



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA MEMBRANA DINÁMICA
ACOPLADA A UN REACTOR ANAEROBIO PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUA RESIDUAL MUNICIPAL**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MARÍA ELENA VILLALBA PASTRANA

TUTOR PRINCIPAL
DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES
INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR
DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
DR. GERMÁN CUEVAS RODRÍGUEZ
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
DRA. GABRIELA ELEONORA MOELLER CHÁVEZ
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL EDO. DE MORELOS
DR. OSCAR GONZÁLEZ BARCELÓ
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2015

Jurado asignado:

Presidente: Dra. Petia Mijaylova Nacheva

Secretario: Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez

Vocal: Dr. Germán Cuevas Rodríguez

1er. suplente: Dr. Adalberto Noyola Robles

2° suplente: Dr. Oscar González Barceló

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.
MÉXICO D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Adalberto Noyola Robles

FIRMA

***No es el laurel el que convierte un hecho en hazaña, sino el lento martilleo
de la lucha contra los propios límites.***

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Programa de Posgrado de Maestría y Doctorado en Ingeniería por brindarme la oportunidad de continuar mi formación profesional.

Al Instituto de Ingeniería por permitir la realización de este trabajo de tesis en sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante la realización de la maestría.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM por los recursos otorgados a través del proyecto PAPIIT IT101212 titulado: Evaluación de membranas dinámicas sumergidas en un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Al Doctor Adalberto Noyola por aceptarme una vez más en su grupo de investigación, por su continua asesoría, su confianza y sobre todo por su loable ejemplo.

A la Doctora Petia Mijaylova Nacheva y al Doctor Germán Cuevas Rodríguez por sus valiosas aportaciones y asesoría a lo largo de esta investigación.

A la Doctora Gabriela Moeller Chávez y al Doctor Oscar González Barceló por su detallada revisión a este documento.

A la M. en C. Margarita Cisneros, por su respaldo, afecto y continuo apoyo tanto en asuntos académicos como personales.

Al Doctor Daniel de los Cobos, por su incesante orientación tanto en la experimentación como en la redacción de este trabajo. Pero sobre todo te agradezco tu paciencia, respaldo y serenidad transmitida.

A Vania Martínez, Eliezer Quiñonez, Guillermo Anides y Pedro Guadarrama, por su arduo trabajo y loable dedicación al proyecto de membranas. Gracias por sus contribuciones y por las aventuras compartidas en la PTAR a lo largo de estos dos últimos años.

A Andrea Rodríguez, Ireri Segura, Jair Fajardo y Carlos Correa, por continuar con el proyecto, pero sobre todo por brindarme su confianza y permitirme colaborar en sus respectivos trabajos.

A Patricia de la Cruz, Adriana Isaak, Tania Gómez, Patricia Ruiz, Elisa García, Daniela Sánchez, Álvaro Huete y Emilio Gómez; por permitirme conocerlos más allá de los muros del IINGEN, por compartir momentos de estrés y también de distracción.

A Adriana Santiago, Lida Martínez, Rodolfo Cortés, Carlos Melchor, Miguel Ramírez y Juan Carlos Jiménez por seguir a mi lado, por apoyarme en los momentos difíciles y ser ese escape a la rutina de la maestría. Gracias a ustedes aún conservo la cordura.

A Lizeth García, Giovanna Gutiérrez, Verónica Reyes, Rocio Castillo y Marco Antonio Quero por brindarme su cariño desinteresadamente, creer en mí y alentarme continuamente a lograr esta meta.

A Ulises González por motivarme a ser perseverante. Especialmente gracias por estar pendiente de mi vida este último año y apoyarme en toda circunstancia.

Finalmente mi más honda gratitud a mis queridos padres por enseñarme con su ejemplo a luchar hasta obtener lo que se quiere y a valorar los pequeños y grandes logros. Gracias por su apoyo y amor incondicional.

“La gratitud en silencio no sirve a nadie.”

Gladys Bronwyn Stern

RESUMEN

Los biorreactores anaerobios de membrana han demostrado potencial para la producción de agua con calidad de reúso a partir de aguas residuales municipales, principalmente por su menor demanda de energía en comparación con su versión aerobia. Sin embargo, su implementación se ha visto restringida por los costos asociados a las membranas de ultra o microfiltración y a los costos de operación.

Como solución a esta problemática se ha propuesto suplantar las membranas convencionales por materiales porosos de bajo costo y propiciar que la capa de sólidos depositada sobre la superficie funcione como filtro activo favoreciendo la separación sólido-líquido. Sin embargo, la información disponible es aún limitada sobre todo en lo que concierne a tratamiento de efluentes anaerobios.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el desempeño en periodos prolongados de una membrana dinámica que recibe un efluente de un reactor anaerobio alimentado con agua residual municipal. Se trabajó con un sistema de filtración dinámica sumergida que trató el efluente de un reactor UASB piloto ubicado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Nacional Autónoma de México. En la primera etapa del desarrollo experimental se realizó la comparación de dos configuraciones de membranas sumergidas (en cámara externa y en la zona de sedimentación de un reactor UASB); en ambas configuraciones se analizó el comportamiento de dos materiales (textil compuesto de 63% polipropileno y 37% poliéster y textil no tejido de polipropileno con un tamaño nominal de poro de 50 μm). Para cada material y configuración se realizaron siete experimentos de 300 horas de filtración. En los experimentos donde se colocaron las membranas en la zona de sedimentación del reactor se tuvo dificultad para estabilizar la filtración y lograr reproducibilidad. Por el contrario, para los experimentos en cámaras externas se observó reproducibilidad aunque con una alta tasa de dispersión en los datos, inherentes a la filtración dinámica. En esta configuración, el material polipropileno-poliéster logró producir permeado con valores de turbiedad por debajo de los 15 NTU pero presentó menor rendimiento en cuanto a productividad de permeado (menor a 10 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$). Por otro lado, al utilizar polipropileno como soporte primario se alcanzó una producción de permeado por arriba de los 25 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$ con calidad aceptable por mayor tiempo. Por lo anterior, se seleccionó la configuración de membrana sumergida en cámara externa y el textil de polipropileno para estudiar la operación a mayor plazo durante la segunda etapa de esta investigación.

Durante la segunda etapa se evaluó por 96 días la filtración dinámica, comparando el efecto de dos métodos de limpieza sobre el desempeño de membranas dinámicas: 1) Un método de remoción parcial (retrolavado), 2) un método de remoción total (aplicación frontal de agua a presión). Se comprobó que con el retrolavado se redujo la etapa de formación de la membrana dinámica; sin embargo, no se encontró evidencia de que esto favoreciera la obtención de permeado de buena calidad. Por el contrario, la aplicación de agua a presión permitió recuperar mayor porcentaje del flux inicial (100 %). En general se identificó influencia del método de limpieza sobre la productividad de la filtración pero no sobre la calidad del permeado producido.

ABSTRACT

The anaerobic membrane bioreactors have proved their potential for producing high quality effluent from municipal wastewater, especially for their lower energy requirements compared with the aerobic membrane bioreactors. However, their implementation have been restricted due to the high capital and operating costs, mainly associated to the ultrafiltration or microfiltration membranes.

As an alternative, the replacement of the conventional membranes by cheaper filtration materials has been proposed. By this means, the solids layer accumulated on the support material may act as an active filter for a liquid-solid separation. However, the available information is limited, especially for applications with anaerobic treatment processes.

The main objective of this work was to evaluate the performance of a dynamic membrane over a long period, treating the effluent of an anaerobic reactor fed with municipal wastewater (a pilot scale UASB reactor located in the wastewater treatment plant of the Universidad Nacional Autónoma de México). In the first stage of the experimental work, a comparison was performed between two configurations of submerged membranes (one located in an external chamber, the other in the settling zone of the UASB reactor): In both configurations, different materials were tested (textile composed of 63% polypropylene and 37% polyester and a nonwoven fabric of polypropylene having a nominal pore size of 50 μm). For each material and configuration, seven experiments of 300 hours of filtration were carried out. The membranes located in the settling zone of the reactor did not stabilized the filtration and did not reach reproducibility of the data. Instead, the experiments located in the external chamber of the reactor achieved reproducibility of the data but highly dispersed, an inherent behaviour of the dynamic filtration. In this configuration, the polypropylene-polyester material produced permeate with values lower than 15 NTU, but with a lower performance regarding productivity of permeate (lower than 10 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$). Furthermore, when polypropylene was used as primary support, the permeate flux was higher than 25 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$, with a suitable quality. So, in the second stage of this study, the configuration of submerged membrane in an external chamber was selected, together with the nonwoven fabric of polypropylene, in order to study a long term performance.

During the second stage of this study, the dynamic filtration was evaluated for 96 days, comparing the effect of two cleaning methods on the performance of the dynamics membranes: 1) A partial removal method (backwash), 2) a total removal method (a front application of pressurized water). It was proved that with backwash decreased the formation time of the dynamic membrane; however, there was no evidence that this was linked to a higher permeate quality. Instead, the application of pressurized water allowed to recover the initial flux. In general, the effect of the cleaning method was identified on the permeate productivity but not on the quality of permeate.

CONTENIDO

Introducción	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES	3
1.1 Reactor UASB y biorreactores de membrana	3
1.1.1 Reactores UASB.....	3
1.1.2 Biorreactores de membrana (BRM)	4
1.2 Membranas	5
1.3 Taponamiento	7
1.4 Métodos de limpieza.....	7
1.5 Filtración dinámica.....	10
1.6 Estructura de la membrana dinámica.....	10
1.7 Clasificación.....	11
1.8 Materiales de soporte.....	11
1.9 Etapas de filtración	12
1.10 Flux y resistencia en la filtración con membranas dinámicas.....	12
1.11 Trabajos existentes en biorreactores anaerobios de membranas	13
1.12 Métodos de limpieza aplicados a membranas dinámicas	16
1.13 Trabajo previo dentro del grupo de investigación.....	19
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS Y META DEL TRABAJO.....	23
2.1 Justificación	23
2.2 Objetivo general.....	23
2.3 Objetivos específicos.....	23
2.4 Metas del trabajo propuesto	23
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 Etapa 1: Evaluación del desempeño de las membranas dinámicas en dos configuraciones y dos distintos materiales.....	25
3.2 Etapa 2: Evaluación del desempeño de la filtración dinámica durante periodos prolongados en el ensayo recomendado.....	31
3.2.1 Descripción del sistema cuádruple de filtración dinámica sumergida	34
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1 Resultados de la etapa 1: Evaluación del desempeño de las membranas dinámicas en dos configuraciones y dos distintos materiales.....	38

4.1.1 Membrana dinámica sumergida en una cámara externa: textil polipropileno-poliéster	39
4.1.2 Membrana dinámica sumergida en una cámara externa – textil polipropileno	43
4.1.3 Membranas dinámicas sumergidas en zona de sedimentación del reactor UASB.....	51
4.2 Análisis y discusión: Etapa 1.....	62
4.2.1 Filtración efectiva	62
4.2.2 Influencia de la carga orgánica volumétrica en la filtración dinámica.....	63
4.2.3 Selección de tratamiento a evaluar durante la etapa 2.....	67
4.3 Resultados de la etapa 2: Evaluación de la filtración dinámica a largo plazo	69
4.3.1Evaluación de la productividad de permeado	69
4.3.2 Evaluación de la calidad del permeado.....	75
4.3.3 Filtración efectiva	83
4.3.4 Influencia de la composición del agua sobrenadante en la calidad del permeado	85
4.4 Análisis y discusión: Etapa 2.....	90
4.4.1 Influencia de la etapa de operación a flux constante	90
4.4.2 Variación del flux.....	90
4.4.3 Definición del concepto Tiempo de formación de membrana dinámica (TFMD).....	92
4.4.4 Efectividad de los métodos de limpieza.....	93
4.4.5 Variación de la composición del agua residual	95
4.4.6 Influencia de la composición del agua sobrenadante en la calidad del permeado....	96
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
5.1 Conclusiones	98
5.1.1 Etapa 1: Evaluación del desempeño de las membranas dinámicas en dos configuraciones y dos distintos materiales	98
5.1.2 Etapa 2: Evaluación de la filtración dinámica a largo plazo	99
5.2 Recomendaciones	100
Anexo A. Diagrama de caja.....	101
Anexo B. Gráficos de variación de turbiedad en la etapa 2.	102
Referencias.....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Procesos de filtración con membranas (Radjenović <i>et al.</i> , 2008).....	5
Tabla 1.2. Ventajas y desventajas de los sistemas AnMBR (Adaptado de Salazar Peláez, 2011) ...	9
Tabla 1.3. Recopilación de condiciones de operación de biorreactores anaerobios con membrana dinámica (Adaptada de (M E Ersahin, 2012)).	14
Tabla 1.4. Recopilación de información sobre características de los soportes de membranas dinámicas utilizadas en biorreactores anaerobios (Adaptada de Ersahin et al., 2012).....	15
Tabla 1.5. Trabajos recientes sobre métodos de limpieza de membranas dinámicas (MBR aerobios).....	17
Tabla 1.6. Materiales caracterizados (Díaz Marcelín, comunicación personal).	21
Tabla 3.1. Plan de experimentación de etapa 1.	29
Tabla 3.2. Puntos de muestreo y análisis realizados	30
Tabla 3.3. Especificaciones de los métodos de limpieza.	33
Tabla 4.1. Límites máximos permisibles de contaminantes de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997.	38
Tabla 4.2. Duración y número de ciclos por cámara.....	74
Tabla 4.3. Tiempo de formación y porcentaje de recuperación de flux.....	75
Tabla 4.4 Valores promedios de materia orgánica expresada como demanda química de oxígeno total del influente alimentado al reactor UASB.	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de un reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB) (Noyola, <i>et al.</i> , 2013).....	3
Figura 1.2. Configuraciones en un biorreactor de membrana (Cerón Vivas, 2013).....	6
Figura 1.3. Módulo filtración	19
Figura 1.4. Montaje experimental del sistema de filtración dinámica con membranas sumergidas en tanques laterales.....	20
Figura 1.5. Montaje y distribución de membranas en la estructura sumergida en el reactor UASB (González-Ortega, 2014).	22
Figura 3.1. a) Fotografía y esquema de una cámara externa.	25
Figura 3.2. Fotografía y esquema de sistema de filtración dinámica sumergida en cámara externa.	26
Figura 3.3. Módulo utilizado en la filtración dinámica en cámaras externas.....	27
Figura 3.4. Módulo utilizado en la filtración dinámica sumergida en la zona de expansión de reactor UASB.	27
Figura 3.5. Esquema del sistema de filtración dinámica sumergida en zona de expansión de reactor UASB.	28
Figura 3.6. Fotografía de pistola de agua a presión, se resalta patrón de riego tipo FAN.	32
Figura 3.7. Esquemas del procedimiento de limpieza con agua a presión: aplicación frontal, a) tiempo, distancia y modo de riego, b) ángulo de inclinación con respecto al plano de la membrana.	32
Figura 3.8. Esquema de sistema cuádruple de filtración dinámica sumergida en cámara externa.	35
Figura 3.9. a) Fotografía del sistema cuádruple de filtración dinámica sumergida en cámaras externas, Etapa 2 b) cámara externa, c) módulo de membrana dentro de la cámara d) válvula de aguja para control del caudal de permeado.	36
Figura 4.1. Variación del flux con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster, la línea punteada corresponde al flux mínimo establecido 25 L/m ² h.....	40
Figura 4.2. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster, la línea punteada corresponde a la turbiedad máxima establecida 15 NTU.	41
Figura 4.3. Variación del flux, de la turbiedad los permeados y porcentaje de remoción de turbiedad obtenido en la filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster.	42
Figura 4.4. Variación del flux con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte polipropileno, la línea punteada corresponde al flux mínimo establecido 25 L/m ² h.	44
Figura 4.5. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte polipropileno, la línea punteada corresponde a la turbiedad máxima establecida 15 NTU.....	45
Figura 4.6. Variación del flux, de la turbiedad los permeados y porcentaje de remoción obtenido en la filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno, en sombreado gris se resaltan los periodos de filtración efectiva.	46

Figura 4.7. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación del flux de los experimentos de filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster. ...	47
Figura 4.8. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación del flux de los experimentos de filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno.	48
Figura 4.9. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de turbiedad de los experimentos de filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster. ...	49
Figura 4.10. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de turbiedad de los experimentos de filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno.	49
Figura 4.11. a) Soporte primario de polipropileno - poliéster limpio, b) y c) Membrana secundaria formada d) Membrana seca.	50
Figura 4.12. a) Soporte de polipropileno limpio, b) y c) Membrana secundaria formada y d) membrana seca.	50
Figura 4.13. Variación del flux con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno - poliéster, la línea punteada corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m ² h.....	52
Figura 4.14. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno-poliéster, la línea punteada corresponde a turbiedad máxima establecida 15 NTU.....	53
Figura 4.15. Variación del flux, de la turbiedad los permeados y porcentaje de remoción obtenido en la filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno - poliéster. En sombreado gris se resalta periodos de filtración efectiva.	54
Figura 4.16. Variación del flux con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno, la línea punteada corresponde al flux mínimo establecido 25 L/m ² h.....	55
Figura 4.17. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte polipropileno, la línea punteada corresponde a la turbiedad máxima establecida 15 NTU.....	56
Figura 4.18. Variación del flux, de la turbiedad los permeados y porcentaje de remoción obtenido en la filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno. En sombreado gris se resalta periodos de filtración efectiva.	57
Figura 4.19. Módulos rectangulares con soportes primarios limpios y con las membranas formadas a) Polipropileno poliéster, b) polipropileno (50µm).....	58
Figura 4.20. Biopelícula formada sobre soporte metálico en módulos rectangulares a) Polipropileno poliéster, b) polipropileno (50µm)	58
Figura 4.21. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación del flux de los experimentos de filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte polipropileno - poliéster.....	60
Figura 4.22. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación del flux de los experimentos de filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno.	60
Figura 4.23. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de la turbiedad de los experimentos de filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno- poliéster.....	61
Figura 4.24. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de la turbiedad de los experimentos de filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno.	61
Figura 4.25. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de la turbiedad de los sobrenadantes de filtración dinámica sumergida en cámaras externas y en reactor UASB.	63

Figura 4.26. a) Precipitación pluvial durante experimentación (Estación CCH- Sur), b) Variación de la carga orgánica volumétrica de alimentación del reactor, c) variación de la turbiedad del licor mezcla a una profundidad de 1.92m dentro del reactor. Se resalta en línea punteada roja y sombreado gris los datos que se presentaron durante el experimento 5 de membranas sumergidas en reactor UASB.....	65
Figura 4.27. Variación del flux permeado en la cámara CA; línea continua roja corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m ² h.	70
Figura 4.28. Variación del flux permeado en la cámara CB; línea continua roja corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m ² h.	71
Figura 4.29. Variación del flux permeado en la cámara CC; línea continua roja corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m ² h.	71
Figura 4.30. Variación del flux permeado en la cámara CD; línea continua roja corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m ² h.	72
Figura 4.31. Diagramas de cajas (Box Plot) para la variación del flux con respecto al tiempo en las cuatro cámaras analizadas.	73
Figura 4.32. Variación de la turbiedad en el permeado obtenido en la cámara CA a lo largo de la experimentación.	76
Figura 4.33. Variación de los sólidos suspendidos en el permeado obtenido en la cámara CA; la línea continua roja corresponde al valor máximo definido (20 mg SST/L).	77
Figura 4.34. Variación de los sólidos suspendidos en el permeado obtenido en la cámara CB; la línea continua roja corresponde al valor máximo definido (20 mg SST/L).	78
Figura 4.35. Variación de los sólidos suspendidos en el permeado obtenido en la cámara CC; la línea continua roja corresponde al valor máximo definido (20 mg SST/L).	78
Figura 4.36. Variación de los sólidos suspendidos en el permeado obtenido en la cámara CD; la línea continua roja corresponde al valor máximo definido (20 mg SST/L).	79
Figura 4.37. Diagramas de cajas (Box Plot) para la variación de los sólidos suspendidos totales en el permeado de las cuatro cámaras analizadas.	80
Figura 4.38. Variación de la DQO total en el permeado obtenido en la cámara CA.	81
Figura 4.39. Variación de la DQO total en el permeado obtenido en la cámara CB.	81
Figura 4.40. Variación de la DQO total en el permeado obtenido en la cámara CC.	82
Figura 4.41. Variación de la DQO total en el permeado obtenido en la cámara CD.	82
Figura 4.42. Variación de flux y sólidos suspendidos totales, a) cámara CA, b) cámara CB, c) cámara CC, y d) cámara CD. En sombreado gris, periodos de filtración efectiva con calidad y productividad deseadas	
Figura 4.43. Variación de sólidos suspendidos totales en los sobrenadantes de las cuatro membranas analizadas, a) cámara CA, b) cámara CB, c) cámara CC, y d) cámara CD (las líneas punteadas corresponden a la tendencia de los datos). En sombreado gris, periodos de filtración efectiva con calidad y productividad deseadas.....	85
Figura 4.44. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de los sólidos suspendidos totales en los sobrenadantes de las cuatro cámaras durante la temporada vacacional y temporada de estiaje.	86
Figura 4.45. Variación de la DQO total en los sobrenadantes de las cuatro membranas analizadas, a) cámara CA, b) cámara CB, c) cámara CC, y d) cámara CD (las líneas punteadas corresponden a la tendencia de los datos). En sombreado gris, periodos de filtración efectiva con calidad y productividad deseadas.	87

Figura 4.46. Variación de la DQO soluble en los sobrenadantes de las cuatro membranas analizadas, a) cámara CA, b) cámara CB, c) cámara CC, y d) cámara CD (las líneas punteadas corresponden a la tendencia de los datos). En sombreado gris, periodos de filtración efectiva con calidad y productividad deseadas.	88
Figura 4.47. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de materia orgánica total en los sobrenadantes de las cuatro cámaras durante la temporada vacacional y temporada de estiaje.	89
Figura 4.48. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de la materia orgánica soluble en los sobrenadantes de las cuatro cámaras durante la temporada vacacional y temporada de estiaje.	89
Figura 4.49. Curvas típicas de: a) variación del flux bajo PTM constante (Ho <i>et al.</i> , 2007), b) variación de la PTM bajo flux constante(Zhang <i>et al.</i> , 2011).....	91
Figura 4.50. Variación de flux en filtración dinámica aerobia operando a presión constante por columna hidrostática (Xue <i>et al.</i> , 2010b).	91
Figura A.1. Ejemplo de diagrama de caja (Box Plot).	101
Figura B.1. Variación de la turbiedad del permeado de la cámara CB a lo largo de la experimentación.	102
Figura B.2. Variación de la turbiedad del permeado de la cámara CC a lo largo de la experimentación.	103
Figura B.3. Variación de la turbiedad del permeado de la cámara CD a lo largo de la experimentación.	103

Introducción

La escasez de agua es un problema mundial cada vez más grave que puede ser mitigado por la reutilización de las aguas residuales después de ser tratadas adecuadamente. Entre los procesos utilizados para el tratamiento de aguas residuales, los sistemas anaerobios, en especial los reactores UASB acoplados a módulos de filtración con membranas, han demostrado potencial para convertirse en una tecnología viable, primordialmente por su capacidad de producción de efluentes con calidad de reúso, además de contar con varias ventajas, entre las que se destacan las siguientes: menores requerimientos de espacio y energía en comparación a tecnologías convencionales, baja producción de lodos, y la posibilidad de autoabastecimiento energético mediante el biogás producido (Martin-Garcia *et al.*, 2011; Skouteris *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2012). Pese a todos estos atributos, la implementación de esta tecnología se ha visto restringida debido a que la vida útil de las membranas de micro- o ultra-filtración es limitada, y los costos asociados a la limpieza química y al reemplazo de éstas son aún muy altos (Jeison y van Lier, 2007; Jeison *et al.*, 2008; Skouteris, 2012).

Ante esta problemática, se ha propuesto como solución el uso de membranas dinámicas (MD), utilizando como soporte materiales porosos de bajo costo (mallas metálicas o fibras textiles), las cuales son capaces de obtener un efluente de calidad comparable con el obtenido con membranas convencionales (Ersahin *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2013; Loderer *et al.*, 2013; Skouteris, 2012; Smith *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012).

La implementación de las membranas dinámicas, en particular en reactores anaerobios, requiere la identificación de condiciones adecuadas de operación que permitan una satisfactoria formación de la MD y un efectivo control de la capa taponante (Ersahin *et al.*, 2012; Jeison *et al.*, 2008), como por ejemplo: el material del soporte, la configuración del módulo de membrana, y un método de limpieza eficiente.

Esta línea de investigación presenta una gran área de oportunidad, ya que los trabajos que existen de caracterización del comportamiento de membranas dinámicas son en su gran mayoría en sistemas aerobios (Al-malack y Anderson, 1997; Wang *et al.*, 2012; Xue *et al.*, 2010a). Los trabajos que existen en procesos anaerobios son escasos y con alcances limitados (An *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010), ya que se remiten a estudiar el proceso a escala laboratorio. Por consiguiente, además de profundizar en la investigación en sistemas anaerobios es necesario incursionar en la aplicación de reactores anaerobios acoplados a un módulo de filtración a escala piloto, lo cual es un paso indispensable para la implementación de esta tecnología a mayor escala.

Con el propósito de contribuir a esta línea de investigación, esta tesis de maestría analizó el desempeño de las membranas dinámicas acopladas a un reactor anaerobio escala piloto que trata agua residual municipal. La etapa experimental se dividió en dos etapas: la primera etapa se enfocó en comparar el desempeño de las membranas dinámicas en dos configuraciones y con dos distintos materiales, a través de estos ensayos surgió la recomendación de una configuración y un material; combinación que se evaluó en la segunda etapa durante periodos de filtración prolongados junto con dos métodos de limpieza.

El presente documento fue organizado de la siguiente manera: en el primer capítulo se incluyen los fundamentos teóricos y los antecedentes que en su conjunto sirven como sustento teórico

de esta investigación. En el segundo capítulo se presentan los objetivos y la meta de este trabajo de tesis. El tercer capítulo detalla los materiales y métodos que fueron empleados en el desarrollo experimental de esta investigación. En el cuarto capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en las dos etapas experimentales. El último capítulo se dedicó a las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de este trabajo.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES

1.1 Reactor UASB y biorreactores de membrana

1.1.1 Reactores UASB

Dentro de los diversos tipos de tratamiento anaerobios existentes, los reactores de lecho anaerobio de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés) han sido ampliamente estudiados principalmente porque esta tecnología es capaz de operar a cargas orgánicas altas, lo cual radica en la alta concentración de microorganismos en la cama de lodos dado que en ella ocurren todos los procesos biológicos (Metcalf & Eddy, 2003). La retención mediante sedimentación de grandes cantidades de microorganismos en el lodo granular del reactor permite operar el sistema con menores tiempos de retención hidráulica y por consiguiente volúmenes menores con respecto a otras tecnologías.

El reactor UASB consta de tres secciones (Noyola *et al.*, 2013) como se muestra en la Figura 1.1:

- En la parte inferior, *la cama de lodos*: es la biomasa anaerobia granular o floculada localizada en el fondo del reactor con un volumen aproximado de 1/3 del volumen del reactor.
- En la parte superior, *un sistema de captación de biogás*: el cual tiene como función captar el biogás producido y crear una zona libre de turbulencia, para favorecer la sedimentación de los gránulos o flóculos anaerobios que pudieran haber atravesado la zona de campanas colectoras de biogás.
- En la parte intermedia, *una zona de expansión de lodo* que permite acomodar el lodo expandido por la acción del biogás y la velocidad ascendente del agua.

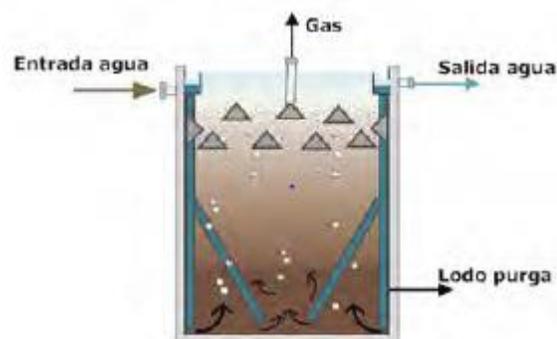


Figura 1.1 Esquema de un reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB) (Noyola *et al.*, 2013).

Este tipo de reactor fue desarrollado en la década de los setenta por Gatzke Lettinga y su grupo de investigación de la Universidad de Wageningen, en Holanda. Desde entonces este reactor, al soportar cargas orgánicas 10 veces mayores a los procesos aerobios, comenzó a ser utilizado en el tratamiento de aguas residuales industriales y poco tiempo después, a mediados de los años

ochenta, en el tratamiento de aguas residuales municipales. Sin embargo, la mayor aplicación de esta tecnología se ha dado en los efluentes de ciertos tipos de industrias y en menor medida, en aguas residuales municipales (Lin *et al.*, 2013; Morgan-Sagastume, 1996). Algunos de los factores operacionales que han interferido en su aplicación para tratamiento de efluentes municipales están relacionados con las características del agua residual, como por ejemplo: la baja concentración de materia orgánica, la alta fracción de material particulado, la relativamente baja temperatura y las fluctuaciones de carga hidráulica, ya que estos son particularmente relevantes en el tratamiento anaerobio y pueden causar impactos negativos en el desempeño de este tipo de reactores (Salazar Peláez, 2011).

Algunos problemas identificados durante el tratamiento de aguas residuales municipales en reactores UASB son la pobre formación de lodo granular, la acumulación y lenta hidrólisis de los sólidos suspendidos, la disminución en la actividad metanogénica y la resultante baja producción de biogás (Kalogo y Verstraete, 1999). Por lo general, los efluentes de reactores UASB no alcanzan la calidad para reuso establecida por la normatividad, por lo que comúnmente se usan posteriormente procesos aerobios de pulimento (Alibardi *et al.*, 2014). Debido a lo anterior, es conveniente encontrar una alternativa para mejorar la calidad del efluente de este tipo de reactores. Una de las propuestas para lograr lo anterior ha sido acoplar este tipo de reactores con sistemas de filtración por membranas, convirtiéndose propiamente en un biorreactor anaerobio de membrana.

1.1.2 Biorreactores de membrana (BRM)

Este término se emplea cuando a procesos biológicos para tratamiento de aguas residuales se les implementa sistemas de filtración por membranas para lograr la separación física de la biomasa y sólidos suspendidos y coloidales. Esta tecnología ofrece muchas ventajas sobre los procesos de tratamiento convencionales como: instalaciones más compactas, alta calidad del efluente, buena capacidad de desinfección y menor producción de lodos (Cerón Vivas, 2013; Skouteris *et al.*, 2012).

Este arreglo fue propuesto en la década de los sesenta para sustituir los sedimentadores en los sistemas de lodos activados convencionales por membranas; sin embargo, el alto costo de las membranas limitó su implementación provocando que hasta los primeros años de los noventa esta tecnología, en su versión aerobia, fuera introducida ampliamente en la industria. Gracias a que este arreglo puede disminuir el área para su instalación y que es capaz de obtener un efluente de mejor calidad, la industria de los biorreactores de membrana aerobios (MBR, por sus siglas en inglés) ha crecido durante los últimos años.

Los reactores anaerobios de membrana (AnMBR, por sus siglas en inglés) pueden proveer los mismos beneficios que los MBR, solo que lo logran con menores requerimientos de energía (Smith *et al.*, 2012), incluso cuentan con la ventaja de que durante su operación se produce metano (CH₄), gas que puede ser utilizado para producir energía eléctrica que en algunos casos puede cubrir la demanda energética de la filtración por membrana y parte de la requerida en la planta de tratamiento de aguas residuales.

1.2 Membranas

Una membrana puede ser definida como una barrera selectiva o una interfase entre dos fases. El transporte de materia a través de las membranas es causado por una fuerza que actúa sobre los componentes del influente, esta fuerza puede ser un gradiente de presión, concentración, potencial eléctrico o temperatura (Sun *et al.*, 2012). Estos gradientes obligan a ciertas moléculas a pasar a través de las membranas junto con el permeado que es recuperado como producto final; mientras que las impurezas son retenidas en el rechazo o concentrado. Las sustancias que atraviesen dependerán de las características de la membrana, ver Tabla 1.1.

En los sistemas de tratamiento de aguas residuales los módulos de filtración de membranas se operan bajo presión, y se pueden identificar cuatro tipos de membranas de acuerdo al rango de partículas que logran separar por su tamaño de poro: ósmosis inversa (OI), nanofiltración (NF), ultrafiltración (UF) y microfiltración (MF) (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Procesos de filtración con membranas (Radjenović *et al.*, 2008).

Proceso	Objetivo usual	Rango de separación
Microfiltración (MF)	Remoción de sólidos suspendidos	100-1000 nm
Ultrafiltración (UF)	Remoción de partículas coloidales suspendidas y solutos disueltos	5-100nm
Nanofiltración (NF)	Remoción selectiva de iones multivalentes y ciertas moléculas polares cargadas	1-5 nm
Ósmosis inversa (OI)	Remoción de iones inorgánicos	0.1- 1nm

Las membranas pueden ser elaboradas de materiales orgánicos e inorgánicos, y para el caso de los biorreactores de membrana se utiliza comúnmente las membranas de polietileno (PE) y las de fluoruro de polivinildieno (FPVD) por su carga electrostática negativa, elongación y buena resistencia a los químicos (Cerón Vivas, 2013).

Con respecto a la geometría de las membranas, ésta depende del proceso de producción de la membrana, y pueden ser de tipo plana o cilíndrica.

La membrana de filtración puede existir en tres configuraciones (Smith *et al.*, 2012):

- Externa de flujo transversal. La membrana se coloca fuera del biorreactor y el efluente es bombeado hacia la membrana para obtener el permeado (se opera bajo presión positiva), la corriente de rechazo y el material retenido son bombeados nuevamente al reactor (ver figura 1.2 a).
- Interna sumergida. La membrana está sumergida directamente en la biomasa suspendida dentro del biorreactor y el permeado es extraído a través de la membrana aplicando vacío (Figura 1.2 b).
- Externa sumergida. Esta configuración opera de la misma forma que la de “interna sumergida” con la única diferencia de que en este caso la membrana es colocada en una cámara independiente del biorreactor pero de igual forma está sumergida en biomasa suspendida proveniente del reactor (Figura 1.2 c). Esta configuración facilita la limpieza y reemplazo de la membrana, manteniendo las condiciones anaerobias en el biorreactor.

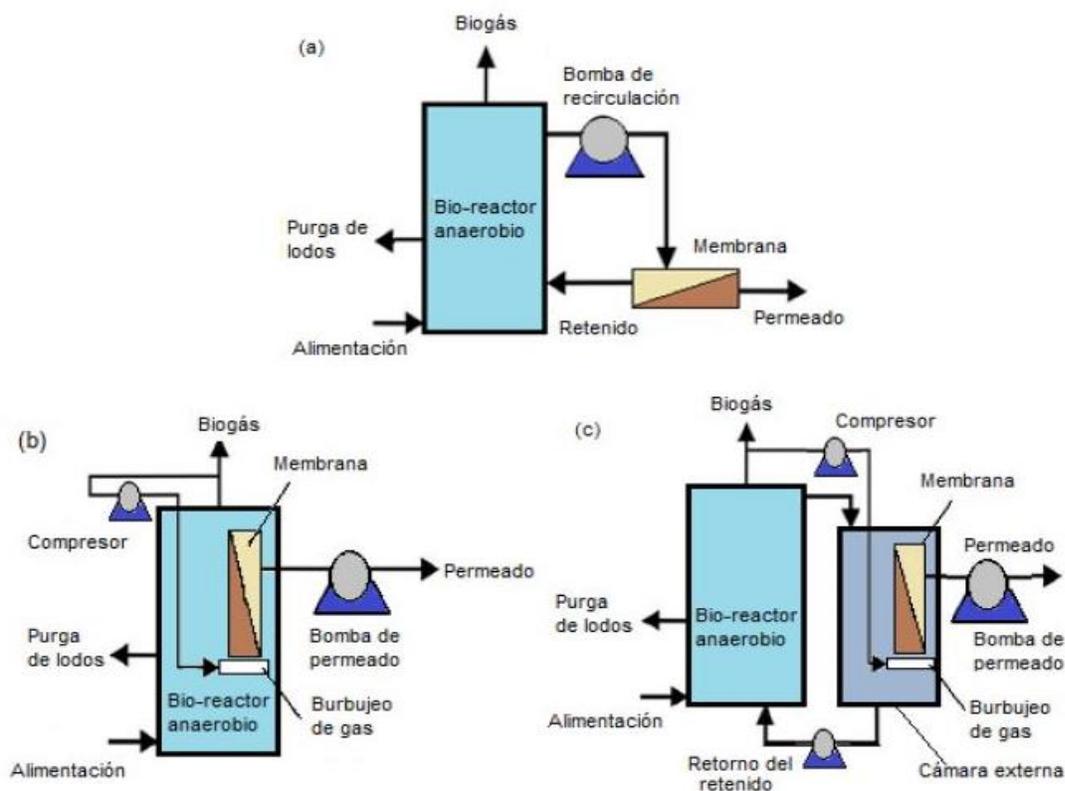


Figura 1.2. Configuraciones en un biorreactor de membrana (Cerón Vivas, 2013).

La selección del tamaño de poro de la membrana, material y configuración son decisiones muy importantes de diseño. De acuerdo a Smith y colaboradores (2012), en los MBR se utiliza comúnmente membranas de microfiltración y ultrafiltración, ya que con éstas se pueden alcanzar niveles adecuados de tratamiento para el reúso de aguas residuales.

1.3 Taponamiento

A pesar de las múltiples ventajas que tienen los MBR, con el paso del tiempo es inevitable que el permeado obtenido disminuya debido a la deposición, adsorción y acumulación de partículas, microorganismos, coloides, solutos y residuos celulares sobre la superficie de la membrana o dentro de sus poros (Meng *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2012). Este fenómeno se conoce como taponamiento y es, sin duda, el mayor obstáculo a superar para diseminar la tecnología y aplicarla a gran escala.

El taponamiento es influenciado por varios parámetros, entre los que se puede destacar: la composición del agua residual, el tipo de membrana y las condiciones hidrodinámicas en las que se opera (Stuckey, 2012). La reducción del flux permeado es resultado del taponamiento de la membrana, lo cual incrementa la presión transmembrana (PTM) y consecuentemente el consumo de energía. Además, se aumenta la frecuencia de limpieza y reemplazo de las membranas, acrecentando los costos de operación y mantenimiento (Ozgun *et al.*, 2013).

De acuerdo al grado de retención de las sustancias taponantes, el taponamiento se puede clasificar en removible, irremovible e irreversible. Se utiliza el término “removible” cuando las sustancias taponantes están pobremente adheridas a la superficie de la membrana y pueden ser eliminadas por medio de limpieza física como retrolavado, burbujeo o relajación. El taponamiento irremovible se debe al bloqueo de los poros y a las sustancias taponantes fuertemente adheridas, y éste necesita limpieza química para ser eliminado. De acuerdo a lo anterior, se dice que el taponamiento es irreversible cuando éste permanece y no puede ser removido por ningún método de limpieza (Lin *et al.*, 2013; Meng *et al.*, 2009).

Es importante comentar que los AnMBR suelen ser más susceptibles al taponamiento que los biorreactores aerobios, debido a que los procesos anaerobios producen efluentes con mayor DQO residual en comparación a los MBR, además que el licor mezcla es significativamente diferente dado que tiene mayor cantidad de sólidos suspendidos, mayor cantidad de productos microbianos solubles y que por su elevada producción de amonio y fosfatos pueden presentar precipitación de coloides y cristales inorgánicos (Lin *et al.*, 2013). Como consecuencia, en algunos estudios se han reportado valores de flux menores en comparación a su contra parte aerobia (Liao *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2011). Esta comparación sugiere que es posible usar el mismo tipo de membranas pero se debe prestar mayor atención al control del taponamiento en los biorreactores anaerobios (Lin *et al.*, 2013).

1.4 Métodos de limpieza

De acuerdo a lo anterior, la limpieza de las membranas es un factor indispensable a considerar en la operación de los MBR dado que influye directamente en el comportamiento de las membranas. La clasificación más general que existe de los métodos de limpieza es de acuerdo al lugar donde se aplica la limpieza, usando el término “*in situ*” cuando el módulo de las membranas permanece dentro del reactor y “*ex situ*” cuando se extrae el módulo para aplicar el método de limpieza. Por otra parte, éstos también se suelen clasificar de acuerdo al

mecanismo de remoción que emplean o según los reactivos que utilizan para este fin, de tal forma que se tienen (1) métodos físicos, (2) métodos químicos o bien (3) métodos bioquímicos.

Si se decide que lo más conveniente es aplicar la limpieza *in situ*, existen varias alternativas técnicas para controlar el taponamiento de las membranas, como incorporar periodos de relajación (filtración intermitente), ultrasonido, retrolavados, burbujeo de aire, inyección de reactivos químicos o bien se pueden aplicar en conjunto algunas combinaciones de éstas. Por otra parte, si se opta por trabajar *ex situ*, es posible aplicar limpiezas químicas más rigurosas y durante periodos más prolongados, o bien aplicar limpiezas mecánicas ya sea con un barrido con una esponja o aplicación de agua presión (Wang *et al.*, 2014).

Por lo regular, durante la operación de los MBR se prefieren los métodos de limpieza *in situ*, pese a que éstos requieran ser aplicados de forma más frecuente durante la operación, en contraste con las limpiezas *ex situ* que se suelen aplicar una vez en un lapso de tiempo de 1 a 3 años (Wang *et al.*, 2014).

Dentro de los métodos físicos figuran los retrolavados, la filtración intermitente, burbujeo de aire o biogás, vibraciones, ultrasonido, o incluso la adición de partículas inertes que debido a la hidrodinámica y a la fricción logran el desprendimiento de los sólidos adheridos a las membranas. En general, este tipo de métodos se aplican con el propósito de controlar el taponamiento de tipo removible y cuentan con la ventaja de que no dañan la integridad de la membrana salvo que se apliquen limpiezas mecánicas demasiado abrasivas. Por el contrario, las limpiezas químicas cuentan con la ventaja de que logran abatir el taponamiento de tipo irremovible mediante la aplicación de reactivos como bases (hidróxido de sodio), ácidos (ácido clorhídrico, sulfúrico, cítrico, etc.) u oxidantes (hipoclorito y peróxido). Sin embargo, en estos casos se ha demostrado que existe mayor afectación a los materiales que constituyen las membranas. Es de resaltar que es común aplicar un método de limpieza físico además de la adición de reactivos químicos, con el objetivo de mejorar el control del taponamiento y logrando así reducir la cantidad de reactivo requerida para lograr la misma eficiencia obtenida en el tratamiento en conjunto (Wang *et al.*, 2014).

Es importante mencionar que en el proceso de elección de método de limpieza es crucial considerar el tipo de módulo que se está trabajando así como la configuración y material del mismo, ya que esto determinará aquellos métodos de limpieza que puedan ser aplicados y la efectividad de cada uno de ellos (Regula *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014).

Como se mencionó en párrafos anteriores, con el paso del tiempo las limpiezas físicas no son suficientes y se requieren métodos de limpieza más severos (limpiezas químicas), pese a ello, después de largos periodos de tiempo (en el mejor de los casos cada 5 a 10 años) las membranas se deterioran y deben ser remplazadas (Mackenzie, 2010).

Analizando esta problemática a largo plazo, se puede ver que el tipo de limpieza aplicada tiene un gran impacto en la rentabilidad de la tecnología y no únicamente por el costo asociado al reemplazo de la membrana sino desde el punto de vista energético, ya que varias de las estrategias para controlar el taponamiento involucran energía eléctrica (retrolavados, ultrasonido, vibración, etc.), ocasionando que el control del taponamiento represente la mayor demanda energética de estos sistemas (Smith *et al.*, 2012). Por lo tanto, se requiere mayor

investigación sobre este tema para disminuir la demanda energética y así, en el caso de sistemas anaerobios, maximizar el potencial de la energía recuperada a través del biogás producido.

A manera de resumen, la Tabla 1.2 presenta las ventajas y desventajas que presentan los reactores anaerobios que están acoplados a sistemas de filtración de membranas.

