Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

Universidad de Granada
E.T.S de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS FANGOS ACTIVOS DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA SUMERGIDA CON LIMPIEZA DE MEMBRANAS MEDIANTE ULTRASONIDOS

**Haniel Isaac Girón de León**
Asesorado por el Dr. Miguel Ángel Gómez Nieto
e Ing. Luis Rodolfo Castro García

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

# CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS FANGOS ACTIVOS DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA SUMERGIDA CON LIMPIEZA DE MEMBRANAS MEDIANTE ULTRASONIDOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

**HANIEL ISAAC GIRÓN DE LEÓN**
ASESORADO POR EL DR. MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ NIETO
E ING. LUIS RODOLFO CASTRO GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO AMBIENTAL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

| | |
|---|---|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Narda Lucía Pacay Barrientos |
| VOCAL V | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

| | |
|---|---|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Jaime Domingo Carranza González |
| EXAMINADOR | Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz |
| EXAMINADOR | Ing. Jorge Mario Estrada Asturias |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

# HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS FANGOS ACTIVOS DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA SUMERGIDA CON LIMPIEZA DE MEMBRANAS MEDIANTE ULTRASONIDOS**

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 8 de abril de 2015.

**Haniel Isaac Girón de León**

Guatemala, 08 de Abril del 2015

Ingeniero
Víctor Monzón
Director
Escuela de Ingeniería Química, USAC

Respetable Ingeniero Monzón:

Con un cordial saludo me dirijo a una persona para informarle que he asesorado y aprobado el Informe Final de Trabajo de Graduación titulado ***"Caracterización fisicoquímica de los fangos activos de un biorreactor de membrana sumergida con limpieza de membranas mediante ultrasonidos"***; elaborado por el estudiante de Ingeniería Ambiental Haniel Isaac Girón de León, quien se identifica con el número de carnet 200914981, la cual fue desarrollada en la Universidad de Granada, España; a través del programa de movilidad académica PIMA (Red de Medioambiente y Desarrollo Sostenible). Considero que dicho Informe Final de Trabajo de Graduación, satisface los requisitos exigidos.

Agradezco a usted la atención prestada.

Atentamente,

Ing. Luis Rodolfo Castro García

ASESOR

Luis Rodolfo Castro García
Ingeniero Químico Col. # 1,591
Maestro en Ingeniería Sanitaria

Guatemala, 19 de agosto de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.053.2015.

Ingeniero
**Víctor Manuel Monzón Valdez**
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **019-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**
**-Modalidad Intercambio Académico y Movilidad Estudiantil-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Haniel Isaac Girón De León.**
Identificado con número de carné: **2009-14981.**
Previo a optar al título de **INGENIERO AMBIENTAL.**

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS FANGOS ACTIVOS DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA SUMERGIDA CON LIMPIEZA DE MEMBRANAS MEDIANTE ULTRASONIDOS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por: **el Ingeniero Químico Luis Rodolfo Castro García y el Doctor Miguel Ángel Gómez Nieto.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

ESCUELA INGENIERIA QUIMICA
AREA TRABAJOS DE GRADUACION
FIUSAC

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

Ref.EIQ.TG.128.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera, **Ingeniería Ambiental** de la **-Modalidad Intercambio Académico y Movilidad Estudiantil-** del estudiante, **HANIEL ISAAC GIRÓN DE LÉON** titulado: **"CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS FANGOS ACTIVOS DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA SUMERGIDA CON LIMPIEZA DE MEMBRANAS MEDIANTE ULTRASONIDOS".** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECTOR
ESCUELA
INGENIERIA QUIMICA
U. S. A. C.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, septiembre 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 460.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS FANGOS ACTIVOS DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANA SUMERGIDA CON LIMPIEZA DE MEMBRANAS MEDIANTE ULTRASONIDOS,** presentado por el estudiante universitario: **Haniel Isaac Girón de León,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, septiembre de 2015

/gdech

## ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|---|---|
| **Dios** | Por su magnificencia demostrada hasta el día de hoy. |
| **Mi madre** | Elly Girón, porque ha sido el pilar de mi vida desde siempre; su amor y comprensión son infinitos como mi agradecimiento. |
| **Mi primo** | Josué Daniel Godínez Girón, por ser un hermano mayor y brindarme su aprecio y ayuda. |
| **Mi familia** | Primos, tíos y abuelos; por compartir la alegría de vivir. |
| **Mis amigos** | A esas personas que hacen de la vida un popurrí de experiencias y emociones. |
| **El pueblo de Guatemala** | Por darme la oportunidad de tener una educación superior en la Universidad de San Carlos de Guatemala. |

## AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|---|
| **La Universidad de San Carlos de Guatemala** | Por su confianza en mi persona para desarrollar el potencial manifestado durante estos años. |
| **Facultad de Ingeniería** | Por ofrecerme una oportunidad de desarrollo personal y profesional a lo largo de mi carrera. |
| **Mi madre** | Por su paciencia y esfuerzo para que pudiera salir adelante. |
| **Mis amigos de la "U"** | A todos aquellos que a pesar del tiempo, su amistad sigue presente. Especialmente a Anne Fernández, Rodrigo Ríos, Juan Pablo Samaniego, Odalis López, Ana Belén Morales, Indira Barreno, Andrés Puac, Diego Ochoa y Leonel Morataya. |
| **Mis amigos en España** | Más allá de las fronteras, las amistades son sempiternas. Gracias por tanto y por todo, hermanos y hermanas. Especialmente a Lorenzo Román, Maddi Cerruti, Alicia Portella, Lisa Franzeska y Lorenzo Laziale. |
| **Miguel Ángel Gómez Nieto** | Por su paciencia y dedicación en la supervisión de mi investigación. |

| | |
|---|---|
| **Universidad de Granada** | Por abrirme las puertas para realizar esta investigación. |
| **Programa de movilidad PIMA** | Por brindarme el privilegio de llevar a cabo el trabajo de fin de carrera en España. |

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES ..... VII
LISTA DE SÍMBOLOS ..... XV
GLOSARIO ..... XVII
RESUMEN ..... XXI
OBJETIVOS ..... XXIII
INTRODUCCIÓN ..... XXV

1. ANTECEDENTES ..... 1

2. MARCO TEÓRICO ..... 5
2.1. Concepto de membrana ..... 5
2.1.1. Desarrollo histórico de las membranas ..... 5
2.1.2. Clasificación de las membranas ..... 8
2.1.3. Materiales en las membranas ..... 8
2.1.4. Configuraciones de membrana ..... 10
2.1.4.1. Membrana plana ..... 12
2.1.4.2. Membrana multitubo ..... 12
2.1.4.3. Membrana de fibra hueca ..... 13
2.1.4.4. Membrana plana de microfiltración, Kubota ..... 15
2.1.4.5. Membrana de fibra hueca de ultrafiltración Zenon-GE ..... 18
2.2. Biorreactores de membranas sumergidas ..... 22
2.3. Biorreactor con la membrana integrada o sumergida ..... 22
2.4. Biorreactor con membrana externa o de recirculación ..... 23

2.4.1. Fundamentos del proceso ..... 23
2.4.2. Flujo ..... 23
2.4.3. Conversión ..... 24
2.4.4. Rechazo ..... 26
2.4.5. Transporte de masa ..... 26
2.4.6. Fuerza conductora ..... 26
2.5. Ensuciamiento o *fouling* ..... 27
2.5.1. Factores que afectan al *fouling* ..... 29
2.6. Limpieza de las membranas ..... 31
2.7. Retrolavado o *backwashing* ..... 32
2.7.1. Limpieza química ..... 33
2.8. Características de la membrana ..... 34
2.8.1. Hidrofobicidad ..... 34
2.9. Características de la biomasa ..... 36
2.9.1. Concentración y naturaleza de materia entrante ..... 36
2.9.2. Concentración de sólidos suspendidos en fango activo (MLSS) ..... 36
2.9.3. Viscosidad ..... 37
2.9.4. Temperatura ..... 37
2.9.5. Oxígeno disuelto (OD) ..... 38
2.9.6. *Foaming* o espuma ..... 38
2.10. Características del flóculo ..... 39
2.10.1. Tamaño del flóculo ..... 39
2.10.2. Hidrofobicidad y carga de superficie ..... 39
2.10.3. Sustancias poliméricas extracelulares (EPS) ..... 40
2.10.4. Productos microbianos solubles (SMP) ..... 42
2.11. Ultrasonido en la limpieza de membranas ..... 42
2.12. Frecuencia ultrasónica ..... 44

2.13. Intensidad de poder ultrasónico ..... 47

3. DISEÑO METODOLÓGICO ..... 49
3.1. Variables ..... 49
3.1.1. Variables de control ..... 49
3.1.2. Variables independientes y variables de respuesta ..... 52
3.2. Delimitación del campo de estudio ..... 52
3.3. Recursos humanos disponibles ..... 53
3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, reactivos y cristalería) ..... 53
3.5. Técnicas cuantitativas ..... 55
3.5.1. Viscosidad ..... 55
3.5.2. Sólidos en suspensión totales (SST) y volátiles (SSV) ..... 56
3.5.3. Distribución de tamaño de partículas ..... 57
3.5.4. Extracción de SMP ..... 58
3.5.5. Extracción de EPS ..... 58
3.5.6. Hidrofobicidad relativa (HR) ..... 58
3.6. Recolección y ordenamiento de la información ..... 59
3.6.1. Hidrofobicidad ..... 59
3.6.2. Carbono orgánico total en SMP ..... 64
3.6.3. Carbono orgánico en EPS ..... 68
3.6.4. Temperatura ..... 73
3.6.5. Viscosidad de fango ..... 77
3.6.6. Viscosidad del efluente ..... 82
3.6.7. Sólidos en suspensión ..... 86
3.6.8. Tamaño de partículas ..... 91
3.7. Análisis estadístico ..... 103

