%
22	96.78	26.17	13.98	13.23	73%	86%	86%	47%
23	134.17	37.21	23.03	27.37	72%	83%	80%	38%
24	170.52	42.30	29.06	26.32	75%	83%	85%	31%
25	165.59	30.83	24.93	28.96	81%	85%	83%	19%
Promedio	149.98±23.58	28.4±8.06	16.69±6.8	16.25±8.41	81±6%	89±4%	89±6%	40±21%
Máximo	178.40	42.30	29.06	28.96	89%	94%	95%	64%
Mínimo	96.78	18.11	9.36	7.50	72%	83%	80%	5%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
- (2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
- (3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
- (4) Efluente del sedimentador secundario.
- (5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.
- (8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 25

DBO₅ soluble en el periodo puesta en marcha.

DBO ₅ soluble (mg O ₂ /L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
5	93.37	19.60	8.02	5.97	79%	91%	94%	59%

Nota: En el periodo puesta en marcha la DBO₅ soluble se midió solo una vez.

- (1) Afluente al reactor MBBR.

- (2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
- (3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
- (4) Efluente del sedimentador secundario.
- (5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.
- (8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 26

DBO₅ soluble en el primer periodo.

DBO ₅ soluble (mg O ₂ /L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
8	92.20	13.04	8.39	5.39	86%	91%	94%	36%
10	60.28	14.09	4.64	7.14	77%	92%	88%	67%
11	100.23	15.08	7.65	5.52	85%	92%	94%	49%
12	77.69	10.75	5.92	8.12	86%	92%	90%	45%
14	93.58	8.59	3.41	5.66	91%	96%	94%	60%
Promedio	84.8±15.98	12.31±2.63	6 ± 2.06	6.37±1.21	85±5%	93±2%	92±3%	51±12%
Máximo	100.23	15.08	8.39	8.12	91%	96%	94%	67%
Mínimo	60.28	8.59	3.41	5.39	77%	83%	88%	21%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
- (2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
- (3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
- (4) Efluente del sedimentador secundario.
- (5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.
- (8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 27

DBO₅ soluble en el segundo periodo.

DBO ₅ soluble (mg O ₂ /L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
16	89.43	10.91	5.63	5.06	88%	94%	94%	48%
17	94.88	11.70	9.23	11.10	88%	90%	88%	21%
18	50.77	9.01	4.19	5.46	82%	92%	89%	54%
20	100.93	17.32	7.97	6.56	83%	92%	94%	54%
22	64.15	13.64	10.69	6.88	79%	83%	89%	22%
24	112.96	14.89	11.80	10.50	87%	90%	91%	21%
Promedio	85.52±23.48	12.91±2.99	8.25±2.93	7.6±2.58	84±4%	89±4%	90±2%	37±17%
Máximo	112.96	17.32	11.80	11.10	87%	90%	91%	21%
Mínimo	50.77	9.01	4.19	5.06	87%	90%	91%	21%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
 (2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
 (3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
 (4) Efluente del sedimentador secundario.
 (5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
 (6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
 (7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.
 (8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 28

DQO en el primer periodo.

DQO (mg O ₂ /L)			
Semana	P1 ⁽¹⁾	P4 ⁽²⁾	E-1 ⁽³⁾
10	501	138	72%
11	348	86	75%
12	289	39	87%
14	298	27	91%
Promedio	359 ± 98.16	72.5 ± 50.55	81 ± 9%
Máximo	501.00	138.00	91%
Mínimo	289.00	27.00	72%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
 (2) Efluente del sedimentador secundario.
 (3) Eficiencia de remoción del efluente del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

Resultado 29

DQO en el segundo periodo.

DQO (mg O ₂ /L)			
Semana	P1 ⁽¹⁾	P4 ⁽²⁾	E-1 ⁽³⁾
16	345	37	89%
17	350	39	89%
18	307	36	88%
20	375	28	93%
22	242	47	81%
24	437	74	83%
Promedio	342.67 ± 65.44	43.67 ± 16.05	87 ± 4%
Máximo	437.00	74.00	93%
Mínimo	242.00	28.00	81%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
 (2) Efluente del sedimentador secundario.
 (3) Eficiencia de remoción del efluente del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

Resultado 30

SS en el primer periodo.