Tabla 1.2. Ventajas y desventajas de los sistemas AnMBR (Adaptado de Salazar Peláez, 2011)

Ventajas	Desventajas
Efluente de buena calidad	Taponamiento de membranas
Independencia entre el TRC y el TRH	Alto costo membranas
Soporta altas cargas orgánicas	Demanda energética en estrategias de control de taponamiento y limpieza química
Poco requerimiento de espacio	Producción de olores
Diseño modular flexible	Impacto en el taponamiento por las natas acumuladas en el reactor
Producción de energía recuperable en forma de CH ₄	
Baja producción de lodo	

Pese a que esta tecnología cuenta con varios atributos, su implementación se ha visto restringida debido a que la vida útil de las membranas de micro- o ultra-filtración es limitada, y los costos asociados a la limpieza química y al reemplazo de éstas son aún muy altos (Jeison y van Lier, 2007; Jeison *et al.*, 2008; Skouteris *et al.*, 2012).

Ante esta problemática, se ha propuesto como solución el uso de membranas dinámicas (MD), utilizando como soporte materiales porosos de bajo costo (mallas metálicas o fibras textiles), las cuales son capaces de obtener un efluente de calidad comparable con el obtenido con membranas convencionales (Ersahin *et al.*, 2012; Gahleitner *et al.*, 2014; Lin *et al.*, 2013; Skouteris *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012).

1.5 Filtración dinámica

La filtración dinámica es un concepto que en los últimos años ha captado la atención de varios grupos de investigación, debido a que podría superar las desventajas que presentan los biorreactores de membrana a través del reemplazo de las membranas de micro- o ultrafiltración por materiales filtrantes con poros de mayor tamaño pero de menor costo; lo cual sin duda representa una opción muy atractiva (Ersahin *et al.*, 2012; Loderer *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2010). Con las características de estos nuevos materiales además se aumentaría el flux de operación y demandarían métodos de limpieza menos sofisticados (H. Chu *et al.*, 2014).

A través de varios estudios se ha identificado que durante la filtración de una solución que contiene material orgánico e inorgánico se forma una película sobre la superficie de la membrana, que funciona como un filtro activo mejorando la separación de los sólidos del líquido (H. Chu, 2014; David Jeison, 2008; Liang *et al.*, 2013; Loderer, 2013; Xiong *et al.*, 2014; X. Zhang, 2010). Además, se ha encontrado que esta capa retiene coloides y partículas orgánicas impidiendo que éstas taponen los poros del material de soporte primario (Ersahin *et al.*, 2012). Por consiguiente, el mayor potencial de las membranas dinámicas es prescindir de las costosas membranas comerciales, ya que el rechazo de los sólidos se lleva a cabo por la película o membrana secundaria, misma que al estar altamente taponada se puede remover con facilidad y una nueva capa se puede formar rápidamente *in situ*; es por esto que recibe el nombre de membrana dinámica.

De acuerdo a lo anterior, el principio de filtración dinámica difiere del proceso convencional de membranas, dado a que en aquella se aprovecha el taponamiento del soporte. Una desventaja que debe ser superada mediante la investigación es controlar el proceso de formación de la membrana dinámica y su reproducibilidad.

1.6 Estructura de la membrana dinámica

En cuanto a la estructura de la membrana dinámica varios autores han identificado que consiste en dos capas: 1) la capa taponante y 2) la capa gel (Stuckey, 2012; Xiong *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2011). La primera de ellas se debe principalmente a la aglomeración de flóculos de lodo y se caracteriza por ser fácilmente removible. Por el contrario, la capa gel está constituida principalmente por sustancias poliméricas extracelulares (SPE) que se adhieren fuertemente a la superficie del soporte primario lo cual dificulta su remoción, y por consiguiente se llega a considerar como causa del taponamiento irremovible (Xiong *et al.*, 2014).

De acuerdo a la literatura, la capa taponante es la que provoca principalmente la resistencia al filtrado y la que evita el paso de los flóculos de mayor tamaño y así favorece la calidad del permeado (Xiong *et al.*, 2014). Mientras que el rechazo de las partículas finas está a cargo de la capa gel.

1.7 Clasificación

Las membranas dinámicas pueden clasificarse en dos grupos:

- a) Pre-formadas. Son aquellas que se producen de manera preliminar al poner en contacto una solución de uno o más componentes coloidales específicos sobre la superficie del material poroso. Algunos de los materiales que se usan para formar las membranas son: Carbón activado en polvo, caolinita (arcilla) y diatomita. Esto representa su principal desventaja, dado que se requiere de material extra al proceso.
- b) Auto-formadas. Se forman debido a las sustancias presentes en las soluciones filtradas, usualmente coloides y moléculas orgánicas de alto peso molecular, además de microorganismos que colonizan el soporte y forman una biopelícula (Xue *et al.*, 2010a).

1.8 Materiales de soporte

Durante el desarrollo de esta tecnología, se ha logrado formar membranas dinámicas en gran variedad de soportes orgánicos e inorgánicos, entre los que se pueden destacar: cerámica, acero inoxidable, incluso membranas de micro- y ultrafiltración y en membranas de ósmosis inversa (Ersahin *et al.*, 2012). Sin embargo, el costo de estos materiales es su principal desventaja.

Por lo consiguiente, los trabajos de investigación que se han realizado sobre la filtración dinámica en el tratamiento de aguas residuales se han enfocado en evaluar el comportamiento de materiales de soportes primarios como: mallas metálicas, materiales textiles tejidos y no tejidos. El objetivo es disminuir el monto de la inversión así como los gastos de operación y mantenimiento para que esta tecnología pueda ser implementada en pequeñas instalaciones donde existen restricciones económicas. Por lo general se usan módulos de membranas sumergidas de tipo plano (Tabla 1.3 y Tabla 1.4), probablemente por su fácil construcción y operación (Ersahin *et al.*, 2012).

Otro de los beneficios que brinda utilizar materiales porosos, es que el sistema de filtración dinámica puede ser operado solo por gravedad, ya que una bomba de succión no es necesaria para alcanzar valores de flux altos (80 L/m² h). Kiso y colaboradores (2005) operaron con columnas de agua entre 0.5-2 m mientras que otros estudios ha logrado operar biorreactores de membranas dinámicas con columnas inferiores a 0.5 m (Ersahin *et al.*, 2012). Lo anterior representa un gran potencial para esta tecnología, debido a que se podría implementar este tipo de sistemas en comunidades rurales donde no se cuenta con suministro eléctrico o bien los recursos son escasos, permitiendo así a los habitantes tratar sus aguas residuales e incluso poder reutilizarlas para otros fines.

1.9 Etapas de filtración

La filtración con membranas dinámicas se puede dividir en tres etapas principales (Ersahin *et al.*, 2012; Loderer *et al.*, 2013):

- 1) Etapa de formación de la membrana secundaria. Se observa un decremento del flux, en el caso de operar el sistema a presión constante, indicando que se está formando la membrana dinámica. En este periodo el permeado puede tener una alta concentración de sólidos en suspensión debido al paso de flóculos de lodo por los poros de gran tamaño del soporte primario. Para asegurar una buena calidad del efluente, durante esta etapa se suele recircular el permeado al reactor.
- 2) Etapa de filtración estable. Durante esta etapa es cuando se logra una alta remoción de sólidos en suspensión, obteniéndose un permeado de calidad comparable al obtenido en la micro- y ultrafiltración. El término filtración efectiva, describe el periodo durante el cual se obtiene permeado con baja concentración de sólidos suspendidos y además éste se produce en cantidad suficiente para favorecer la rentabilidad del proceso.
- 3) Etapa de retrolavado. Una vez que la membrana se ha taponado casi por completo y su desempeño ha disminuido considerablemente, se debe realizar una limpieza para reiniciar el proceso de filtración. La frecuencia de aplicación del método de limpieza, depende de las condiciones de operación, pero de acuerdo a trabajos realizados el taponamiento total del filtro se puede alcanzar después de 3 a 6 semanas de operación (Loderer *et al.*, 2013).

1.10 Flux y resistencia en la filtración con membranas dinámicas

El flux de una membrana, es volumen de fluido que permea a través de una unidad de área de membrana por unidad de tiempo, el cual de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades se representa como $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) o m/s ; sin embargo, es comúnmente expresado en $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$. Para cualquier proceso que involucre membranas, los elementos clave se refieren a la influencia de los siguientes parámetros sobre el flux de permeado:

- La resistencia de la membrana
- La fuerza impulsora por unidad de área
- Las condiciones hidrodinámicas en la membrana: interfase líquida
- El taponamiento y posterior limpieza de la superficie

De acuerdo a la ley de Darcy, el flux puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_{cp} + R_p + R_t)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde J es el flux de permeado producido (m/s), ΔP es la diferencia de presión que propicia el paso del material a través del medio poroso (Pa), μ corresponde a la viscosidad (Pa s), R_m es la resistencia interna de la membrana (m^{-1}), R_{cp} es la resistencia de la capa de concentración y polarización (m^{-1}), R_p es la resistencia debido al bloqueo interno de los poros (m^{-1}) y R_t es la resistencia de la torta o capa membrana formada por la acumulación de material particulado sobre la superficie de la membrana (m^{-1}).

En el contexto de filtración dinámica, es posible simplificar el término que representa a la resistencia total en la ecuación 1, ya que debido a las características de este proceso de filtración, pueden despreciarse la resistencia de la capa de concentración y polarización así como la resistencia debida al bloqueo interno de poros, ya que la resistencia intrínseca del material poroso y la resistencia aportada por la formación de la membrana secundaria impactan de manera mayoritaria el proceso. Por consiguiente, la ec. 1 se puede expresar de la siguiente forma:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_t)} \quad \text{Ec. (2)}$$

Incluso se podría despreciar el término R_m , porque de acuerdo al trabajo de Jeison y colaboradores (2008), la resistencia asociada a la membrana dinámica es mucho mayor que la intrínseca del material poroso utilizado como soporte primario.

1.11 Trabajos existentes en biorreactores anaerobios de membranas

Como se puede observar en la Tabla 1.3, son pocos los trabajos en los que se ha analizado el comportamiento de las membranas dinámicas acopladas a reactores anaerobios. Por lo general son experimentos a escala laboratorio y en algunos de ellos se han encontrado resultados contradictorios, principalmente dificultad para estabilizar la filtración y obtener valores de flux altos (Meng *et al.*, 2009). Por ejemplo, Ho y colaboradores (2007), Jeison y colaboradores (2008) y An y colaboradores (2009) solo pudieron alcanzar valores bajos de flux ($\leq 5 \text{ L/m}^2\text{h}$) que impedirían la aplicación de las membranas dinámicas en este tipo de reactores; sin embargo, Zhang y colaboradores (2010) estudiaron la formación de la membrana dinámica en la parte superior de un reactor UASB que trata aguas residuales municipales y reportaron un flux de $65 \text{ L/m}^2\text{h}$ (ver Tabla 1.4). Por otra parte, en varios de los trabajos enlistados en la Tabla 1.4, sus autores concuerdan en que la resistencia al filtrado de la membrana secundaria es mucho más alta que la resistencia intrínseca que presentan los materiales utilizados como soportes primarios.

Tabla 1.3. Recopilación de condiciones de operación de biorreactores anaerobios con membrana dinámica (Adaptada de (Ersahin *et al.*, 2012)).

Configuración del módulo de membrana	Volumen de reactor (L)/ Temperatura (°C)	Sustrato	Calidad del permeado (gSS/L)	Remoción de DQO (%)	Referencia
Corriente lateral /Tubular	n.d./25	agua residual sintética	9.6-12.5	<90	(Ho <i>et al.</i> , 2007)
Sumergida/ plana	3/30	agua residual sintética	17.5	n.d.	(Jeison <i>et al.</i> , 2008)
Sumergida/ plana	3/55	agua residual sintética	7.2	n.d.	(Jeison <i>et al.</i> , 2008)
Sumergida/ plana	3/30	agua residual sintética	25.6	n.d.	(Jeison <i>et al.</i> , 2008)
Sumergida/ tubular	12.9/15-20	agua residual municipal	n.d.	70	(An <i>et al.</i> , 2009)
Sumergida ^b / plana	45/10-15	agua residual municipal	n.d.	57.3	(Zhang <i>et al.</i> , 2010)
Sumergida ^b / plana	45/10-30	agua residual municipal	n.d.	63.4	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)
Sumergida/ plana (dos lados filtración)	6.8/35.7	agua residual sintética	7.4	99.1	(Ersahin <i>et al.</i> , 2013)
Sumergida zona sedimentación /plana	n.d.	agua residual municipal	1-2	79.4	(Ma <i>et al.</i> , 2013)
Externa/ plana cross-flow	0.898/35	agua residual sintética	n.d.	65-92	(Alibardi <i>et al.</i> , 2014)
Sumergida zona sedimentación /plana	48/37	lixiviados	n.d.	62.2	(Xie <i>et al.</i> , 2014)

^a n.d.: no disponible

^b: sumergida en la parte superior de un UASB

Tabla 1.4. Recopilación de información sobre características de los soportes de membranas dinámicas utilizadas en biorreactores anaerobios (Adaptada de Ersahin *et al.*, 2012).

Configuración del módulo de membrana	Material de soporte	Tamaño de poro (μm)	Flux ($\text{L}/\text{m}^2\text{h}$)	Método recuperación flux	Área efectiva de filtrado m^2	Referencia
Corriente lateral /Tubular	No tejido (polipropileno)	12	4-12	Retrolavado con permeado Frecuencia: cada 4-10 días	0.015	(Ho <i>et al.</i> , 2007)
Sumergida/plana	poliéster	20	0.5-3	Burbujeo biogás	0.0188	(Jeison <i>et al.</i> , 2008)
Sumergida/plana	No tejido (polipropileno)	30	3	Burbujeo biogás	0.0188	(Jeison <i>et al.</i> , 2008)
Sumergida externa/plana	poliéster	15	0.5-3	Burbujeo biogás	0.0292	(Jeison <i>et al.</i> , 2008)
Sumergida/tubular	No tejido (tereftalato de polietileno)	0.64	5	2 h 0.5% v/p NaClO Frecuencia:15-30 días	0.98	(An <i>et al.</i> , 2009)
Sumergida ^b /plana	Malla dacrón	61	65	n.d.	n.d.	(Zhang <i>et al.</i> , 2010)
Sumergida ^b /plana	Malla dacrón	61	65	Agua presión Frecuencia: cuando la PTM fuera < 25kPa (ciclos de 90 días promedio)	n.d.	(Zhang <i>et al.</i> , 2011)
Sumergida/plana (dos lados filtración)	Tejida-monofilamento (polipropileno)	10	2.6	Burbujeo de biogás y periodos de filtración de 190s y 35 s de retrolavado	0.018	(Ersahin <i>et al.</i> , 2013)
Sumergida zona sedimentación/plana	Malla dacrón	61	60	Agua presión Frecuencia: cuando la PTM fuera <35kPa (ciclos de 35 días promedio)	0.081.	(Ma <i>et al.</i> , 2013)
Externa/plana cross-flow	Malla monofilamento, Poliamida-nylon	200		n.d.	0.004	(Alibardi <i>et al.</i> , 2014)
Sumergida zona sedimentación/plana	Malla dacrón	40	6	Agua presión	n.d.	(Xie <i>et al.</i> , 2014)

^a n.d.: no disponible

^b: sumergida en la parte superior de un UASB

En su trabajo, Loderer y colaboradores (2013) expresan que el punto clave para la optimización de la filtración dinámica es comprender los principios que rigen la formación de la membrana secundaria. A través de este mismo estudio, identificaron que los principales problemas que se presentan en la experimentación es, por un lado, no lograr controlar la filtración y por otro lado, la reproducibilidad de los experimentos.

1.12 Métodos de limpieza aplicados a membranas dinámicas

De acuerdo a la literatura, para las membranas dinámicas no es necesario utilizar reactivos químicos de limpieza, siendo suficiente aplicar retrolavados (aire o agua) o cepillados. Pese a ello, dependiendo del material, los periodos de limpieza ocasionarán pérdida de calidad en el permeado (Ersahin *et al.*, 2012). Para los sistemas donde se tiene la membrana sumergida, se suele remover la capa taponante por medio de burbujeo de aire, o biogás en el caso de procesos anaerobios (Jeison *et al.*, 2008; Ersahin *et al.*, 2012). También en filtración sumergida en reactores anaerobios se ha optado por el tratamiento *ex situ*, mediante la aplicación de agua a presión sobre la capa de sólidos adherida al soporte primario. Los estudios reportan una adecuada recuperación de la permeabilidad, caracterizada por presión transmembrana (PTM) cercana a la inicial (Zhang *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2013). Sin embargo, hasta ahora son escasos los estudios que analizan este aspecto directamente, lo cual ocasiona que se utilicen métodos de limpieza inapropiados (Gahleitner *et al.*, 2014).

Por ejemplo, las limpiezas químicas convencionales no son recomendadas para la limpieza de los soportes primarios de las membranas dinámicas, porque éstos tienen poros de mayor tamaño y cualquier agente de limpieza líquido agregado, drena de forma rápida y no se logra una distribución homogénea ni se alcanza el tiempo de contacto necesario (Gahleitner *et al.*, 2014). Ante esta problemática Gahleitner y colaboradores proponen como alternativa utilizar agentes químicos de limpieza en forma de espumas, con lo cual se lograría minimizar la cantidad requerida.

En el año de 1997, Al-Malack y Anderson realizaron una investigación acerca de la eficacia de algunos métodos de limpieza para membranas dinámicas tubulares, el soporte primario utilizado en este trabajo fue poliéster. Entre los métodos utilizados figuran: periodos de relajación, cepillado, inyección de aire y paso de agua o ácido sulfúrico concentrado a través de la membrana; encontrando que el cepillado es el mejor método de limpieza pero requiere que se forme prácticamente de nuevo la membrana secundaria.

Por otra parte, González-Ortega en su trabajo de filtración dinámica sumergida sugiere que el método de limpieza se enfoque en controlar el espesor o bien retirar la capa taponante de la membrana dinámica, cuidando de no afectar, en medida de lo posible, la capa gel con el propósito de acortar el tiempo de formación de ésta y favorecer la filtración efectiva (González-Ortega, 2014).

Otro aspecto muy importante a considerar en la elección del método de limpieza, es el desgaste que sufre el material de soporte debido al proceso de recuperación de flux. Como se mencionó con anterioridad, mientras los retrolavados y burbujeos de aire prácticamente no impactan la durabilidad de las membranas convencionales, las limpiezas mecánicas, la aplicación de ultrasonido y la adición de químicos dañan en mayor proporción las membranas. Por

consiguiente, en el caso de la filtración dinámica en donde se utilizan como soportes primarios materiales de mayor porosidad y en algunos casos de menor resistencia, se debe prever que los métodos de limpieza convencionales pueden impactar de manera amplificada en las propiedades de estos materiales afectando directamente en la eficiencia del proceso.

Tabla 1.5. Trabajos recientes sobre métodos de limpieza de membranas dinámicas (MBR aerobios).

Configuración del módulo de membrana	Material de soporte	Escala	Método limpieza	Recuperación del flux de la membrana	Periodos de limpieza	Referencia
Sumergida /plana	Malla acero	Piloto	Retrolavado con aire durante 2 minutos ($22\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$)	Parcial	2-4 días	(Xue <i>et al.</i> , 2010a)
Sumergida /plana	Malla acero	Piloto	Retrolavado con agua a presión	100%	25-35 días	(Xue <i>et al.</i> , 2010a)
Sumergida/ tubulares	Poliéster	Piloto	Ultrasónica-retrolavado con permeado	Satisfactoria (periodos cortos exposición)	18-20 días	(Loderer <i>et al.</i> , 2013)
Sumergida /plana	Poliéster	Piloto	Limpieza química con espuma 270mg NaOCl/L	Satisfactoria	18 día	(Gahleitner <i>et al.</i> , 2014)
Sumergida /plana	Malla acero inoxidable	Laboratorio	-9 min filtración, 1 min relajación -Retrolavado con aire al alcanzar 40kPA	Satisfactoria	40-120 horas	(Chu <i>et al.</i> , 2014)

En la Tabla 1.5 se concentra información de interés de algunos trabajos actuales que analizaron algunas metodologías de limpieza de las membranas dinámicas, pero para biorreactores aerobios, la cual se incluye al ser la única disponible para filtración dinámica. Estos estudios analizan variaciones de los métodos convencionales, como es el caso de la limpieza química con hipoclorito de sodio o retrolavados, encontrando en la mayoría buenos resultados al recuperar casi en su totalidad el flux inicial y mantener periodos de operación entre limpiezas alrededor de 20 días.

Con el propósito de complementar la información proporcionada, a continuación se detallan los métodos de limpieza que se utilizaron en los trabajos enlistados en la Tabla 1.4, que corresponden a investigaciones que han analizado las membranas dinámicas acopladas a tratamientos anaerobios. En estos, la recuperación de flux se buscó en algunos casos mediante el burbujeo de biogás para sistemas de membrana sumergida, o bien mediante retrolavados y limpieza químicas.

Ho y colaboradores (2007) operaron una membrana externa de polipropileno con la cual obtuvieron un flux inicial de $12 \text{ L/m}^2\text{h}$ el cual disminuyó gradualmente a $5 \text{ L/m}^2\text{h}$, manteniéndose prácticamente constante durante 50 días. Durante este periodo, como estrategia de control de

la capa taponante y recuperación de flux se utilizaron retrolavados usando el permeado. Se aplicaron cuando el flux disminuía de 5 L/m²h que correspondió a una frecuencia de entre 4 y 10 días. Después de los 50 días, para mantener el mismo valor de flux se requirió mayor presión transmembrana.

En el trabajo de An y colaboradores (2009) se estudió el comportamiento de un módulo de membranas tubulares sumergidas, monitoreando el cambio de la presión transmembrana durante la filtración. Cuando ésta rebasaba los 30 kPa se realizaba una limpieza química *ex situ* utilizando una solución al 0.5% de hipoclorito de sodio durante 2 horas para retirar la biopelícula formada sobre la superficie del material no tejido y recuperar el flujo de permeado. Este procedimiento lo realizaron con una frecuencia que varió de 30 a 15 días.

De forma general, el tipo de sustancias que formen la membrana secundaria y la resistencia de los materiales de los soportes primarios definirán el método adecuado de limpieza y la frecuencia en el que deberá ser aplicado.

1.13 Trabajo previo dentro del grupo de investigación

Dentro del Grupo de Investigación de Procesos Anaerobios (GIPA) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se está desarrollando la línea de investigación de membranas dinámicas para tratamiento de efluentes anaerobios.

En un inicio, de forma paralela se realizaron dos tesis de maestría, la principal diferencia entre ellas es que en la primera de éstas se trabajó con una configuración de membrana sumergida lateral, mientras que en la segunda las membranas se colocaron sumergidas en la zona de sedimentación del reactor UASB. En ambas investigaciones se trabajó a presión constante, pero en cada caso se experimentó con diferentes alturas de columna de agua y distintos materiales de soporte primario. A continuación se presenta un resumen de cada uno de los trabajos así como de los hallazgos que sirven de base para la presente investigación.

Membranas sumergidas en cámara lateral (Díaz Marcelín, comunicación personal). En este estudio se trabajó con una configuración de membrana sumergida en un tanque lateral y con un módulo de tipo hoja plana a presión constante por columna de agua (ver Figura 1.3 y Figura 1.4). Se caracterizaron siete materiales de soporte primario de tipo textil comercial e industrial los cuales se enlistan en la Tabla 1.6. De acuerdo con sus características, se decidió evaluar el desempeño de cuatro de ellos (tela comercial de poliéster, tela industrial de polipropileno, malla de acero inoxidable y tela compuesta de polipropileno y poliéster) mediante pruebas de filtración de 33 horas de duración. El material recomendado fue el compuesto de *polipropileno - poliéster* y el mejor valor de turbiedad obtenido con esta tela fue de 4 NTU con 8 mg/L de SST, alcanzando un flux de 10 L/m²h a las 170 horas de operación.

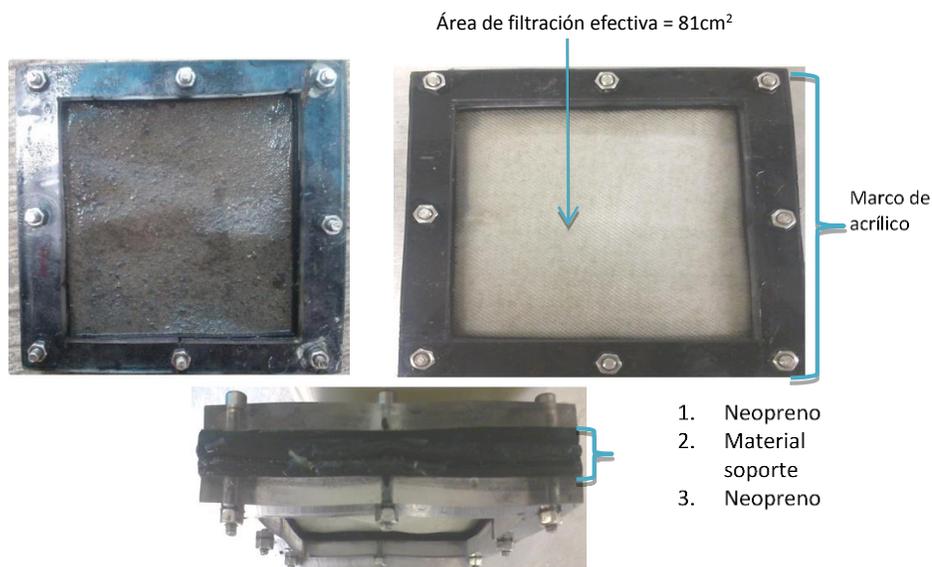


Figura 1.3. Módulo filtración



Figura 1.4. Montaje experimental del sistema de filtración dinámica con membranas sumergidas en tanques laterales.

Por otra parte, se realizó para los cuatro materiales seleccionados una optimización de tamaño de columna de agua; se probaron 2, 3 y 4 m, relacionando flux y calidad del agua con turbiedad. Para el caso del material recomendado en las pruebas de filtración, la columna de agua óptima fue de 3 metros.

Cabe destacar que con el material recomendado se identificó la formación de la membrana durante las primeras horas de filtración y con el transcurso del tiempo disminuyó la dispersión de los resultados de flux, turbiedad y sólidos suspendidos, logrando una filtración relativamente estable durante 8 días, con un flux aproximado de $10 \text{ L/m}^2\text{h}$. Sin embargo, es importante reconocer que el periodo de filtración evaluado es corto y el flux logrado es bajo en comparación con el obtenido con las membranas convencionales. Con base en ello, se concluye que se requiere profundizar la investigación atendiendo principalmente estos dos aspectos.

Tabla 1.6. Materiales caracterizados (Díaz Marcelín, comunicación personal).

Nombre comercial	Material	Uso
Paladín*	poliéster	textil
Fany	poliéster	textil
Polipropileno - poliéster *	63%Polipropileno 37%poliéster	textil
Polipropileno	polipropileno	textil
Malla metálica *	acero inoxidable (40 μ m)	industrial
Lona 04	polipropileno	filtro prensa
Lona 05*	polipropileno	filtro prensa

*Materiales seleccionados para pruebas de filtración

Membranas sumergidas en el interior del reactor UASB (González-Ortega, 2014). Esta investigación analizó el comportamiento de las membranas dinámicas operando también en modo filtración sumergida, solo que en este caso, las membranas se ubicaron en la zona de sedimentación del reactor UASB. Se emplearon materiales textiles no tejidos de tipo industrial de polipropileno y poliéster. Para cada textil se estudiaron tres distintos tamaños nominales de poro (25, 50 y 100 μ m) y a su vez tres distintas presiones hidrostáticas (12.8, 19.2 y 25.6 kPa), equivalentes a 1.28, 1.92 y 2.56 metros de columna de agua.

Los soportes consistieron en círculos de cada uno de los textiles que se ajustaron en los extremos de tuberías de PVC de 2 pulgadas de diámetro, que a su vez se sujetaron a un eje para ser sumergidos dentro del reactor a las tres distintas profundidades estudiadas de 1.28, 1.92 y 2.56 m (ver figura 1.5).

Para la recolección del permeado, en el interior de los tubos de PVC (tubos de recolección) se introdujo una manguera con el propósito de conducir por succión el filtrado desde el fondo del tubo de recolección hasta la zona de toma de muestra mediante una bomba peristáltica. Es de resaltar que la fuerza impulsora del sistema en la filtración dinámica fue la diferencia de presiones generada entre la columna de agua y el interior del tubo, el cual una vez formada la membrana dinámica se encontraba a presión atmosférica. También es importante comentar que debido a la relativamente alta porosidad de los materiales estudiados, tuvieron que transcurrir aproximadamente 16 horas para que se formara una capa de sólidos sobre el soporte que alterara la permeabilidad y evitara la inundación del tubo recolector, de tal forma que, solo hasta ese momento se alcanzaba la presión transmembrana de diseño. Por consiguiente, las primeras horas se tuvo variación de la presión y una filtración a flux constante.

Los soportes fueron colocados en dirección normal al flujo ascendente del reactor y cada uno de ellos tuvo un área efectiva de filtración de 12.5 cm². Cada corrida tuvo una duración aproximada de cuatro semanas, la primera limpieza se aplicó al transcurrir 15 días y posteriormente cada 8 días hasta finalizar la prueba. Durante las cuatro corridas experimentales se monitoreó la

variación de la turbiedad, el flux del permeado, la demanda química de oxígeno total y soluble, y los sólidos suspendidos totales.

Bajo esta configuración y con respaldo estadístico, el material recomendado fue polipropileno con un tamaño de poro de 50 μm y una profundidad de 1.92 m (19.2 kPa). Si bien con este material y profundidad se obtuvieron buenos valores en cuanto a productividad (flux de 55 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$) y calidad de permeado (SST de 15 mg/L), no se logró estabilidad en el proceso. Es decir, pese a que durante la experimentación se lograron varios episodios filtración efectiva, no se logró mantener estas condiciones por más de 24 horas, por lo tanto esto continúa siendo un reto para recomendar este tipo de tratamiento.

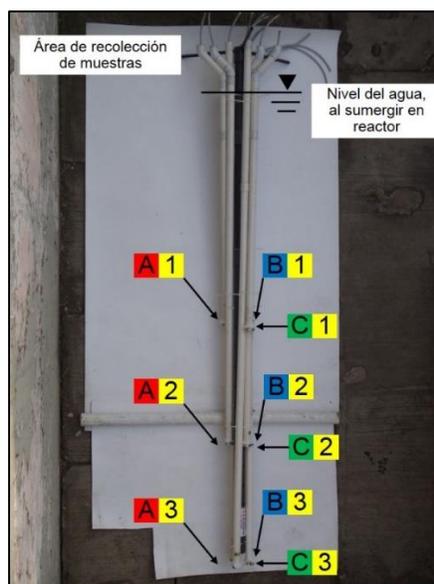


Figura 1.5. Montaje y distribución de membranas en la estructura sumergida en el reactor UASB (González-Ortega, 2014).

Tomando en consideración los dos trabajos experimentales previos, los aspectos a mejorar y las recomendaciones que surgieron de cada uno de ellos (configuración, material de soporte primario y tamaño de columna de agua), el trabajo de tesis planteado en el presente documento pretende integrar los hallazgos y profundizar en el estudio, dando así continuidad a esta línea de investigación con el propósito de identificar cuál de las dos configuraciones y cuál de los dos materiales de soporte favorece la filtración dinámica.

CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS Y META DEL TRABAJO

2.1 Justificación

El estudio y el desarrollo de biorreactores anaerobios acoplados a membranas dinámicas presentan una gran área de oportunidad, debido a que los trabajos que existen son escasos y con alcances limitados (An *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010). En general, se remiten a operar a flux constante y a escala laboratorio; además no han profundizado en el estudio de métodos de limpieza como estrategia de control de la capa taponante.

Por consiguiente, además de incursionar en la aplicación de reactores anaerobios acoplados a un módulo de filtración a escala piloto, es necesaria la evaluación de las membranas dinámicas por periodos prolongados de filtración y la identificación de las condiciones que favorezcan la filtración efectiva.

2.2 Objetivo general

Evaluar el desempeño de una membrana dinámica que filtra un efluente de un reactor anaerobio alimentado con agua residual municipal durante periodos prolongados de operación.

2.3 Objetivos específicos

- Identificar el material de soporte primario y la configuración que permitan un mejor desempeño de la filtración dinámica.
- Evaluar el desempeño de una membrana dinámica sumergida en un efluente anaerobio durante periodos de filtración prolongados (semanas).
- Determinar el método de limpieza que favorezca el mayor tiempo de filtración efectiva.

2.4 Metas del trabajo propuesto

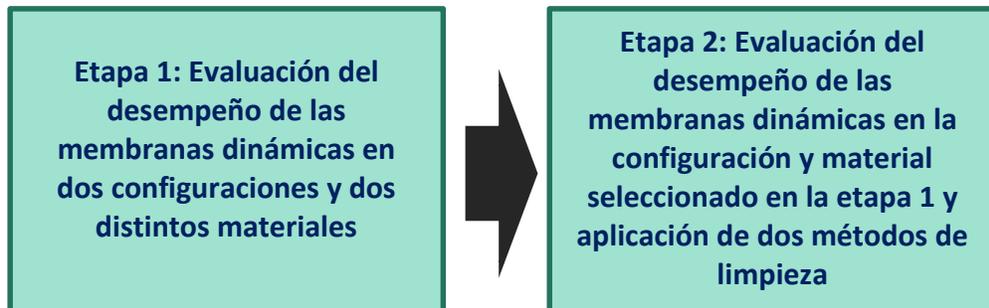
Identificación de la configuración y material de soporte que junto con un método de limpieza permitan una buena remoción de contaminantes presentes en agua residual municipal tratada por vía anaerobia, que sirva de base para la futura implementación de este tipo de tecnología.

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de esta investigación se trabajó con el efluente de un reactor UASB piloto que se ubica en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México. El reactor consiste en una columna de PVC de 3.85 metros de altura, un diámetro de 0.5 m y un volumen útil de 0.7 m³. El UASB es alimentado con agua residual proveniente del campus universitario y opera a un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 8 horas.

Dada la importancia del reactor UASB en el presente trabajo experimental, se evaluó continuamente el desempeño del sistema, con base en muestras recolectadas en el influente y en la zona superior del reactor UASB (efluente); la evaluación se llevó a cabo realizando los siguientes análisis: Turbiedad (HI93414 Hanna Instruments), Demanda Química de Oxígeno (DQO) total y soluble, así como sólidos suspendidos totales (SST) de acuerdo a los métodos establecidos para el análisis de agua y agua residual de la Asociación Americana de Salud Pública (2130, 5220 D, 2540 D) (APHA, AWWA, WEF, 2012). El monitoreo se realizó una vez por semana.

En lo que concierne al desarrollo experimental de esta investigación, la experimentación se dividió en dos etapas:



3.1 Etapa 1: Evaluación del desempeño de las membranas dinámicas en dos configuraciones y dos distintos materiales

En primera instancia se evaluó el desempeño de las membranas dinámicas en dos configuraciones:

- **Sumergida en una cámara externa.** Para realizar la filtración en esta configuración se utilizó una caja distribuidora para dirigir de forma equitativa el efluente del reactor UASB a dos cámaras externas, cada una con un volumen de 7 L, que trabajaron en paralelo y a una presión constante de una columna de agua de tres metros equivalente a 30 kPa (ver figura 3.2). Cada una de las cámaras contó con un módulo de la membrana, el cual se encontraba sumergido en el efluente del UASB (figura 3.1). Para este caso, el módulo de membrana tipo hoja plana fue construido en acrílico, utilizando neopreno como empaque periférico (ver figura 3.3), el área efectiva de filtración fue de 81 cm². Con el propósito de monitorear la calidad del sobrenadante en contacto con la membrana, la cámara externa tuvo un punto de muestreo específico para este propósito (ver figura 3.1), y otro punto más para permitir la salida por gravedad del permeado.

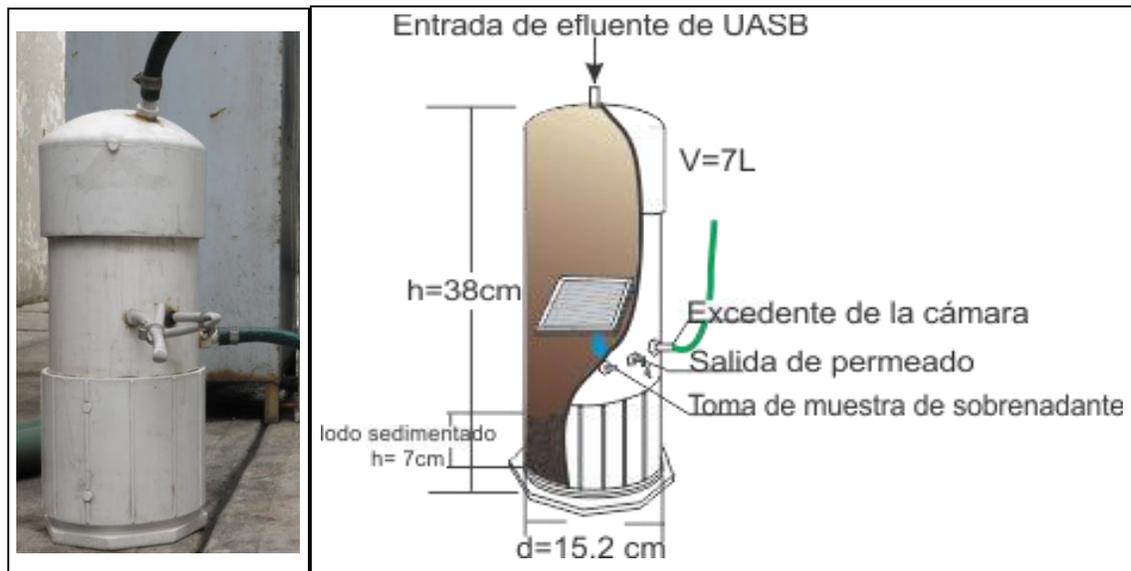


Figura 3.1. a) Fotografía y esquema de una cámara externa.

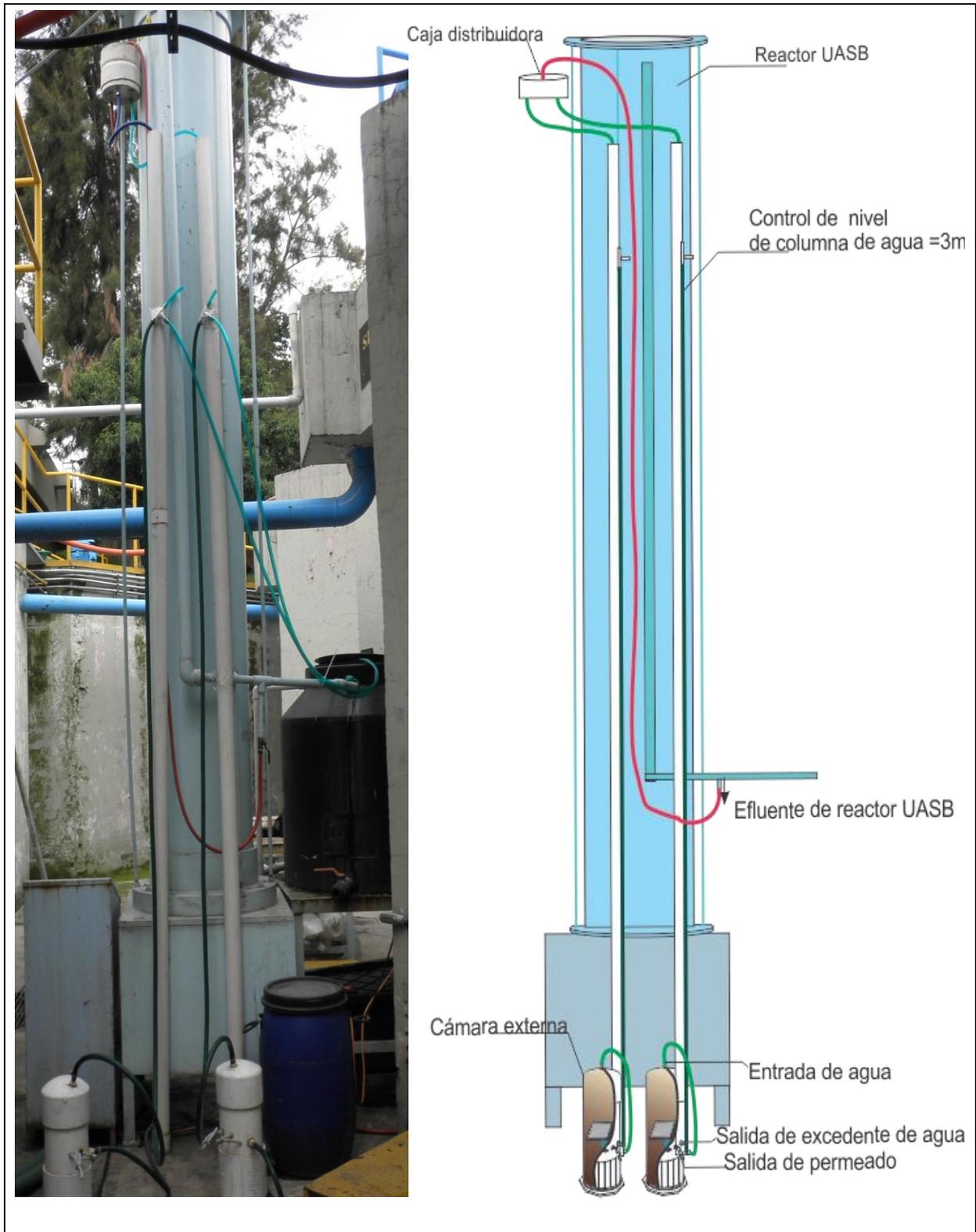


Figura 3.2. Fotografía y esquema de sistema de filtración dinámica sumergida en cámara externa.

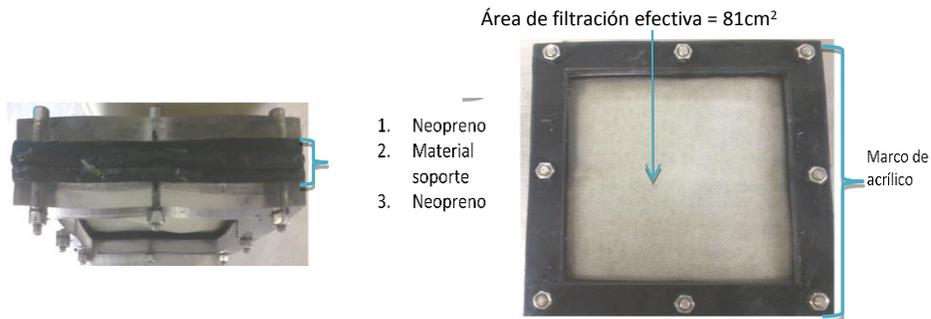


Figura 3.3. Módulo utilizado en la filtración dinámica en cámaras externas.

- Sumergida en zona de sedimentación del reactor UASB.** Para este caso, también se operó a presión constante solo que el módulo de filtración se encontraba sumergido dentro del reactor UASB a una profundidad de 1.92 m (que corresponde a una presión hidrostática de 19.2 kPa) y se utilizó un tubo de PVC conectado directamente al módulo de filtración con el propósito de recolectar el permeado, el cual se extrajo con ayuda de una bomba peristáltica (ver figura 3.5). Adicionalmente, también haciendo uso de una bomba peristáltica se tomó muestra del sobrenadante del reactor en contacto con la membrana tal como se muestra en la figura 3.5. El módulo consistió en un soporte de plástico rectangular adaptado a un marco de acrílico utilizando neopreno como empaque periférico (ver figura 3.4); el área efectiva de filtración fue de 105 cm².