3.7.1. Análisis estadístico para la variable de hidrofobicidad en los distintos módulos de membranas ..... 104
3.7.2. Análisis estadístico para la variable de carbono orgánico en los SMP de los distintos módulos de membranas ..... 108
3.7.3. Análisis estadístico para la variable de carbono orgánico en los EPS de los distintos módulos de membranas ..... 110
3.7.4. Análisis estadístico para la variable de viscosidad del fango de los distintos módulos de membranas ..... 113
3.7.5. Análisis estadístico para la variable de viscosidad del efluente en los distintos módulos de membranas ..... 116
3.7.6. Análisis estadístico para la variable de sólidos suspendidos totales de los distintos módulos de membranas ..... 119
3.7.7. Análisis estadístico para la variable temperatura en los distintos módulos de membranas ..... 122
3.7.8. Análisis de componentes principales en el módulo A ..... 125
3.7.9. Análisis de componentes principales en el módulo B ..... 126
3.7.10. Análisis de componentes principales en el módulo C ..... 128
3.7.11. Análisis de componentes principales en el módulo Kubota ..... 130

3.7.12. Análisis estadístico para el tamaño de partículas de los módulos A, B, C y Kubota ..... 132

4. RESULTADOS ..... 135
4.1. Hidrofobicidad relativa ..... 135
4.2. Productos microbianos solubles (SMP) ..... 138
4.3. Productos solubles extracelulares (EPS) ..... 141
4.4. Sólidos suspendidos totales ..... 144
4.5. Viscosidad del fango ..... 146
4.6. Viscosidad del efluente ..... 148
4.7. Temperatura ..... 150
4.8. Tamaño de partículas ..... 152

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS ..... 155
5.1. Tamaño de partículas. ..... 155
5.2. Temperatura ..... 156
5.3. Hidrofobicidad ..... 158
5.4. EPS y SMP ..... 159
5.5. Viscosidad del fango y del efluente ..... 160

CONCLUSIONES ..... 163
RECOMENDACIONES ..... 165
BIBLIOGRAFÍA ..... 167
APÉNDICES ..... 169
ANEXOS ..... 171

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS


1. Imágenes de biorreactores de membrana Zenon y Kubota ..... 14
2. Configuración de membrana de Kubota ..... 17
3. Configuración de la membrana Zenon-GE ..... 20
4. Configuración de módulo de membranas Zenon-GE ..... 21
5. Desarrollo del proceso ..... 24
6. Balances de masas al módulo del agua ..... 25
7. Simulación de *fouling* ..... 27
8. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día dieciocho de noviembre del 2014 ..... 91
9. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día veinticinco de noviembre del 2014 ..... 92
10. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día dos de diciembre del 2014 ..... 93
11. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día nueve de diciembre del 2014.....94
12. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día dieciséis de diciembre del 2014 ..... 95
13. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día dieciocho de diciembre del 2014 ..... 96
14. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día nueve de enero del 2015 ..... 97
15. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día trece de enero del 2015 ..... 98

16. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día veintidós de enero del 2015 ..... 99
17. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día veintisiete de enero del 2015 ..... 100
18. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día tres de febrero del 2015 ..... 101
19. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día diecinueve de febrero del 2015 ..... 102
20. Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día veinticuatro de febrero del 2015 ..... 103
21. Medias y 95 % de Fisher LSD de la variable de hidrofobicidad ..... 107
22. Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable de carbono orgánico en los SMP ..... 110
23. Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable de carbono orgánico en los EPS ..... 113
24. Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable de viscosidad de fango ..... 115
25. Medias y 95 % de Fisher LSD de la variable de viscosidad del efluente ..... 119
26. Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable de SST ..... 122
27. Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable temperatura ..... 124
28. Vectores de componentes principales en el módulo A ..... 126
29. Vectores de componentes principales en el módulo B ..... 128
30. Vectores de componentes principales en el módulo C ..... 130
31. Vectores de componentes principales en el módulo Kubota ..... 132
32. Medianas y 95 % de Fisher LSD del tamaño de partículas ..... 134
33. Gráfico de hidrofobicidad en el módulo A y módulo Kubota ..... 135
34. Gráfico de hidrofobicidad en el módulo B y módulo Kubota ..... 136
35. Gráfico de hidrofobicidad en el módulo C y módulo Kubota ..... 137