SS (ml/L.hr)			
Semana	P1 ⁽¹⁾	P4 ⁽²⁾	E-1 ⁽³⁾
6	0.7	0	100%
7	0.5	0	100%
8	0.8	0	100%
9	0.3	0	100%
10	0.2	0	100%
11	1.3	0	100%
12	1.5	0	100%
13	0.1	0	100%
14	0.2	0	100%
15	0.4	0	100%
Promedio	0.6 ± 0.48	0 ± 0	100 ± 0%
Máximo	1.50	0.00	100%
Mínimo	0.10	0.00	100%

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽³⁾ Eficiencia de remoción del efluente del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

Resultado 31

SS en el segundo periodo.

SS (ml/L.hr)			
Semana	P1 ⁽¹⁾	P4 ⁽²⁾	E-1 ⁽³⁾
16	1.3	0	100%
17	1.5	0	100%
18	0.2	0	100%
19	0.9	0	100%
20	0.4	0	100%
21	1.5	0	100%
22	0.3	0	100%
23	0.6	0	100%
24	0.2	0	100%
25	0.2	0	100%
Promedio	0.71 ± 0.55	0 ± 0	100 ± 0%
Máximo	1.50	0.00	100%
Mínimo	0.20	0.00	100%

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽³⁾ Eficiencia de remoción del efluente del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

Resultado 32

SSV en el primer periodo.

SSV (mg/L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
6	72.00	13.60	1.80	1.20	81%	98%	98%	87%
7	85.00	17.00	0.90	0.60	80%	99%	99%	95%
8	53.33	13.43	0.49	0.36	75%	99%	99%	96%
9	74.00	13.20	0.75	0.62	82%	99%	99%	94%
10	100.00	10.00	0.67	0.67	90%	99%	99%	93%
11	81.00	4.27	0.73	0.21	95%	99%	100%	83%
12	80.00	13.33	1.00	1.25	83%	99%	98%	93%
13	100.00	6.00	0.94	0.75	94%	99%	99%	84%
14	90.00	10.00	0.75	0.44	89%	99%	100%	93%
15	60.00	8.00	1.09	0.53	87%	98%	99%	86%
Promedio	79.53±15.4	10.88±3.95	0.91±0.36	0.66±0.33	86±6%	99±1%	99±0%	90±5%
Máximo	100.00	17.00	1.80	1.25	95%	99%	100%	96%
Mínimo	53.33	4.27	0.49	0.21	75%	98%	98%	83%

Nota:

⁽¹⁾ Afluente al reactor MBBR.

⁽²⁾ Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

⁽³⁾ Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

⁽⁴⁾ Efluente del sedimentador secundario.

⁽⁵⁾ Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

⁽⁶⁾ Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

⁽⁷⁾ Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

⁽⁸⁾ Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 33

SSV en el segundo periodo.

SSV (mg/L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
16	100.00	19.23	8.33	5.71	81%	92%	94%	57%
17	103.00	20.20	1.75	2.60	80%	98%	97%	91%
18	103.00	4.91	1.11	0.77	95%	99%	99%	77%
19	83.00	5.65	1.38	1.23	93%	98%	99%	75%
20	84.00	7.00	0.86	0.88	92%	99%	99%	88%
21	56.67	7.87	1.20	1.00	86%	98%	98%	85%
22	70.00	10.89	3.80	4.10	84%	95%	94%	65%
23	69.33	28.95	11.56	11.80	58%	83%	83%	60%
24	89.00	10.20	6.31	4.14	89%	93%	95%	38%
25	93.00	27.67	6.67	6.67	70%	93%	93%	76%
Promedio	85.1±15.74	14.26±9.06	4.3±3.73	3.89±3.49	83±11%	95 ± 5%	95 ± 5%	71±16%
Máximo	103.00	28.95	11.56	11.80	95%	99%	99%	91%
Mínimo	56.67	4.91	0.86	0.77	58%	83%	83%	38%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
- (2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
- (3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
- (4) Efluente del sedimentador secundario.
- (5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.
- (8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 34

SSF en el primer periodo.