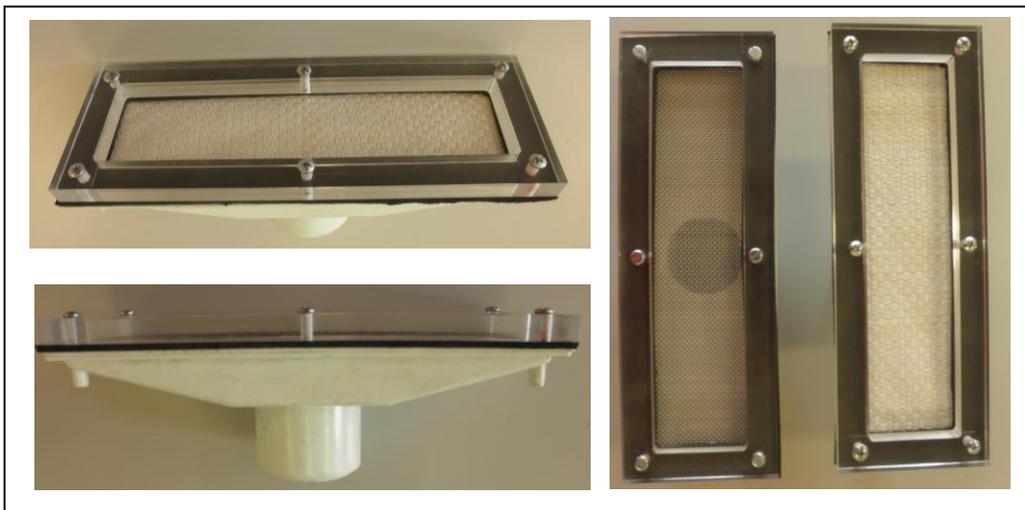


Figura 3.4. Módulo utilizado en la filtración dinámica sumergida en la zona de expansión de reactor UASB.

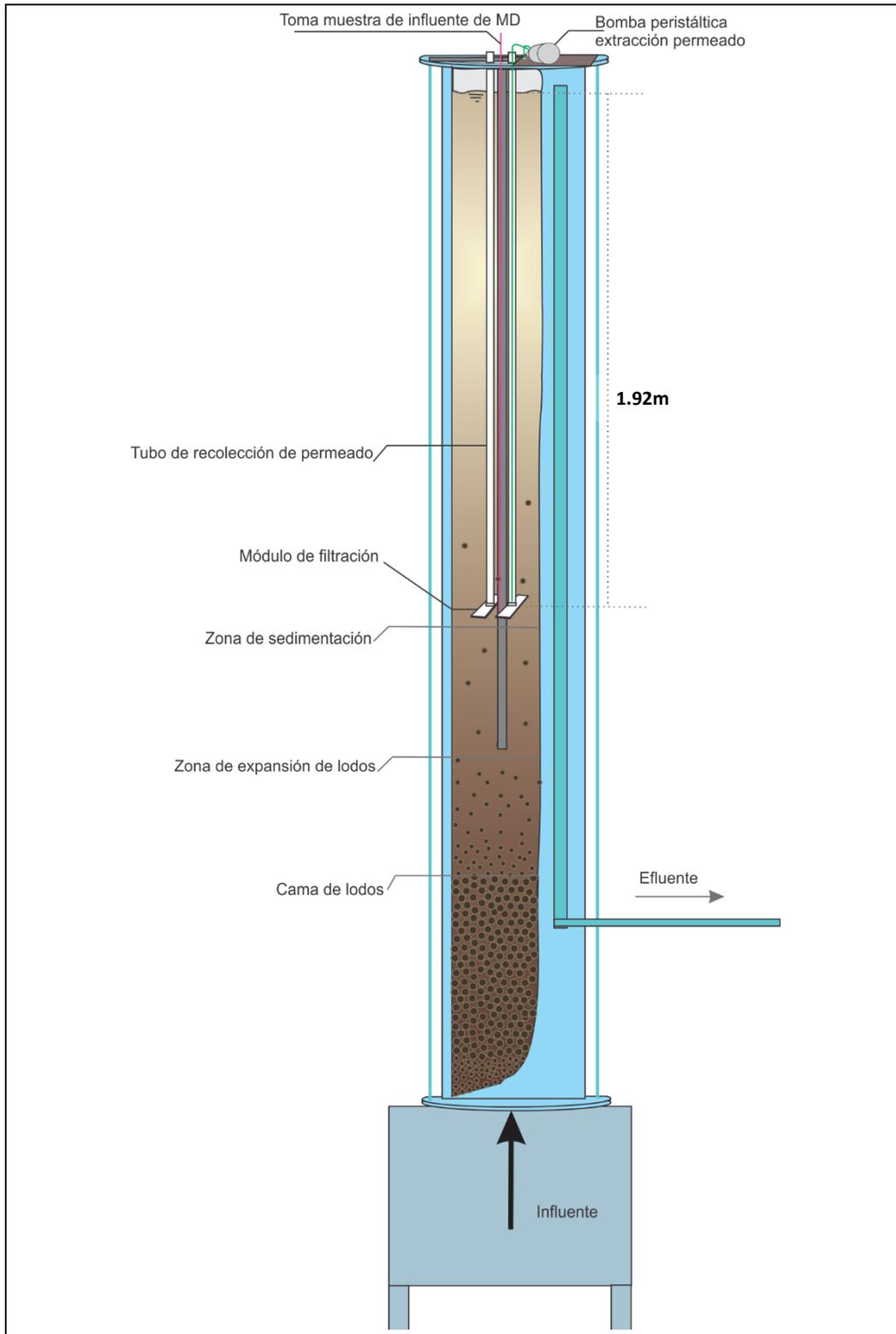


Figura 3.5. Esquema del sistema de filtración dinámica sumergida en zona de expansión de reactor UASB.

Adicionalmente, en cada una de las configuraciones se evaluó la formación de la membrana dinámica sobre dos distintos materiales de soporte primario. Los materiales utilizados fueron:

- Un material tejido con multifilamentos de uso textil compuesto de 63% polipropileno y 37% poliéster (**PP**) con nombre comercial “Nomad”.
- Polipropileno, textil no tejido de tipo industrial con un tamaño nominal de poro de 50 μm (**P**).

A manera de resumen, la Tabla 3.1 muestra el número de ensayos que conformaron la primera etapa de la presente investigación.

Tabla 3.1. Plan de experimentación de etapa 1.

Código	Configuración	Material soporte
RPP	Sumergida en zona de sedimentación del reactor UASB	Nomad:63% polipropileno-37% poliéster
RP	Sumergida en zona de sedimentación del reactor UASB	Polipropileno (50 μm)
CPP	Sumergida - cámara externa	Nomad:63% polipropileno-37% poliéster
CP	Sumergida- cámara externa	Polipropileno (50 μm)

Al inicio de esta etapa se realizaron pruebas preliminares con el propósito de explorar el comportamiento de los dos materiales en las dos distintas configuraciones. Cada 12 horas se colectaron muestras del sobrenadante y del permeado de cada membrana dando seguimiento a la variación del flux y de la turbiedad con respecto al tiempo (ver tabla 3.2) con el propósito de definir la frecuencia de muestreo adecuada para cada ensayo. Simultáneamente, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se establecieron los valores de flux y turbiedad (variables que asocian la productividad y calidad del permeado producido) que definieron el estado de filtración efectiva alineados con las especificaciones de reúso establecidas en la normatividad mexicana vigente (NOM-003-SEMARNAT-1997). La definición de estos valores no solo indicó cuándo detener la filtración o cuándo aplicar el método de limpieza, también determinó la duración del periodo de filtración efectiva que a su vez se utilizó como criterio de selección del ensayo a evaluar durante la etapa 2 de esta investigación.

Tabla 3.2. Puntos de muestreo y análisis realizados.

Configuración	Punto de muestreo	Análisis
Sumergida en una cámara externa	Permeado de las dos membranas	Flux Turbiedad
	Sobrenadante de las dos membranas	Turbiedad
Sumergida en zona de sedimentación del reactor UASB	Permeado de las dos membranas	Flux Turbiedad
	Sobrenadante	Turbiedad

Una vez establecida la frecuencia de toma de muestra y los criterios de filtración efectiva, se evaluaron bajo estos criterios los ensayos desglosados en la Tabla 3.1, con el objetivo de identificar la configuración y el material para conseguir un mejor desempeño en la filtración dinámica, es decir, aquellos que mantuvieran mayores periodos de filtración efectiva. Otro propósito de estos experimentos, fue lograr la reproducibilidad de los resultados en las corridas de filtración dinámica. Al igual que en las pruebas preliminares, se dio seguimiento a la variación del flux y de la turbiedad con respecto al tiempo en los puntos especificados en la Tabla 3.2. De cada tratamiento se realizaron en total siete corridas experimentales, en cada prueba se utilizó material de soporte nuevo y cada una tuvo una duración de 300 horas de filtración.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta primera etapa, se seleccionó un ensayo con el propósito de evaluar su desempeño en un periodo de tiempo mayor en la segunda etapa de este trabajo.

3.2 Etapa 2: Evaluación del desempeño de la filtración dinámica durante periodos prolongados en el ensayo recomendado.

A lo largo de la segunda etapa se evaluó el desempeño de la filtración dinámica trabajando en la configuración y con el material de soporte seleccionados durante la primera etapa. Cabe mencionar que para evaluar el desempeño de la filtración dinámica durante periodos largos (semanas) fue necesario aplicar un método de limpieza para restablecer el flux de la membrana cuando éste disminuyó drásticamente, es decir, cuando ya no se cumplían las condiciones de filtración efectiva. Por ello, también se evaluaron dos métodos de limpieza que se describen en esta sección.

Se dio seguimiento a la variación del flux, la turbiedad, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) total y soluble, tanto en el sobrenadante como en el permeado, con la frecuencia que se determinó en la etapa 1. Cuando se alcanzó el valor de flux especificado como criterio de limpieza (establecido en los resultados de la etapa 1) y este valor se mantuvo por debajo del criterio por 24 horas se procedió a aplicar el método de limpieza a la membrana y posteriormente se inició un nuevo ciclo de operación. Se analizaron ciclos continuos a lo largo de 96 días de experimentación.

En esta segunda etapa se observó el efecto de dos métodos distintos de limpieza en la filtración dinámica, el primero de ellos consistió en un retrolavado y el segundo en la aplicación frontal de agua a presión. El primero de ellos buscó remover parcialmente la membrana secundaria mientras que el segundo buscó retirar la mayor parte de ella.

Para la selección de los métodos de limpieza se buscó minimizar el requerimiento energético, menor demanda de insumos y que fueran de fácil aplicación. Además, se buscó contrastar el efecto de la remoción total contra la remoción parcial de la membrana sobre la filtración dinámica.

En ambos casos se detuvo la corrida de filtración y se procedió a realizar la limpieza de la membrana sin desmontar el soporte primario del módulo. A continuación se detalla la metodología que se aplicó para cada método de limpieza:

- Limpieza por retrolavado

Por la toma donde se colecta normalmente el permeado se ingresó a contraflujo agua limpia proveniente de la red municipal con un caudal de 0.2 L/s correspondiente a un flux inverso de 9.26×10^4 L/m²h. Estas condiciones se mantuvieron durante 6 minutos. La duración se estableció con base en experimentos previos donde se identificó que a este tiempo todavía se mantenía adherida parte de la torta taponante.

- Limpieza con agua a presión: aplicación frontal.

Se utilizó una pistola de agua a presión que cuenta con siete distintos modos de riego (ver figura 3.6). La aplicación del agua a presión fue frontal, es decir del lado del soporte en el que se tiene la membrana dinámica, bajo el patrón de riego denominado "FAN" y con un ángulo de

inclinación de 45° con respecto al plano de la membrana y a 30 cm de distancia (ver figura 3.7). Este tipo de limpieza se aplicó en un barrido longitudinal de derecha a izquierda durante 1 minuto, manteniendo las condiciones especificadas en la Tabla 3.3.



Figura 3.6. Fotografía de pistola de agua a presión, se resalta patrón de riego tipo FAN.

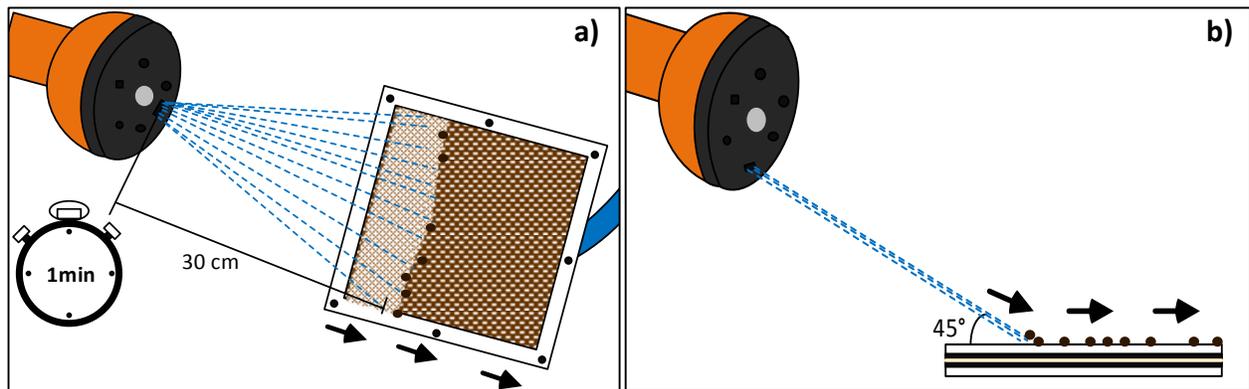


Figura 3.7. Esquemas del procedimiento de limpieza con agua a presión: aplicación frontal, a) tiempo, distancia y modo de riego, b) ángulo de inclinación con respecto al plano de la membrana.

Tabla 3.3. Especificaciones de los métodos de limpieza.

Parámetro	Retrolavado	Agua a presión: aplicación frontal
Q (L/s)	0.2	0.1
Q (L/h)	750	382.5
Modo de aspersión	NA	Fan (sección rectangular)
Flux (L/m ² h)	9.26x10 ⁴	3.83x10 ⁷
Distancia (cm)	NA	30
Ángulo con respecto al plano	NA	45°
Tiempo de aplicación (min)	6	1

*NA: no aplica

Es importante destacar, que el efecto de los métodos de limpieza en la filtración dinámica se analizó en corridas experimentales simultáneas para que ambos tratamientos estuvieran sometidos a las mismas variaciones de la composición del agua residual municipal y mismas variaciones meteorológicas. Adicionalmente, se llevó un registro de la temperatura ambiente, precipitación pluvial y caracterización del influente del reactor UASB. De igual forma, cabe mencionar que cada tratamiento contó con un duplicado, haciendo un total de cuatro ensayos.

Con el propósito de operar simultáneamente los ensayos planteados en el párrafo anterior, se construyó un sistema cuádruple de filtración dinámica sumergida. A continuación se describe el montaje experimental (figura 3.8 y 3.9) y como se operó a lo largo de la segunda etapa.

3.2.1 Descripción del sistema cuádruple de filtración dinámica sumergida

El efluente del reactor UASB se descargó en una columna central de PVC de 4 metros de altura y 15.2 centímetros de diámetro (6 pulgadas), de donde se distribuía equitativamente el agua a cuatro cámaras que se encontraban conectadas a la misma columna por tubería de PVC de media pulgada. Las cámaras tenían una altura de 33 cm y un diámetro de 15.2 centímetros, con un volumen útil de 6 litros. Cada una de las cámaras contaba con dos puntos de muestreo, el primero conectado al módulo de membrana y por donde se colectaba el permeado (figura 3.8, f), y el segundo donde se tomaba muestra del agua que ingresaba al módulo de filtración (g). Cabe mencionar que tanto la columna distribuidora como las cámaras contaban con una válvula de purga de lodos en la zona inferior (h).

La columna central tenía un rebosadero a 3 metros sobre el nivel donde estaba colocada la membrana, con el fin de mantener la presión de diseño a la que se deseaba operar y para permitir que el agua en exceso saliera y se dirigiera hacia el sedimentador secundario. Como medida adicional la columna contó con un medidor de nivel (ver figura 3.8, b).

Una modificación importante en este arreglo con respecto al utilizado en la etapa 1 fue la colocación de una válvula de aguja en la salida del permeado con el objeto de controlar el caudal las primeras horas de filtración, mientras se formaba la membrana secundaria y se reducía el flux lo suficiente para mantener la columna de agua de 3 metros. En el arreglo utilizado en la etapa 1, la columna se vaciaba durante los primeros minutos de la corrida de filtración ya que no había resistencia al flujo a través del textil, lo cual provocó la variación de la presión de operación en este primer periodo.

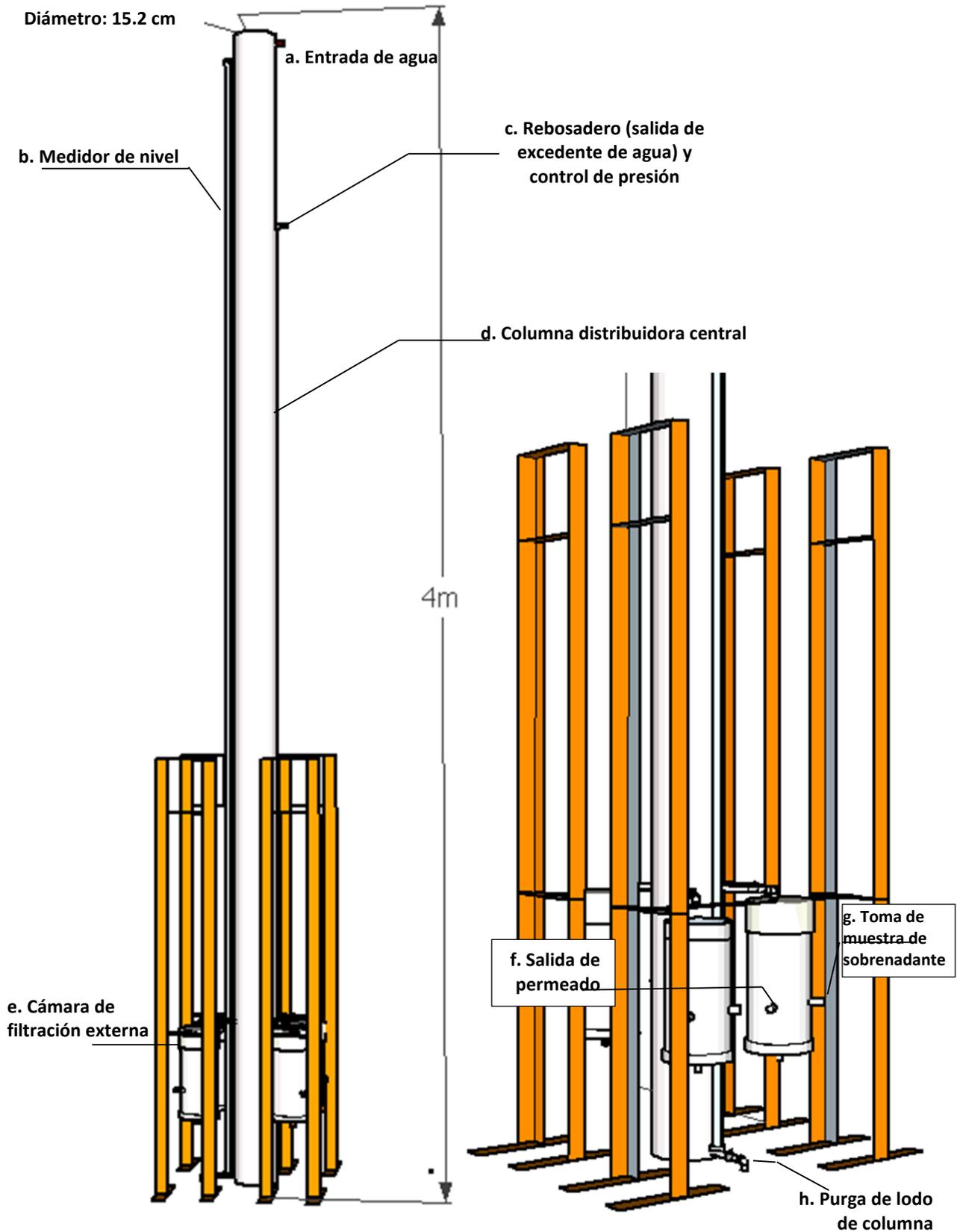


Figura 3.8. Esquema de sistema cuádruple de filtración dinámica sumergida en cámara externa.

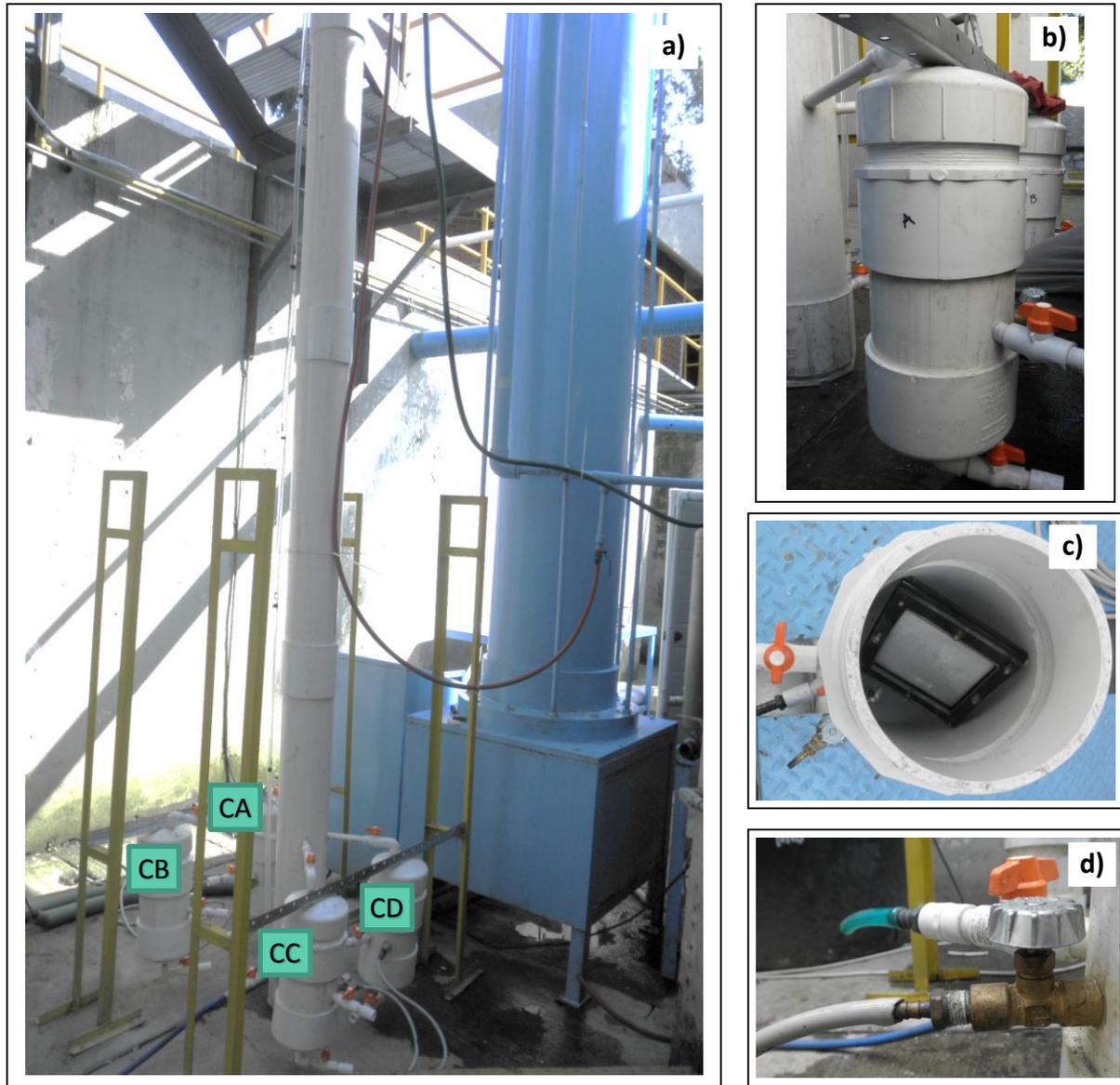


Figura 3.9. a) Fotografía del sistema cuádruple de filtración dinámica sumergida en cámaras externas, Etapa 2 b) cámara externa, c) módulo de membrana dentro de la cámara d) válvula de aguja para control del caudal de permeado.

Durante la etapa de formación de la membrana el sistema se operó de la siguiente manera:

En primer lugar se cerraron todas las válvulas de salida y se esperó a que se llenara el sistema con el efluente del reactor UASB y alcanzara el nivel de 3 m de columna de agua. A continuación, se fijó la abertura de válvula apropiada para mantener un flux de $2844 \text{ L/m}^2\text{h}$ correspondiente a un caudal por cámara de 0.38 L/min (6.4 mL/s). Durante las primeras horas se controló la salida de permeado porque de lo contrario se hubiera despresurizado el sistema, dado que el caudal de salida de los permeados era muy elevado (a causa de la alta porosidad del soporte primario limpio) con respecto al caudal de entrada de agua a la columna de distribución que era de 1.5 L/min . El procedimiento que se siguió durante las primeras horas es el que se ejemplifica en el diagrama de la figura 3.10, que consistió básicamente en medir el caudal de permeado cada 15 minutos durante las primeras 3 horas de filtración y posteriormente a las 6, 9, 20, 26 horas. La válvula se abrió completamente cuando el caudal fue menor a 6.4 mL/s , comenzando así la operación a presión constante a 30 kPa .

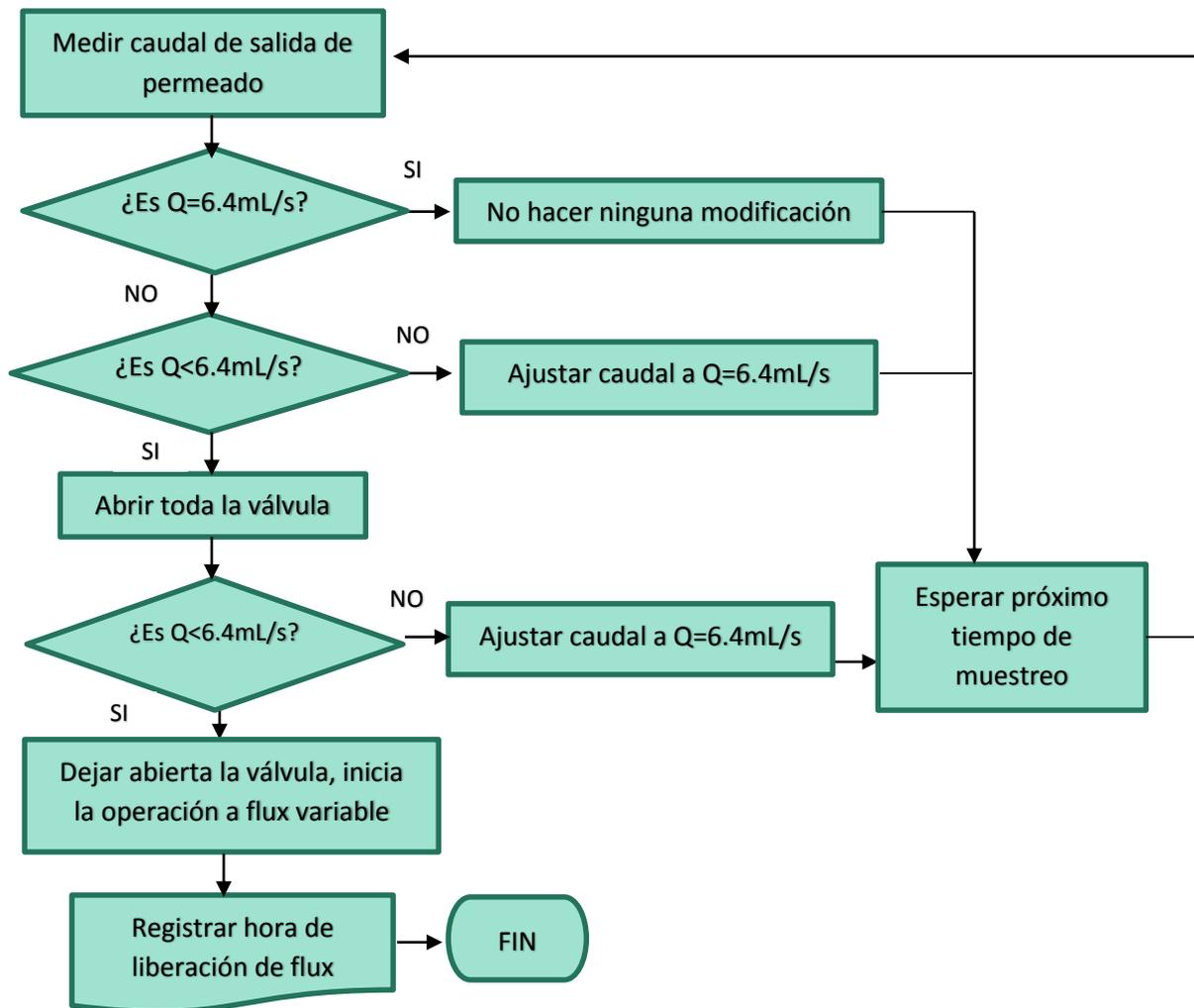


Figura 3.10. Diagrama de operación en la etapa de flux constante

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la etapa 1: Evaluación del desempeño de las membranas dinámicas en dos configuraciones y dos distintos materiales

Al inicio de esta etapa se realizaron pruebas preliminares de filtración en las dos configuraciones y con los dos materiales a analizar. Con base en estos experimentos y a la poca variación entre las mediciones que se tomaron cada 12 horas tanto de flux como de turbiedad, se definió que era apropiado realizar la toma de muestra cada 24 horas. Con respecto a la calidad de permeado, se identificó que los cuatro tratamientos fueron capaces de producir permeados de buena calidad (aunque de forma intermitente), caracterizados por valores de turbiedad menores a 15 NTU y sólidos suspendidos totales menores a 20 mg/L. Sin embargo, solo tres de los cuatro tratamientos lograron producir permeado a valores de flux mayores de 10 L/m²h (más adelante se explicará por qué se considera inapropiado este valor).

Los parámetros de calidad fueron definidos considerando que la normatividad mexicana vigente establece que para reutilizar el agua tratada se debe cumplir con los límites máximos permisibles enlistados en la tabla 4.1. Es importante resaltar que debido a la información de remoción obtenida en estudios previos con membranas dinámicas, la presente investigación solo se enfocó en cumplir con el parámetro de sólidos en suspensión. Por consiguiente, se consideró el caso más estricto que contempla contacto directo, donde el efluente debe cumplir con una concentración menor a 20 mg SST/L (NOM-003-SEMARNAT-1997, 1997). No se fijaron criterios más estrictos debido a que hasta el momento no se cuenta con suficiente evidencia de que la filtración dinámica tenga la capacidad de competir en cuanto a calidad de permeado con las membranas convencionales (González-Ortega, 2014). Además, uno de los principales propósitos de profundizar en la investigación de la filtración dinámica en el grupo de trabajo, es generar una propuesta viable de tratamiento de aguas residuales que abarate la inversión y operación de los MBR, por lo que resulta suficiente cumplir con la normatividad de reúso de agua en el país.

Tabla 4.1. Límites máximos permisibles de contaminantes de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales NMP/100mL	Huevos de helminto (h/L)	Grasas y aceites (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
Servicios al público con contacto directo	240	1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	5	15	30	30

Con respecto a la productividad, en primer lugar se tomó en consideración que la literatura de membranas convencionales y dinámicas establece que valores de flux por debajo de los 10 L/m²h limita la rentabilidad de esta tecnología (Breu *et al.*, 2008; Ersahin *et al.*, 2012; Le-Clech, 2010), y en segundo lugar, que el valor de flux de 25 L/m²h corresponde a uno de los estándares de la industria de los biorreactores de membrana y a su vez es el límite superior del intervalo de flux de los MBR que operan a presiones menores de medio bar (equivalente a menos de 5 m de columna de agua) (Judd, 2006; Water Environment Federation, 2012). Por consiguiente, para asegurar la alta productividad de permeado obtenido por las membranas dinámicas se decidió establecer 25 L/m²h como el valor mínimo de flux aceptable.

Es de resaltar que tanto la calidad como la productividad del permeado son dos aspectos fundamentales a considerar en una filtración, y deben considerarse a la par, porque no resulta rentable tener permeado de excelente calidad si no se logra producir suficiente, o bien el caso contrario, que se obtenga mayor recuperación del agua filtrada pero con muy poca eficiencia en cuanto a remoción de contaminantes.

En resumen, se decidió establecer que para las corridas experimentales subsecuentes serían desempeños aceptables solo cuando se presentaran valores de turbiedad menores a 15 NTU o menores de 20 mg SST/L y valores de flux mayores o iguales a 25 L/m²h, y que en el momento en el que el flux decayera por debajo de este valor se debería aplicar limpieza a la membrana.

Una vez definida la periodicidad de muestreo y la duración de cada prueba, se procedió a realizar las siete corridas experimentales de cada tratamiento. A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron de acuerdo a la configuración de la membrana analizada.

4.1.1 Membrana dinámica sumergida en una cámara externa: textil polipropileno-poliéster

En la figura 4.1 se puede observar la variación del flux con respecto al tiempo, notándose una clara disminución del flux durante las primeras 24 horas de filtración seguida de una relativa estabilidad alrededor de un flux de 10 L/m²h durante las siguientes 288 horas.

Si bien la variación del flux en esta configuración concuerda con lo determinado previamente en el grupo de investigación, el comportamiento de la turbiedad es distinto debido a que no se logra mantener una buena calidad del permeado. Como se puede apreciar en la figura 4.2, varias mediciones presentaron valores menores a 15 NTU; sin embargo existió gran dispersión en los resultados.

Aun así, la razón principal por la que se decidió descartar este tratamiento fue por la baja producción de permeado, debido al criterio anteriormente presentado. Como se comentó, el flux decayó rápidamente en las primeras 24 horas de filtración, de tal forma que si se aplicara el criterio de limpieza establecido en esta investigación de 25 L/m²h, se requeriría limpiar la membrana a las 24 horas de filtración, momento en el cual no se habría obtenido un permeado de buena calidad, y si se esperara a obtener mejor calidad se sacrificaría la productividad del proceso, lo cual no es conveniente si se piensa en la implementación de la filtración dinámica a mayor escala.

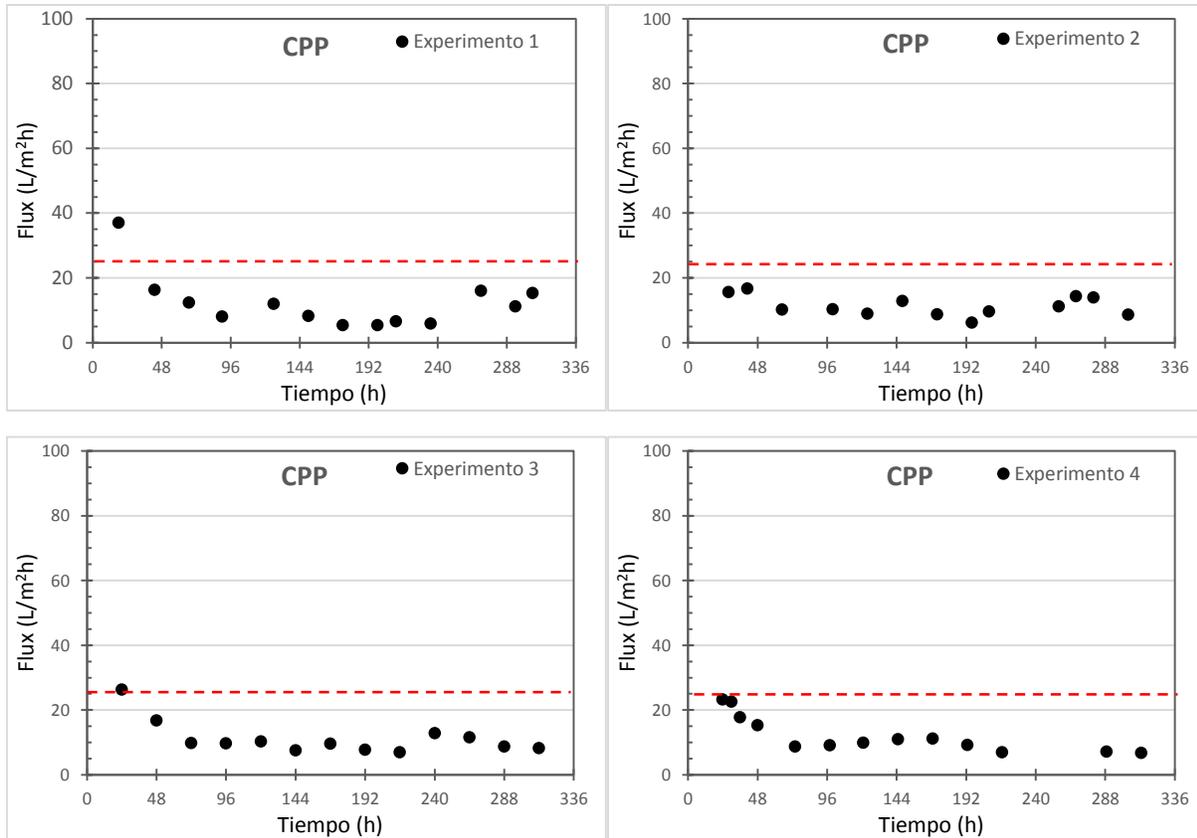


Figura 4.1. Variación del flux con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster, la línea punteada corresponde al flux mínimo establecido 25 L/m²h.

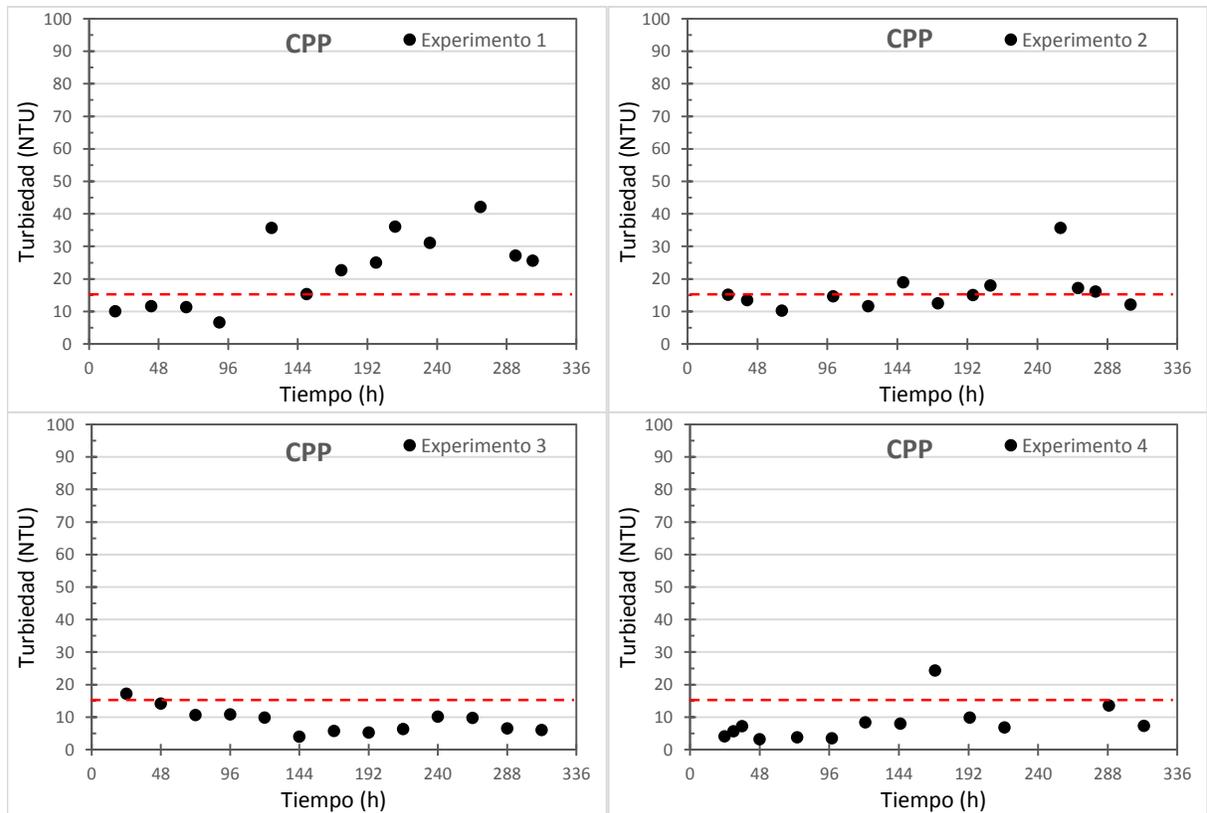


Figura 4.2. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster, la línea punteada corresponde a la turbiedad máxima establecida 15 NTU.

En cuanto a reproducibilidad, los cuatro ensayos que se llevaron a cabo presentaron resultados similares entre sí (ver figura 4.1), es decir, coinciden en que al usar esta configuración se obtiene baja productividad de permeado. Lo anterior se consideró como suficiente evidencia para detener la experimentación de las membranas sumergidas en cámara externa utilizando el textil de polipropileno-poliéster.

De acuerdo a los parámetros establecidos, en ninguna de las cuatro corridas experimentales que se realizaron con este textil se logró filtrar efectivamente. Como se puede apreciar en la figura 4.3 pese a que en la mayoría de los casos se obtuvieron porcentajes de remoción de turbiedad mayores al 40% y calidad de permeado aceptable, no se logró producir permeado en cantidad superior a los 25 L/m²h estipulados.

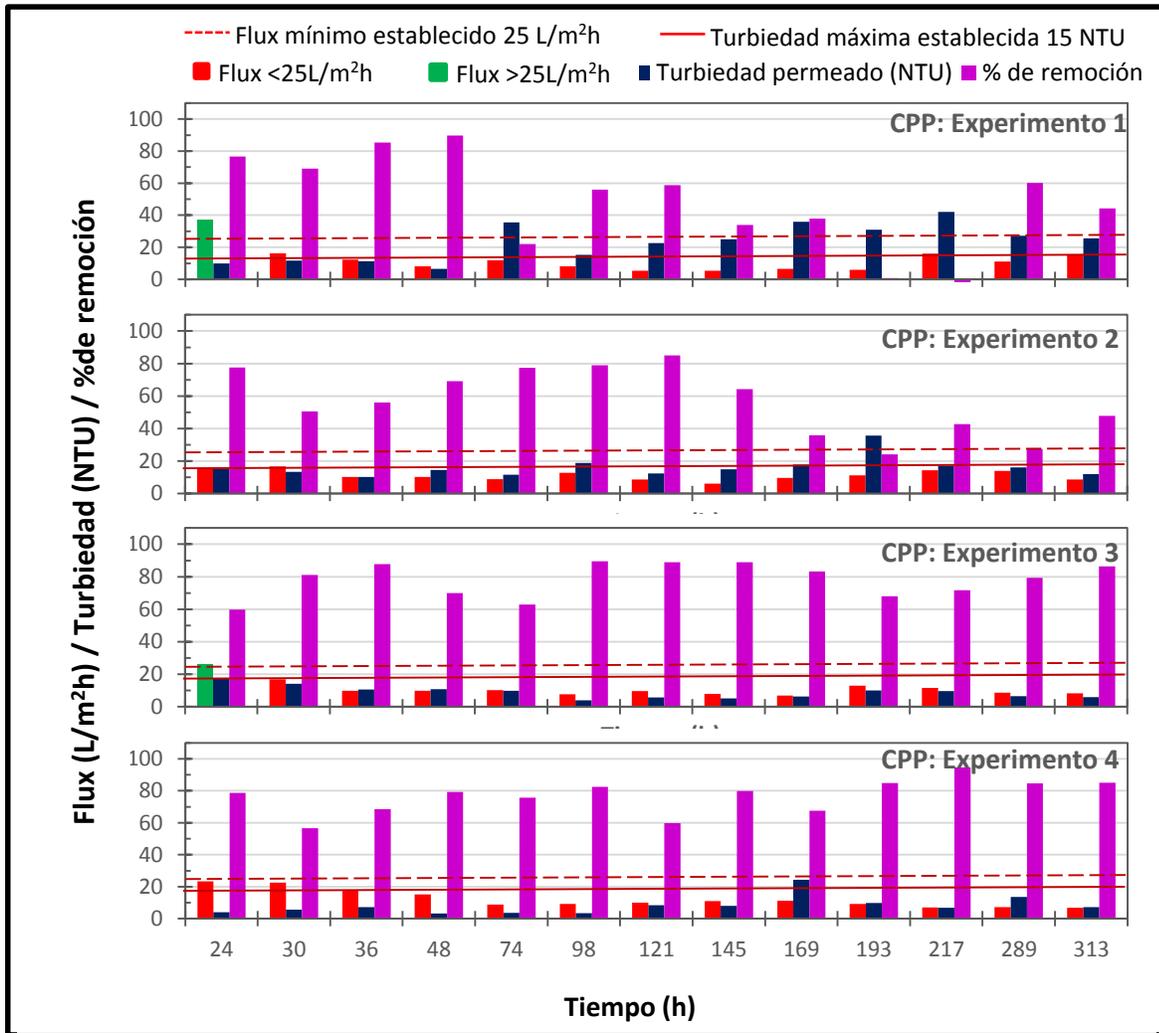


Figura 4.3. Variación del flux, de la turbiedad los permeados y porcentaje de remoción de turbiedad obtenido en la filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster.