36. Gráfico de productos microbianos solubles en el módulo A y módulo Kubota ..... 138
37. Gráfico de productos microbianos solubles en el módulo B y módulo Kubota ..... 139
38. Gráfico de productos microbianos solubles en el módulo C y módulo Kubota ..... 140
39. gráfico de productos solubles extracelulares en el módulo A y módulo Kubota ..... 141
40. Gráfico de productos solubles extracelulares en el módulo B y módulo Kubota ..... 142
41. Gráfico de productos solubles extracelulares en el módulo C y módulo Kubota ..... 143
42. Gráfico de sólidos suspendidos totales en los módulos A y Kubota..... 144
43. Gráfico de sólidos suspendidos totales en los módulos B y Kubota..... 145
44. Gráfico de sólidos suspendidos totales en los módulos C y Kubota .... 145
45. Gráfico de viscosidad del fango en los módulos A y Kubota ..... 146
46. Gráfico de viscosidad del fango en los módulos B y Kubota ..... 147
47. Gráfico de viscosidad del fango en los módulos C y Kubota ..... 147
48. Gráfico de viscosidad del efluente en los módulos A y Kubota ..... 148
49. Gráfico de viscosidad del efluente en los módulos B y Kubota ..... 149
50. Gráfico de viscosidad del efluente en los módulos C y Kubota ..... 149
51. Gráfico de temperatura en los módulos A y Kubota ..... 150
52. Gráfico de temperatura en los módulos B y Kubota ..... 151
53. Gráfico de temperatura en los módulos C y Kubota ..... 151
54. Tamaño de partículas en los módulos A, B, C y Kubota ..... 152
55. Porcentaje acumulado, tamaño de partículas en módulos A,B,C y Kubota ..... 153

## TABLAS


I. Variables de control en el procedimiento de obtención de la hidrofobicidad relativa....49
II. Valores de control en la obtención de SMP y EPS....50
III. Variables de control en la caracterización de la hidrofobicidad relativa....50
IV. Valores de control en la caracterización del SMP y EPS....51
V. Valores de control en la granulometría del fango activo....51
VI. Valores de control en la obtención de la viscosidad del fango activo....51
VII. Valores de control en la obtención de sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles y sólidos suspendidos totales....51
VIII. Frecuencias de ultrasonido utilizadas....52
IX. Valores resultantes de la hidrofobicidad relativa para el módulo de membranas A....60
X. Valores resultantes de la hidrofobicidad relativa para el módulo de membranas B....61
XI. Valores resultantes de la hidrofobicidad relativa para el módulo de membranas C....62
XII. Valores resultantes de la hidrofobicidad relativa para el módulo de membranas Kubota....63
XIII. Valores de TOC para los SMP en el módulo A....64
XIV. Valores de TOC para los SMP en el módulo B....65
XV. Valores de TOC para los SMP en el módulo C....66
XVI. Valores de TOC para los SMP en el módulo Kubota....67
XVII. Valores de TOC para los EPS en el módulo A....68
XVIII. Valores de TOC para los EPS en el módulo B....70
XIX. Valores de TOC para los EPS en el módulo C....71

XX. Valores de TOC para los EPS en el módulo Kubota ..... 72
XXI. Valores de la temperatura en el módulo de membranas A ..... 73
XXII. Valores de la temperatura en el módulo de membranas B ..... 74
XXIII. Valores de la temperatura en el módulo de membranas C ..... 75
XXIV. Valores de la temperatura en el módulo de membranas Kubota ..... 76
XXV. Valores de viscosidad del fango en el módulo de membranas A ..... 77
XXVI. Valores de viscosidad del fango en el módulo de membranas B ..... 78
XXVII. Valores de viscosidad del fango en el módulo de membranas C ..... 79
XXVIII. Valores de viscosidad del fango en el módulo de membranas Kubota..... 81
XXIX. Valores de viscosidad del efluente procedente del módulo de membranas A..... 82
XXX. Valores de viscosidad del efluente procedente del módulo de membranas B..... 83
XXXI. Valores de viscosidad del efluente procedente del módulo de membranas C..... 84
XXXII. Valores de viscosidad del efluente procedente del módulo de membranas Kubota..... 85
XXXIII. Valores resultantes de sólidos en suspensión totales en el módulo de membranas A ..... 86
XXXIV. Valores resultantes de sólidos en suspensión totales en el módulo de membranas B ..... 87
XXXV. Valores resultantes de sólidos en suspensión totales en el módulo de membranas C..... 89

XXXVI. Valores resultantes de sólidos en suspensión totales en el módulo de membranas Kubota ..... 90
XXXVII. Resumen estadístico de la variable de hidrofibicidad ..... 104
XXXVIII. Curtosis estandarizada de la variable de hidrofobicidad ..... 105
XXXIX. Tabla Anova de la variable de hidrofobicidad ..... 105
XL. Verificación de la varianza de la variable de hidrofobicidad ..... 106
XLI. Comparación de desviaciones típicas de la variable de hidrofobicidad ..... 106
XLII. Medias con intervalos de confianza al 95 % de la variable de hidrofobicidad ..... 107
XLIII. Resumen estadístico de la variable de carbono orgánico en los SMP ..... 108
XLIV. Curtosis estandarizada de la variable de carbono orgánico en los SMP ..... 108
XLV. Prueba de Kruskal-Wallis de la variable de carbono orgánico en los SMP ..... 109
XLVI. Comparación de pares de la variable de carbono orgánico en los SMP ..... 109
XLVII. Resumen estadístico de la variable de carbono orgánico en los EPS ..... 111
XLVIII. Curtosis estandarizada de la variable de carbono orgánico en los EPS ..... 111
XLIX. Prueba de Kruskal-Wallis de la variable de carbono orgánico en los EPS ..... 111
L. Comparación de pares de la variable de carbono orgánico en los EPS ..... 112
LI. Resumen estadístico de la variable de viscosidad de fango ..... 113