SSF (mg/L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
6	10.00	3.20	1.40	1.80	68%	86%	82%	56%
7	12.00	2.50	0.90	1.10	79%	93%	91%	64%
8	2.00	0.57	0.40	0.44	71%	80%	78%	30%
9	6.00	0.40	0.20	0.22	93%	97%	96%	50%
10	10.00	2.50	0.40	0.33	75%	96%	97%	84%
11	4.00	0.27	0.15	0.13	93%	96%	97%	44%
12	16.00	3.78	0.17	0.10	76%	99%	99%	95%
13	10.00	2.00	0.24	0.25	80%	98%	98%	88%
14	20.00	2.00	0.25	0.22	90%	99%	99%	88%
15	10.00	1.33	0.36	0.27	87%	96%	97%	73%
Promedio	10 ± 5.33	1.85±1.2	0.45±0.4	0.49±0.54	81 ± 9%	94 ± 6%	93 ± 8%	67±22%
Máximo	20.00	3.78	1.40	1.80	93%	99%	99%	95%
Mínimo	2.00	0.27	0.15	0.10	68%	80%	78%	30%

Nota:

- (1) Afluente al reactor MBBR.
- (2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.
- (3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.
- (4) Efluente del sedimentador secundario.
- (5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.
- (7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.
- (8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 35

SSF en el segundo periodo.

SSF (mg/L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
16	20.00	3.85	1.67	1.43	81%	92%	93%	57%
17	20.00	3.40	0.18	0.12	83%	99%	99%	95%

18	22.00	0.36	0.09	0.13	98%	100%	99%	76%
19	23.00	0.82	0.12	0.09	96%	99%	100%	85%
20	14.67	3.50	0.09	0.11	76%	99%	99%	98%
21	12.00	0.80	0.08	0.12	93%	99%	99%	90%
22	13.00	0.67	0.30	0.20	95%	98%	98%	55%
23	13.33	2.11	1.78	1.80	84%	87%	86%	16%
24	24.00	3.60	1.54	1.57	85%	94%	93%	57%
25	27.00	3.33	0.83	0.53	88%	97%	98%	75%
Promedio	18.9±5.29	2.24±1.44	0.67±0.72	0.61±0.7	88 ± 7%	96 ± 4%	97 ± 4%	70±25%
Máximo	27.00	3.85	1.78	1.80	98%	100%	100%	98%
Mínimo	12.00	0.36	0.08	0.09	76%	87%	86%	16%

Nota:

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

(4) Efluente del sedimentador secundario.

(5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

(8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 36

SST en el primer periodo.

SST (mg/L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
6	82.00	16.80	3.20	3.00	80%	96%	96%	81%
7	97.00	19.50	1.80	1.70	80%	98%	98%	91%
8	55.33	14.00	0.89	0.80	75%	98%	99%	94%
9	80.00	13.60	0.95	0.84	83%	99%	99%	93%
10	110.00	12.50	1.07	1.00	89%	99%	99%	91%
11	85.00	4.53	0.88	0.35	95%	99%	100%	81%
12	96.00	17.11	1.18	1.35	82%	99%	99%	93%
13	110.00	8.00	1.18	1.00	93%	99%	99%	85%
14	110.00	12.00	1.00	0.67	89%	99%	99%	92%
15	70.00	9.33	1.45	0.80	87%	98%	99%	84%
Promedio	89.53±18.48	12.74±4.54	1.36±0.71	1.15±0.75	85±6%	98±1%	99±1%	89±5%
Máximo	110.00	19.50	3.20	3.00	95%	99%	100%	94%
Mínimo	55.33	4.53	0.88	0.35	75%	96%	96%	81%

Nota:

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

(4) Efluente del sedimentador secundario.

(5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

(8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 37

SST en el segundo periodo.

SST (mg/L)								
Semana	P1 ⁽¹⁾	P2 ⁽²⁾	P3 ⁽³⁾	P4 ⁽⁴⁾	E-1 ⁽⁵⁾	E-2 ⁽⁶⁾	E-3 ⁽⁷⁾	E-4 ⁽⁸⁾
16	120.00	23.08	10.00	7.14	81%	92%	94%	57%
17	123.00	23.60	1.93	2.72	81%	98%	98%	92%
18	125.00	5.27	1.20	0.90	96%	99%	99%	77%
19	106.00	6.47	1.51	1.31	94%	99%	99%	77%
20	98.67	10.50	0.94	0.99	89%	99%	99%	91%
21	68.67	8.67	1.28	1.12	87%	98%	98%	85%
22	83.00	11.56	4.10	4.30	86%	95%	95%	65%
23	82.67	31.05	13.33	13.60	62%	84%	84%	57%
24	113.00	13.80	7.85	5.71	88%	93%	95%	43%
25	120.00	31.00	7.50	7.20	74%	94%	94%	76%
Promedio	104±19.92	16.5±9.84	4.96±4.42	4.5±4.06	84±10%	95±5%	95±5%	72±16%
Máximo	125.00	31.05	13.33	13.60	96%	99%	99%	92%
Mínimo	68.67	5.27	0.94	0.90	62%	84%	84%	43%

Nota:

(1) Afluente al reactor MBBR.