4.1.2 Membrana dinámica sumergida en una cámara externa – textil polipropileno

En este caso (figura 4.4) también se nota un decaimiento del flux durante las primeras horas de filtración pero no tan drástico como sucedió con el material de polipropileno-poliéster. En general este textil bajo esta configuración presentó mayor producción de permeado, ya que en la mayoría de los casos se obtuvieron valores arriba de los 25 L/m²h. Pese a ello se presentó una gran variación entre las mediciones aunque en general la tendencia es la misma. Las primeras dos corridas experimentales fueron las que presentaron mayor dispersión e inestabilidad, mientras que en las subsecuentes se logró obtener mejores resultados y con menos variación, indicando que gracias a algunos ajustes en la operación (espaciamiento de la purga de lodo de la cámara externa, principalmente), se logró estabilizar parcialmente la filtración.

Con respecto a la variación de la turbiedad en el transcurso del tiempo de filtración, en la figura 4.5 se observa que los experimentos 3, 4, 6 y 7 se obtuvo menor variación en la calidad del permeado y valores, en su mayoría, por debajo de los 20 NTU. Sin embargo, aún no fue posible estabilizar el proceso para producir permeado de buena calidad de forma continua.

Como se observa en la figura 4.6 se presentaron 10 periodos de filtración efectiva, en ocho de estos se tuvieron porcentajes de remoción de turbiedad mayores al 50%. El periodo de filtración efectiva más prolongado fue durante las primeras 120 horas de la corrida experimental 4, los demás periodos sólo se mantuvieron entre 24 y 72 horas.

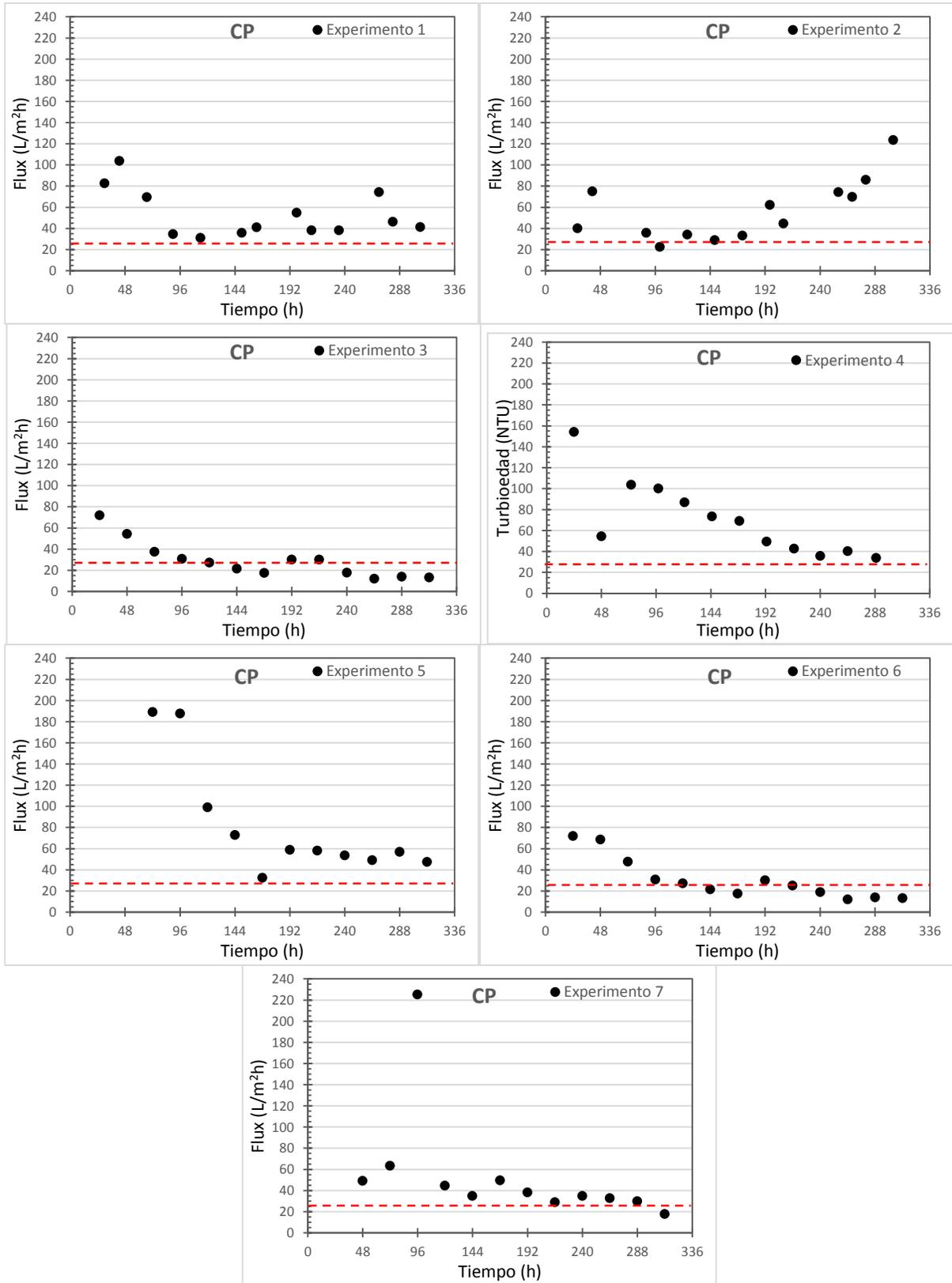


Figura 4.4. Variación del flux con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte polipropileno, la línea punteada corresponde al flux mínimo establecido 25 L/m²h.

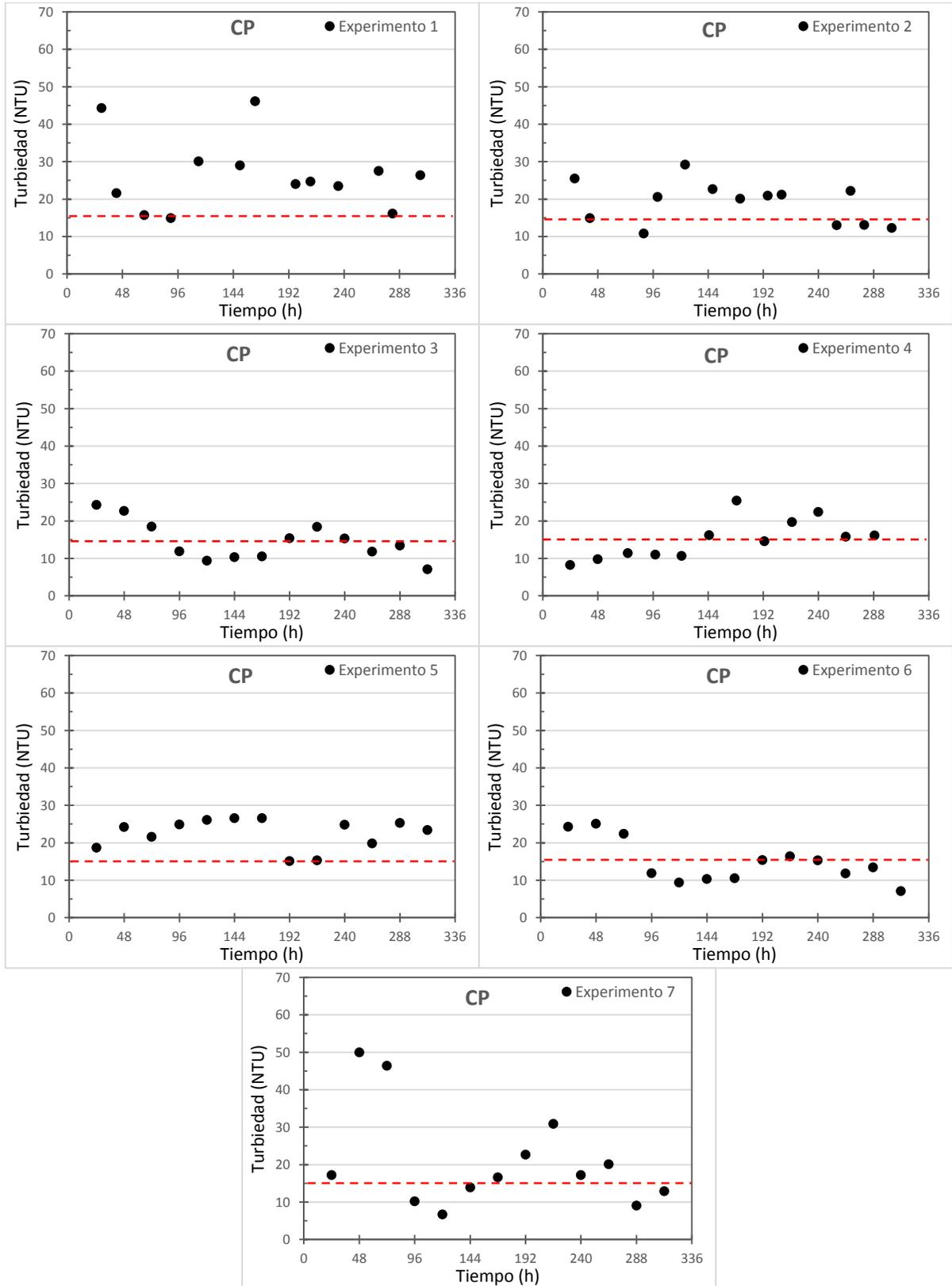


Figura 4.5. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte polipropileno, la línea punteada corresponde a la turbiedad máxima establecida 15 NTU.

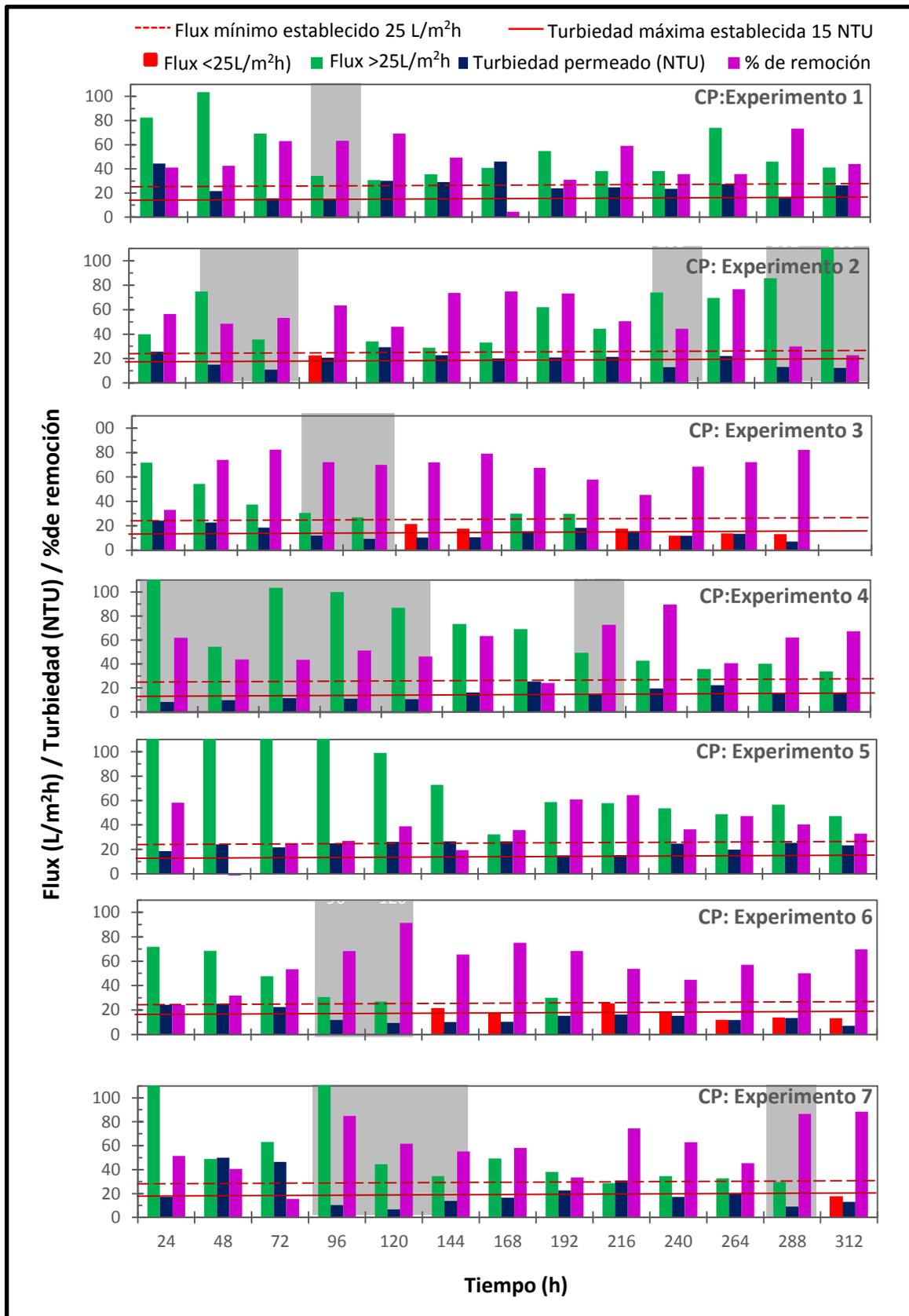


Figura 4.6. Variación del flux, de la turbiedad los permeados y porcentaje de remoción obtenido en la filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno, en sombreado gris se resaltan los periodos de filtración efectiva.

Para facilitar el análisis de los resultados de las distintas corridas experimentales y realizar la comparación de los dos materiales de soporte primario, se utilizó una herramienta de la estadística descriptiva denominada diagrama de cajas (Box Plot) (para mayor información ver Anexo A). Se construyeron los diagramas de cajas para cada experimento realizado de acuerdo a las dos variables analizadas: flux y turbiedad (figuras 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10).

Como se puede observar en la figura 4.7, en los cuatro experimentos realizados con el textil de polipropileno-poliéster el 75 % de los datos se encuentran por debajo de los 15 L/m²h. Por el contrario, en los experimentos con polipropileno, todos los puntos experimentales se ubican por arriba de los 15 L/m²h (figura 4.8). Resultando evidente, que al emplear polipropileno como soporte primario se logra mayor productividad de permeado. Sin embargo, es de resaltar que pese a los valores altos de flux, en general se observan mayores intervalos intercuartílicos (longitud de las cajas) lo cual implica una mayor dispersión de los datos en comparación con la observada para los experimentos con el textil de polipropileno-poliéster (figura 4.7). El caso más extremo fue el experimento 5 con polipropileno, presentó el mayor intervalo intercuartílico debido a que durante las primeras 144 horas de filtración se tuvieron valores de flux por arriba de los 180 L/m²h, lo cual reflejó la inapropiada formación de la membrana dinámica prácticamente durante la primera mitad de la corrida experimental (figura 4.4 y 4.8). Este incidente pudo haber ocasionado que durante la corrida número cinco no se presentara ningún periodo de filtración efectiva (figura 4.6).

Con respecto a la turbiedad con el soporte de polipropileno-poliéster (figura 4.9), se puede observar que el experimento 1 presentó mayor dispersión con respecto a los experimentos subsecuentes. Además, es relevante mencionar que en los cuatro experimentos el 75% de los datos de turbiedad se encuentran por debajo de los 27 NTU, demostrando que las características de este textil favorecen la obtención de permeado de buena calidad.

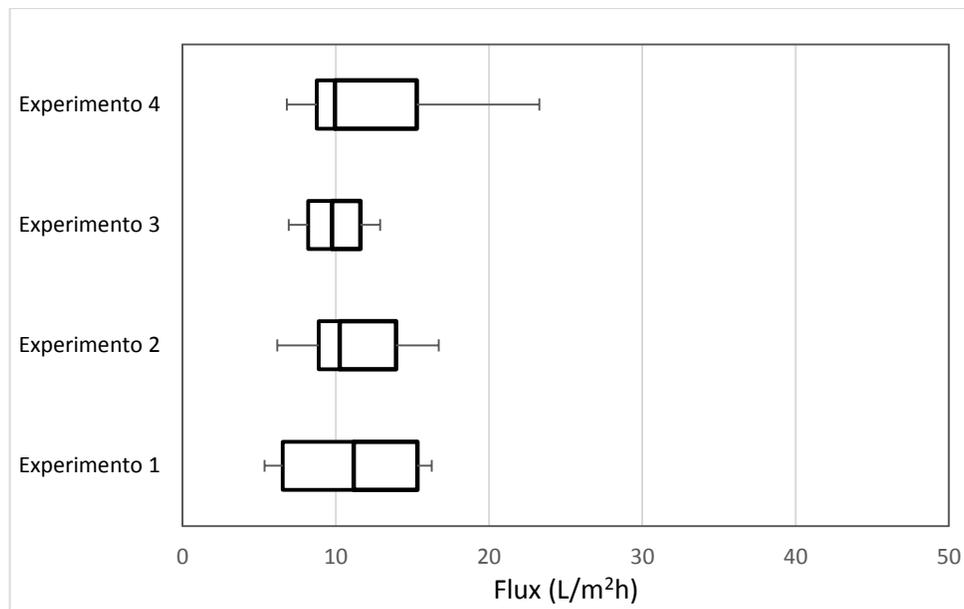


Figura 4.7. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación del flux de los experimentos de filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster.

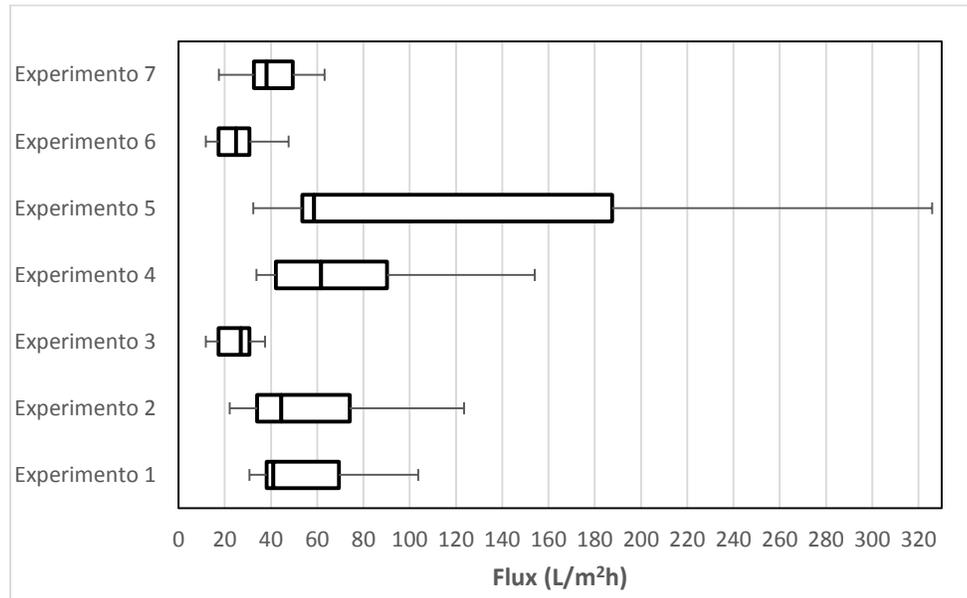


Figura 4.8. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación del flux de los experimentos de filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno.

Para el caso del polipropileno (figura 4.10) se observa mayor dispersión de los datos de turbiedad que los presentados en el gráfico 4.9, lo cual es congruente con la dispersión que se observó en la variable de flux para este mismo material (figura 4.8). Es importante destacar que pese a ello la calidad de permeado producido no se vio disminuida, prueba de esto es que en los experimentos con polipropileno el 75% de los datos de turbiedad se encuentran por debajo de los 30 NTU (figura 4.8), tan solo tres unidades por arriba de lo obtenido con el material de polipropileno-poliéster (figura 4.7).

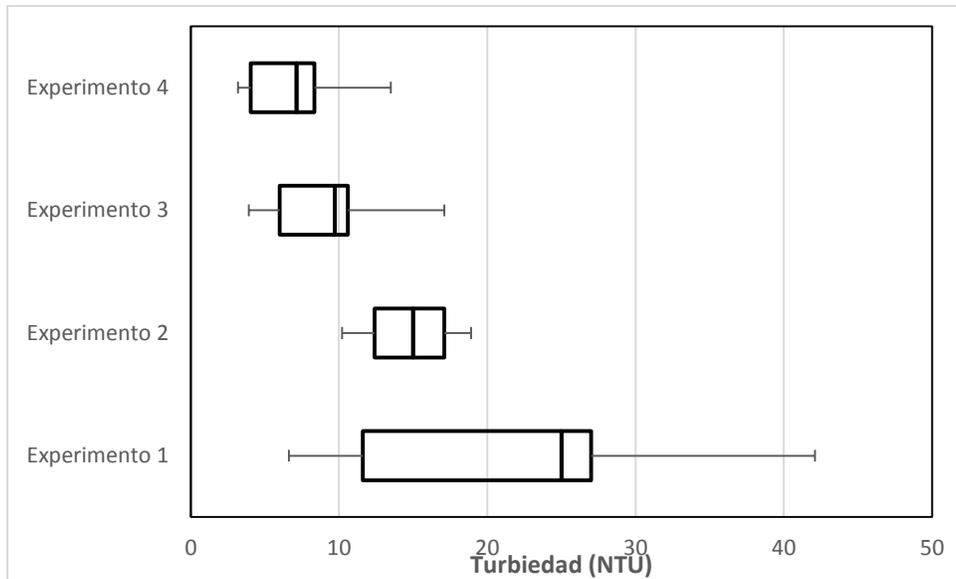


Figura 4.9. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de turbiedad de los experimentos de filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno – poliéster.

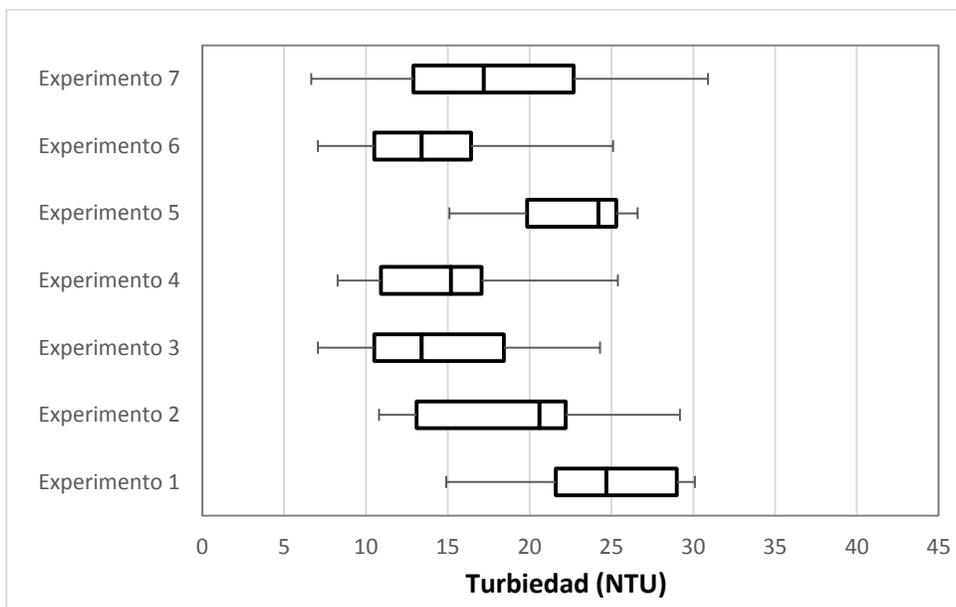


Figura 4.10. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de turbiedad de los experimentos de filtración dinámica sumergida en cámara externa con soporte de polipropileno.

En las fotografías de la figura 4.11 se puede observar la membrana secundaria que se formó sobre la superficie de la tela polipropileno-poliéster y en la figura 4.12 se pueden observar las membranas secundarias formadas sobre el textil de polipropileno. En ambos casos se incluye una fotografía del soporte limpio como punto de comparación y para observar las diferencias macroscópicas entre un material textil tejido (PP) y uno no tejido (P).

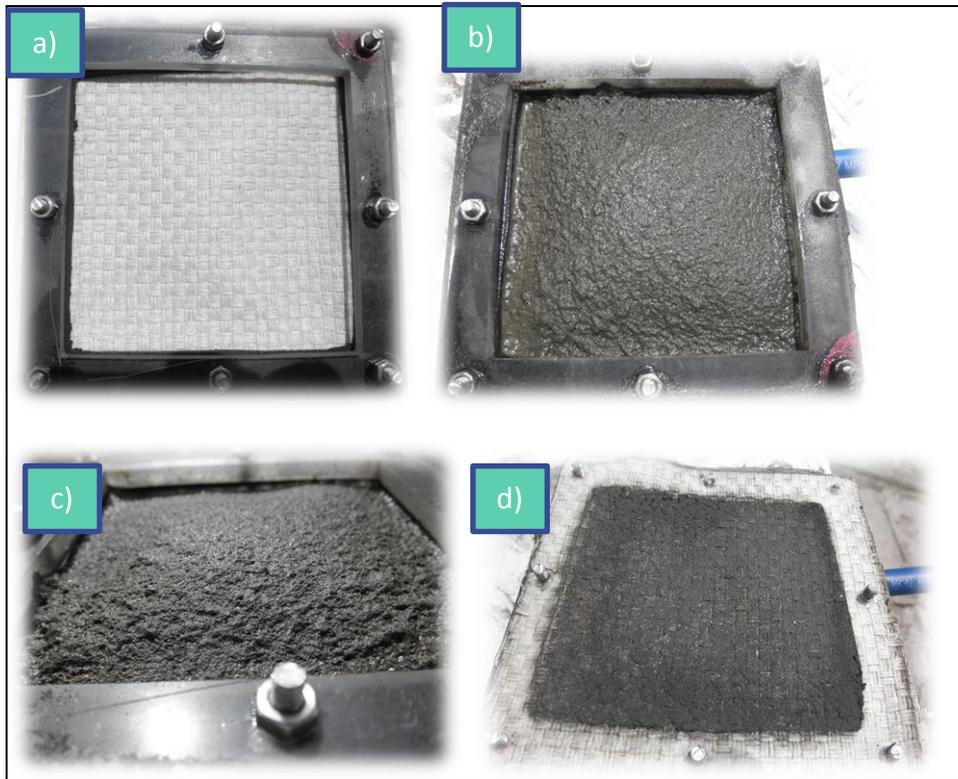


Figura 4.11. a) Soporte primario de polipropileno - poliéster limpio, b) y c) Membrana secundaria formada d) Membrana seca.

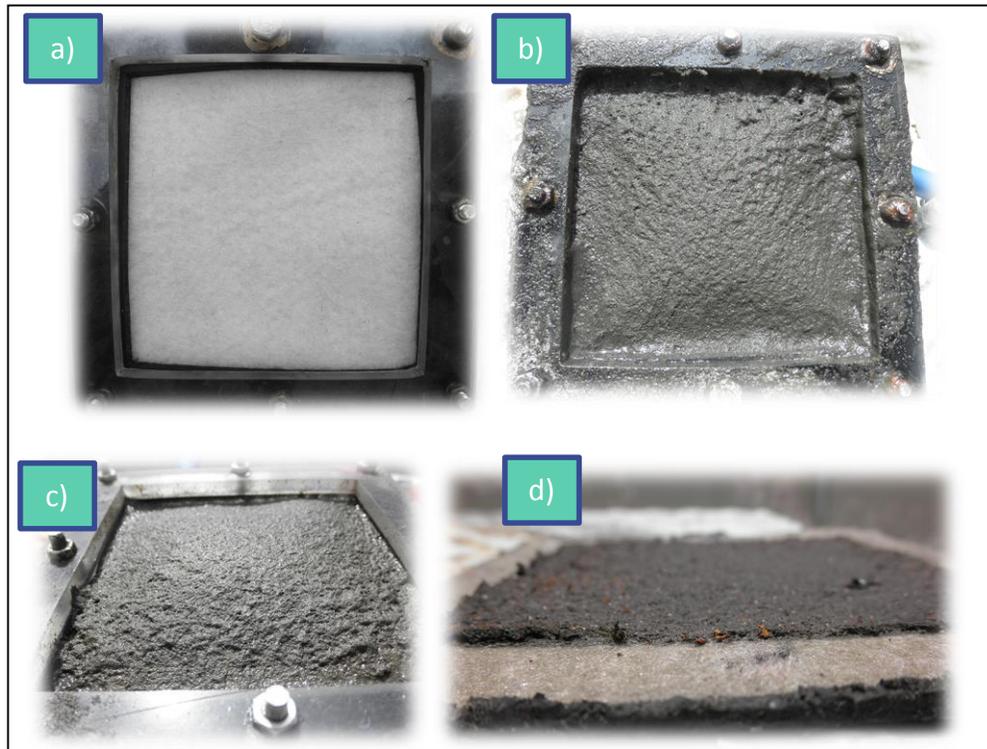


Figura 4.12. a) Soporte de polipropileno limpio, b) y c) Membrana secundaria formada y d) membrana seca.

4.1.3 Membranas dinámicas sumergidas en zona de sedimentación del reactor UASB

En general, bajo esta configuración y con los dos materiales estudiados se tuvo dificultad para lograr reproducibilidad en los experimentos (ver figuras 4.13, 4.14, 4.16 y 4.17). Debido a que las corridas de ambos materiales se realizaron simultáneamente, se discutirán sus comportamientos de forma conjunta.

En las corridas experimentales 1 y 2 en ambos soportes, se observó decaimiento del flux de permeado durante las primeras 48 horas de filtración lo cual se asoció a la formación de la membrana dinámica; posteriormente el flux siguió decayendo, siendo más evidente en el textil de polipropileno – poliéster (ver figuras 4.13 y 4.16). Por otra parte, en las primeras 144 horas del experimento 3 y en toda la corrida experimental 5 se puede notar que al contrario de lo sucedido en las corridas 1 y 2, no hay una clara disminución del flux, indicando que no se formó apropiadamente la membrana dinámica. Lo anterior se atribuyó a la baja concentración de sólidos en el licor mezcla a la profundidad analizada (1.92 m dentro del reactor) y también a valores bajos de carga orgánica volumétrica alimentados al reactor UASB ocasionados a su vez por la temporada de lluvias.

Otro acontecimiento a resaltar es la recuperación de flux durante las corridas experimentales 3 y 7, lo cual se asoció al desprendimiento de la membrana dinámica. En un principio se pensó que los desprendimientos se presentaban cuando el grosor de la membrana se había incrementado en demasía; sin embargo, los valores de flux que preceden estos acontecimientos no son lo suficientemente bajos para asociarlos con un fuerte taponamiento. Por lo tanto, es posible que estos incidentes se debieron a la pobre adherencia de la membrana dinámica a los soportes primarios y al entorno cambiante dentro del reactor UASB.

En varias ocasiones pese a que se tuvo un valor de flux bajo, el permeado no presentó baja turbiedad, contradiciendo el concepto de filtración dinámica que indica que debido a la formación y compactación de una capa de sólidos sobre el soporte primario, a medida que el flux va disminuyendo va aumentando la calidad del permeado. Con el fin de dilucidar lo acontecido, se realizó una observación macroscópica de las muestras de permeado con turbiedad atípica y de los módulos de membrana al finalizar los experimentos. En las muestras de permeado se apreciaron fragmentos de biopelícula lo cual ocasionaba un incremento en su turbiedad. Posteriormente, se identificó que esta biopelícula se formaba sobre la malla metálica que integra el módulo de la membrana (ver figuras 3.4 y 4.20), probablemente debido a la acumulación de permeado dentro del tubo de recolección (ver figura 3.5) lo que brindó las condiciones propicias para el crecimiento de microorganismos en la zona posterior de la membrana.

En los ensayos con polipropileno-poliéster se presentaron 7 periodos de filtración efectiva, los cuales se mantuvieron entre 24 a 48 horas. Es importante resaltar que tan solo en tres de ellos se tuvo más del 50% de remoción de turbiedad (Figura 4.15). Mientras que en los experimentos con el textil de polipropileno se logró filtrar efectivamente en 13 ocasiones, pero solo en 6 de éstas el porcentaje de remoción superó el 50%. Cabe comentar que estas condiciones se presentaron generalmente durante 24 horas, a excepción de un periodo que se mantuvo por 72 horas (Figura 4.18).

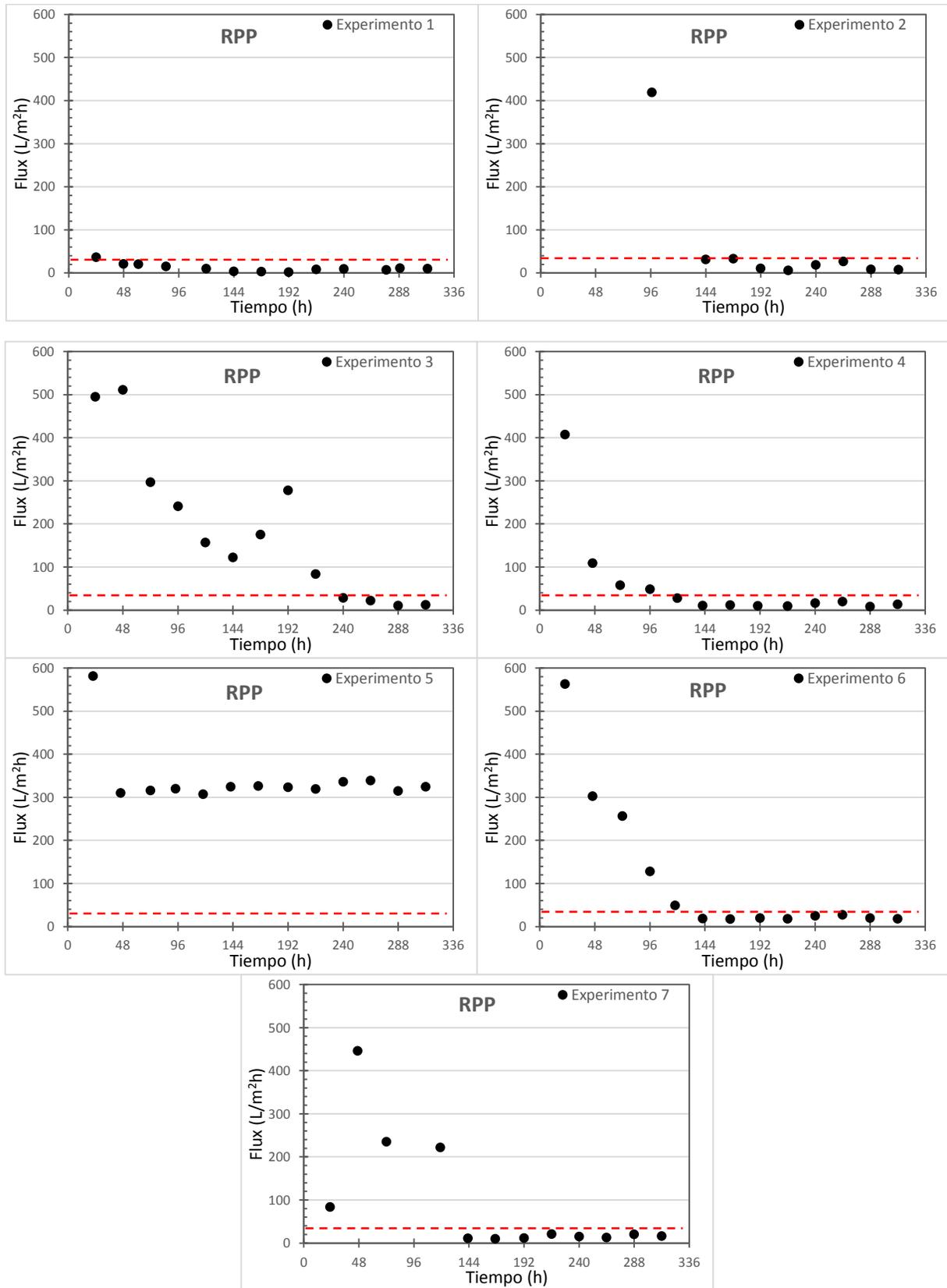


Figura 4.13. Variación del flux con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno - poliéster, la línea punteada corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m²h.

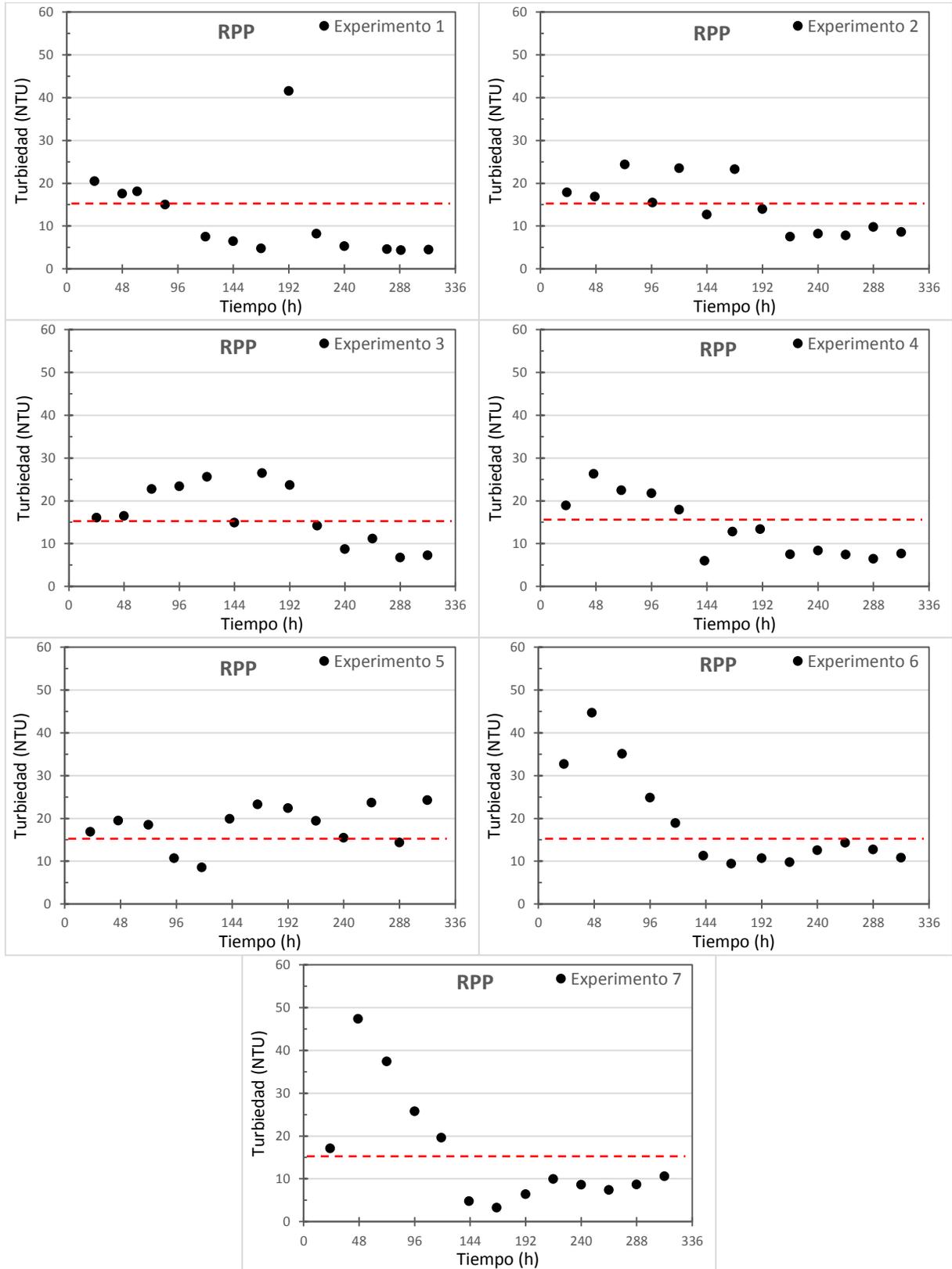


Figura 4.14. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno-poliéster, la línea punteada corresponde a turbiedad máxima establecida 15 NTU.

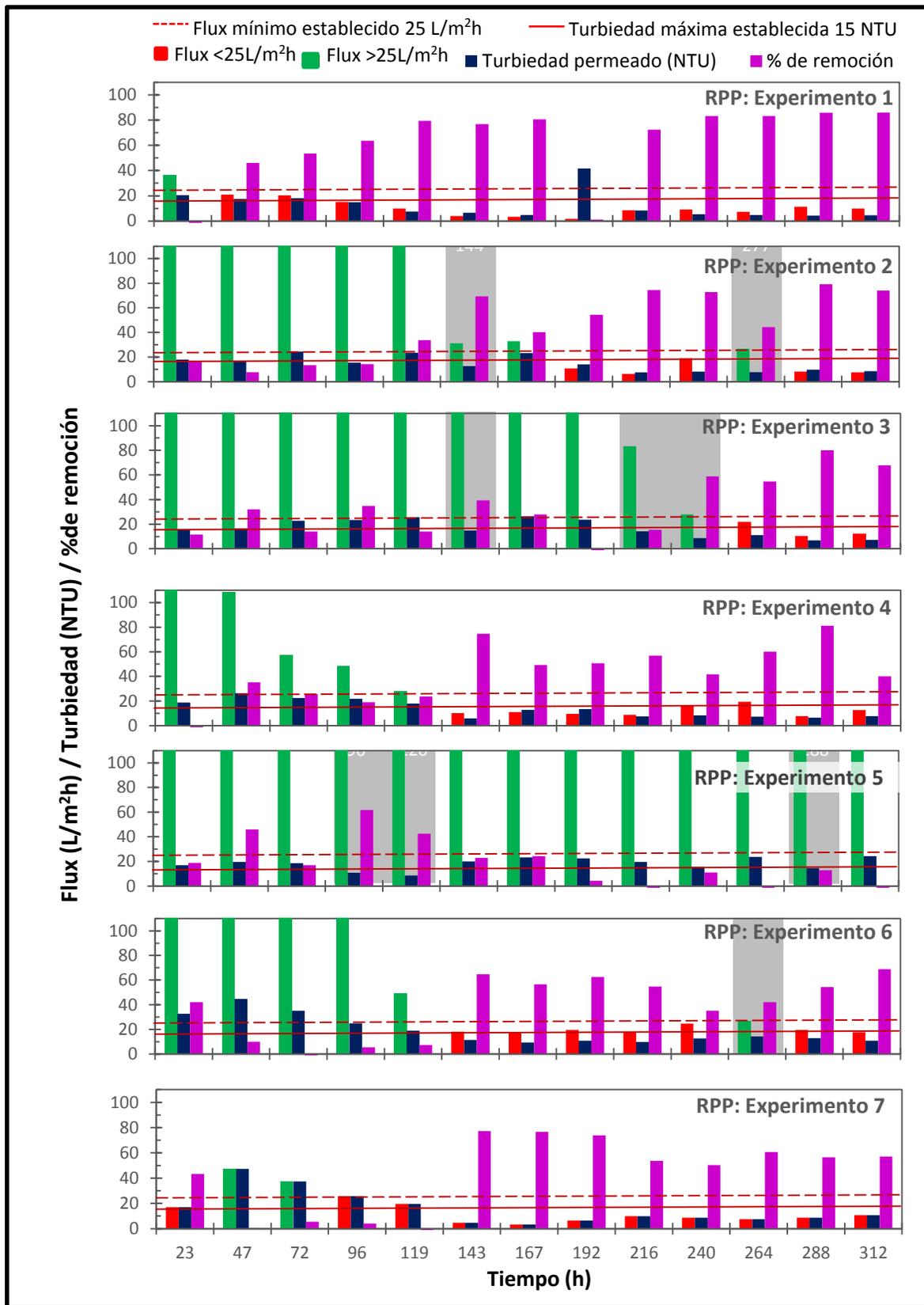


Figura 4.15. Variación del flux, de la turbiedad los permeados y porcentaje de remoción obtenido en la filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno - poliéster. En sombreado gris se resalta periodos de filtración efectiva.