LII. Curtosis estandarizada de la variable de viscosidad de fango ..... 114
LIII. Prueba de Kruskal-Wallis de la variable de viscosidad de fango ..... 114
LIV. Comparación de pares de la variable de viscosidad de fango ..... 115
LV. Resumen estadístico de la variable de viscosidad del efluente ..... 116
LVI. Curtosis estandarizada de la variable de viscosidad del efluente ..... 116
LVII. Tabla Anova de la variable de viscosidad del efluente ..... 117
LVIII. Verificación de la varianza de la variable de viscosidad del efluente ..... 117
LIX. Comparación de desviaciones típicas de la variable de viscosidad del efluente ..... 118
LX. Medias con intervalos de confianza al 95 % de la variable de viscosidad del efluente ..... 118
LXI. Resumen estadístico de la variable de SST ..... 120
LXII. Curtosis estandarizada de la variable de SST ..... 120
LXIII. Tabla Anova de la variable de SST ..... 120
LXIV. Verificación de la varianza de la variable de SST ..... 121
LXV. Comparación de pares de la variable de SST ..... 121
LXVI. Resumen estadístico de la variable temperatura ..... 122
LXVII. Curtosis estandarizada de la variable temperatura ..... 123
LXVIII. Tabla Anova de la variable temperatura ..... 123
LXIX. Comparación de pares de la variable temperatura ..... 124
LXX. Valores de componentes principales en el módulo A ..... 125
LXXI. Pesos de los componentes en el módulo A ..... 125

LXXII. Valores de componentes principales en el módulo B ..... 127
LXXIII. Pesos de los componentes en el módulo B ..... 127
LXXIV. Valores de componentes principales en el módulo C ..... 129
LXXV. Pesos de los componentes en el módulo C ..... 129
LXXVI. Valores de componentes principales en el módulo Kubota ..... 131
LXXVII. Pesos de los componentes en el módulo Kubota ..... 131
LXXVIII. Resumen estadístico del tamaño de partículas ..... 133
LXXIX. Curtosis estandarizada del tamaño de partículas ..... 133
LXXX. Prueba de Kruskal-Wallis del tamaño de partículas ..... 133
LXXXI. Comparación de pares del tamaño de partículas ..... 134

# LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|---|---|
| **cm** | Centímetro |
| **°C** | Grado Celsius |
| **g** | Gramo |
| **kHz** | Kilohercio |
| **L** | Litro |
| **µm** | Micrómetro |
| **mPa** | Micropascal |
| **mg** | Miligramo |
| **mL** | Mililitro |
| **mm** | Milímetro |
| **%RH** | Porcentaje de hidrofobicidad relativa |
| **W** | Vatio |

# GLOSARIO

| | |
|---|---|
| **EPS** | Sustancias poliméricas extracelulares; de origen biológico que participan en la formación de agregados microbianos, que en su mayoría se componen de polisacáridos y proteínas, así como ácidos húmicos, ácidos nucleicos y lípidos. |
| **Foaming** | Proceso de formación de espuma debido a la existencia de algún agente surfactante o bacterias filamentosas en el medio. |
| **Fouling** | Acumulación no deseada de material biológico, orgánico e inorgánico sobre superficies, reduciendo la funcionalidad de un sistema. |
| **Hidrofobicidad** | Capacidad de una sustancia a no ser miscible en el agua. Esto ocurre cuando una molécula no es capaz de interaccionar con las moléculas de agua por interacciones ion dipolo o puentes de hidrógeno. |
| **Microfiltración** | Proceso físico de separación mediante membrana cuyo tamaño medio es de 0,2 μm. |

| | |
|---|---|
| **MLSS** | Es la concentración de sólidos suspendidos en un tanque de aireación durante el proceso de fangos activos, principalmente se mide en mg/L. |
| **PEC** | Polietileno clorado. $-(CH_2 - CHCl - CH_2 - CH_2)_n$ Material utilizado para la fabricación de membranas, la cual posee características como la impermeabilización, resistente a alcoholes, ácidos y alcalinidad. |
| **PTM** | Presión transmembrana. Es la diferencia de presión entre el lado del retenido y del permeado de la membrana. |
| **PVDF** | Fluoruro de polivinilideno. Polímero utilizado en la fabricación de membranas, la cual posee alta resistencia a ácidos, bases, disolventes y rayos ultravioleta. |
| **SMP** | Sustancias microbianas solubles. También llamado EPS soluble, definido como componentes celulares solubles liberados durante el metabolismo del sustrato y lisis celular. |
| **TOC** | Carbono orgánico total. Es la cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico y se usa frecuentemente como un indicador no específico de calidad del agua. |

| | |
|---|---|
| **TRH** | Tiempo de retención hidráulica. Tiempo de permanencia del agua residual en el sistema. |
| **Ultrasonido** | Onda acústica o sonora cuya frecuencia está por encima del umbral de audición del oído humano (aproximadamente 20,000 Hz). |