(2) Efluente de la primera etapa del reactor MBBR.

(3) Efluente de la segunda etapa del reactor MBBR.

(4) Efluente del sedimentador secundario.

(5) Eficiencia de remoción del efluente de la primera etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(6) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto del afluente del reactor MBBR.

(7) Eficiencia de remoción del sedimentador secundario respecto del afluente del reactor MBBR.

(8) Eficiencia de remoción del efluente de la segunda etapa respecto de la primera etapa del reactor MBBR.

Resultado 38

SSV adheridos al portador en la primera y segunda etapa del reactor MBBR.

SSV adheridos al portador (mg/L)		
Muestra	PE – MBBR ⁽¹⁾	SE – MBBR ⁽²⁾
1	2054.40	324.57
2	1446.40	232.00
3	1939.20	250.00
4	757.33	309.33
5	1721.60	302.93
Promedio	1583.79 ± 516.89	283.77 ± 40.33
Máximo	2054.40	324.57
Mínimo	757.33	232.00

Nota: El análisis de SSV adheridos se realizó al final del segundo periodo de la investigación.

(1) Hace referencia a la primera etapa del reactor MBBR.

(2) Hace referencia a la segunda etapa del reactor MBBR.

Anexo 2: Resultados de ensayos de laboratorio de la DQO



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.

INFORME DE ENSAYO IE-2024-3686

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-5963	Demanda Química de Oxígeno	mg /L O ₂	4	10	501

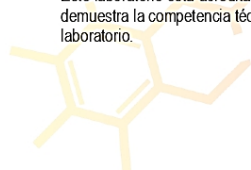
Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

LDM: Límite de Detección del Método.

(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.



Laboratorio de ensayo e investigación

FIN DE DOCUMENTO

FR-INF-02 V00
2024-10-09

SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.
Calle 22 Urb. Vipol Naranjal Mz E Lt 07, San Martín De Porres Lima-Perú.
Cel: 926640042
www.slabperu.com – contacto@slabperu.com

Página 2 de 2

Nota: Informe de la DQO del afluente al reactor MBBR – 1 de 2.

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-5964	Demanda Química de Oxígeno	mg /L O ₂	4	10	138

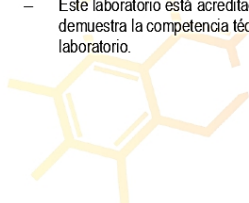
Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

LDM: Límite de Detección del Método.

(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

**SLab**
Laboratorio de ensayo e investigación**FIN DE DOCUMENTO***Nota:* Informe de la DQO del efluente del sedimentador secundario – 2 de 2.

INFORME DE ENSAYO IE-2024-3952

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-6290	S-6291
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(c)				AFLUENTE	EFLUENTE
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(c)				N.A.	N.A.
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(c)				N.A.	N.A.
FECHA MUESTREO ^(c)				2024-12-12	2024-12-12
HORA DE MUESTREO ^(c)				13:00	13:00
GRUPO ^(c)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(c)				DOMÉSTICA	DOMÉSTICA
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Demanda Química de Oxígeno ^(*)	mg /L O ₂	4	10	348	86

ESTE PRESENTE INFORME REEMPLAZA A: IE-2024-3774

Leyenda

^(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

N.A. No Aplica

^(c) Información suministrada por el cliente.

INFORME DE ENSAYO IE-2024-3914

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-6247	S-6248
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(c)				AFLUENTE-04	EFLUENTE-04
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(c)				N.A.	N.A.
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(c)				N.A.	N.A.
FECHA MUESTREO ^(c)				2024-12-20	2024-12-20
HORA DE MUESTREO ^(c)				08:30	08:30
GRUPO ^(c)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(c)				DOMESTICA	DOMESTICA
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Demanda Química de Oxígeno ^(*)	mg /L O ₂	4	10	289	39

Leyenda

^(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

N.A. No Aplica

^(c) Información suministrada por el cliente.