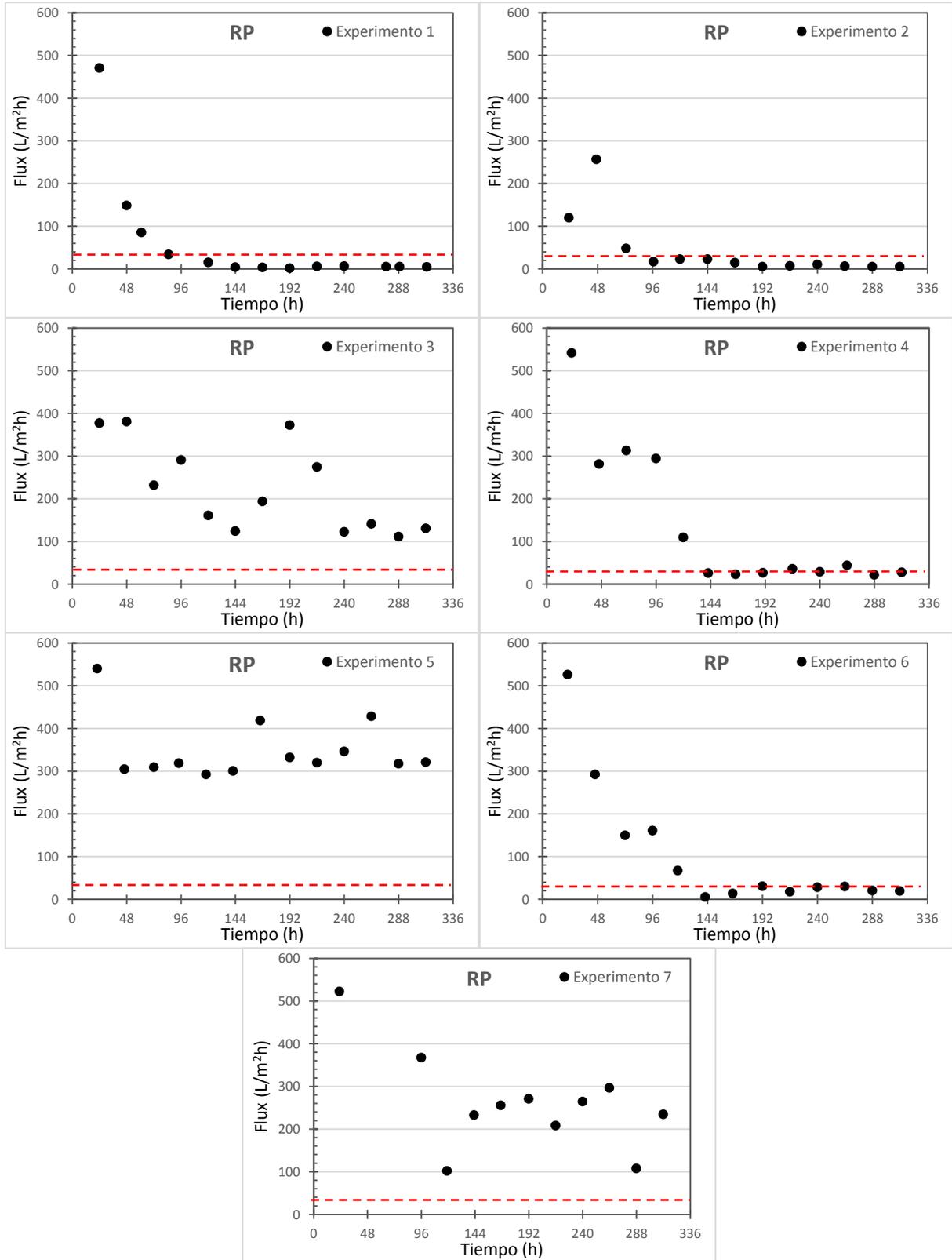


Figura 4.16. Variación del flux con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno, la línea punteada corresponde al flux mínimo establecido 25 L/m²h.

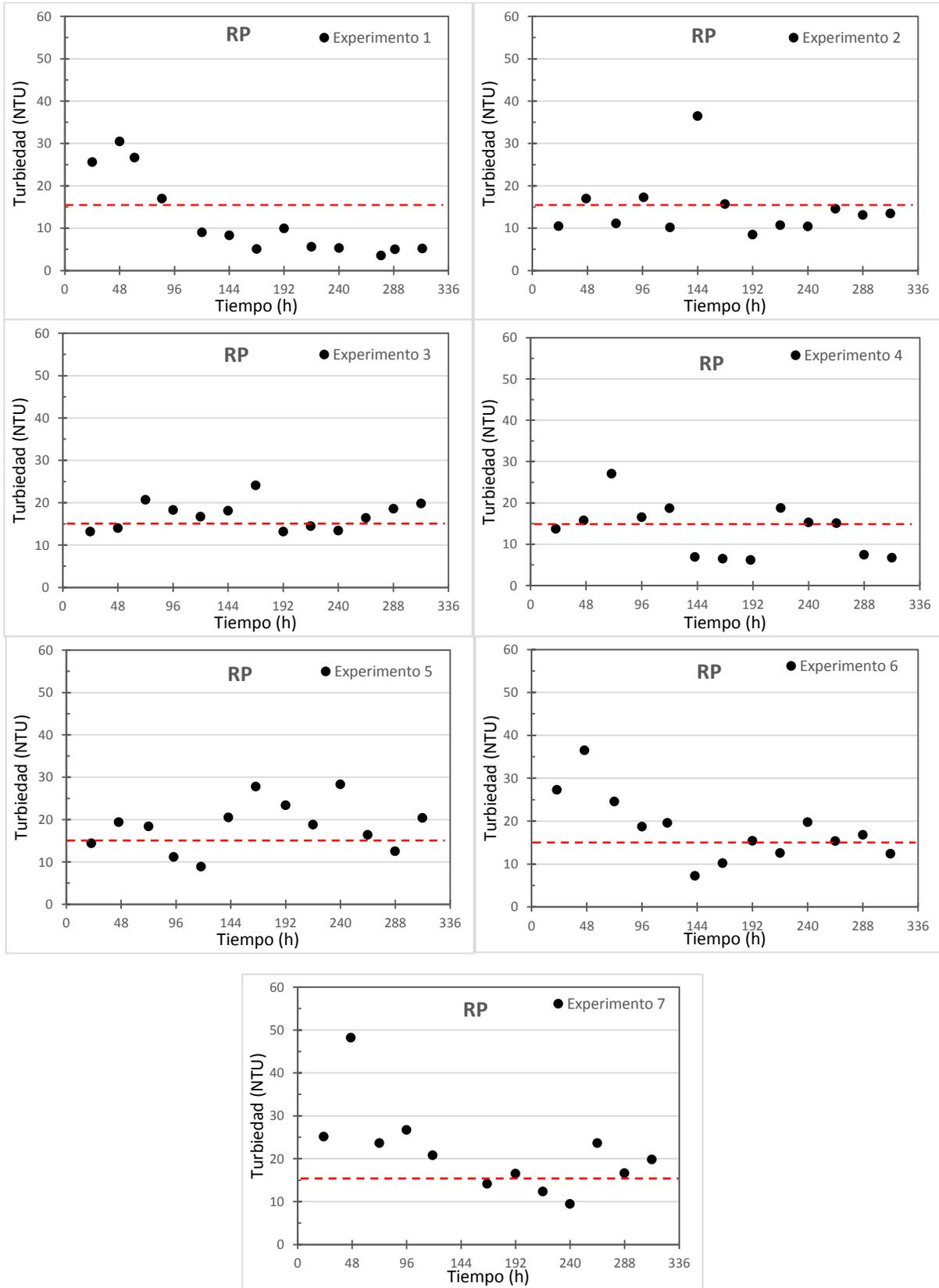


Figura 4.17. Variación de la turbiedad con respecto al tiempo en filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte polipropileno, la línea punteada corresponde a la turbiedad máxima establecida 15 NTU.

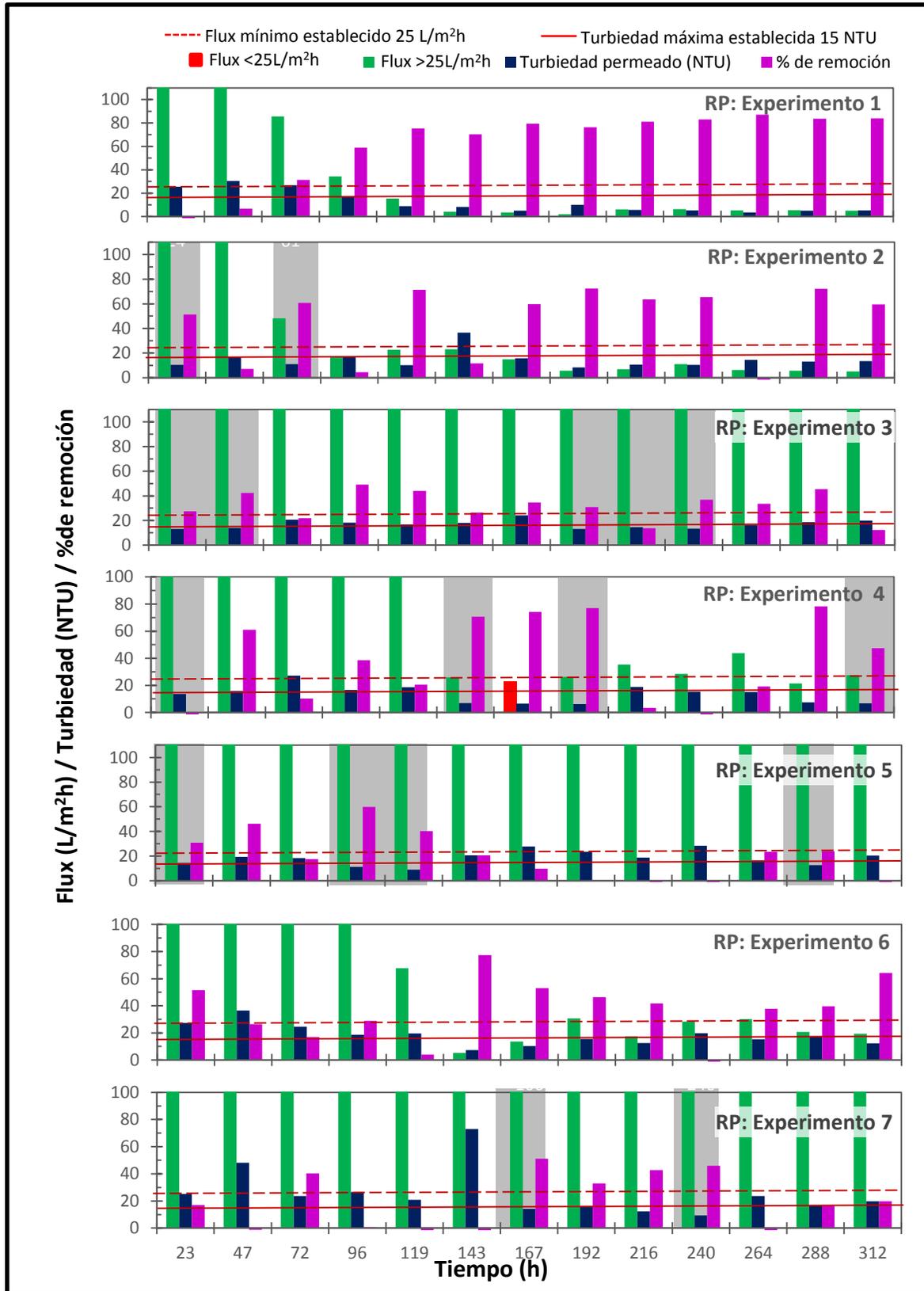


Figura 4.18. Variación del flux, de la turbiedad los permeados y porcentaje de remoción obtenido en la filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno. En sombreado gris se resalta periodos de filtración efectiva.

La figura 4.19 muestra una fotografía de los materiales limpios y otra con las membranas secundarias formadas.

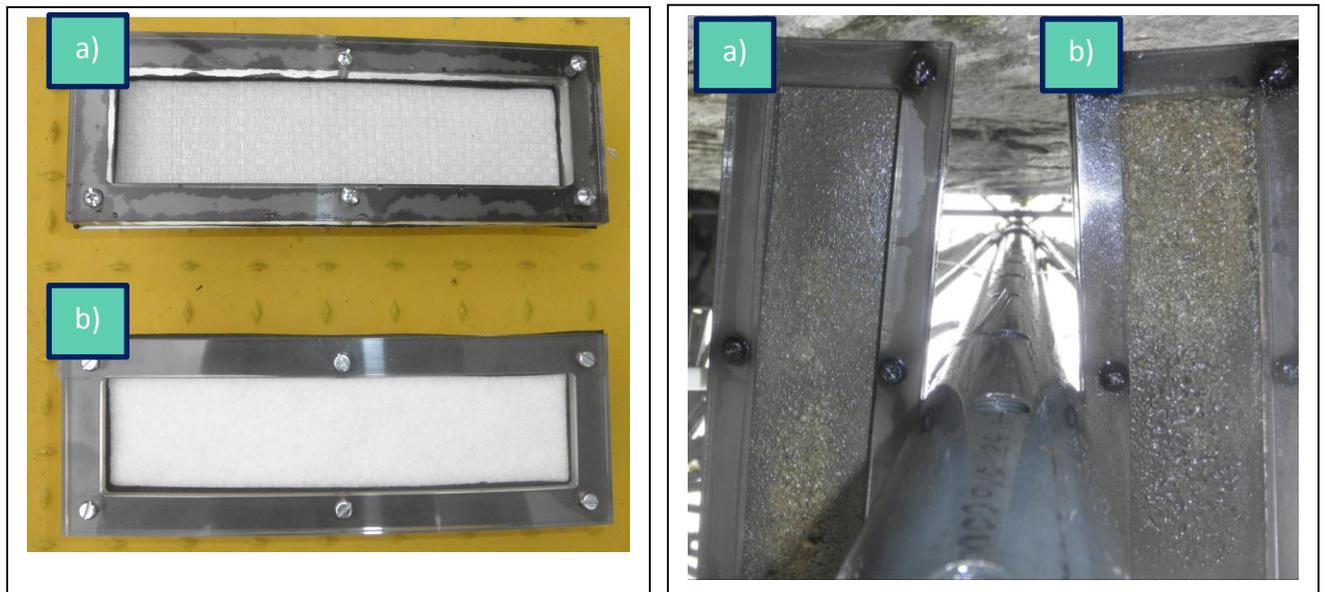


Figura 4.19. Módulos rectangulares con soportes primarios limpios y con las membranas formadas a) Polipropileno poliéster, b) polipropileno ($50\mu\text{m}$)

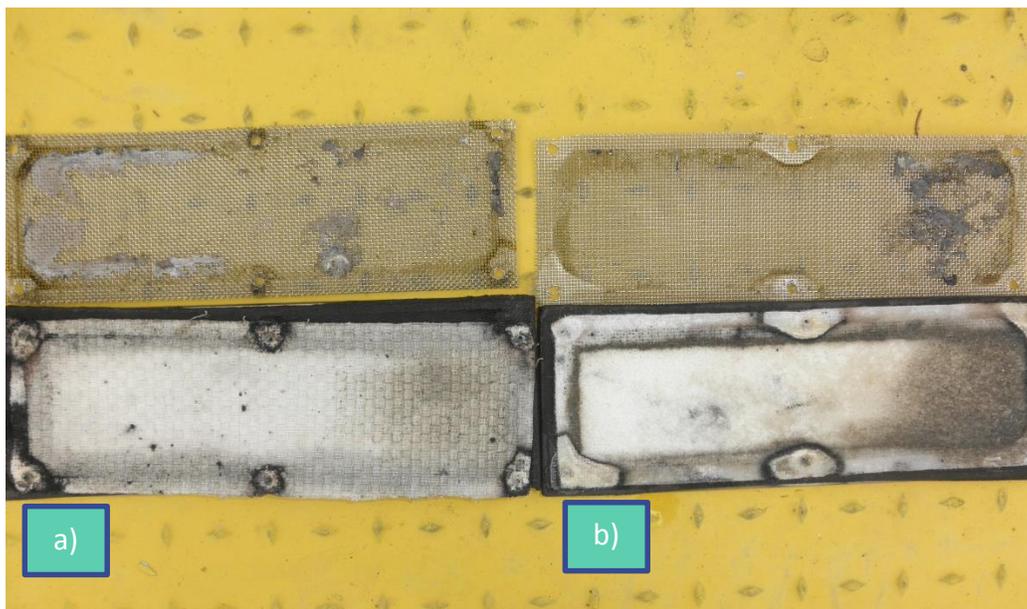


Figura 4.20. Biopelícula formada sobre soporte metálico en módulos rectangulares a) Polipropileno poliéster, b) polipropileno ($50\mu\text{m}$)

Para completar la descripción de los resultados obtenidos en esta configuración, también se realizaron los diagramas de cajas, y es a través de ellos que se puede distinguir con más facilidad los experimentos en los cuales no se tuvo una buena formación de la membrana, como por ejemplo la corrida experimental 5 con polipropileno-poliéster donde se aprecia que el flux se mantuvo constante en valores altos (figura 4.21), o bien los experimentos 3, 5 y 7 con polipropileno donde tampoco hubo un descenso del flux a lo largo del tiempo de filtración (Figura 4.22).

En la figura 4.21, el experimento 2 presentó un amplio rango intercuartílico el cual se asoció a que durante las primeras 96 horas de filtración se tuvieron valores de flux por arriba de los 400 L/m²h que al ser valores muy elevados no se observan en la escala de la figura 4.13.

Cuanto menor es el intervalo intercuartílico, se tiene una menor dispersión en el conjunto de datos, como ejemplos se encuentran los experimentos 1 y 5 de las figuras 4.21 y 4.22. La diferencia radica en que para el experimento 1, las mediciones se concentran a valores bajos de flux (con polipropileno- poliéster de 2 a 21 L/m²h y con polipropileno 2 a 86 L/m²h), lo cual implica que en este ensayo se tuvo un fuerte taponamiento del material de polipropileno-poliéster. Caso contrario, lo acontecido en el experimento 5, que mantuvo valores altos de flux indicando una inapropiada formación de la capa taponante (con polipropileno- poliéster de 307 a 339 L/m²h y con polipropileno 293 a 419 L/m²h). Es relevante mencionar que este fenómeno se presentó con los dos textiles estudiados, lo cual es congruente debido a que ambas membranas estuvieron expuestas a las mismas condiciones hidrodinámicas dentro del reactor. Pese a esta consistencia, los intervalos de flux con el polipropileno fueron superiores a los obtenidos con el polipropileno poliéster.

Las figuras 4.23 y 4.24 presentan la variación de la turbiedad. Para ambos materiales se puede observar que el 75% de los datos se encuentran por debajo de los 26 NTU, lo cual indica que colocando las membranas dinámicas sumergidas en la zona de sedimentación del reactor UASB se logró producir permeado de calidad de una a tres unidades nefelométricas por debajo a las obtenidas en las cámaras externas (polipropileno-poliéster: 75% de los datos por debajo de 27 NTU, polipropileno: 75% de los datos por debajo de 30 NTU).

En lo que concierne a la comparación de materiales, ambos textiles superaron los valores de flux obtenidos en la filtración en cámara externa; sin embargo, persiste la misma tendencia. Es decir, el polipropileno presentó mayor productividad de permeado con respecto al otro soporte analizado.

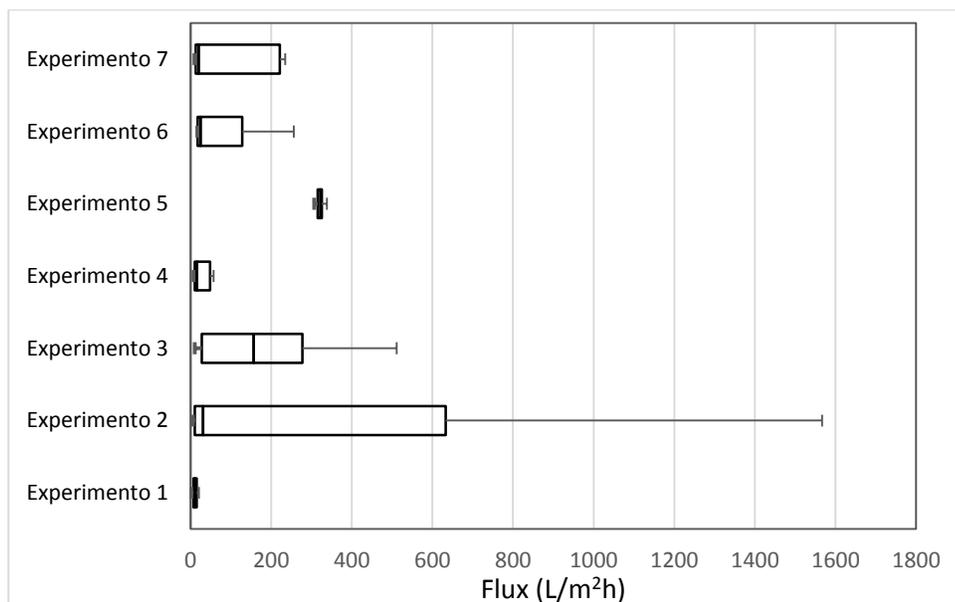


Figura 4.21. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación del flux de los experimentos de filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte polipropileno - poliéster.

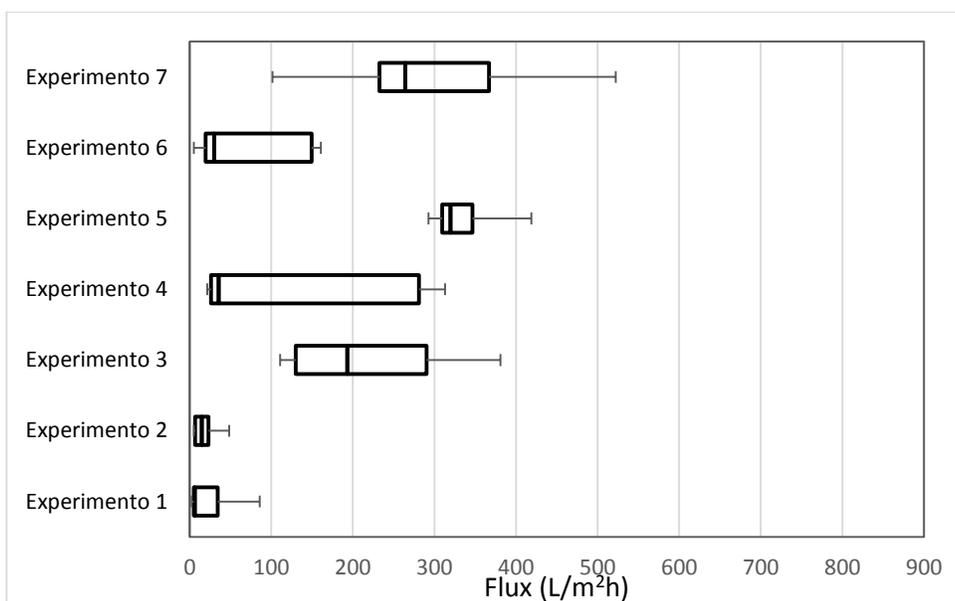


Figura 4.22. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación del flux de los experimentos de filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno.

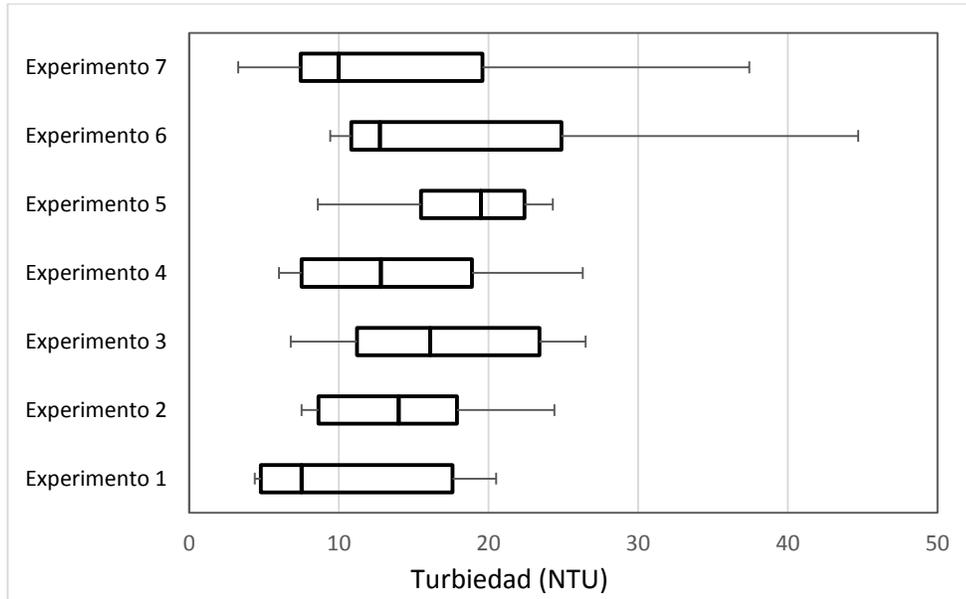


Figura 4.23. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de la turbiedad de los experimentos de filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno- poliéster

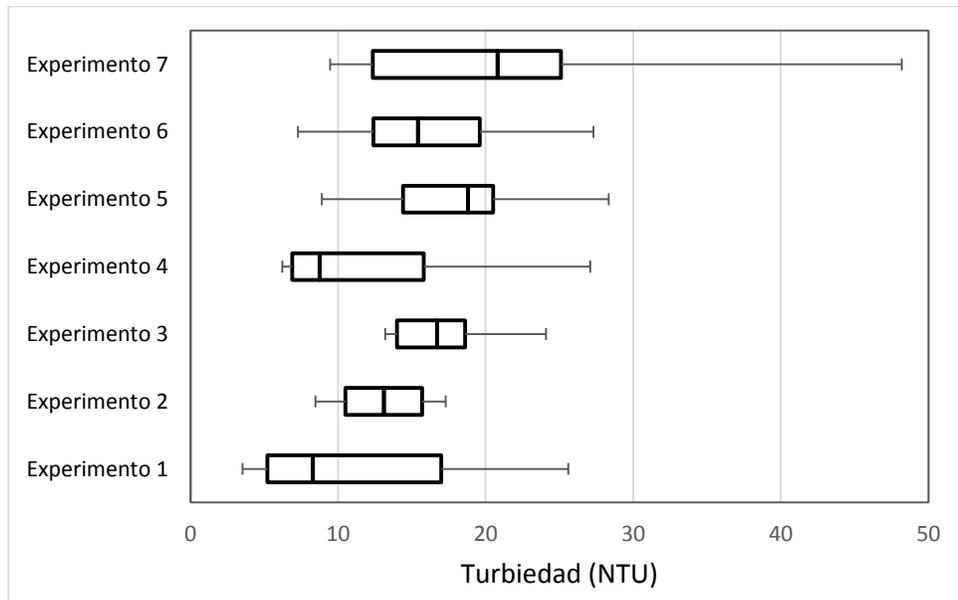


Figura 4.24. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de la turbiedad de los experimentos de filtración dinámica sumergida en reactor UASB, soporte de polipropileno.

4.2 Análisis y discusión: Etapa 1

4.2.1 Filtración efectiva

De acuerdo a la literatura en la filtración dinámica, se pueden distinguir principalmente tres etapas: 1) la etapa de formación de la membrana secundaria, 2) la etapa de filtración estable o efectiva y finalmente, 3) la etapa de limpieza (Ersahin *et al.*, 2012; Loderer *et al.*, 2013). Por razones obvias se busca minimizar la etapa de formación de la membrana y prolongar la duración de la filtración estable. Debido a esto, en este trabajo se presta especial atención a la capacidad de los tratamientos de alcanzar y mantener la etapa de filtración efectiva. Según el criterio establecido en este trabajo, esta condición se alcanzó cuando se operó con un flux mayor o igual a 25 L/m²h y además se obtuvo un permeado con turbiedad menor o igual a 15 NTU.

Dados estos criterios y de acuerdo a los resultados obtenidos, se puede comentar que en ninguno de los cuatro tratamientos se logró mantener por más de 120 horas estas condiciones de operación, por lo general se presentaron por tan solo 24 horas. En el caso de la configuración de cámara externa, el bajo flux obtenido con el textil de polipropileno - poliéster fue el principal limitante para lograr la filtración efectiva; mientras que con el polipropileno se presentaron 10 episodios con una duración que fue desde 24 hasta 120 horas, de los cuales 8 presentaron remociones mayores al 50%. Pese a que en este último caso se logró operar a las condiciones deseadas, no se logró mantener esta condición por periodos de tiempo más largos, lo cual implicaría, en caso de implementarse a mayor escala, el retorno del permeado de baja calidad la mayor parte del tiempo, afectando así la rentabilidad del proceso.

En lo que respecta a las membranas de polipropileno-poliéster sumergidas en la zona de sedimentación del reactor UASB, se cumplió en siete ocasiones, las condiciones de filtración efectiva, pero solo en tres de ellas se obtuvo un porcentaje de remoción de turbiedad por arriba del 50%. En lo que respecta a la membrana de polipropileno, pese a que fue el tratamiento que obtuvo mayor número de episodios de filtración efectiva, solo en seis de estas trece ocasiones se logró obtener remociones superiores al 50%.

Se hace énfasis en el porcentaje de remoción de turbiedad dado que éste permite evaluar la eficiencia de la filtración al comparar la turbiedad del permeado con respecto a la turbiedad del sobrenadante en contacto con la membrana. En otras palabras, una buena calidad de permeado por sí sola no implica que la membrana secundaria tenga una alta capacidad de remoción; esto solo sería verdadero si independientemente de la turbiedad del sobrenadante (alta o baja), la membrana dinámica fuera capaz de mantener baja turbiedad en el permeado producido.

De todo lo expuesto líneas arriba se desprende que el textil no tejido de polipropileno en ambas configuraciones presentó mayor número de periodos de filtración efectiva en comparación al otro material estudiado. Por otra parte, bajo la configuración de membranas sumergidas en cámaras externas se logró producir en más ocasiones permeado con las especificaciones deseadas y con valores de remoción de turbiedad por arriba del 50%. Lo anterior se atribuyó, entre otras cosas, a que los sobrenadantes de las cámaras externas presentaron valores de

turbiedad mayores (mediana 40 NTU) que los que se presentaron en el licor mezcla de la zona de sedimentación del reactor UASB (mediana 25 NTU) (Figura 4.25).

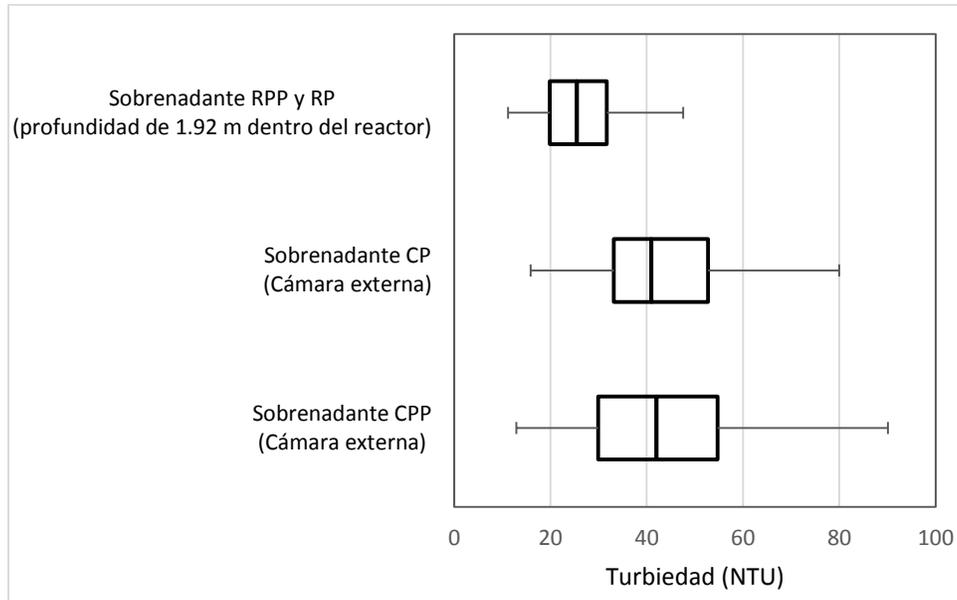


Figura 4.25. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de la turbiedad de los sobrenadantes de filtración dinámica sumergida en cámaras externas y en reactor UASB.

4.2.2 Influencia de la carga orgánica volumétrica en la filtración dinámica

Como se ha discutido a lo largo de este documento, tanto la concentración de los sólidos suspendidos como la carga orgánica volumétrica (COV) afectan la formación de la membrana secundaria de la cual depende la eficiencia de la filtración dinámica. La carga orgánica volumétrica es un parámetro que relaciona la concentración de contaminante en el influente, a través de la DQO, con el caudal y volumen del reactor. Los reactores anaerobios alimentados con influentes con alta concentración de DQO (efluentes industriales) tienen capacidad de tratar cargas orgánicas entre 10 y 20 kg DQO/m³ d, cargas 10 veces mayores a las manejadas por los procesos aerobios. En el caso de aguas residuales domésticas la carga orgánica no es el factor limitante, ya que en general es menor a 2.5 a 3 kg DQO/m³d (Morgan-Sagastume, 1996) siendo el tiempo de residencia hidráulica el factor limitante (no menor a 5 horas para aguas residuales municipales). Un estudio previo de Salazar Peláez (2011), recomendó operar a un TRH de 8 horas, debido a que en esa condición se reducía el taponamiento de membranas externas de ultrafiltración convencionales que en ese trabajo se analizaron como postratamiento del reactor UASB piloto. Por otra parte, se dice que los biorreactores de membrana pueden tolerar variaciones de la COV dentro del intervalo que va de 0.5 a 12.5 kg DQO/m³d (Wen *et al.*, 1999), intervalo donde se encuentran, en la parte baja del mismo, las cargas orgánicas volumétricas que se tienen en el sistema piloto aquí analizado.

Durante la temporada de lluvias, se presenta una dilución de la materia orgánica contenida en el agua residual, lo cual repercute inversamente sobre la COV. Todos los resultados que se reportan de la etapa 1 fueron realizados en época de lluvia (mayo - octubre), por ello es de vital importancia analizar las variaciones que sufre el sistema a causa de los eventos de precipitación y cómo pudiera estar afectando a la filtración dinámica. La variación de este parámetro en este estudio se puede apreciar en la figura 4.26, que incluye registros de precipitación de la estación meteorológica automática CCH Sur (Sistema Meteorológico Nacional), notándose coincidencia entre las lluvias más intensas y los bajos valores de carga orgánica volumétrica.

Para el caso de la filtración dinámica, se notó mayor influencia de los eventos de lluvia en la configuración de filtración sumergida en el reactor UASB. Un ejemplo de esto es que en el experimento 5, en los dos materiales estudiados se observó una alta producción de permeado, lo cual se asoció a una inadecuada formación de la membrana secundaria. Con fines de comparación en la figura 4. 26 se resalta en sombreado gris los datos que se presentaron durante este quinto experimento. Se puede observar que durante este ensayo hubo precipitaciones y se tuvo una baja carga orgánica volumétrica que osciló alrededor de 0.5 kg DQO/m³d, a excepción de una ocasión en que la COV se incrementó a 1.21 kg DQO/m³ lo cual coincidió con el incremento de turbiedad del licor mezcla.

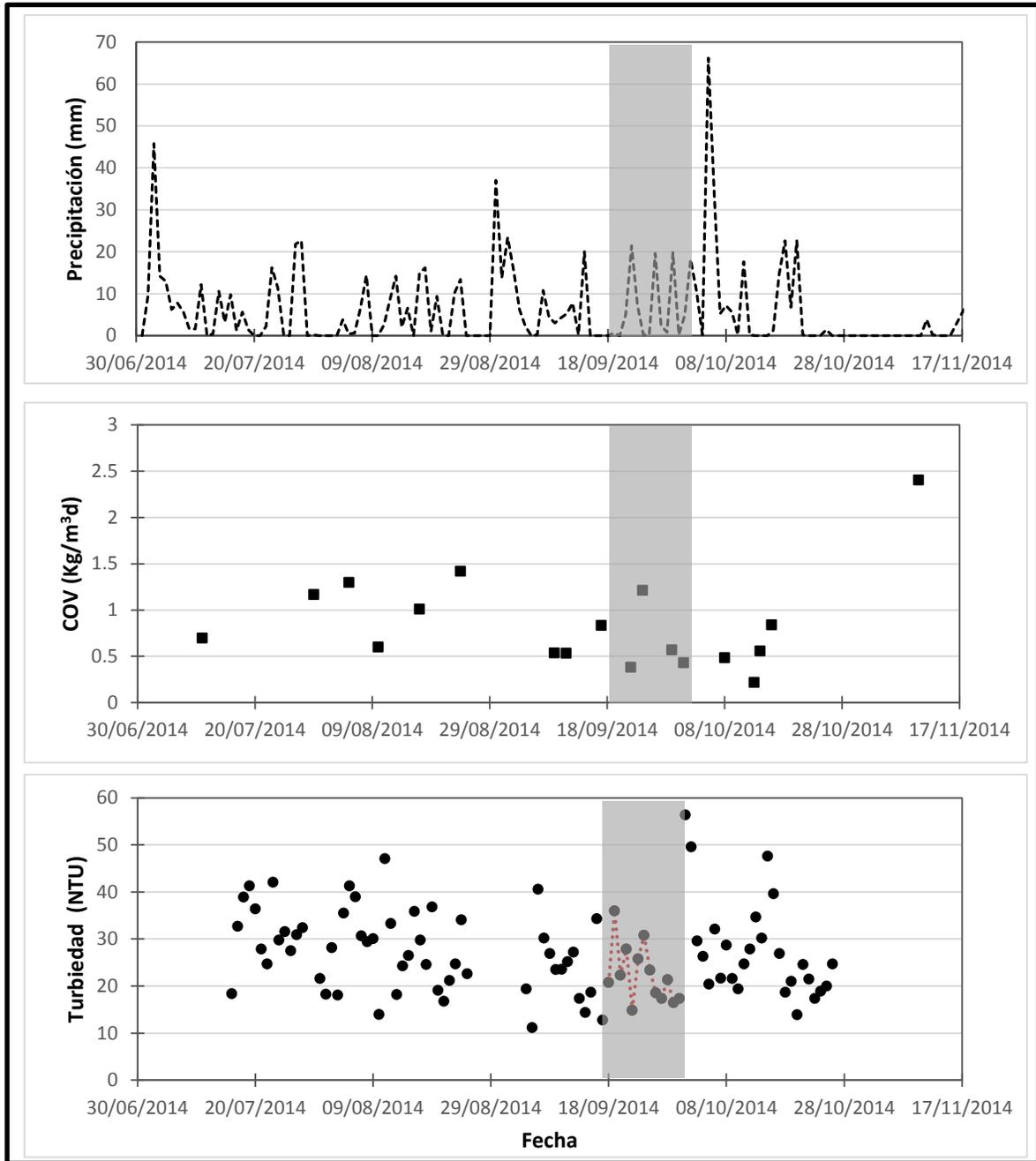


Figura 4.26. a) Precipitación pluvial durante experimentación (Estación CCH- Sur), b) Variación de la carga orgánica volumétrica de alimentación del reactor, c) variación de la turbiedad del licor mezcla a una profundidad de 1.92m dentro del reactor. Se resalta en línea punteada roja y sombreado gris los datos que se presentaron durante el experimento 5 de membranas sumergidas en reactor UASB.

En el trabajo previo de González-Ortega (2014) donde se analizó esta misma configuración, se recomendó trabajar con polipropileno con 50 μm de tamaño de poro ya que con este material se obtuvo buen comportamiento de la filtración dinámica. Sin embargo, en la presente investigación no se lograron reproducir estos resultados ni mucho menos estabilizar la filtración, con el mismo material. La diferencia principal puede radicar en que en el trabajo previo se mantuvo una COV promedio de 2.97 kg DQO/ m^3d y en el presente trabajo sólo de 0.58 kg DQO/ m^3d . Este hallazgo corrobora la influencia de la carga orgánica volumétrica en la filtración dinámica sumergida, coincidiendo con lo discutido por González-Ortega (2014) quien de acuerdo a sus resultados asoció la variabilidad entre repeticiones a la variación de la COV. En el mismo sentido, el ingreso de menor cantidad de sustrato al reactor UASB (menor COV) pudo ser lo que ocasionó que también se presentara una menor turbiedad del licor mezcla (turbiedad promedio 26.9 ± 8.9 NTU) en comparación con la reportada en el trabajo de González-Ortega (turbiedad promedio 88 ± 36.8 NTU). Aunque en esta etapa de la investigación no se determinó la cantidad de sólidos suspendidos en el licor mezcla, se considera que hay una relación directamente proporcional entre estas dos variables; tal que, la menor turbiedad del sobrenadante se asoció con una menor concentración de sólidos en suspensión en la profundidad analizada que afectó el desempeño de las membranas dinámicas.

El fenómeno anterior se puede explicar considerando lo enunciado por Ersahin y colaboradores (2012), de que las propiedades de filtración de las membranas están en función de la concentración de los sólidos suspendidos en el licor mezcla, de la cantidad de sustrato disponible, del tiempo de retención de sólidos y de los esfuerzos cortantes (burbujeo, velocidad ascensional) a los que estén expuestas las membranas durante la operación. En el trabajo de Chu y Li (2006), estudiaron cuatro distintas concentraciones de sólidos suspendidos en el licor mezcla (3100 mg/L, 5500 mg/L, 8000 mg/L y 10000 mg/L) y su influencia en la cantidad y calidad de permeado producido; comentan que una alta concentración de sólidos puede contribuir a una buena formación de la membrana dinámica aunque esto podría provocar que se tenga también mayor concentración de sólidos y menor flux en el permeado. Alavi Moghaddam y colaboradores (2002) analizaron dos distintas concentraciones de sólidos suspendidos en el licor mezcla durante cuatro meses de filtración (5000 mg/L y 3500 mg/L), en ambos experimentos lograron obtener permeado de buena calidad; sin embargo, el flux fue significativamente menor cuando se trabajó con la concentración de 5000 mg/L.

De acuerdo a lo reportado en los trabajos mencionados, un aumento en la concentración de sólidos en el sobrenadante favorece la formación de la membrana dinámica aunque en exceso repercute en la productividad de la filtración. Sin embargo, es importante considerar que en esas investigaciones se trabajó en condiciones aerobias, agua con características distintas a los efluentes anaerobios, y se analizó el efecto de concentraciones de sólidos más elevadas a las que se están analizando en el presente documento.

Por el contrario, el trabajo de Zhang y colaboradores (2010) estudiaron membranas dinámicas sumergidas en la zona de sedimentación de un reactor UASB; reportan que en los casi 100 días de operación los sólidos en suspensión en esta zona variaron de 68 a 250 mg/L, pero no profundizan en el efecto de esta variación sobre la formación de la capa taponante. Concluyen que la membrana dinámica no solo está formada por partículas de lodo, sino por la acumulación de coloides, sustancias poliméricas extracelulares (SPE) y productos microbianos solubles (PMS).