# RESUMEN

El ensuciamiento de membranas es uno de los principales problemas que tienen los biorreactores de membrana sumergida y es un obstáculo en la implementación de estas tecnologías en el sector de tratamiento de aguas, ya que los costes de mantenimiento, reemplazo y corrección son elevados. Se han desarrollado diferentes alternativas para mitigar el impacto sobre las membranas; la irradiación de ultrasonido es una de ellas.

Esta investigación se realizó en una planta experimental, evaluando el desempeño de cuatro módulos MBR irradiando ultrasonido a diferentes frecuencias en cada uno de ellos 20 kHz, 30 kHz y 40 kHz y con una potencia de 15 watts.

Las características del fango activo tales como la hidrofobicidad relativa (HR), la distribución de tamaño de partículas, los productos microbianos solubles (SMP), el exopolisacárido (EPS), sólidos en suspensión (SST) y viscosidad, fueron analizadas, sin embargo ninguna de ellas demostró alguna diferencia significativa estadísticamente respecto del módulo control, a excepción de la temperatura, ya que esta ascendió de 1,5 °C a 2 °C a lo largo del desarrollo de la investigación en todos los módulos, sin importar la frecuencia de ultrasonido utilizada. Asimismo, se demuestra en los módulos con irradiación ultrasónica que existe una aglomeración de partículas pequeñas, que tienden a unirse y formar flóculos de mayor tamaño, ayudando así a evitar un ensuciamiento de membrana irreversible.

# OBJETIVOS

## General

Evaluar el impacto del tratamiento de ultrasonido a diferentes frecuencias sobre la calidad de los fangos activos en la limpieza de membranas de ultrafiltración en la depuración de aguas residuales.

## Específicos

1. Analizar el comportamiento de la temperatura y viscosidad al aplicar ondas ultrasónicas al medio.

2. Determinar la fluctuación en la cantidad de EPS y SMP en los fangos activos.

3. Evaluar la variabilidad en el tamaño de partículas en los fangos activos.

4. Determinar la relación entre la frecuencia de ultrasonido utilizada y la influencia que tiene sobre las características fisicoquímicas de los fangos activos.

# INTRODUCCIÓN

La tecnología de membranas se ha utilizado ampliamente en la purificación de agua, tratamiento de aguas residuales, especialmente en la remoción de sólidos suspendidos y disueltos provenientes de aguas industriales o municipales. Durante la filtración por membranas, el flujo permeado puede reducirse significativamente hasta llegar a un estado de saturación; normalmente esto se debe al ensuciamiento de la misma, ya sea por microorganismos, materia orgánica o materia inorgánica.

El reemplazo de una membrana debido al ensuciamiento es uno de los costes de operación más significativos en una planta de tratamiento de aguas. Es por eso que la mitigación de este problema es importante para mantener una viabilidad económica en el proceso del tratamiento.

El nivel de ensuciamiento que puede sufrir una membrana depende de las características del influente, características de la membrana e hidrodinámica propuesta. Hoy en día se han desarrollado tecnologías que se utilizan para la reducción del ensuciamiento de membranas, tales como limpieza química, hidráulica y electrolítica, sin embargo han presentado desventajas que van desde la poca eficiencia del tratamiento hasta el daño irreversible de la membrana, sin contar con los gastos significativos que pueden presentar.

La incorporación de irradiación de ultrasonido en la limpieza de membranas ha sido una opción que puede promover la eficiencia de operación de estas, que a través del mecanismo de cavitación, se produce turbulencia,

altas velocidades de corte y remoción de fangos en la superficie de la membrana, reduciendo así el riesgo de ensuciamiento irreversible.

# 1. ANTECEDENTES

El empleo de los biorreactores de membrana se ha incrementado considerablemente en el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales en las últimas décadas. Hasta ahora, el ensuciamiento de membranas y el alto coste de las mismas son los principales obstáculos para una amplia aplicación de esta tecnología. A través de los años se han desarrollado investigaciones en orden para entender los mecanismos de ensuciamiento en detalle y así desarrollar métodos y técnicas que ayuden a minimizar su impacto.

La irradiación de ultrasonido en la limpieza de membranas sumergidas ha sido motivo de estudio extensivo; se ha estudiado su influencia en las propiedades intrínsecas de la membrana, el comportamiento del flujo, los fenómenos mecánicos que produce en el agua, sus efectos sobre los fangos activos. Asimismo, los parámetros de control como la frecuencia, el poder de intensidad, propiedades del influente, entre otros, han sido evaluados para optimizar el proceso de limpieza y reducir el ensuciamiento de membranas. Sin embargo, el mejoramiento de la limpieza con ultrasonido no ha sido comercializado abiertamente.