INFORME DE ENSAYO IE-2025-0004

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-0004	S-0005
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(c)				AFLUENTE-05	EFLUENTE-05
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(c)				No Precisa	No Precisa
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(c)				No Precisa	No Precisa
FECHA MUESTREO ^(c)				2025-01-03	2025-01-03
HORA DE MUESTREO ^(c)				08:30	08:30
GRUPO ^(c)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(c)				DOMÉSTICA	DOMÉSTICA
ENSAYO		UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Química de Oxígeno ^(f)		mg/L O ₂	4	10	298 27

Leyenda

^(f) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

^(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.
- Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

FIN DE DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO IE-2025-0115

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-0122	S-0123
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(d)				AFLUENTE - 06	EFLUENTE - 06
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(d)				No Precisa	No Precisa
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(d)				No Precisa	No Precisa
FECHA MUESTREO ^(d)				2025-01-14	2025-01-14
HORA DE MUESTREO ^(d)				08:30	08:30
GRUPO ^(d)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(d)				DOMÉSTICA	DOMÉSTICA
ENSAYO		UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Química de Oxígeno ⁽¹⁾		mg /L O ₂	4	10	345 37

Leyenda

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

N.A. No Aplica

^(d) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.
- Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

FIN DE DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO IE-2025-0212

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-0239	S-0240
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(d)				AFLUENTE-07	EFLUENTE-07
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(d)				No Precisa	No Precisa
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(d)				No Precisa	No Precisa
FECHA MUESTREO ^(d)				2025-01-21	2025-01-21
HORA DE MUESTREO ^(d)				08:30	08:30
GRUPO ^(d)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(d)				DOMÉSTICA	DOMÉSTICA
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Demanda Química de Oxígeno ^(*)	mg /L O ₂	4	10	350	39

Leyenda

^(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

N.A. No Aplica

^(d) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.
- Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

FIN DE DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO IE-2025-0293

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-0351	S-0352
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(c)				AFLUENTE-08	EFLUENTE-08
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(c)				No Precisa	No Precisa
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(c)				No Precisa	No Precisa
FECHA MUESTREO ^(c)				2025-01-28	2025-01-28
HORA DE MUESTREO ^(c)				08:30	08:30
GRUPO ^(c)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(c)				DOMÉSTICA	DOMÉSTICA
ENSAYO		UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Química de Oxígeno ⁽⁷⁾		mg/L O ₂	4	10	30736

Leyenda

^(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.
- Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

FIN DE DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO IE-2025-0577

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-0763	S-0764
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(d)				AFLUENTE-09	EFLUENTE-09
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(d)				No Precisa	No Precisa
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(d)				No Precisa	No Precisa
FECHA MUESTREO ^(d)				2025-02-14	2025-02-14
HORA DE MUESTREO ^(d)				12:00	12:00
GRUPO ^(d)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(d)				DOMÉSTICA	DOMÉSTICA
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Demanda Química de Oxígeno ^(f)	mg /L O ₂	4	10	375	28

Leyenda

^(f) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

^(d) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.
- Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

FIN DE DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO IE-2025-0840

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-1050	S-1051
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(d)				AFLUENTE-10	EFLUENTE-10
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(d)				No Precisa	No Precisa
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(d)				No Precisa	No Precisa
FECHA MUESTREO ^(d)				2025-02-28	2025-02-28
HORA DE MUESTREO ^(d)				08:30	08:30
GRUPO ^(d)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(d)				DOMÉSTICA	DOMÉSTICA
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Demanda Química de Oxígeno ^(f)	mg /L O ₂	4	10	242	47

Leyenda

^(f) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

N.A. No Aplica

^(d) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra o cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.
- Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

FIN DE DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO IE-2025-1024

5. RESULTADOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

ITEM				1	2
CODIGO DE LABORATORIO				S-1265	S-1266
PUNTO DE MUESTREO Y/O DESCRIPCIÓN DE MUESTRA ^(c)				AFLUENTE -11	EFLUENTE -11
COORDENADAS NORTE (N) – UTM WGS 84 ^(c)				No Precisa	No Precisa
COORDENADAS ESTE (E) – UTM WGS 84 ^(c)				No Precisa	No Precisa
FECHA MUESTREO ^(c)				2025-03-12	2025-03-12
HORA DE MUESTREO ^(c)				8:30	8:30
GRUPO ^(c)				AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL
SUB GRUPO ^(c)				DOMÉSTICA	DOMÉSTICA
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Demanda Química de Oxígeno ^(*)	mg /L O ₂	4	10	437	74

Leyenda

^(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL-DA.