De acuerdo con sus resultados, estas sustancias incrementaron su deposición sobre el textil conforme avanzó la experimentación. En este sentido, las sustancias poliméricas extracelulares excretadas por los microorganismos se ha considerado que tienen un efecto significativo sobre el taponamiento dado que incrementan la viscosidad del licor mezcla, lo que aumenta la resistencia al filtrado (Ozgun *et al.*, 2013). En el caso del presente estudio, las cargas orgánicas volumétricas bajas pudieron provocar que se generara una menor cantidad de sustancias poliméricas extracelulares que cuando el reactor recibe alimentación con mayor concentración de materia orgánica, lo cual de acuerdo a la literatura pudo provocar un menor taponamiento del textil que en este caso significó una inapropiada formación de la membrana secundaria. Debido a que este desarrollo experimental no contempló la determinación de SPE, es recomendable en futuras investigaciones corroborar esta hipótesis mediante la cuantificación de las sustancias poliméricas extracelulares en las membranas sumergidas en la zona de sedimentación en condiciones distintas de COV.

En resumen, se observó que con la temporada de lluvias disminuyó la cantidad de materia orgánica que ingresaba al reactor UASB (disminuyendo por consiguiente la COV), reduciendo su actividad y provocando un menor arrastre de sólidos; lo cual se vio reflejado con valores bajos de turbiedad tanto en la zona de sedimentación donde se ubicaron las membranas sumergidas en el reactor como en el efluente de éste. Es importante reiterar que pese a este menor arrastre de sólidos, los valores de turbiedad de los sobrenadantes de las cámaras externas (mediana 40 NTU) excedieron los valores que se presentaron a 1.92 m de profundidad dentro del reactor (mediana 25 NTU) (ver figura 4.25).

En contraste con lo acontecido en las membranas sumergidas en el reactor UASB, en la filtración sumergida en cámaras externas se notó mayor robustez ante las precipitaciones pluviales por tratarse de una etapa posterior al tratamiento biológico. Se observó que la disminución de sólidos y una operación en un entorno más controlado, propició la obtención de mejores resultados con las membranas dinámicas en cámaras externas en comparación a la otra configuración analizada.

4.2.3 Selección de tratamiento a evaluar durante la etapa 2

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la primera etapa de este trabajo, se puede decir que la filtración sumergida en cámaras externas presentó mejor comportamiento en cuanto a reproducibilidad y estabilidad de la filtración. Lo anterior se relaciona a que bajo esta configuración, la formación de la membrana secundaria se debe principalmente a mecanismos físicos de deposición y compactación de sólidos sobre el textil que funciona como soporte primario, y sobre todo que la membrana se encuentra en una cámara independiente que mantiene un entorno más controlado. Cuando los módulos se colocan en la zona de sedimentación del reactor UASB, estos están sometidos a un entorno más cambiante que pudiera o no favorecer la formación de una apropiada membrana dinámica.

Por ejemplo, en la sección 4.2.2 se comentó que al incrementar la cantidad de sustrato alimentado a los microorganismos anaerobios, estos incrementan su actividad y por consiguiente la producción de biogás, lo cual genera mayor turbulencia dentro del reactor y

mayor arrastre de sólidos en el efluente. Este fenómeno pudo haber impactado en especial en este estudio debido a que el reactor UASB no contó con el separador trifásico en la parte alta, ya que fue substituido por las membranas sumergidas en la zona de sedimentación. Lo que se busca resaltar es que el interior del reactor se encuentra en condiciones cambiantes en función de la acción conjunta de varias variables como es la carga orgánica, la turbulencia generada por las burbujas de biogás, que no es constante, la concentración y el tamaño de partículas.

Otra de las inconveniencias que presentó trabajar dentro del reactor fue que durante las corridas de filtración se tuvo variación de la presión hidrostática con respecto a la PTM que se deseaba analizar. Para explicar lo anterior es relevante comentar que durante las primeras horas de filtración, cuando no se tenía aún una buena formación de membrana dinámica, la alta porosidad del material del soporte primario permitió el libre paso del sobrenadante del reactor hacia el tubo de recolección de permeado, con un flux muy grande (figura 3.5). Si se considera que el caudal de la bomba peristáltica que se instaló para extraer de forma continua el permeado resultó insuficiente para extraer todo el líquido filtrado en ese periodo inicial, se explica la acumulación de éste dentro del tubo de recolección. Es decir, en el inicio de la corrida, la presión transmembrana era el resultado de la diferencia de los niveles hidrostáticos entre el reactor y el tubo de salida de recolección del permeado. Si bien en el trabajo de González-Ortega se reportó este suceso durante las primeras horas de filtración debido a la alta porosidad de los materiales estudiados, en los ensayos que se realizaron durante la etapa 1, sobre todo cuando el soporte se trataba de polipropileno no se alcanzó la presión de diseño hasta transcurridas 48 horas.

De los cuatro tratamientos estudiados, el que corresponde a la filtración sumergida en cámara externa utilizando como soporte polipropileno de 50 μm de tamaño de poro, fue el ensayo que obtuvo el mayor número de episodios de filtración efectiva con porcentajes de remoción mayores al 50%. Debido a los buenos resultados obtenidos y a todo lo discutido a lo largo de esta sección, se decidió optar por esta configuración y material para evaluar la filtración dinámica en periodos prolongados.

4.3 Resultados de la etapa 2: Evaluación de la filtración dinámica a largo plazo

En esta etapa, se evaluó simultáneamente y durante 96 días el comportamiento de cuatro membranas a través del sistema cuádruple de filtración dinámica que se describió en la sección de metodología. La diferencia entre los ensayos residió en que a las membranas contenidas en las cámaras A y B se les aplicó el método de limpieza de retrolavado, mientras que a las membranas de las cámaras C y D se les aplicó limpieza con agua presión (procedimientos de limpieza descritos en la sección de metodología). Cabe recordar que este método de recuperación de flux se aplicó siempre que este parámetro se mantuvo 24 horas por debajo de los 25 L/m²h. En adelante se hará referencia al término “ciclo”, entendiéndose éste como el periodo de tiempo comprendido entre dos aplicaciones de limpieza.

Los resultados obtenidos en esta segunda etapa se presentan y se discuten bajo dos enfoques fundamentales en los procesos de filtración: la productividad obtenida y la calidad del permeado producido.

4.3.1 Evaluación de la productividad de permeado

Las figuras 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 muestran la variación del flux que se presentó a lo largo de los 96 días de experimentación. Se puede observar que independientemente del método de limpieza aplicado, durante los ciclos 2 y 3 en las cuatro cámaras disminuyó la productividad de permeado (ver figura 4.31).

Por ejemplo en el gráfico correspondiente a la cámara CA (Figura 4.27 y 4.31), se puede observar que el primer ciclo se caracterizó por valores de flux más elevados que los obtenidos en los dos ciclos subsecuentes. Conforme fue transcurriendo el ciclo 1, se fue notando una clara disminución del flux de operación, a excepción de un evento que perturbó la membrana el día 19 (obstrucción de la salida del efluente del reactor UASB), hasta que fue necesario aplicar limpieza a la membrana el día 26. A diferencia del primer periodo de filtración, los ciclos 2 y 3 presentaron una tendencia irregular debido a los altibajos del flux de operación.

Otro fenómeno a resaltar es que durante el ciclo 2 y 3 de las cuatro cámaras, hubo varias ocasiones en que el flux decayó por debajo de los 25 L/m²h pero se restableció en las horas subsecuentes no llegando a mantenerse las 24 horas estipuladas en el criterio de limpieza.

Al comparar los intervalos en los que osciló el flux en los cuatro ensayos, resulta evidente que la cámara CD fue la que presentó un comportamiento más estable manteniendo su producción de permeado entre 25 –100 L/m²h.

Antes de proseguir, es prudente mencionar que la cámara CB sufrió una ruptura en una de las válvulas durante la aplicación de la segunda limpieza (día 55). La reparación tomó un par de días lo cual ocasionó que se tuviera que suplantar la membrana dinámica por textil nuevo. Más allá de obstaculizar la experimentación, se aprovechó este incidente para evaluar la reproducibilidad de la fase de formación de la membrana dinámica sobre material nuevo. Como se puede

observar en la figura 4.28 el ciclo 3 corresponde a este nuevo ensayo, es por ello que los valores de flux son más elevados que en el ciclo 2; sin embargo, no se logró igualar la productividad obtenida en el primer ciclo (figura 4.31). Por otro lado, la dispersión de los valores persistió, indicando que este fenómeno no se debe al desgaste del material sino a otra de las demás variables que influyen en la filtración dinámica, las cuales serán abordadas más adelante en este documento.

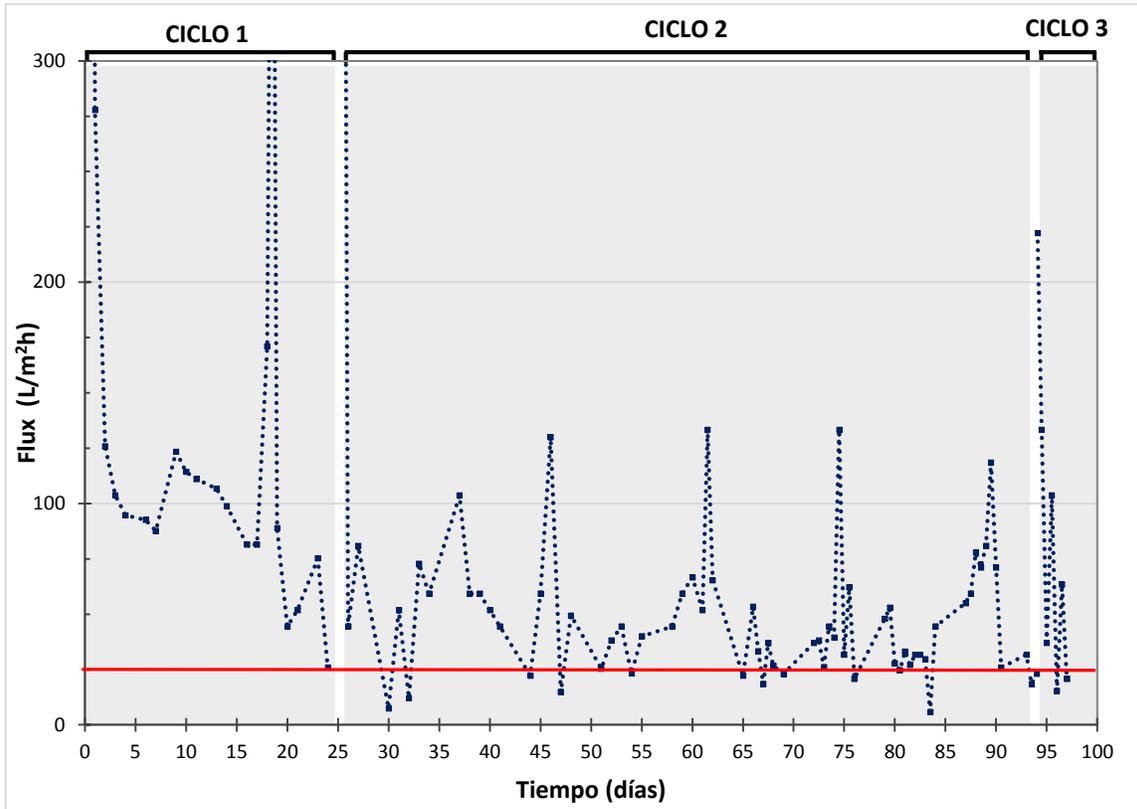


Figura 4.27. Variación del flux permeado en la cámara CA; línea continua roja corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m²h.

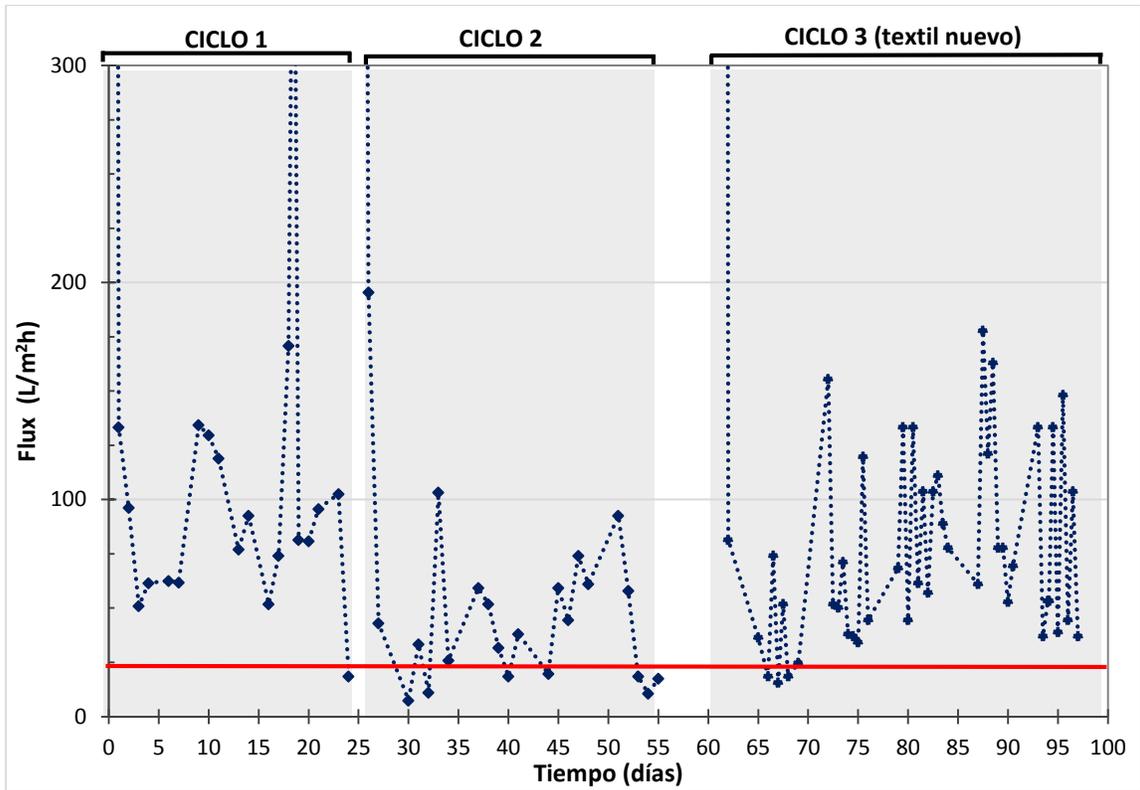


Figura 4.28. Variación del flux permeado en la cámara CB; línea continua roja corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m²h.

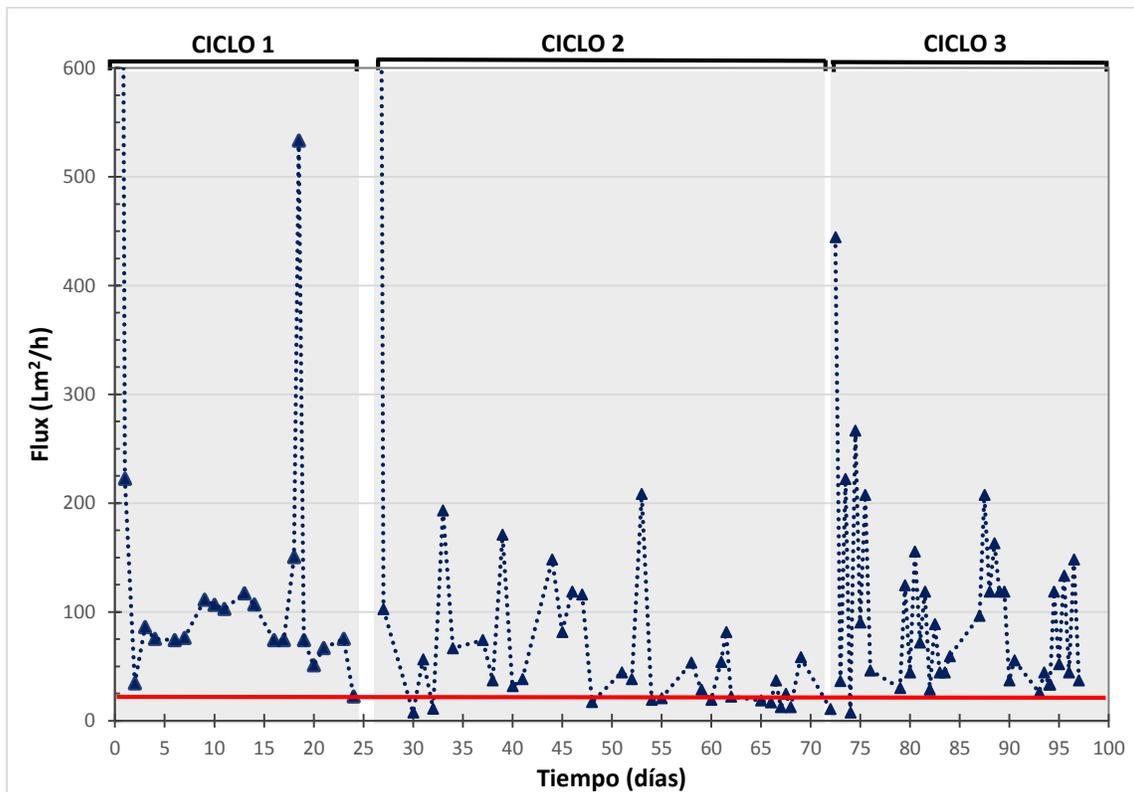


Figura 4.29. Variación del flux permeado en la cámara CC; línea continua roja corresponde a flux mínimo establecido 25 L/m²h.

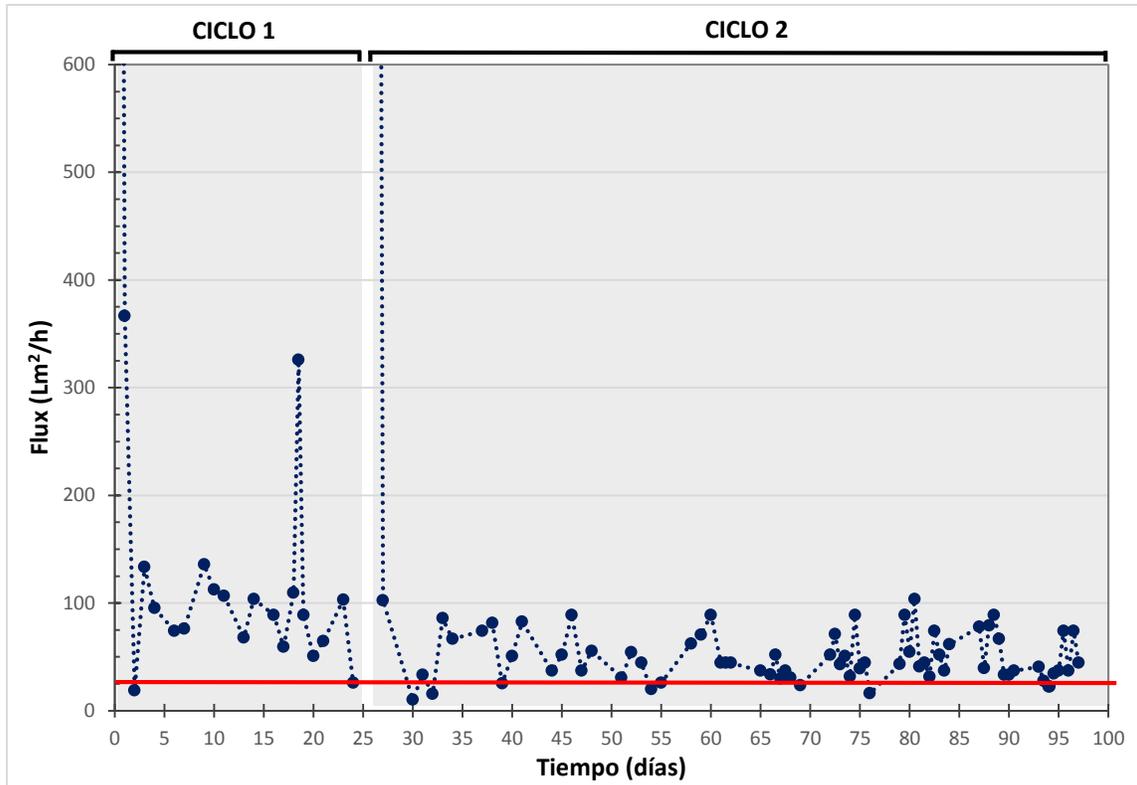


Figura 4.30. Variación del flux permeado en la cámara CD; línea continua roja corresponde a flux mínimo establecido $25 L/m^2h$.

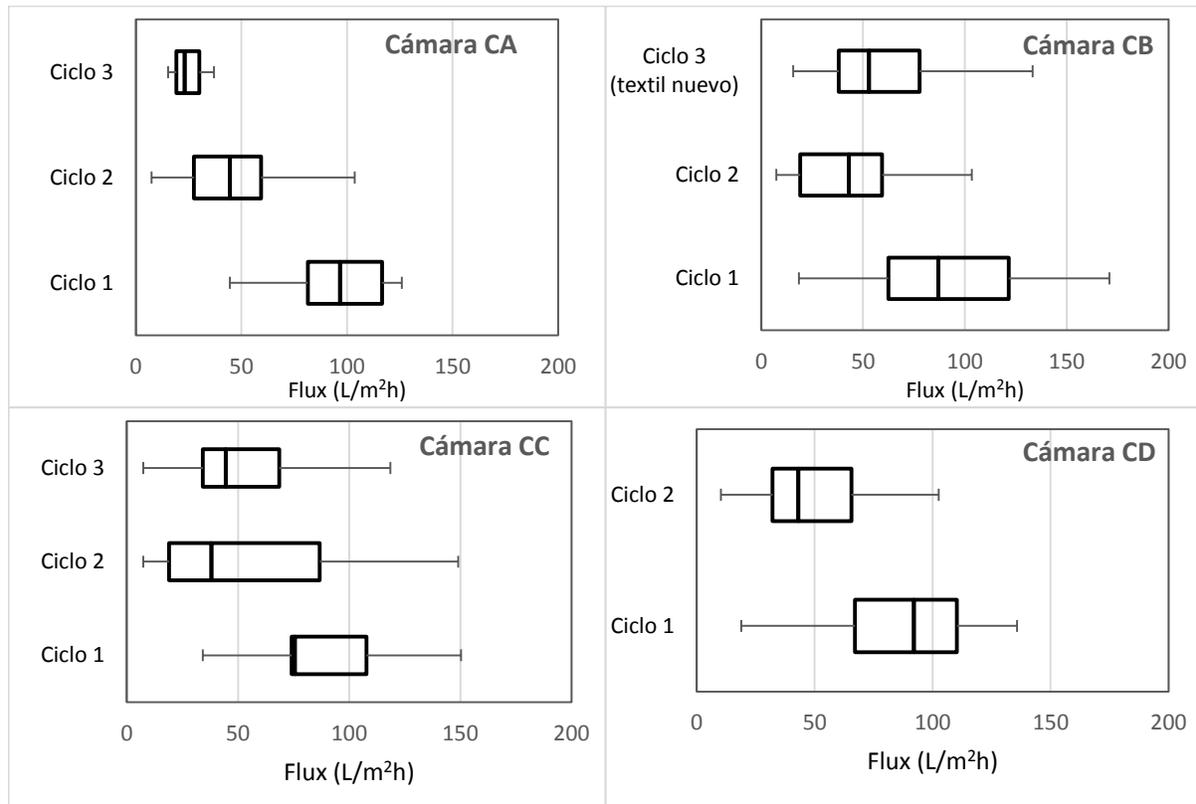


Figura 4.31. Diagramas de cajas (Box Plot) para la variación del flux con respecto al tiempo en las cuatro cámaras analizadas.

Como se puede apreciar en las figuras 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 y en la tabla 4.2, el primer ciclo de operación tuvo la misma duración en los cuatro ensayos. Por otra parte, la cámara A y C presentaron 3 ciclos, mientras que la cámara D solo presentó 2 ciclos, siendo el segundo el de mayor duración. En referencia a los últimos ciclos en cada cámara, es importante comentar que aún continuaban operando adecuadamente cuando se cumplió el periodo de 96 días y cesó la experimentación para cumplir con el programa de este trabajo de tesis.

Tabla 4.2. Duración y número de ciclos por cámara.

Cámara	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Operación Total
CA	26 d	68 d	2 d	96 d
CB	26 d	30d	-	56 d
CB'(textil nuevo)			34 d	34d
CC	26 d	46 d	24 d	96 d
CD	26 d	70 d	-	96 d

De acuerdo con el procedimiento de operación del sistema cuádruple de filtración previamente descrito en la metodología, durante la etapa de formación de membrana dinámica se controló el flux del permeado hasta que éste fuera menor a 6.4 mL/s lo cual marcó el inicio de la operación a presión constante (30 kPa). Para fines de este trabajo de investigación, al periodo comprendido desde el arranque de la membrana hasta el inicio de la operación a presión constante se le denominará Tiempo de Formación de la Membrana Dinámica (TFMD).

Cuando se inició la experimentación, los cuatro soportes requirieron de 26 horas para que se formara la membrana dinámica (tabla 4.3). Para el caso de las cámaras CA y CB que se limpiaron mediante retrolavado, se identificó que el TFMD previo al inicio del ciclo 2 disminuyó considerablemente a 10 y 25 minutos respectivamente; esto se asocia a que este método de limpieza solo remueve parcialmente la membrana secundaria. Cuando se limpió por segunda vez la membrana de la cámara CA (previo al ciclo 3), el TFMD disminuyó a tan solo 5 minutos.

Por el contrario, el TFMD en CC y CD después de la primera limpieza por agua a presión solo disminuyó a 20 horas, lo cual indicó que este método logró remover casi en su totalidad la membrana dinámica, lo suficiente como para requerir un tiempo de formación de membrana similar al demandado en el primer ciclo con material nuevo. En el tercer ciclo de la cámara CC, el TFMD disminuyó a 6 horas lo cual sugiere que algunos sólidos pudieron quedar adheridos al material provocando un decremento en el tiempo de formación de la membrana. Cabe recordar que la cámara CD no requirió de limpieza durante la operación del segundo ciclo, en el tiempo de experimentación aplicado.

Con respecto al ciclo 3 de la cámara B que corresponde a una réplica del arranque con textil nuevo, el tiempo de formación de membrana dinámica fue 22 horas, 15% menor al que se tuvo en el arranque de las primeras 4 membranas. Lo anterior se puede deber a la variación de la composición del agua alimentada a las cámaras, esto se discutirá más adelante.

Tabla 4.3. Tiempo de formación y porcentaje de recuperación de flux.

Cámara	CICLO 1		CICLO 2		CICLO 3	
	Tiempo de formación de MD (h)	Flux inicial L/m ² h	Tiempo de formación de MD (h)	% recuperación de flux	Tiempo de formación de MD (h)	% recuperación de flux
CA	26	2844.44	0.16(10 min)	19	0.08 (5 min)	8
CB	26	2844.44	0.42(25 min)	25	(textil nuevo) 22	N/A
CC	26	2844.44	20	100	6	100
CD	26	2844.44	20	100	N/A	N/A

*N/A: No aplica

En relación al porcentaje de recuperación de flux, es evidente que cuando se aplica agua a presión como método de limpieza se retira la mayor parte de la membrana secundaria lo cual permite que se recupere el 100% del flux (tabla 4.3) aunque en contrapartida, requiere de un mayor TFMD. En contraste, las membranas CA y CB después de la primer limpieza solo recuperan un 19% y 25%, y para la segunda limpieza en CA (ciclo 3) solo el 8% del flux inicial.

Con respecto al método de limpieza aplicado, en las cámaras que se limpiaron con retrolavado CA y CB el 50% de los datos se concentró en el intervalo de 15 a 55 L/m²h, y en las cámaras donde se aplicó agua a presión para retirar la capa taponante, el 50% de los datos osciló en los siguientes intervalos: para la cámara CC de 20 a 90 L/m²h y en la cámara CD de 32 a 70 L/m²h (Figura 4.31). De estos resultados puede inferirse que el método de remoción total de la membrana secundaria propició la mayor productividad de la filtración dinámica.

4.3.2 Evaluación de la calidad del permeado

Los gráficos que se incluyen en esta sección corresponden al seguimiento de la calidad del permeado, la cual se evaluó a través de la determinación de la turbiedad y de los sólidos suspendidos totales.

En el gráfico 4.32, se observa el descenso de la turbiedad de los permeados de la CA durante los primeros 15 días del primer ciclo de operación; posteriormente se nota un claro incremento de esta variable, el cual prevalece en los dos ciclos de operación, mostrando valores entre los 30 y 60 NTU. Cabe resaltar que esta tendencia se presentó en las cuatro membranas analizadas.

Por otra parte, en la mayoría de los casos los valores de turbiedad excedieron el nivel de sólidos suspendidos buscado, lo cual impidió que esta variable se utilizara como indicador de producción de permeado de buena calidad, es decir, que garantizara que el permeado tuviera menos de 20 mg SST/L. Debido a lo anterior, solo se incluyó la figura 4.32 como ejemplo de la variación de la turbiedad a lo largo de la experimentación; las demás gráficas pueden ser consultadas en el anexo B.

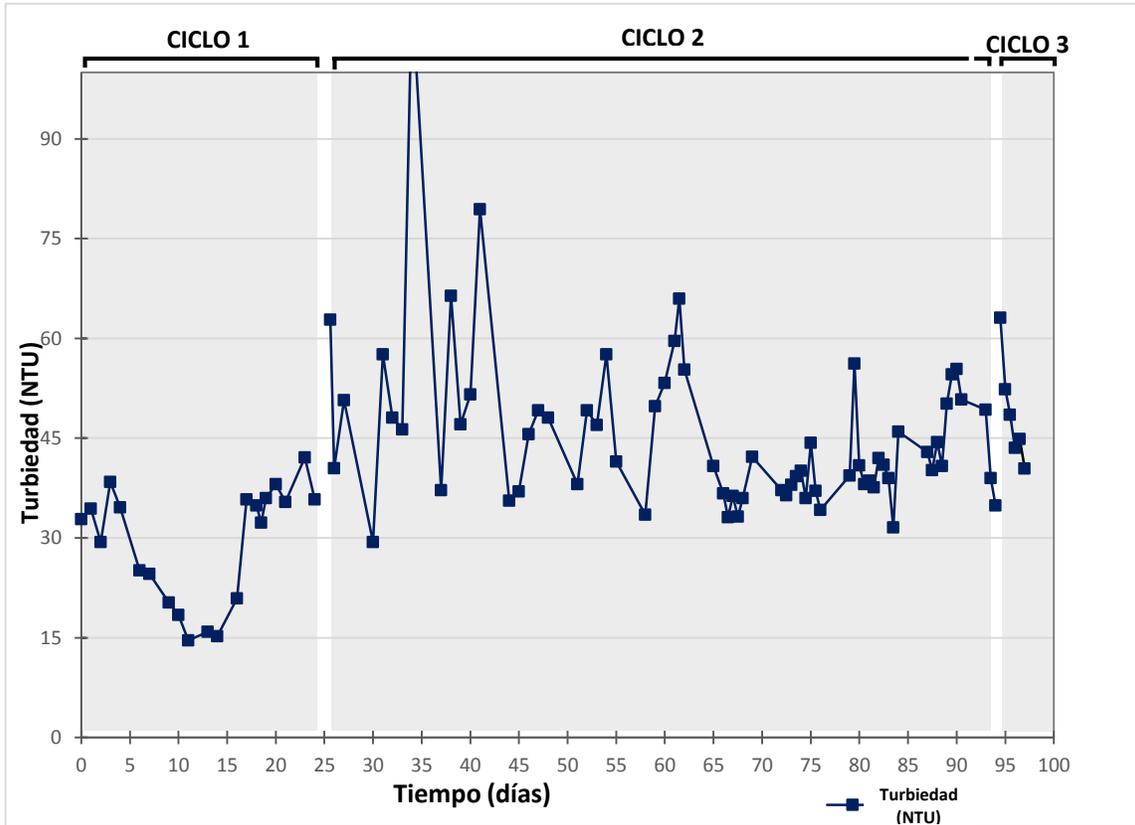


Figura 4.32. Variación de la turbiedad en el permeado obtenido en la cámara CA a lo largo de la experimentación.

En lo que concierne a la variación de los sólidos suspendidos totales, durante los primeros 15 días en las cámaras CA, CC y CD se observa una clara disminución (Figuras 4.33, 4.34, 4.35 y 4.36), como lo observado en la turbiedad. En la cámara CB, aunque no se nota un decaimiento, durante este mismo periodo se determinaron valores por debajo de los 20 mg SST/L.

A partir del día 16 incrementaron gradualmente los sólidos suspendidos presentes en los permeados recolectados de las cuatro cámaras, hasta alcanzar al final del primer ciclo de operación valores de: 32 mg SST/L en la cámara CA, 28 mg SST/L en la cámara CB, 44 mg SST/L en la cámara CC y 36 mg SST/L en CD (Figura 4.37). La calidad de los permeados no se vio favorecida por las limpiezas aplicadas a las membranas, prueba de esto es que durante los ciclos subsiguientes (70 días) los valores de sólidos oscilaron en el intervalo de 16 a 72 mg SST/L (Figura 4.37).

Por otra parte, en la figura 4.37 se puede observar que la distribución de los sólidos suspendidos en el ciclo 2 y ciclo 3 de la cámara CB presentan similitudes en cuanto a la amplitud del rango intercuartílico (dispersión) y a los valores mínimos y máximos, solo difieren en la mediana que para el ciclo 2 fue de 34 mg SST/L y para el ciclo 3 fue de 40 mg SST/L. Se resaltan estas semejanzas, dado que el ciclo 3 de esta cámara se realizó con soporte primario nuevo; por consiguiente, el no presentar mejor calidad de permeado en este ciclo, se puede tomar como evidencia de que en esta investigación el tiempo de uso del textil no influyó sobre la calidad del permeado.

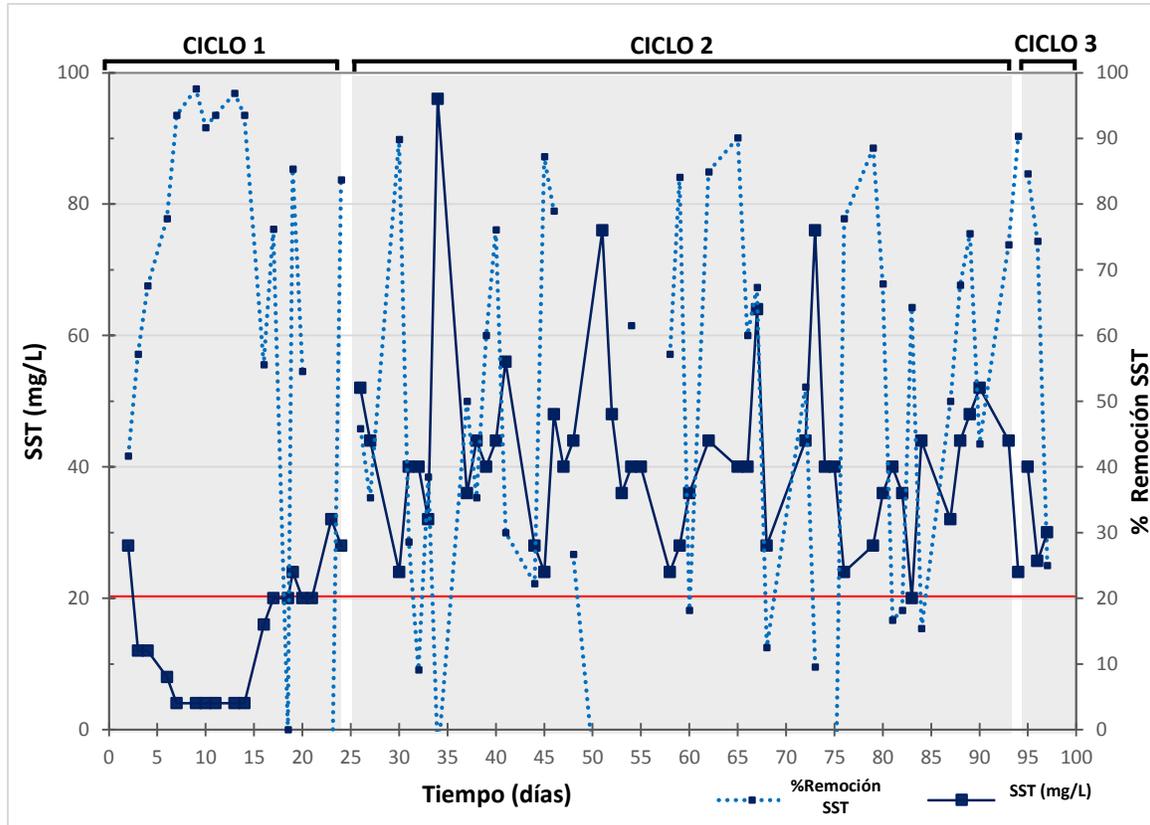


Figura 4.33. Variación de los sólidos suspendidos en el permeado obtenido en la cámara CA; la línea continua roja corresponde al valor máximo definido (20 mg SST/L).

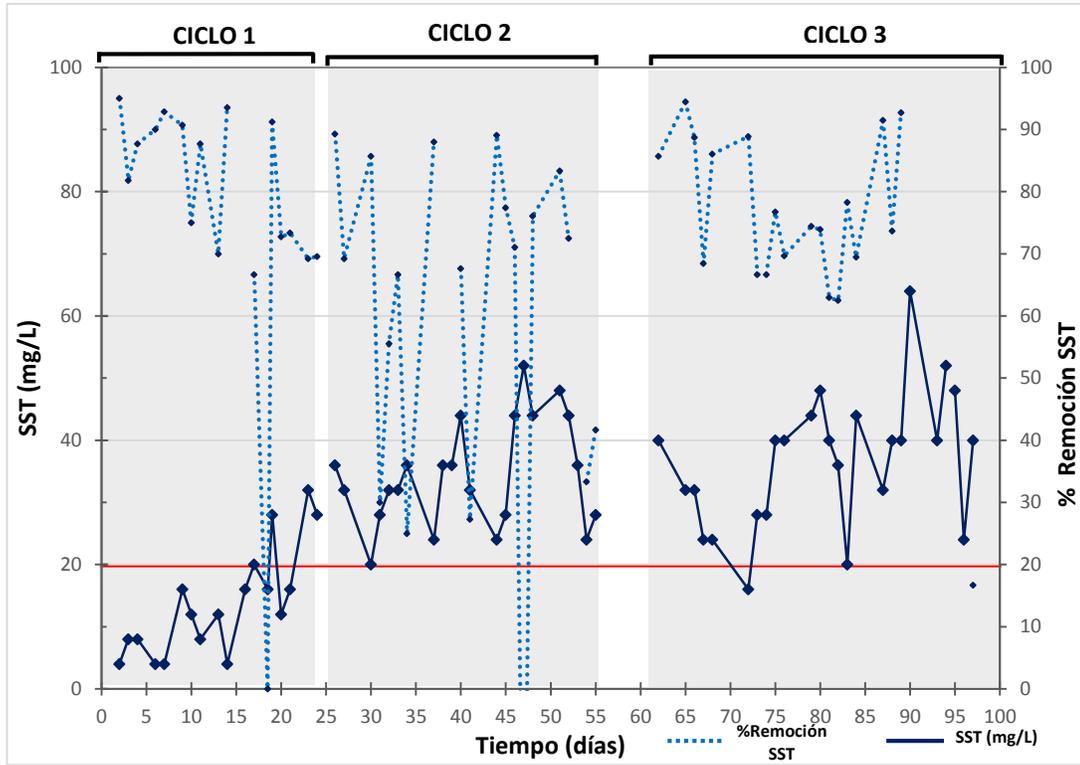


Figura 4.34. Variación de los sólidos suspendidos en el permeado obtenido en la cámara CB; la línea continua roja corresponde al valor máximo definido (20 mg SST/L).

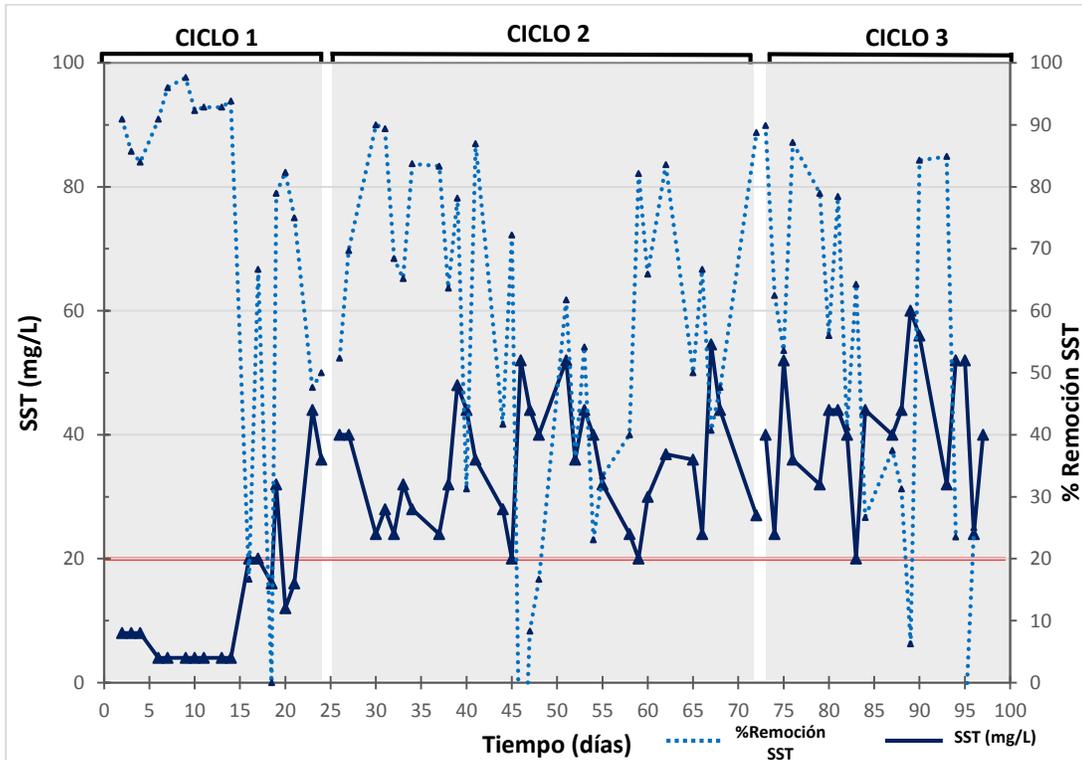


Figura 4.35. Variación de los sólidos suspendidos en el permeado obtenido en la cámara CC; la línea continua roja corresponde al valor máximo definido (20 mg SST/L).

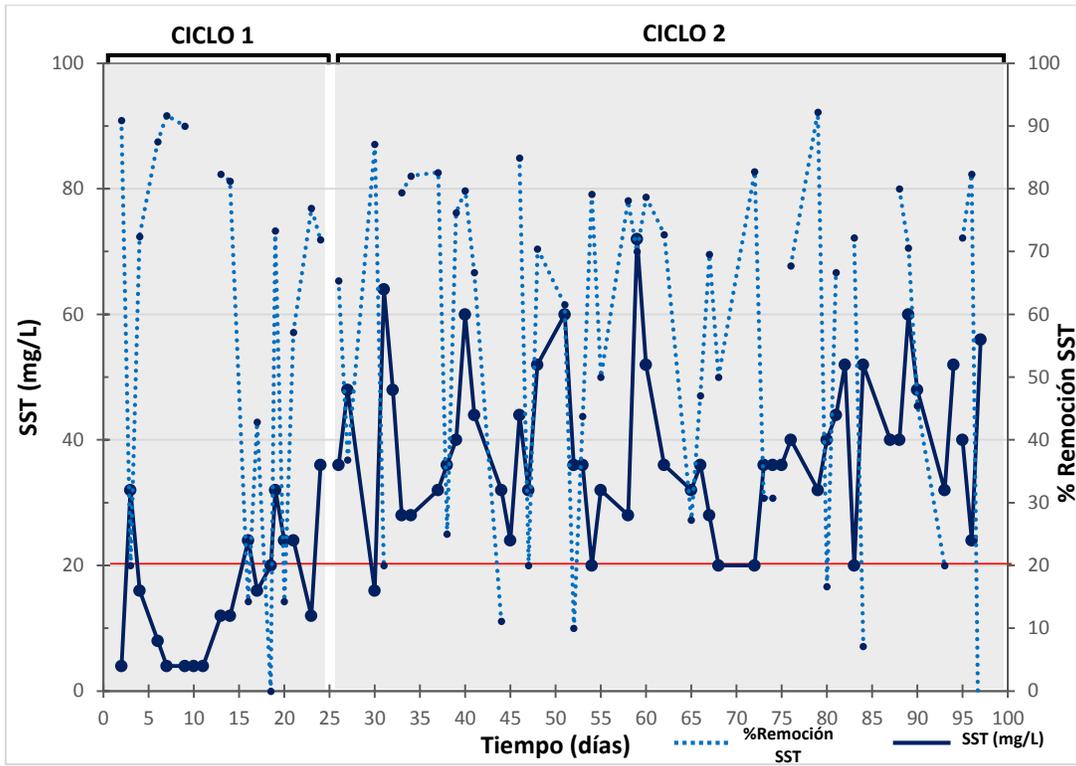


Figura 4.36. Variación de los sólidos suspendidos en el permeado obtenido en la cámara CD; la línea continua roja corresponde al valor máximo definido (20 mg SST/L).