Se ha estudiado la técnica de irradiación para mitigar el ensuciamiento en membranas de polietersulfona (PES) y fluoruro de polivinilideno con una frecuencia de 20 kHz, lo cual ha indicado que mientras más potencia haya, la recuperación del flujo permeado será mayor.

Otros estudios han provisto de información útil al estudiar membranas con tamaño de poro de 10 a 100 kDa, con presiones transmembrana (PTM) de 100 kPa a 140 kPa y un rango de frecuencia de 20 kHz a 40 kHz, donde se han observado incrementos de permeabilidad del 15 % al 20 %, comprobando que mientras más bajas sean las frecuencias de ultrasonido habrá mejor recuperación de flujo.

No obstante, en las membranas cerámicas también existe interés, por tanto se ha demostrado que a 20 kHz la concentración de partículas afecta a la habilidad de controlar el ensuciamiento por parte del ultrasonido. Mediciones de la onda de sonido e imágenes de la región de cavitación indican que las partículas inducen a formar burbujas cerca de la fuente de ultrasonido, lo cual da lugar a menor turbulencia, alcanzando la superficie de la membrana y por consecuencia una reducción en la efectividad del control del ensuciamiento. El tamaño de partícula no afecta la intensidad de la onda de sonido.

Tanto en la microfiltración como en la ultrafiltración, la irradiación de ultrasonido ha tenido aplicación; mientras que en membranas planas se ha investigado más, en ultrafiltración de fibra hueca hay poca información disponible a pesar de que las membranas de fibra hueca son una configuración popular en aplicaciones industriales, resultados experimentales indican que el ultrasonido a altas y bajas frecuencias reducen sustancialmente el ensuciamiento de membrana y mejoran el desempeño del flujo permeado en el filtrado de proceso.

Otro de los problemas que presentan los biorreactores de membrana es cuando hay bacterias filamentosas; en la planta de tratamiento de aguas residuales municipales donde se desarrolló esta investigación, se ha estudiado durante dos años este fenómeno, donde predominan las bacterias

nocardioformes las cuales causan efecto de *foaming* o formación de espuma, teniendo como consecuencia la pérdida de biomasa, llevando así a un ligero aumento de presión transmembrana (PTM).

Se ha descubierto que el método ultrasónico es efectivo para reducir la resistencia de la capa de ensuciamiento en la membrana. Una relativamente alta cantidad de EPS se ha encontrado en la capa de ensuciamiento, respondiendo así a fuerzas externas (como el flujo cruzado y ultrasonido).

Las características del fango activo también han sido estudiadas tales como: sólidos en suspensión (SST), demanda química de oxígeno (DQO), turbidez, viscosidad y distribución de tamaño de partícula. Así como parámetros operativos como temperatura y presión transmembrana (PTM), en donde no se ha demostrado diferencia significativa a diferentes frecuencias de ultrasonido.

# 2. MARCO TEÓRICO

Las membranas han tomado gran importancia en la tecnología química y son usadas en una amplia variedad de aplicaciones. La propiedad fundamental por la que son utilizadas es la habilidad de controlar la tasa de permeabilidad de especies químicas a través de ellas.

## 2.1. Concepto de membrana

Una membrana puede definirse como una delgada película que separa dos fases y actúa como barrera selectiva al transporte de materia. Las membranas que permiten solamente el paso de algunas materias son conocidas como membranas semipermeables (Aptel & Buckley, 1998)

### 2.1.1. Desarrollo histórico de las membranas

Estudios sistemáticos del fenómeno de las membranas pueden ser encontrados desde el siglo XVIII, donde científicos filósofos, por ejemplo, Abbe Nolet acuñó la palabra "ósmosis" para describir la filtración del agua a través de un diafragma en 1748. Entre la década de 1910 y 1920, las membranas no tenían algún uso comercial o industrial, pero eran utilizadas como herramientas de laboratorio para desarrollar teorías fisicoquímicas, por ejemplo, las mediciones de la presión osmótica en solución hechas con membranas, por Traube y Pfeffer fueron usadas por Van't Hoff en 1887 para desarrollar su ley, la cual explica el comportamiento de una solución diluida ideal; este trabajo llevó directamente a la ecuación de Van't Hoff.

Al mismo tiempo, el concepto de una membrana semipermeable perfectamente selectiva fue usada por Maxwell y otros en el desarrollo de la teoría cinética de los gases (Baker, 2012).

Los primeros investigadores de membranas experimentaron con cada tipo de diafragma disponible, tales como vejigas de cerdos, ganado o de peces, y tripas de cualquier animal. Luego, eventualmente se utilizó membranas de colodión (nitrocelulosa), porque podían ser reproducidas. En 1907, Bechhold desarrolló una técnica para fabricar membranas de nitrocelulosa con poros de tamaño graduado (Baker, 2012).