L.D.M.: Límite de detección del método

L.C.M.: Límite de Cuantificación de Método

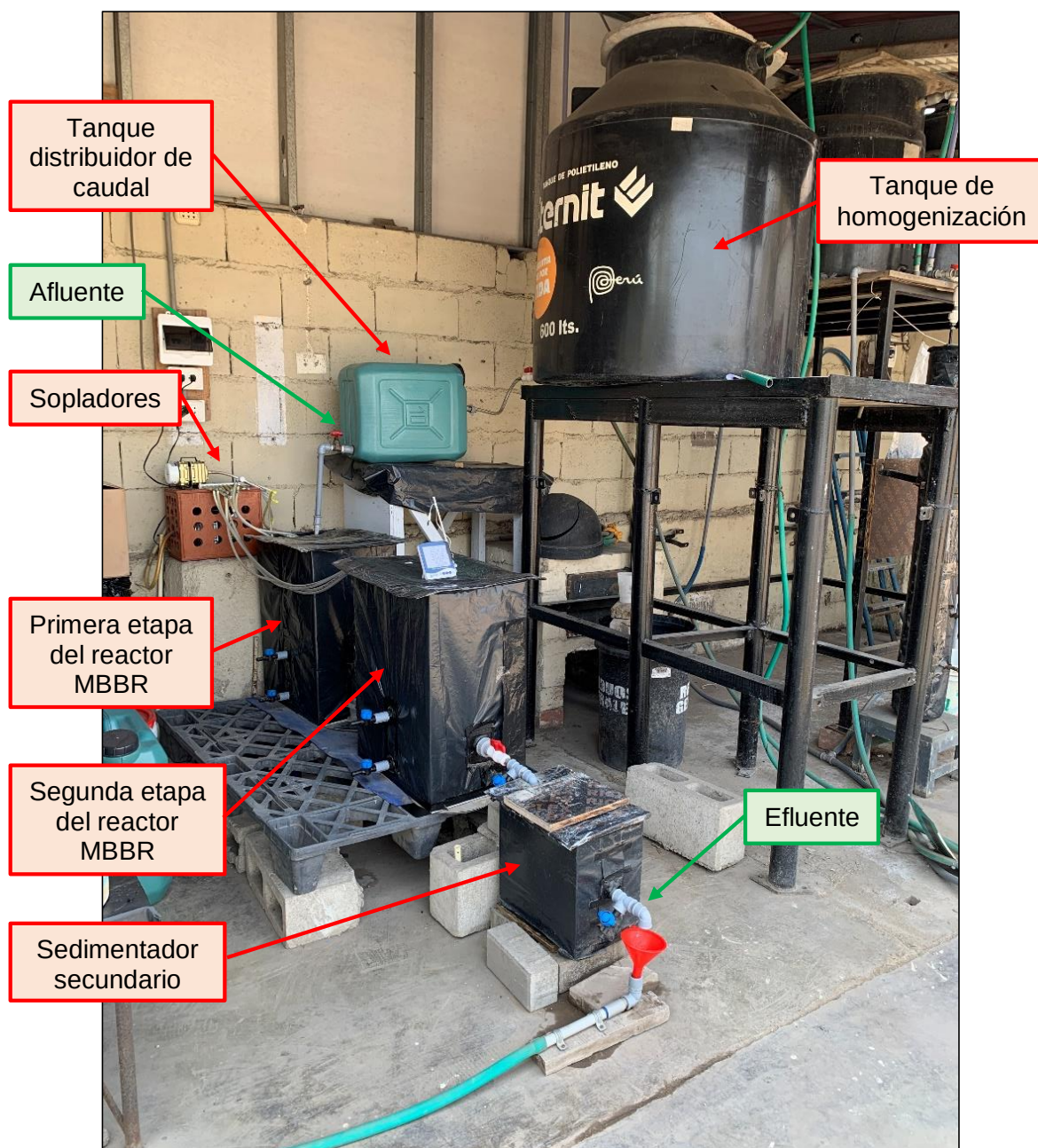
^(c) Información suministrada por el cliente.



Anexo 3: Evidencias de desarrollo de la parte experimental

Fotografía 1

Implementación del reactor MBBR de dos etapas en serie.