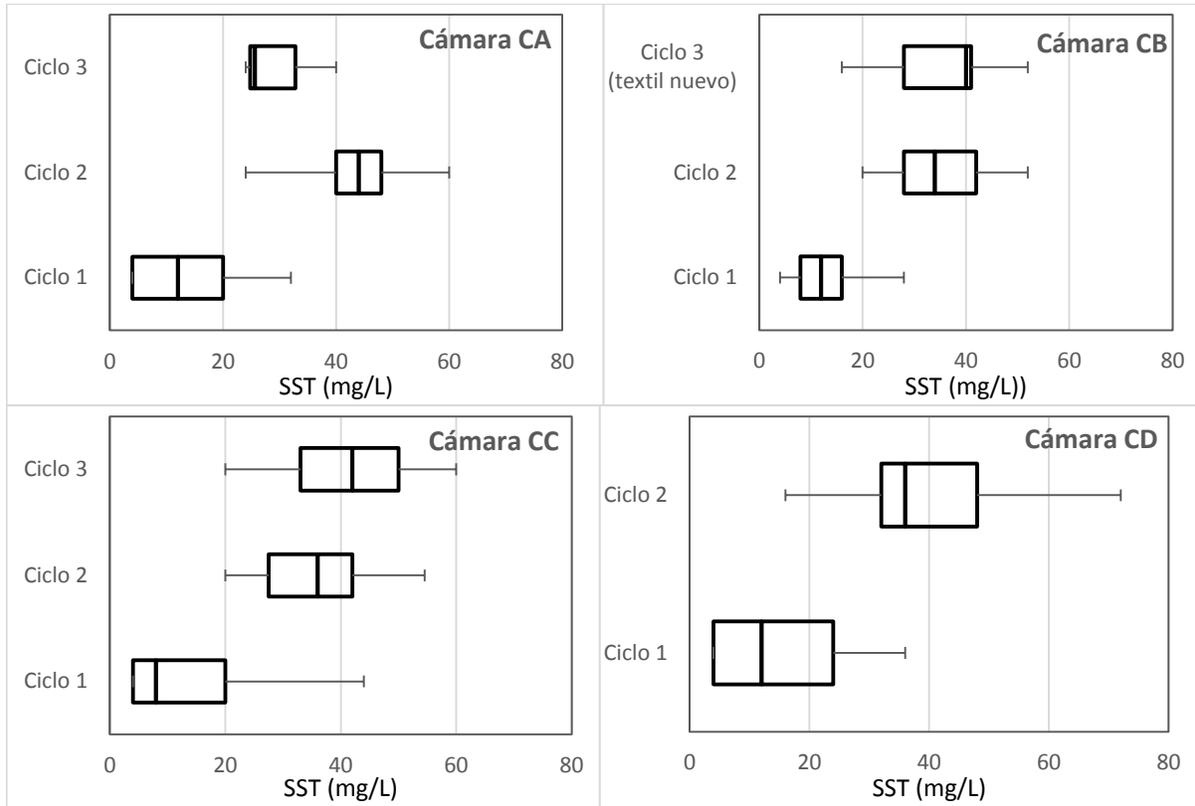


Figura 4.37. Diagramas de cajas (Box Plot) para la variación de los sólidos suspendidos totales en el permeado de las cuatro cámaras analizadas.

En las figuras 4.38, 4.39, 4.40 y 4.41 se puede observar la variación de la concentración de materia orgánica en los permeados. Se puede resaltar que durante el periodo de filtración efectiva que se presentó durante el ciclo 1, el agua filtrada presentó valores por debajo de los 100 mg DQOt/L pero que conforme transcurrió la experimentación éste parámetro fue en aumento como lo acontecido con la concentración de sólidos suspendidos.

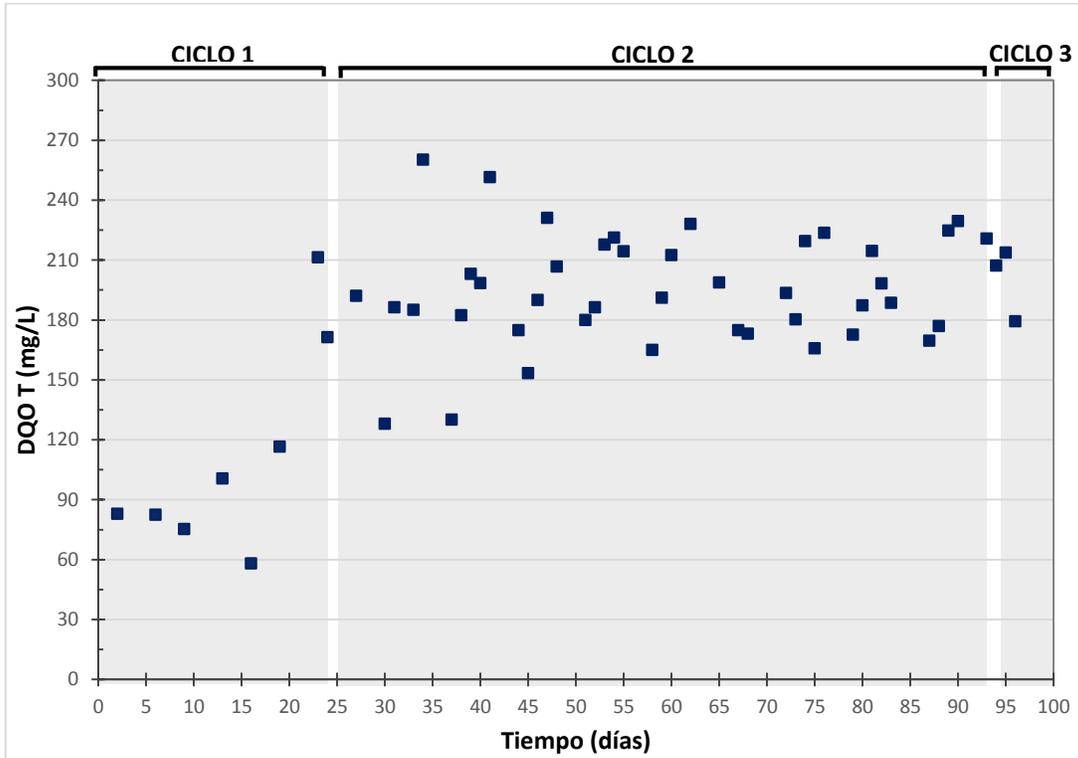


Figura 4.38. Variación de la DQO total en el permeado obtenido en la cámara CA.

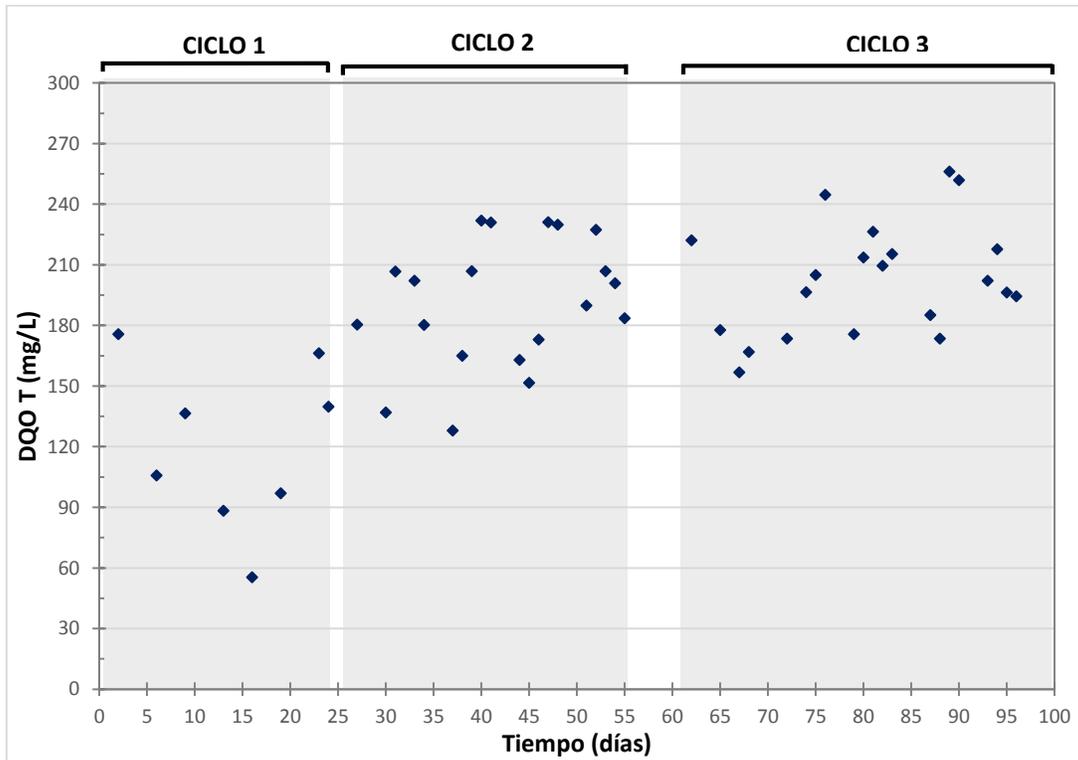


Figura 4.39. Variación de la DQO total en el permeado obtenido en la cámara CB.

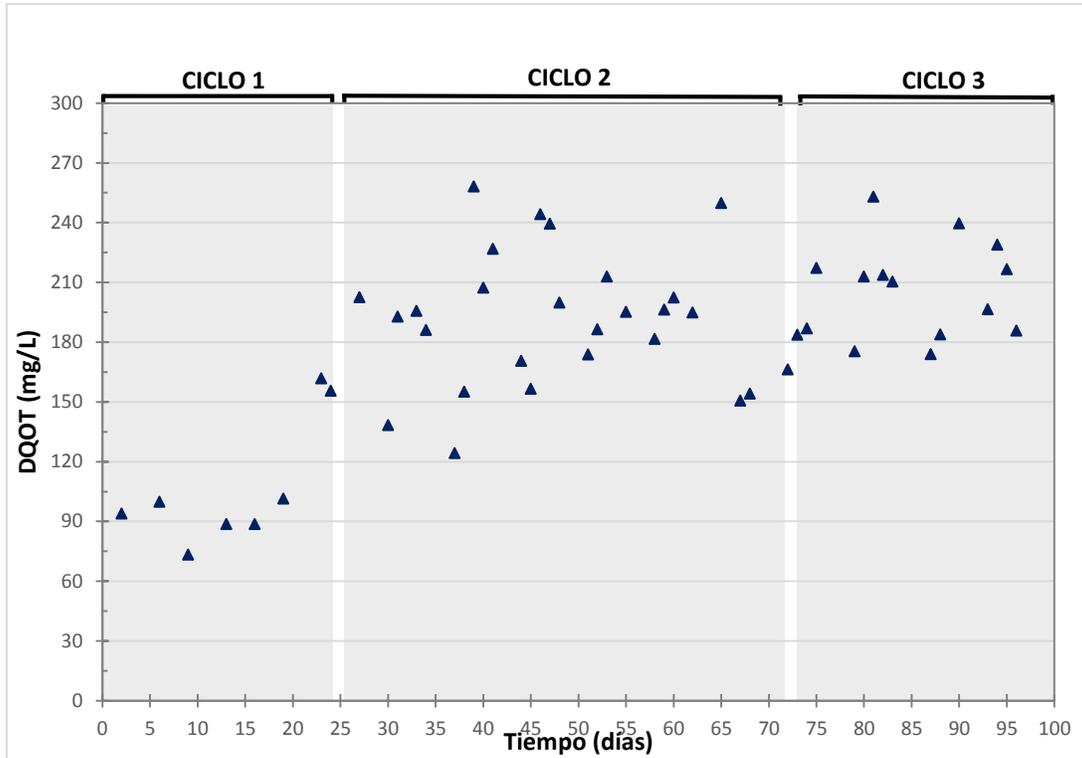


Figura 4.40. Variación de la DQO total en el permeado obtenido en la cámara CC.

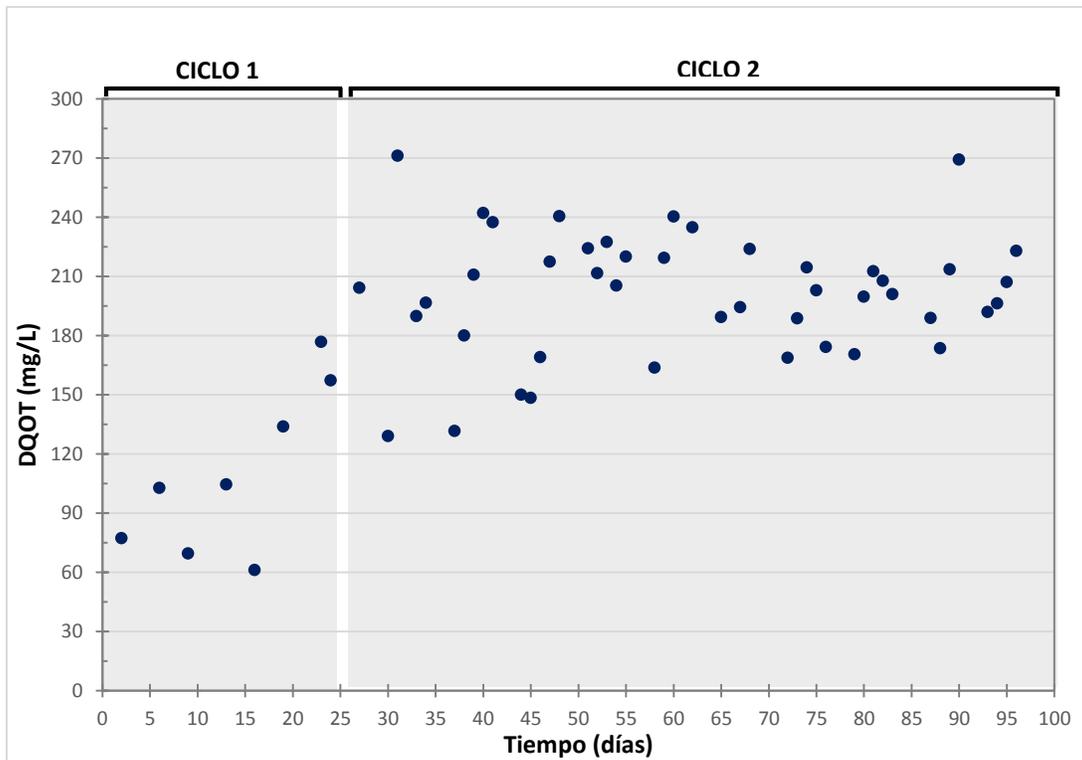


Figura 4.41. Variación de la DQO total en el permeado obtenido en la cámara CD.

4.3.3 Filtración efectiva

De acuerdo a lo establecido en este trabajo, se dice que se está filtrando efectivamente cuando se tiene una producción de permeado mayor a 25 L/m²h con una concentración de sólidos suspendidos menor a 20 mg/L. Estos dos límites corresponden a las líneas punteadas rojas señaladas en los gráficos de la figura 4.42. Con el propósito de facilitar el análisis de las gráficas, se sombreó en color gris los periodos en los que se cumplieron los criterios especificados de calidad y productividad. Gracias a esto se puede observar que al inicio de las cuatro corridas experimentales, se mantuvo por 21 días continuos la filtración efectiva. Lo anterior es un logro significativo teniendo en cuenta que durante la primera etapa de este trabajo no se logró operar en las condiciones deseadas por más de 120 horas.

Como se comentó anteriormente en esta sección, a partir del día 16 fue incrementándose paulatinamente la concentración de los sólidos suspendidos en los permeados, pero fue hasta el día 22 cuando rebasaron los 20 mg SST/L y por lo tanto ya no se filtró efectivamente. En adelante, solo se presentaron un par de periodos esporádicos de filtración efectiva, que no prevalecieron por más de 24 horas.

Las barras de color rojo señalan cuando el flux de las cámaras estuvo por debajo de los 25 L/m²h; cabe recordar que solo cuando esto se mantuvo por 24 horas se aplicó limpieza a las membranas.

En resumen, la figura 4.42 demuestra que las cuatro membranas mantuvieron una alta productividad de permeado a lo largo de los 96 días de operación, de tal forma que, la principal limitante para lograr la filtración efectiva fue la mala calidad del agua filtrada.



Figura 4.42. Variación de flux y sólidos suspendidos totales, a) cámara CA, b) cámara CB, c) cámara CC, y d) cámara CD. En sombreado gris, periodos de filtración efectiva con calidad y productividad deseadas.

4.3.4 Influencia de la composición del agua sobrenadante en la calidad del permeado

Como se comentó con anterioridad, durante la experimentación se presentaron algunos episodios de filtración efectiva, siendo el más significativo, aquel que se mantuvo por 21 días en las cuatro membranas analizadas durante el primer ciclo. Con el fin de identificar los factores que favorecieron la producción de permeado con menos de 20 mg de sólidos suspendidos totales, se analizó la composición del agua que recibieron las membranas especialmente durante ese periodo. Para facilitar el análisis, en las figuras 4.43, 4.45 y 4.46 se resaltan en sombreado gris los periodos en los que obtuvo permeado de buena calidad.

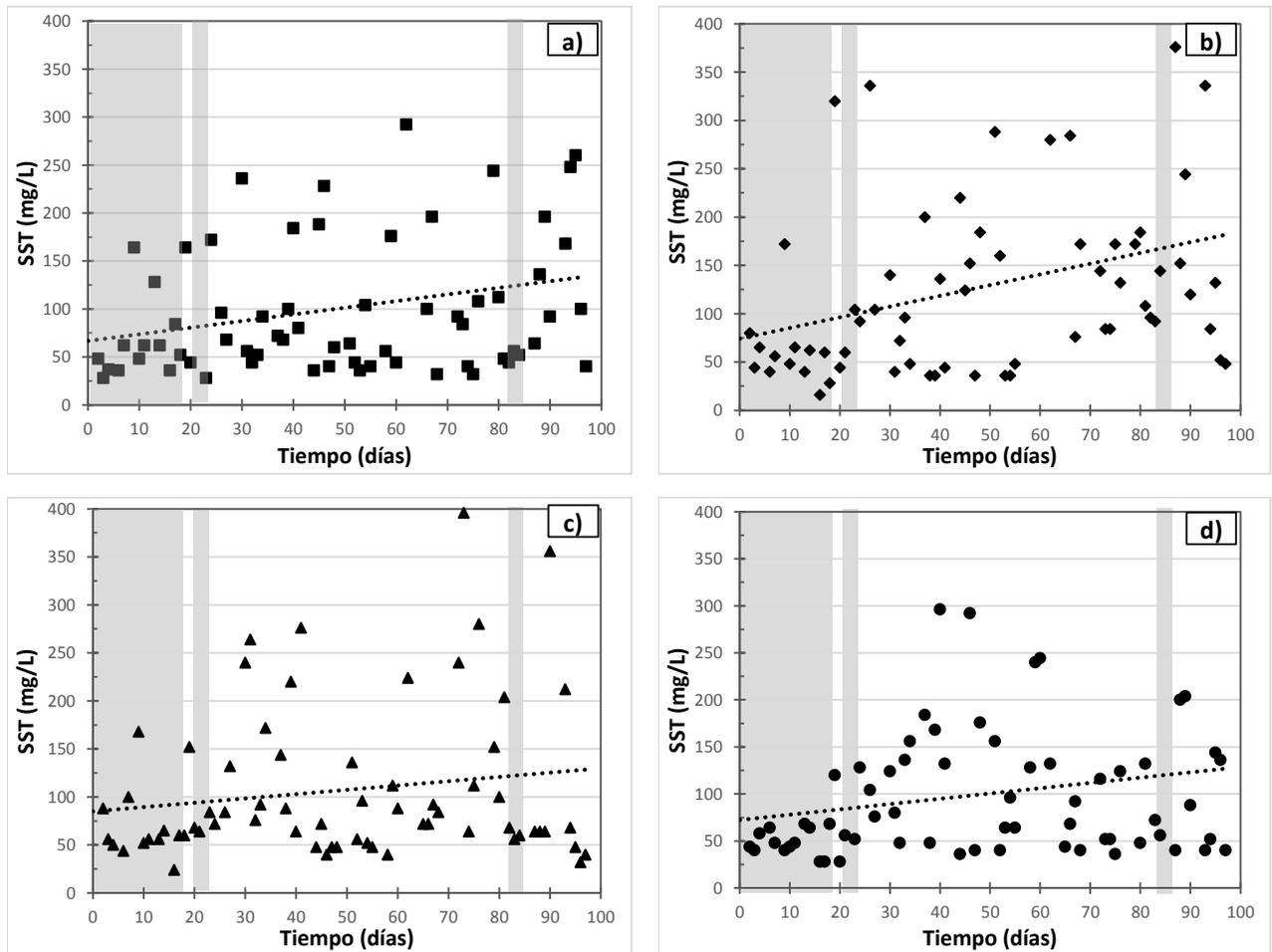


Figura 4.43. Variación de sólidos suspendidos totales en los sobrenadantes de las cuatro membranas analizadas, a) cámara CA, b) cámara CB, c) cámara CC, y d) cámara CD (las líneas punteadas corresponden a la tendencia de los datos). En sombreado gris, periodos de filtración efectiva con calidad y productividad deseadas.

Se observó que el periodo más prolongado de filtración efectiva se presentó durante la temporada vacacional en Ciudad Universitaria. Como se aprecia en las figuras 4.43, 4.45 y 4.46, durante este periodo el efluente del reactor UASB presentó menor concentración de sólidos

suspendidos y menor concentración de materia orgánica en comparación con los valores que se presentaron en los demás días de experimentación que corresponden a la temporada de estiaje.

En el diagrama de cajas de la figura 4.44 se puede observar que durante la temporada vacacional, además de presentarse valores bajos de sólidos en los sobrenadantes, se obtuvieron rangos intercuartílicos menores a los obtenidos en temporada de estiaje, lo cual implica menor variación de la concentración de sólidos suspendidos. En general se presentaron valores que oscilaron entre los 16 y 128 mg SST/L.

En las cuatro gráficas de la figura 4.43 se nota una clara tendencia al incremento (línea punteada negra) conforme se avanzó en la experimentación. Esto se atribuye a que con la temporada de estiaje el agua residual municipal presentó mayor concentración de materia orgánica; lo cual incrementó la actividad del reactor anaerobio y propició mayor arrastre de sólidos en su efluente.

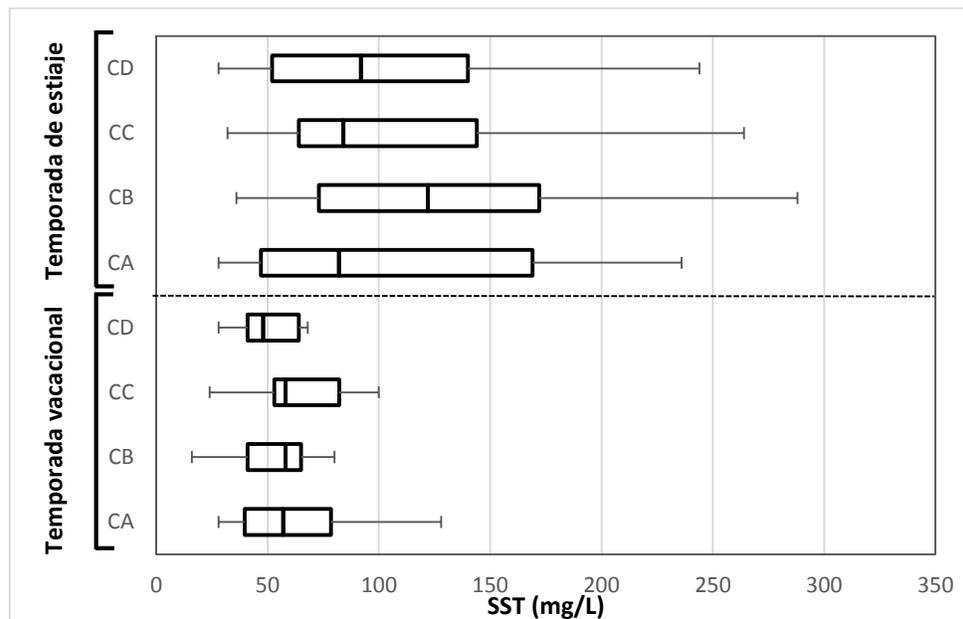


Figura 4.44. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de los sólidos suspendidos totales en los sobrenadantes de las cuatro cámaras durante la temporada vacacional y temporada de estiaje.

Con respecto a la materia orgánica, medida a través de la demanda química de oxígeno (total y soluble), se nota que en el periodo de filtración efectiva el efluente presentó valores por debajo de los 400 mg DQO₇/L y la fracción soluble estuvo por debajo de los 90 mg DQOs/L (figuras 4.45, 4.46, 4.47 y 4.48); estos parámetros, al igual que los SST fueron en aumento conforme transcurrió el tiempo.

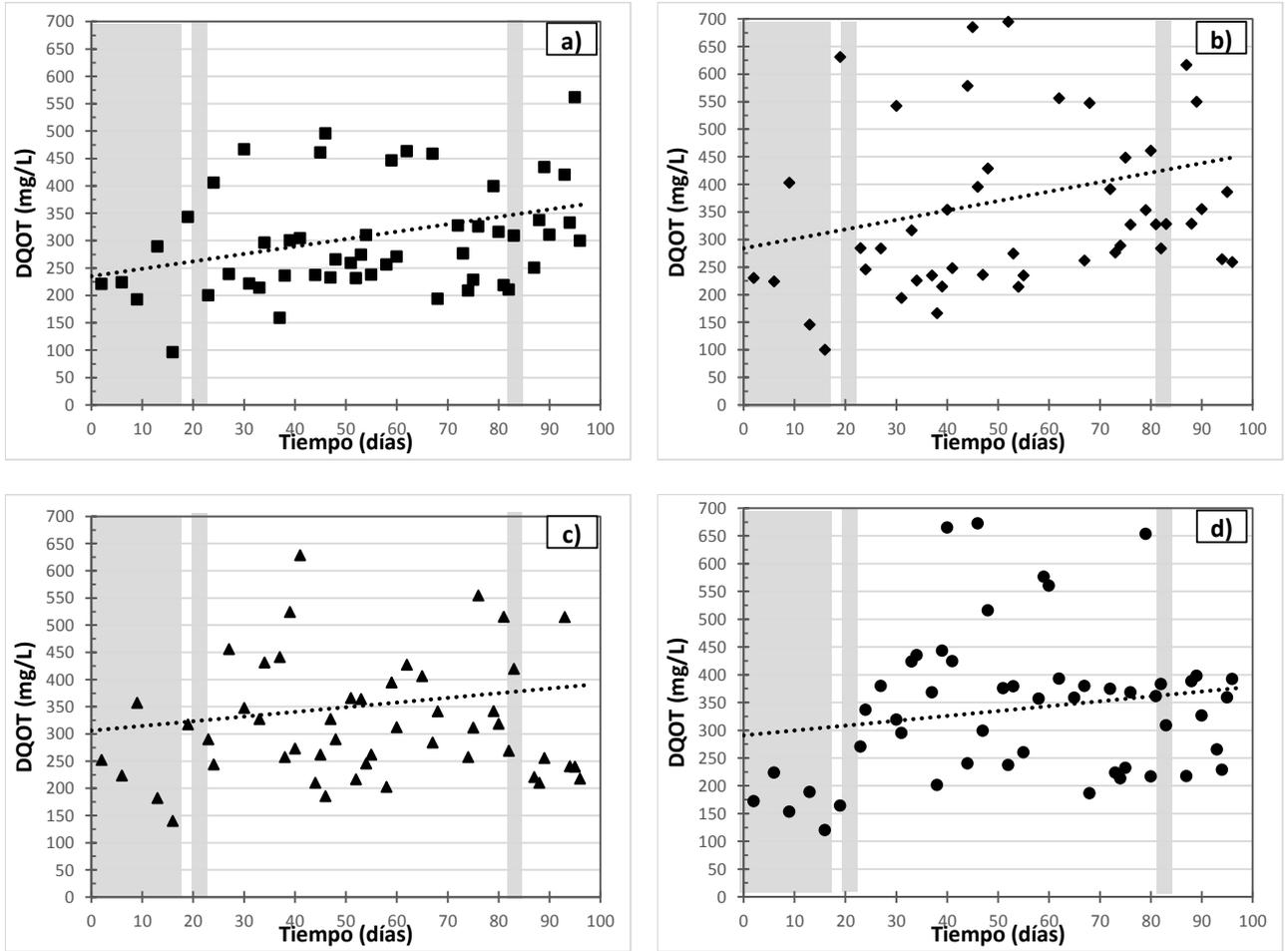


Figura 4.45. Variación de la DQO total en los sobrenadantes de las cuatro membranas analizadas, a) cámara CA, b) cámara CB, c) cámara CC, y d) cámara CD (las líneas punteadas corresponden a la tendencia de los datos). En sombreado gris, periodos de filtración efectiva con calidad y productividad deseadas.

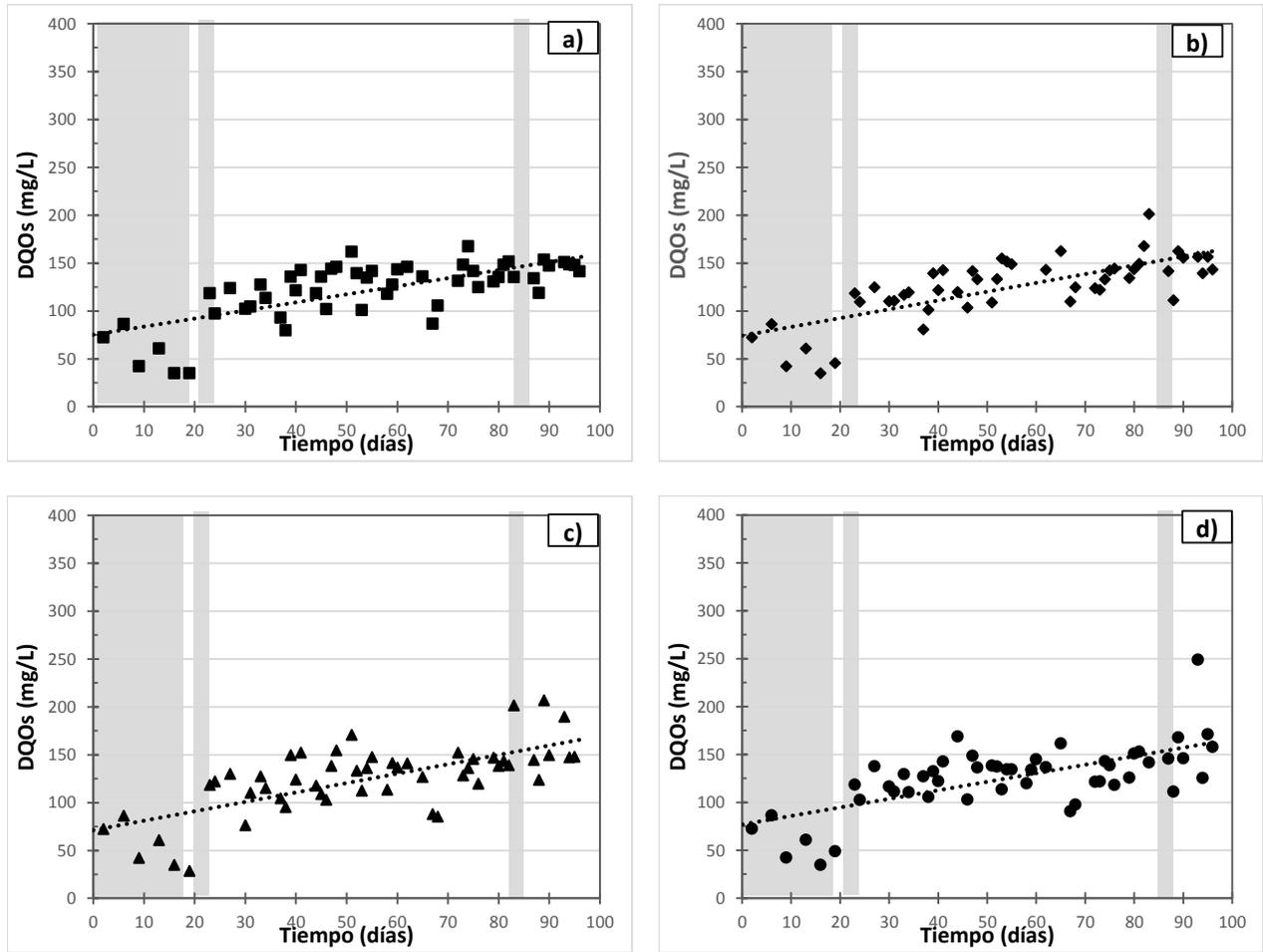


Figura 4.46. Variación de la DQO soluble en los sobrenadantes de las cuatro membranas analizadas, a) cámara CA, b) cámara CB, c) cámara CC, y d) cámara CD (las líneas punteadas corresponden a la tendencia de los datos). En sombreado gris, periodos de filtración efectiva con calidad y productividad deseadas.

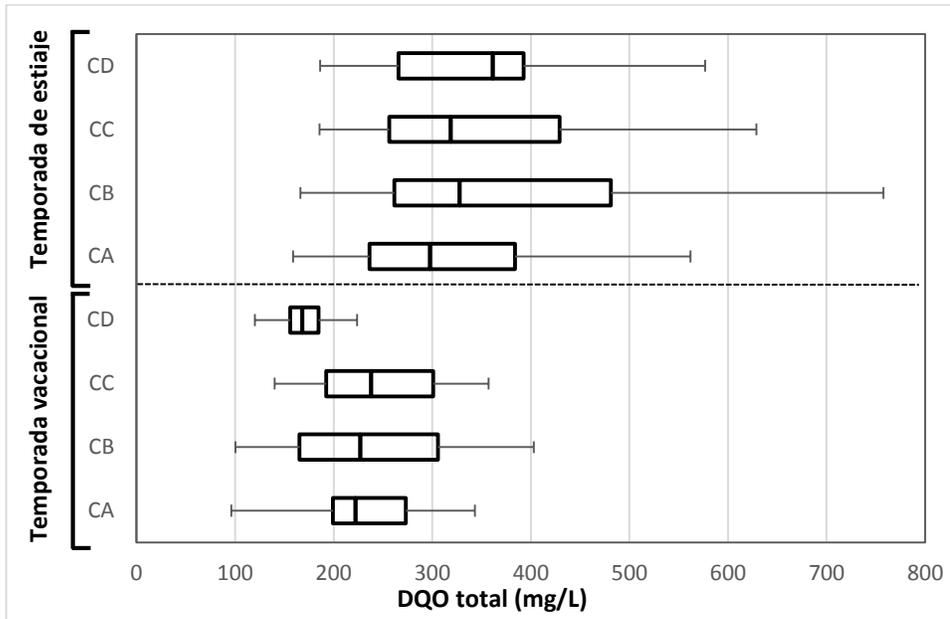


Figura 4.47. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de materia orgánica total en los sobrenadantes de las cuatro cámaras durante la temporada vacacional y temporada de estiaje.

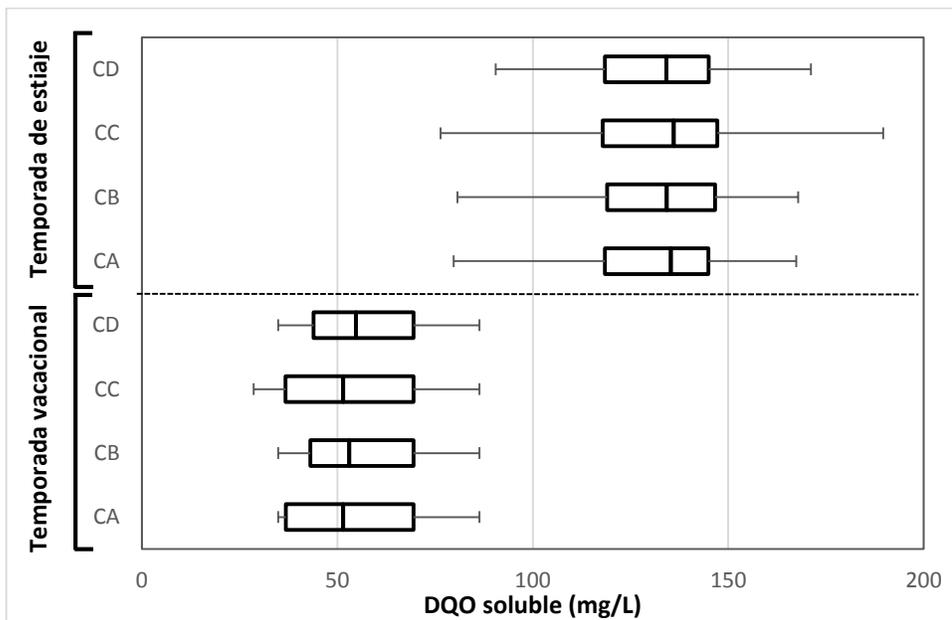


Figura 4.48. Diagrama de cajas (Box Plot) para la variación de la materia orgánica soluble en los sobrenadantes de las cuatro cámaras durante la temporada vacacional y temporada de estiaje.

4.4 Análisis y discusión: Etapa 2

4.4.1 Influencia de la etapa de operación a flux constante

Una de las ventajas de utilizar membranas dinámicas es, además de su costo, que gracias a que los materiales de soporte primario tienen mayor porosidad que las membranas convencionales, presentan menor resistencia al paso de líquido y en consecuencia se requiere menos energía para obtener alta productividad de permeado. A diferencia de otras investigaciones publicadas, en este trabajo se operó membranas dinámicas a presión constante empleando como fuerza impulsora una columna hidrostática con el propósito de reducir aún más la demanda energética de esta tecnología. Sin embargo, operar de esta forma tuvo sus retos, en particular mantener la altura de la columna de agua pese al alto flux inicial provocado por la alta porosidad del soporte primario y la ausencia de membrana secundaria que oponga resistencia al flujo. Como solución se controló el flux durante las primeras horas de filtración, una estrategia operativa que aunque no se ha reportado en la literatura, permitió mantener la presión de diseño y propiciar la formación de la membrana dinámica.

Esta estrategia influyó directamente sobre la formación de la capa taponante; es cierto que al controlar el caudal de salida de permeado se redujo por consiguiente la velocidad de arrastre de partículas, lo que implica que entre menor cantidad de agua pase por el textil, mayor tiempo se requerirá para formar la membrana secundaria. En otro sentido, Liang y colaboradores (2013) comentan que el alto flux inicial que presentan las membranas dinámicas incide directamente en la velocidad de deposición de las partículas sobre el soporte primario y propicia que las partículas de mayor tamaño sean las que se depositen preferentemente sobre el textil, ocasionando mayor porosidad de la membrana secundaria. De acuerdo con esto, es posible que mantener constante el flux a un valor menor que el flux intrínseco del material poroso provocara una menor velocidad de acercamiento de las partículas a la membrana y por consiguiente una formación de la membrana dinámica más lenta, pero más homogénea. Lo anterior pudo propiciar que por 21 días se filtrara efectivamente, a diferencia de la primera etapa de este trabajo donde no se controló el flux inicial y no se logró mantener la filtración efectiva por más de 120 horas.

4.4.2 Variación del flux

Con base en los trabajos publicados de filtración dinámica, cuando se opera a flux o a presión transmembrana constante se obtienen como resultado curvas bien definidas del incremento o decremento de la variable respuesta (presión o flux, según sea el caso) como los ejemplos de la figura 4.45. A diferencia de estos casos, en la filtración dinámica por medio de presión hidrostática, las curvas de descenso del flux obtenidas presentan gran dispersión a lo largo del tiempo de operación (Figura 4.49). Como evidencia están los resultados obtenidos de la variación del flux en esta experimentación (Figuras 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30). Dentro de los trabajos de investigación de tratamiento de efluentes anaerobios no existe hasta el momento alguno que haya operado bajo estas condiciones, y por lo tanto no es posible realizar una comparación directa con lo aquí encontrado. No obstante, en la literatura de membranas dinámicas aerobias si existen trabajos que han analizado la filtración a distintas presiones

hidrostáticas, tal es el caso de Xue y colaboradores (2010) quienes reportan curvas del flux similares a las que aquí se obtuvieron (figura 4.50).

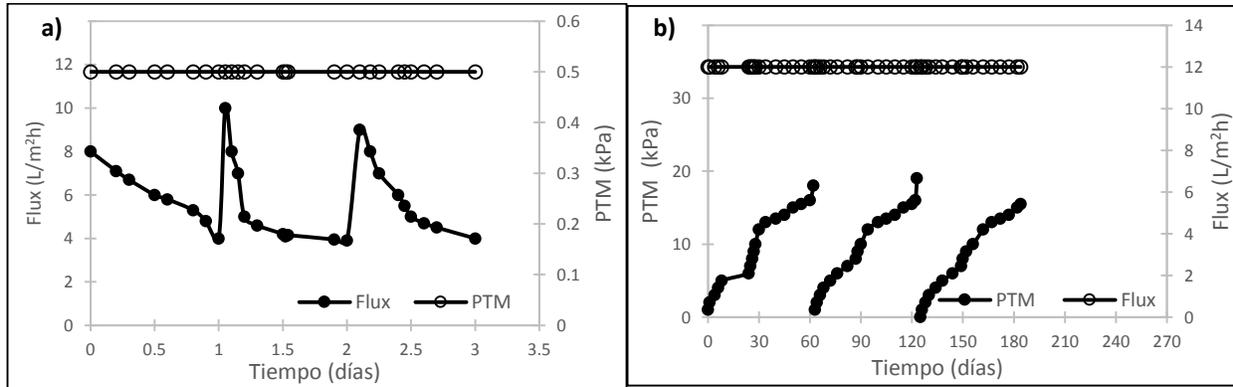


Figura 4.49. Curvas típicas de: a) variación del flux bajo PTM constante (Ho *et al.*, 2007), b) variación de la PTM bajo flux constante (Zhang *et al.*, 2011).

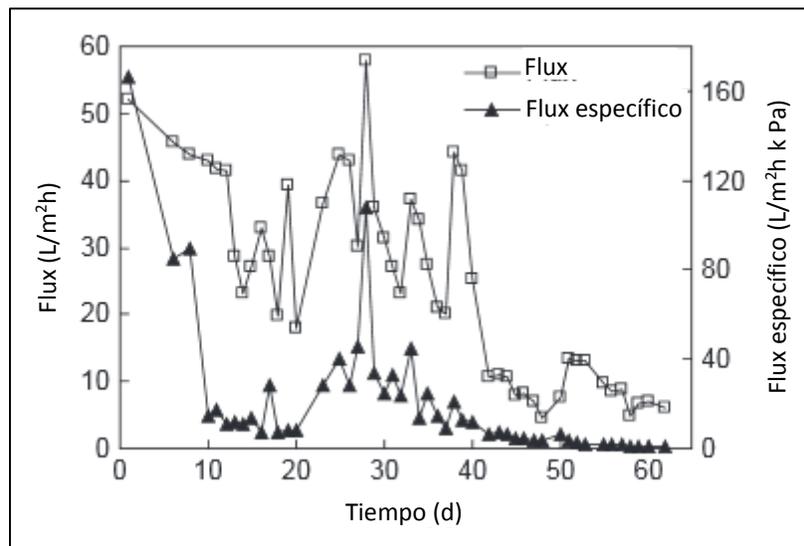


Figura 4.50. Variación de flux en filtración dinámica aerobia operando a presión constante por columna hidrostática (Xue *et al.*, 2010b).

De acuerdo a la literatura, el flux en un proceso de filtración con membranas dinámicas puede ser expresado por la ecuación 2 (Liang *et al.*, 2013):

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_t)} \tag{Ec. (2)}$$

De tal forma que considerando se está operando a presión constante, se evidencia que existe una relación inversamente proporcional entre el flux y la resistencia de la membrana, la cual como ya se comentó se debe mayoritariamente a la capa de sólidos depositada sobre la superficie del textil. A medida que se incremente el espesor y compactación de la membrana secundaria, se presentará mayor resistencia y en consecuencia se tendrá menor flux de

permeado. Por lo tanto, la resistencia varía en función de la capa taponante incidiendo directamente sobre el comportamiento del flux.

En el trabajo realizado por Liang y colaboradores (2013), analizaron el efecto de las características del lodo sobre la resistencia al filtrado de membranas dinámicas aerobias; llegando a la conclusión con respaldo estadístico de que la resistencia al filtrado está inversamente relacionada con el tamaño de las partículas presentes en el líquido en contacto con la membrana. Cuando se tiene mayor proporción de partículas grandes, durante el periodo inicial de la filtración caracterizado por un alto flux, éstas son arrastradas a mayor velocidad y se depositan preferentemente sobre el textil provocando mayor porosidad en la membrana secundaria lo cual a su vez propicia una menor resistencia al filtrado que si las partículas depositadas en el soporte primario fueran de menor diámetro.

En resumen, los altibajos observados en las curvas de descenso de flux (Figuras 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30) reflejan cambios abruptos en la resistencia de la membrana, que probablemente se deban a perturbaciones en las características del agua en contacto con el textil que provocan cambios en la capa taponante. A través de la comparación con otros trabajos existentes, este fenómeno se puede vincular a que se está operando a presión constante y también a escala piloto con agua doméstica real.

Independientemente a lo anterior, es importante comentar que a lo largo de la experimentación se corroboró que la dispersión observada en las curvas de flux no disminuyó cuando en la cámara B se cambió el soporte primario por textil nuevo, descartando así el efecto del tiempo de operación. Por consiguiente, la inestabilidad del flux está vinculada a la variación de la resistencia de la membrana secundaria y no al desgaste o deterioro del soporte primario.

4.4.3 Definición del concepto Tiempo de formación de membrana dinámica (TFMD)

En investigaciones anteriores se ha establecido que la filtración dinámica consta principalmente de tres etapas, siendo la primera la que corresponde al periodo de formación de la membrana secundaria. Su duración se ha definido de acuerdo al tiempo que requiere el proceso para obtener permeado de buena calidad. Por ejemplo, en el trabajo de Zhang *et al.* (2010) reportan TFMD de 7 días, mientras que Ersahin y colaboradores necesitaron entre 10 y 20 días.

Por su parte, en el trabajo de González-Ortega (2014) donde también se operó a presión constante, los tiempos promedio de formación de membrana fueron de 12.8 días. Con la particularidad de que si bien en ese lapso se obtuvo permeado con menos de 5 mg de sólidos suspendidos totales no se mantuvo esta condición por periodos prolongados. Aunado a esto, los resultados que se observaron a lo largo de la experimentación, muestran que pese al decremento notable del flux, en los últimos 70 días otra u otras variables presentaron mayor preponderancia y evitaron la obtención del permeado de buena calidad.

Con respecto al término “permeado de calidad”, es importante comentar que tanto Jeison y colaboradores (2008) como Zhang y colaboradores (2011) reportan producción de permeado con menos de 20 mg/L de sólidos suspendidos independientemente del tamaño de poro del textil utilizado como soporte primario.

Debido a todo lo expuesto anteriormente, en este trabajo se decidió separar conceptos: por un lado, que el TFMD dependiera únicamente del descenso del flux y por otro, que el término de filtración efectiva se aplicara cuando se lograra producir más de 25 L/m²h de permeado con menos de 20 mg de sólidos suspendidos.

4.4.4 Efectividad de los métodos de limpieza

En primer lugar, es importante mencionar que la elección de método de limpieza debe considerar la configuración y el material de soporte de la membrana dinámica, por tanto esto determinará los métodos que puedan ser aplicados y la efectividad de cada uno de ellos (Regula, 2014 *et al.*; Wang *et al.*, 2014). En este caso al trabajar con filtración en cámara externa, se optó por aplicar métodos de limpieza *ex situ* y no afectar así las características del sobrenadante en contacto con la membrana después de la operación de limpieza.

En el trabajo previo de filtración dinámica sumergida realizado por González-Ortega (2014) se propuso que el método de limpieza se enfocara en retirar la capa taponante de la membrana dinámica cuidando de no afectar, en medida de lo posible, la capa gel con el propósito de acortar el TFMD y favorecer la filtración efectiva (González-Ortega, 2014). Esta recomendación fue una de las razones por las cuales se decidió en esta investigación contrastar el efecto de la remoción total contra la remoción parcial de la membrana sobre la filtración dinámica.

Mediante la experimentación, se corroboró que al aplicar un método de limpieza de remoción parcial de la membrana secundaria se redujo considerablemente el TFMD de 26 horas a menos de 30 minutos (25, 10 y 5 minutos). Esto en primer lugar es un resultado esperado, porque el retrolavado apenas logró retirar una pequeña porción de la capa taponante, por lo tanto, sólo fue necesario un breve tiempo para restablecer la membrana secundaria. Sin embargo, la reducción de este periodo no propició que se filtrara efectivamente.

En el mismo sentido, el retrolavado fue el método de limpieza que recuperó en menor porcentaje el flux inicial. Esto era de esperarse debido a que se trata de un método de limpieza físico, que a través de la hidrodinámica y la fricción logran el desprendimiento de una porción de los sólidos adheridos a las membranas y que en general, se aplica con el propósito de controlar el taponamiento de tipo removible.

Si bien lo acontecido es congruente con la remoción parcial de la membrana, la tendencia observada a la disminución gradual del TFMD y del flux recuperado puede deberse al bloqueo de poros a lo largo de la experimentación.

En algunos trabajos de membranas dinámicas se han empleado retrolavados para restablecer el flux de operación; por lo general reportan que se recupera el flux inicial, pero coinciden en que estas condiciones no se mantienen por mucho tiempo. En el trabajo de Ho y colaboradores (2007) una vez aplicada la primera limpieza, el tiempo de operación se reduce, requiriendo limpiar diariamente. En el mismo sentido, y dada la importancia de controlar el espesor de la membrana dinámica, Ersahin y colaboradores (2013) propusieron operar 190 segundos y aplicar

retrolavado durante 35 segundos; de esta manera lograron mantener la operación relativamente estable durante 90 días (operando el reactor a un tiempo de retención de sólidos de 40 días). Cabe comentar que en ese trabajo no se hace mención de que al cumplir este periodo se necesitara aplicar una limpieza más severa.

Con respecto a la aplicación de agua a presión, aunque en menor proporción, también se presentó una reducción del TFMD. Por ejemplo, en la cámara CC el tiempo inicial fue de 26 horas, para el ciclo 2 de 20 horas y para el tercero fue de solo 6 horas. Si bien esto pudo ser ocasionado por la mayor concentración de sólidos suspendidos del agua en contacto con las membranas, también pudo deberse a que la fuerza de arrastre provocada por la aplicación frontal del agua a presión pudo propiciar que sólidos inicialmente depositados sobre la superficie del textil penetraran y se depositaran dentro de los poros del polipropileno, ocasionado a su vez el decremento del flux a lo largo de los ciclos de operación. En el trabajo de Zhang *et al.* (2011) también aplican agua a presión como método de limpieza, y muestran que en las tres ocasiones que realizan la limpieza logran recuperar el 100% de flux. No proporcionan información sobre la variación del TFMD pero si indican que sus tres ciclos mantienen la misma duración (90 días), lo cual indicaría que el textil empleado (Dacrón de 61 μm) no muestra señales de taponamiento en los 330 días analizados.

Es importante tener presente que en lo que respecta a las membranas convencionales, los retrolavados no impactan la durabilidad de las membranas, pero, en el caso de la filtración dinámica en donde se utilizan como soportes primarios materiales de mayor porosidad y en algunos casos de menor resistencia, se debe prever que los métodos de limpieza convencionales pueden impactar de mayor manera en las propiedades de estos materiales afectando el proceso. En lo que concierne a las membranas analizadas en esta investigación, en los 96 días de experimentación no se tuvo el suficiente número de ciclos para identificar una tendencia con respecto a la duración de los ciclos de operación. Esto no descarta que la alteración de las propiedades del textil a causa de las limpiezas impacte en la duración de los ciclos, solo indica la necesidad de dar seguimiento a la filtración dinámica por un periodo más prolongado.

En cuanto a producción de permeado, el 50% de los datos de flux se concentró en los siguientes intervalos: en las cámaras en las que se aplicó retrolavado CA y CB de 15 a 55 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$; mientras que en las cámaras en las que se utilizó agua a presión los valores de flux oscilaron en la cámara CC de 20 a 90 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$ y en la cámara CD de 32 a 70 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$. De lo anterior se desprende que con la remoción total de la membrana secundaria se logró favorecer la productividad de permeado en los ciclos de filtración. Por el contrario, ninguno de los dos métodos de recuperación de flux presentó ventajas en relación a la calidad del permeado producido, dado que en todos los ciclos posteriores a las limpiezas, los sólidos suspendidos presentes en los permeados excedieron los 16 mg/L , llegando en algunas ocasiones hasta los 72 mg/L (ciclo 2 de la cámara CD). Independientemente del método de limpieza aplicado, el 90% de los datos corresponden a valores de sólidos suspendidos superiores a los 20 mg/L que fue el límite superior establecido para permeado de buena calidad.

Consecuentemente, pese a que con el retrolavado se tuvieron TFMD más cortos, no se encontró evidencia de que esto favoreciera la obtención de permeado de buena calidad. De tal forma que pierde relevancia que el método de remoción total requiera más tiempo para restablecer la membrana dinámica. Siendo la productividad el aspecto principal a considerar para generar una

recomendación, es la remoción total de la membrana la que permite recuperar el 100% del flux inicial y en general mantener mayor generación de permeado en comparación al método de remoción parcial. En resumen, los resultados obtenidos en los 96 días de experimentación denotan que los dos métodos de limpieza se diferencian en cuanto a la productividad de la filtración pero no en relación con la calidad del permeado producido.

4.4.5 Variación de la composición del agua residual

En primer lugar se debe considerar que el sistema de filtración dinámica sumergida estuvo acoplado a un reactor escala piloto ubicado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria, y por consiguiente estuvo expuesto a las variaciones meteorológicas y por supuesto a la variación típicas de composición de un agua residual real.

Con fines de comparación, es importante comentar que a diferencia de la primera etapa de esta investigación, la segunda etapa se llevó a cabo en época de estiaje (en los meses de diciembre a marzo), que se caracteriza por concentraciones mayores de materia orgánica. En la tabla 4.4 se presentan los valores promedios de materia orgánica del influente alimentado al reactor UASB; se observa que la concentración de materia orgánica durante la época de estiaje fue de 570 ± 127 mg DQOt/L, 43% más elevada que la demanda química de oxígeno promedio de la época de lluvias. Por lo tanto, en rigor, los resultados encontrados en la configuración de membranas sumergidas en cámara externa de la primera etapa no pueden compararse directamente con los obtenidos en la segunda etapa.

Tabla 4.4 Valores promedios de materia orgánica expresada como demanda química de oxígeno total del influente alimentado al reactor UASB.

	Temporada de lluvias	Temporada vacacional	Temporada estiaje
	DQO total (mg/L)	DQO total (mg/L)	DQO total (mg/L)
Influente alimentado al reactor UASB	398 ± 367 , n=18	247 ± 33 , n=5	570 ± 127 , n=47

Otro aspecto a considerar, es que los primeros 20 días de la experimentación coincidieron con el periodo de vacaciones administrativas de la UNAM, lo cual implicó también una composición diferente de agua residual. Como se muestra en la Tabla 4.4, se tuvo una demanda química de oxígeno promedio de 247 ± 33 mg DQOt/L, la cual fue incluso menor a la concentración de materia orgánica presentada en temporada de lluvias. Y precisamente fue en esta época cuando se mantuvo la filtración en las condiciones deseadas. Posteriormente, la calidad del permeado producido se fue deteriorando conforme la población de Ciudad Universitaria fue regresando a labores; durante este periodo, el cual se incluye en la temporada de estiaje, se tuvo una concentración promedio de materia orgánica de 570 ± 127 mg DQOt/L.

Pese a estas variaciones en el influente del reactor, el agua que entra en contacto con las membranas es el efluente del reactor UASB, es decir, después de un tratamiento biológico, de tal forma que la calidad de éste es el que impacta directamente sobre las membranas. Por lo tanto, la siguiente sección profundizará en la variación de la composición del agua producida por el tratamiento anaerobio.

4.4.6 Influencia de la composición del agua sobrenadante en la calidad del permeado

En la mayoría de los trabajos, el reto a superar ha sido lograr y mantener una alta productividad de permeado con la calidad esperada (Ho *et al.*, 2007; Jeison *et al.*, 2008); en esta investigación el desafío fue alcanzar una baja concentración de sólidos suspendidos conjuntamente con el valor aceptable del flux permeado que se obtuvo. Si bien, esto se logró en algunas ocasiones, la pérdida de calidad en el permeado no se pudo relacionar con las limpiezas aplicadas como se sugiere en la literatura (Ersahin *et al.*, 2013); por lo tanto, fue necesario analizar otros factores que pudieron repercutir en la calidad, con el fin de lograr mayor control sobre la filtración dinámica en futuros experimentos.

Como se comentó con anterioridad, durante la experimentación se presentaron algunos episodios de filtración efectiva, siendo el más significativo, aquel que se mantuvo por 21 días en el primer ciclo de las cuatro membranas analizadas. Con el propósito de identificar los factores que favorecieron la producción de permeado con menos de 20 mg de sólidos suspendidos totales, se analizó la composición del agua que recibieron las membranas especialmente durante ese periodo.

Como resultado de este análisis, se identificó que el periodo más prolongado de filtración efectiva aconteció en el periodo vacacional cuando el efluente del reactor UASB presentó menor concentración de sólidos suspendidos (por debajo de los 128 mg SST/L) y una menor concentración de materia orgánica (por debajo de 400 mg DQO_T/L con una fracción soluble menor de 90 mg DQOs/L). En contraste, el sobrenadante en el resto de la experimentación correspondiente a temporada de estiaje presentó grandes variaciones: los sólidos suspendidos oscilaron en el intervalo de 28 a 288 mg/L, la materia orgánica estuvo en el intervalo de 160 a 758 mg DQO_T/L y la fracción soluble entre 76 y 190 mg DQOs/L.

Es importante comentar que con la finalización del periodo vacacional y la entrada de la época de estiaje, se incrementó la concentración de materia orgánica en el influente del reactor UASB, lo cual aumentó la actividad dentro del reactor anaerobio provocando mayor arrastre de sólidos en el efluente y un mayor residual de materia orgánica en éste. Este cambio de composición del efluente anaerobio coincidió con el incremento de sólidos suspendidos que se presentó en los permeados de las cuatro cámaras analizadas, que ocasionó la pérdida de la calidad deseada del agua tratada.

De todo lo expuesto líneas arriba se desprende que la filtración efectiva se ve favorecida cuando hay menor concentración de sólidos suspendidos y menor concentración de materia orgánica en la composición del sobrenadante. Lo anterior parece congruente, si se tiene presente que la calidad del permeado está en función de la buena formación de la membrana secundaria, la cual depende a su vez de las características del agua con la que está en contacto (Ersahin *et al.*, 2013).

Los resultados indican que el factor principal a considerar es la composición del efluente anaerobio, de tal forma que se debe investigar con mayor detalle las características que favorecen la producción de permeado de buena calidad, como por ejemplo: el caso del tamaño de partícula, cantidad de materia orgánica y presencia de sustancias poliméricas extracelulares.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

5.1.1 Etapa 1: Evaluación del desempeño de las membranas dinámicas en dos configuraciones y dos distintos materiales

En relación con la configuración de membranas dinámicas sumergidas en cámaras externas:

- Para ambos materiales se observó reproducibilidad en los experimentos aunque con una alta tasa de dispersión en los datos, inherentes a la filtración dinámica.
- En los experimentos donde se utilizó el textil de polipropileno–poliéster como soporte primario, se logró producir permeado de buena calidad (turbiedad menor a 15 NTU) pero se tuvo una baja producción del mismo (menor a 10 L/m²h), lo cual afecta negativamente la rentabilidad del proceso.
- Para el caso del polipropileno, se logró mayor productividad de permeado de buena calidad a lo largo de las corridas experimentales (el 75% de los datos de turbiedad se encuentran por debajo de los 30 NTU y flux mayor a 15 L/m²h).
- Se observó que con la temporada de lluvias disminuyó la cantidad de sólidos suspendidos en el efluente del reactor UASB y que esto, junto con una operación en un entorno más controlado (cámara externa), propició la obtención de mejores resultados que los obtenidos con las membranas sumergidas en la zona de sedimentación del reactor anaerobio.

Con respecto a las membranas dinámicas sumergidas en zona de sedimentación del reactor UASB:

- Bajo esta configuración y con los dos materiales estudiados se tuvo dificultad para lograr reproducibilidad en los experimentos, dado que se identificaron sucesos que parecen estar relacionados con el desprendimiento de la membrana secundaria o la no formación de ésta, lo cual se atribuyó al entorno cambiante dentro del reactor UASB y a la variación de la carga orgánica volumétrica ocasionada por la época de lluvias.
- En lo que concierne a la comparación de materiales, ambos textiles superaron los valores de flux obtenidos en la filtración en cámara externa; sin embargo, persistió la misma tendencia. Es decir, el polipropileno presentó mayor productividad de permeado con respecto al soporte de polipropileno-poliéster.

Con respecto a la filtración efectiva, ninguno de los cuatro tratamientos analizados en la primera etapa logró mantener por más de 120 horas producción de flux mayor o igual a 25 L/m²h y permeado con turbiedad menor o igual a 15 NTU.

El mayor número de periodos de filtración efectiva con remociones mayores al 50% se obtuvo con la membrana de polipropileno en la configuración sumergida en cámara externa (8 en total, con una duración que fue desde 24 hasta 120 horas). Debido a esto y al mejor comportamiento en cuanto a reproducibilidad y estabilidad de la filtración, se seleccionó la configuración de filtración en cámara externa y el textil de polipropileno de 50 µm de tamaño de poro para evaluar la filtración a largo plazo durante la etapa 2 de esta investigación.

5.1.2 Etapa 2: Evaluación de la filtración dinámica a largo plazo

- La mayor reducción del tiempo de formación de la membrana dinámica se logró mediante el método de limpieza de remoción parcial de la membrana secundaria (retrolavado). Sin embargo, no se encontró evidencia de que esto favoreciera la obtención de permeado de buena calidad.
- El método de remoción total de la membrana dinámica mediante la aplicación de agua a presión permitió recuperar un mayor porcentaje de flux (100%) en comparación con lo obtenido con el retrolavado.
- En los 96 días de experimentación no se tuvo el suficiente número de ciclos para identificar una tendencia con respecto a la duración de los ciclos de operación y un eventual deterioro del textil.
- De acuerdo con lo observado en esos 96 días de operación, los métodos de limpieza inciden en la productividad del proceso de filtración pero no repercuten directamente en la calidad del permeado obtenido.
- Considerando solo la productividad como criterio de selección de un método de limpieza, el que utiliza agua a presión y logra la remoción total de la membrana es el que permite recuperar el 100% del flux inicial y en general mantener mayor generación de permeado en comparación al método de remoción parcial (retrolavado).
- Las cuatro membranas mantuvieron una alta productividad de permeado a lo largo de los 96 días de operación, de tal forma que, la principal limitante para lograr la filtración efectiva fue la pérdida de calidad del agua filtrada.
- Se identificó que el periodo más prolongado de filtración efectiva (21 días) aconteció cuando el efluente del reactor UASB presentó menor concentración de sólidos suspendidos (entre 16 y 128 mg SST/L) y menor concentración de materia orgánica (valores por debajo de los 400 mg DQO_T/L y la fracción soluble estuvo por debajo de los 90 mg DQOs/L) en contraste con las grandes variaciones del sobrenadante en el resto de la experimentación.

5.2 Recomendaciones

1. Se sugiere realizar modificaciones al diseño del módulo de filtración utilizado en las cámaras externas con el propósito de favorecer el libre flujo de permeado, evitando acumulación de sólidos o crecimiento celular en la zona posterior a la membrana, que contaminen el permeado obtenido por la membrana dinámica.
2. Resultaría conveniente restringir el paso de aire en la zona de recolección del permeado en la cámara externa, para evitar el crecimiento de microorganismos aerobios y así conocer la remoción neta del proceso de filtración.
3. Dados los hallazgos de este trabajo, se recomienda realizar una comparación más detallada de las características del sobrenadante anaerobio en época de lluvias con las que se presentan en estiaje, con el fin de elucidar su influencia en la formación de la membrana dinámica y consecuentemente en la producción de permeado de buena calidad. En particular se recomienda lo siguiente:
 - Realizar análisis de tamaño de partícula del agua en contacto de la membrana y en el permeado.
 - Identificar la presencia e influencia de sustancias poliméricas extracelulares en el efluente del reactor UASB.
 - Realizar seguimiento a mayor detalle de la variación de la materia orgánica en el efluente del tratamiento anaerobio.

Anexo A. Diagrama de caja

Cuando la muestra no parece tener una distribución normal, no debe resumirse la descripción de la muestra en media y desviación típica. La mediana (percentil 50) da una mejor idea del centro. En cuanto a las medidas de dispersión podemos sustituir la desviación típica por el rango intercuartílico (RI), que es la diferencia entre el tercer cuartil y el primero. El primer cuartil (Q1) deja al 25% de los datos por debajo de él y el tercer cuartil (Q3) deja al 75%. Por tanto sabemos que en esa zona central que tiene una longitud de un RI, se encuentra el 50% central de las observaciones.

En los casos en los que la muestra no tenga una distribución normal, para obtener una idea aproximada de la distribución de los datos se acostumbra mostrar un resumen en cinco números, que son: el valor mínimo (Xmin), el primer cuartil (Q1), la mediana (Q2), el tercer cuartil (Q3), y el valor máximo (Xmax). Estos números vienen reflejados en lo que se conoce como diagrama de cajas (Box Plot) (Ver figura 1). Esta es una herramienta de la estadística descriptiva, que permite ver rápidamente si los datos son simétricos o si incluyen observaciones anómalas. Su composición se basa en una caja cuyos extremos son el primer y tercer cuartil, con una marca interior que señala la posición de la mediana. Si esta marca cae cerca del final de la caja, se indica la presencia de asimetría. La longitud de la caja es la distancia entre el primer y el tercer cuartil, de forma que la caja contiene los datos centrales de la distribución. Las líneas que se extienden desde cada caja (llamadas comúnmente bigotes) representan la distancia entre la mayor y la menor de las observaciones que están a menos de un cuartil de la caja y su misión es delimitar hasta donde podemos considerar los datos de las colas como no anómalos. Cualquier valor que quede fuera de los bigotes es marcado como anómalo. En resumen, este tipo de diagrama es útil para representar las diferencias entre dos o más grupos de variables (Barón, 2010).

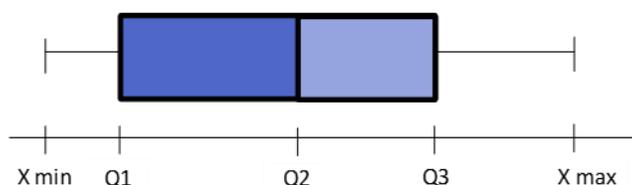


Figura A.1. Ejemplo de diagrama de caja (Box Plot).

Anexo B. Gráficos de variación de turbiedad en la etapa 2.

En este anexo se presentan las gráficas de la variación de la turbiedad a lo largo de la experimentación de la segunda etapa, que no fueron incluidas en el cuerpo del documento.

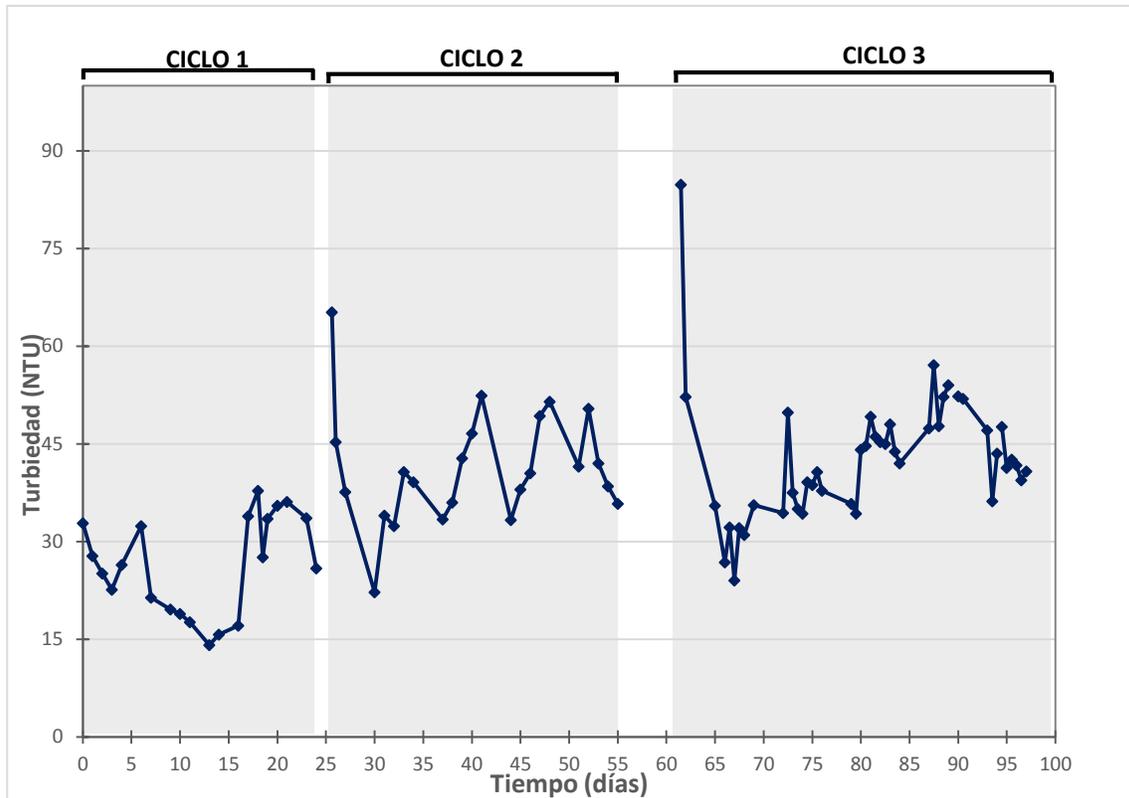


Figura B.1. Variación de la turbiedad del permeado de la cámara CB a lo largo de la experimentación.

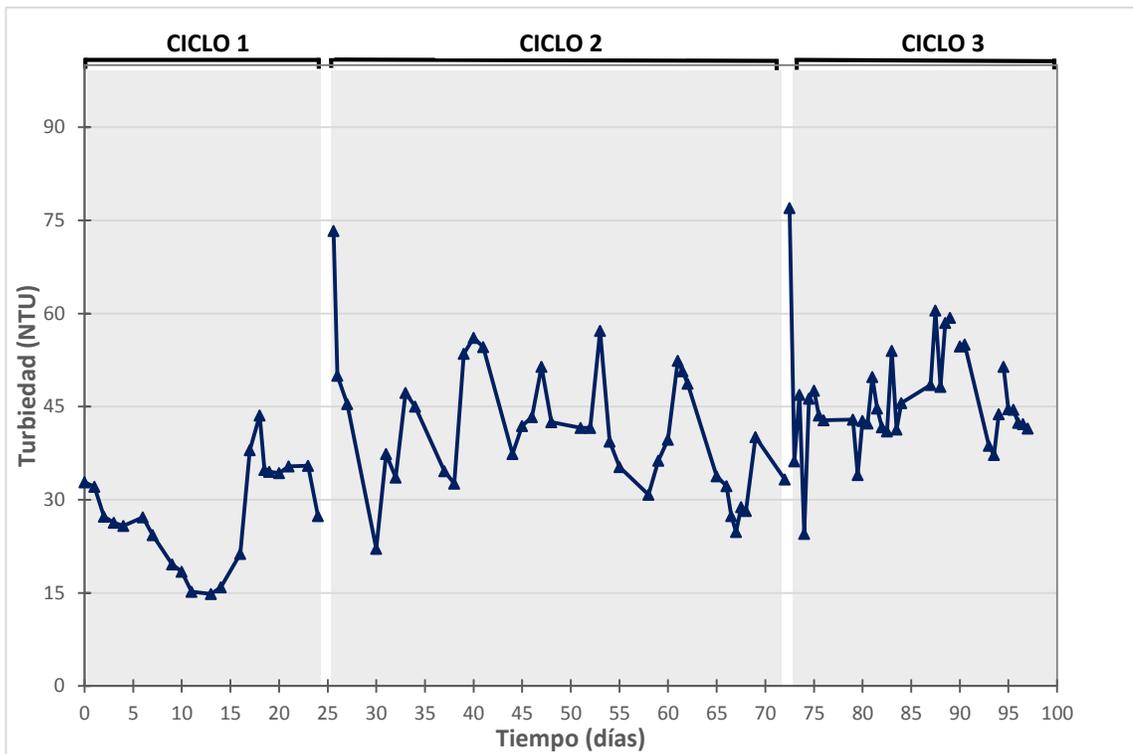


Figura B.2. Variación de la turbiedad del permeado de la cámara CC a lo largo de la experimentación.

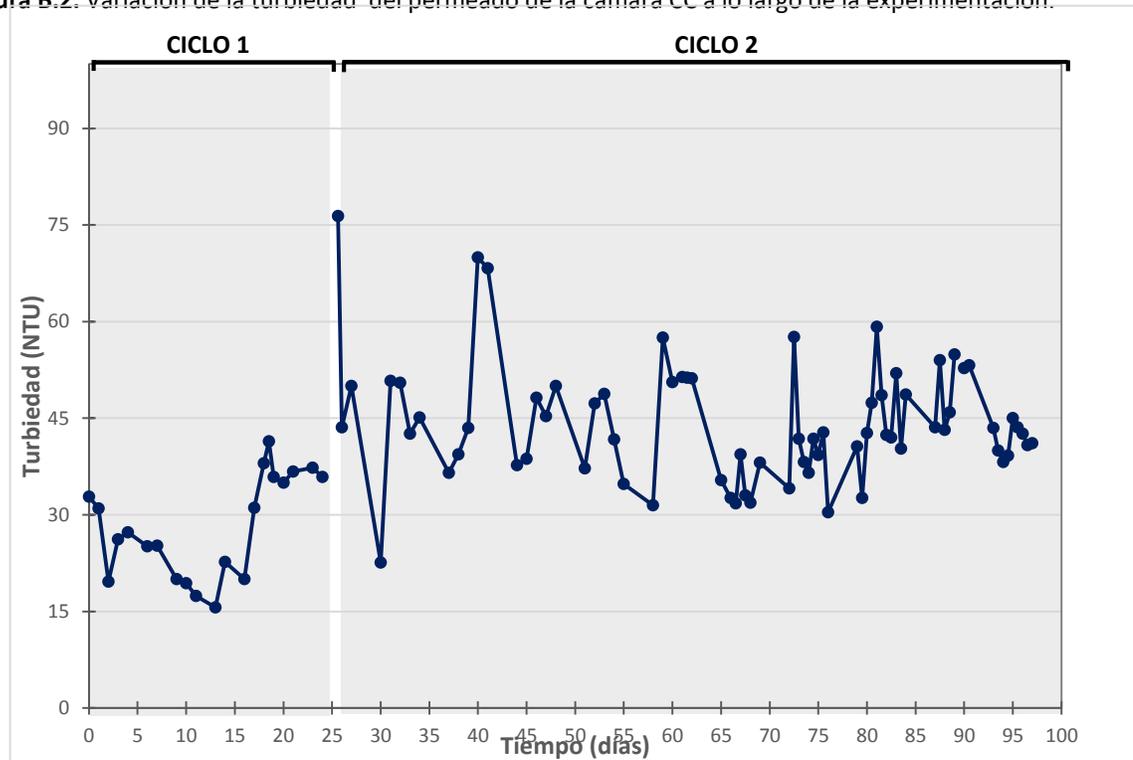


Figura B.3. Variación de la turbiedad del permeado de la cámara CD a lo largo de la experimentación.

Referencias

- Alibardi, L., Cossu, R., Saleem, M. and Spagni, A. (2014) Development and permeability of a dynamic membrane for anaerobic wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 161, pp. 236–44. DOI:10.1016/j.biortech.2014.03.045.
- Al-malack, M. H. and Anderson, G. K. (1997) Cleaning techniques of dynamic membranes. *Separation and Purification Technology*, 12, pp. 25–33.
- An, Y., Wang, Z., Wu, Z., Yang, D. and Zhou, Q. (2009) Characterization of membrane foulants in an anaerobic non-woven fabric membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 155 (3), pp. 709–715. DOI:10.1016/j.cej.2009.09.003.
- AWWA, WEF, APHA. (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington D.C.: American Public Health Association.
- Cerón Vivas, A. (2013) *Taponamiento de membranas de ultrafiltración sumergidas en la zona superior de un reactor uasb bajo diferentes condiciones hidrodinámicas*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chu, H., Zhang, Y., Zhou, X., Zhao, Y., Dong, B. and Zhang, H. (2014) Dynamic membrane bioreactor for wastewater treatment: Operation, critical flux, and dynamic membrane structure. *Journal of Membrane Science*, 450, pp. 265–271. DOI:10.1016/j.memsci.2013.08.045.
- Chu, L. and Li, S. (2006) Filtration capability and operational characteristics of dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 51 (2), pp. 173–179. DOI:10.1016/j.seppur.2006.01.009.
- Ersahin, M. E., Ozgun, H., Dereli, R. K., Ozturk, I., Roest, K. and van Lier, J. B. (2012) A review on dynamic membrane filtration: Materials, applications and future perspectives. *Bioresource Technology*, 122, pp. 196–206. DOI:10.1016/j.biortech.2012.03.086.
- Ersahin, M. E., Ozgun, H., Tao, Y. and van Lier, J. B. (2013) Applicability of dynamic membrane technology in anaerobic membrane bioreactors. *Water Research*, 31 (0), pp. 1–10. DOI:10.1016/j.watres.2013.09.054.
- Gahleitner, B., Loderer, C., Saracino, C., Pum, D. and Fuchs, W. (2014) Chemical foam cleaning as an efficient alternative for flux recovery in ultrafiltration processes. *Journal of Membrane Science*, 450, pp. 433–439. DOI:10.1016/j.memsci.2012.12.047.
- González-Ortega, J. A. (2014) *Evaluación de un sistema de membranas dinámicas para el tratamiento de aguas residuales tratadas por vía anaerobia*. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ho, J. H., Khanal, S. K. and Sung, S. (2007) Anaerobic membrane bioreactor for treatment of synthetic municipal wastewater at ambient temperature. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 55 (7), pp. 79–86. DOI:10.2166/wst.2007.130.

Jeison, D., Días, I. and van Lier, J. B. (2008) Anaerobic membrane bioreactors: Are membranes really necessary?. *Electronic Journal of Biotechnology*, 11 (4). DOI:10.2225/vol11-issue4-fulltext-9.

Jeison, D. and van Lier, J. B. (2007) Thermophilic treatment of acidified and partially acidified wastewater using an anaerobic submerged MBR: Factors affecting long-term operational flux. *Water Research*, 41 (17), pp. 3868–79. DOI:10.1016/j.watres.2007.06.013.

Judd, S. (2006) *The MBR book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. 1st ed. Great Britain: Elsevier. DOI:10.1016/B978-185617481-7/50005-2.

Kalogo, Y. and Verstraete, W. (1999) Development of anaerobic sludge bed (ASB) reactor technologies for domestic wastewater treatment: Motives and perspectives. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 15 (5), pp. 523–534. DOI:10.1023/A:1008950121308.

Kiso Y, Jung Y-J, Park M-S (2005) Coupling of sequencing batch reactor and mesh filtration: operational parameters and wastewater treatment performance. *Water Res* 39:4887–98. doi: 10.1016/j.watres.2005.05.025

Le-Clech, P. (2010) Membrane bioreactors and their uses in wastewater treatments. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 88 (6), pp. 1253–1260. DOI:10.1007/s00253-010-2885-8.

Liang, S., Qu, L., Meng, F., Han, X. and Zhang, J. (2013) Effect of sludge properties on the filtration characteristics of self-forming dynamic membranes (SFDMs) in aerobic bioreactors: Formation time, filtration resistance, and fouling propensity. *Journal of Membrane Science*, 436, pp. 186–194. DOI:10.1016/j.memsci.2013.02.021.

Liao, B.-Q., Kraemer, J. T. and Bagley, D. M. (2006) Anaerobic Membrane Bioreactors: Applications and Research Directions, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36 (6), pp. 489–530. DOI:10.1080/10643380600678146.

Lin, H., Peng, W., Zhang, M., Chen, J., Hong, H. and Zhang, Y. (2013) A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination*, 314, pp. 169–188. DOI:10.1016/j.desal.2013.01.019.

Loderer, C., Gahleitner, B., Steinbacher, K., Stelzer, C. and Fuchs, W. (2013a) Dynamic filtration – A novel approach for critical flux determination using different textiles. *Separation and Purification Technology*, 120, pp. 410–414. DOI:10.1016/j.seppur.2013.10.013.

Loderer, C., Pawelka, D., Vazier, W., Hasal, P. and Fuchs, W. (2013b) Dynamic filtration – Ultrasonic cleaning in a continuous operated filtration process under submerged conditions. *Separation and Purification Technology*, 119, pp. 72–81. DOI:10.1016/j.seppur.2013.09.007.

Ma, J., Wang, Z., Zou, X., Feng, J. and Wu, Z. (2013) Microbial communities in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: Comparison of bulk sludge and cake layer. *Process Biochemistry*, 48 (3), pp. 510–516. DOI:10.1016/j.procbio.2013.02.003.

Mackenzie, L. D. (2010) *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. New York: McGraw-Hill Education.

Martin, I., Pidou, M., Soares, a, Judd, S. and Jefferson, B. (2011) Modelling the energy demands of aerobic and anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment. *Environmental Technology*, 32 (9-10), pp. 921–932. DOI:10.1080/09593330.2011.565806.

Martin-Garcia, I., Monsalvo, V., Pidou, M., Le-Clech, P., Judd, S. J., McAdam, E. J.. (2011) Impact of membrane configuration on fouling in anaerobic membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 382 (1-2), pp. 41–49. DOI:10.1016/j.memsci.2011.07.042.

Meng, F., Chae, S.-R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.-S. and Yang, F. (2009) Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43 (6), pp. 1489–1512. DOI:10.1016/j.watres.2008.12.044.

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

Morgan-Sagastume, F. (1996a) *Fernando Morgan-Sagastume*. Tratamiento anaerobio de aguas residuales municipales: su potencial aplicación en Méxioc. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.

NOM-003-SEMARNAT-1997 Norma Oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público (1997).

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M. and Güereca, L. P. (2013) *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. 1era ed. México.

Ozgun, H., Dereli, R. K., Ersahin, M. E., Kinaci, C., Spanjers, H. and van Lier, J. B. (2013) A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations. *Separation and Purification Technology*, 118, pp. 89–104. DOI:10.1016/j.seppur.2013.06.036.

Radjenović, J., Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M. and Barceló, D. (2008) Membrane bioreactor (MBR) as an advanced wastewater treatment technology. *Handbook of*

Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution, 5 S2 (November 2007), pp. 37–101. DOI:10.1007/698_5_093.

Regula, C., Carretier, E., Wyart, Y., Gésan-Guiziu, G., Vincent, a, Boudot, D. (2014) Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: a review. *Water Research*, 56, pp. 325–65. DOI:10.1016/j.watres.2014.02.050.

Salazar Peláez, M. (2011) *Influencia del tiempo de retención hidráulica en el desempeño y taponamiento de un reactor UASB*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.

Sistema Meteorológico Nacional [no date] Estación meteorológica automática (EMA) CCH Sur, consultado: mayo 2014 - marzo 2015. Available from: <http://smn.cna.gob.mx/emas/> [Accessed

Skouteris, G., Hermosilla, D., López, P., Negro, C. and Blanco, Á. (2012) Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 198-199, pp. 138–148. DOI:10.1016/j.cej.2012.05.070.

Smith, A. L., Stadler, L. B., Love, N. G., Skerlos, S. J. and Raskin, L. (2012) Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: a critical review. *Bioresource Technology*, 122, pp. 149–59. DOI:10.1016/j.biortech.2012.04.055.

Stuckey, D. C. (2012) Recent developments in anaerobic membrane reactors. *Bioresource Technology*, 122, pp. 137–48. DOI:10.1016/j.biortech.2012.05.138.

Sun, X. Y., Chu, H. Q., Zhang, Y. L. and Zhou, X. F. (2012) Review on Dynamic Membrane Reactor (DMBR) for Municipal and Industrial Wastewater Treatment. *Advanced Materials Research*, 455-456, pp. 1278–1284. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.455-456.1278.

Wang, W., Liu, T., Liu, Y. and Guo, S. (2012) Evaluation on contribution of steel products to environmental improvement from life cycle assessment perspectives. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 17 (3), pp. 370–372. DOI:10.1007/s12204-012-1289-6.

Wang, Z., Ma, J., Tang, C. Y., Kimura, K., Wang, Q. and Han, X. (2014) Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. *Journal of Membrane Science*, 468, pp. 276–307. DOI:10.1016/j.memsci.2014.05.060.

Water Environment Federation (2012) *WEF Manual of Practice No. 36 Membrane Bioreactors, World Pumps*. 1st ed. Alexandria: WEF Press. DOI:10.1016/S0262-1762(99)80122-9.

Wen, C., Huang, X. and Qian, Y. (1999) Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration. *Process Biochemistry*, 35 (3-4), pp. 335–340. DOI:10.1016/S0032-9592(99)00076-X.

Xie, Z., Wang, Z., Wang, Q., Zhu, C. and Wu, Z. (2014) An anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for landfill leachate treatment: performance and microbial community identification. *Bioresource Technology*, 161, pp. 29–39. DOI:10.1016/j.biortech.2014.03.014.

Xiong, J., Fu, D. and Singh, R. P. (2014) Self-adaptive dynamic membrane module with a high flux and stable operation for the municipal wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 471, pp. 308–318. DOI:10.1016/j.memsci.2014.08.001.

Xue, N., Xia, J. and Huang, X. (2010) Fouling control of a pilot scale self-forming dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 18 (1-3), pp. 302–308. DOI:10.5004/dwt.2010.1812.

Zhang, X., Wang, Z., Wu, Z., Lu, F., Tong, J. and Zang, L. (2010) Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment, *Chemical Engineering Journal*, 165 (1), pp. 175–183. DOI:10.1016/j.cej.2010.09.013.

Zhang, T., Chu, J., Wang, X., Liu, X. and Cui, P. (2011a) Development pattern and enhancing system of automotive components remanufacturing industry in China, *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (6), pp. 613–622. DOI:10.1016/j.resconrec.2010.09.015.

Zhang, X., Wang, Z., Wu, Z., Wei, T., Lu, F., Tong, J. (2011b) Membrane fouling in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: Characteristics of membrane foulants and bulk sludge, *Process Biochemistry*, 46 (8), pp. 1538–1544. DOI:10.1016/j.procbio.2011.04.002.

(AWWA, WEF, 2012)(L. Chu and Li, 2006)