Nota:

Unidad de investigación del CITRAR en el módulo 2.

Fotografía 2

Arranque del reactor MBBR de dos etapas en serie.



Nota: Durante el arranque o start up, en el reactor MBBR apareció espuma en la primera etapa y la segunda etapa, fue de gran ayuda dejar un borde libre de 30 cm lo que permitió que la espuma no rebasara. Izquierda es la primera etapa del reactor MBBR. Derecha es la segunda etapa del reactor MBBR.

Fotografía 3

Crecimiento y adherencia de biopelícula en el portador – ruler.



Nota: Izquierda es la primera etapa del reactor MBBR. Derecha es la segunda etapa del reactor MBBR.

Fotografía 4

Biopelícula en el reactor MBBR – segundo periodo.



Nota: Izquierda es la primera etapa del reactor MBBR. Derecha es la segunda etapa del reactor MBBR.

Fotografía 5

Muestras de agua residual en los puntos de monitoreo.



Nota: Ambas imágenes son los mismos solo que varía la ubicación de toma de foto y representa la turbiedad en cada punto de monitoreo y del agua potable; partiendo desde la izquierda son muestras del afluente del reactor MBBR, efluente de la primera etapa del reactor MBBR, efluente de la segunda etapa del reactor MBBR, efluente del sedimentador secundario, y agua potable.

Fotografía 6

Determinación de la DBO₅ de cada punto de monitoreo.



Fotografía 7

Determinación de la DBO₅ soluble y la DQO.



Nota: La determinación de la DQO fue realizada en un laboratorio acreditado por INACAL. Izquierda es la determinación de la DBO₅ soluble. Derecha son muestras para análisis de la DQO.

Fotografía 8

Determinación de los SS, los SST, los SSV y los SSF.



Nota:

Izquierda es la determinación de los SS. Derecha es la determinación de los SST, los SSV y los SSF.

Fotografía 9

Formación de biopelícula en los portadores del reactor MBBR.

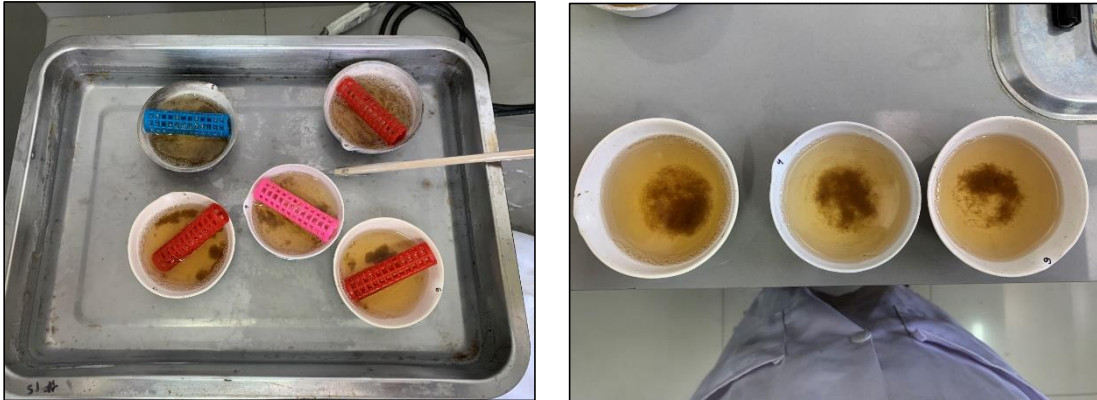


Nota:

Izquierda es el portador y biomasa en la primera etapa del reactor MBBR. Derecha es el portador y biomasa en la segunda etapa del reactor MBBR.

Fotografía 10

Determinación de los SSV de la biopelícula adherida al portador.



Nota: Para el desprendimiento de la biopelícula adherida al portador se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) al 1%.

Fotografía 11

Materiales y equipos utilizados en la determinación de la DBO₅ y la DBO₅ soluble.



Nota:

Izquierda es la técnica de pipeteo directo para la determinación de la DBO₅ y la DBO₅ soluble. Derecha es la incubadora utilizada para determinación de la DBO₅ y la DBO₅ soluble.

Fotografía 12

Tesista Walter Yerba y reactor MBBR de dos etapas en serie.



Nota:

Tesista y unidad de investigación del CITRAR en el módulo 2.