Las membranas encontraron su primera aplicación significativa en la evaluación del agua potable a finales de la Segunda Guerra Mundial. Los servicios de agua potable en las comunidades de Alemania y en toda Europa habían colapsado, y los filtros para evaluar la calidad del agua eran muy necesarios y urgentes. El esfuerzo de investigación llevó a desarrollar estos filtros, patrocinados por el ejército de Estados Unidos, luego fue explotada por Millipore Corporation, el primer productor de membranas de microfiltración en Estados Unidos (Baker, 2012).

La industria moderna de separación por membranas empezó en la década de 1960. La creación de esta industria puede dividirse en cuatro fases: en la primera fase, basada en la técnica original de Loeb-Sourirajan, otros procesos de fabricación de membranas, incluyendo polimerización y composición multicapas, fueron desarrolladas para membranas de alto rendimiento. Usando estos procesos, las membranas con capas selectivas eran tan delgadas como 0,1 µm o menos eran producidas por numerosas compañías. Métodos para el empaque de membranas dentro de extensas áreas de membrana en espiral, de fibra hueca, capilares, y módulos en plato fueron desarrolladas (Baker, 2012).

En la segunda fase, al principio de la década de 1970, los desarrollos del programa de la Oficina de Aguas Salinas (OAS) del Departamento del Interior de los Estados Unidos empezaron a aparecer en unidades de membranas comerciales, en 1980 la microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa y la electrodiálisis fueron procesos establecidos (Baker, 2012).

La tercera fase, la cual empieza en la década de 1980, fue el surgimiento de la membrana industrial para separación de gases. El más grande producto fue la membrana por separación de hidrógeno Monsanto Prism(R). Años más tarde, Dow empezó a producir sistemas para separar nitrógeno del aire, y Cyanara y Separex producían sistemas para separar dióxido de carbono del gas natural (Baker, 2012).

La fase de desarrollo final, la cual empezó a mediados de la década de 1990, fue el desarrollo de los confiables y económicos sistemas de microfiltración y ultrafiltración para el tratamiento de aguas municipales y el uso de biorreactores de membrana en plantas de tratamiento de aguas residuales. Estas aplicaciones fueron el blanco de los desarrolladores desde el principio, tal como en 1960, pero el ensuciamiento de las membranas acarreaba problemas tales como el bajo flujo que atravesaba a través de ella.

A finales de 1980, el Doctor Kazuo Yamamoto empezó a desarrollar membranas sumergidas; sin embargo tomó diez años más para que compañías como Kubota, Mitsubishi Rayon y Zenon lo llevaran a nivel comercial; a finales de la misma década, los sistemas comerciales se empezaron a instalar. Los sistemas de membranas ahora compiten con los tratamientos biológicos convencionales en costes y precios; y pueden producir más agua tratada (Baker, 2012).

### 2.1.2. Clasificación de las membranas

Las membranas de microfiltración (MF) tienen tamaños de poro de 0,1 μm o mayores, y proporcionan una elevada eliminación de sólidos en suspensión, incluyendo la mayoría de bacterias, así como la eliminación parcial de virus y macromoléculas. La presión de trabajo se mantiene baja y similar a la de las membranas de ultrafiltración (Molina, 2007).

Las membranas de ultrafiltración (UF) tienen tamaños de poro que van desde 0,1 μm hasta menos de 5 nm (0,05 μm). Este tipo de membranas suelen permitir el rechazo de macromoléculas, todo tipo de microorganismos como virus y bacterias, y otros tipos de partículas. La presión de trabajo se mantiene baja (50 a 500 kPa) (Molina, 2007).

Las membranas de nanofiltración (NF) tienen poros de un tamaño inferior a 0,01 μm, lo que permite la eliminación de la mayoría de las especies, excepto de ciertos iones monovalentes y moléculas de bajo peso molecular. Este tipo de membranas raramente son utilizadas en BRM, debido a su alta resistencia hidráulica (Fane y Chang, 2002), pero pueden ser de interés en otros procesos, como el ablandamiento del agua por membranas (eliminación de iones polivalentes de calcio y magnesio) (Molina, 2007).

### 2.1.3. Materiales en las membranas

Existen dos principales tipos de membranas hechas de diferentes materiales, estas son las poliméricas y las cerámicas. También existen las membranas metálicas, pero tienen aplicaciones muy específicas que no están relacionadas con la tecnología de los biorreactores de membrana. Los materiales de la membrana, para ser eficaces, deben ser configurados de

manera que permitan el paso del agua a través de ella (Judd, et al., 2006).

En principio, cualquier polímero puede ser utilizado para formar una membrana, sin embargo solamente un número limitado de materiales son adecuados para el trabajo de separación por membranas, los más comunes son (Judd, et al., 2006):

- Fluoruro de polivinilideno (PVDF)
- Polietilsulfona (PES)
- Polietileno clorado (PEC)
- Polipropileno (PP)

De esta gama de materiales los más frecuentemente usados en la fabricación de membranas para el tratamiento de aguas residuales por MBR son las de fluoruro de polivinilideno (PVDF), polietilsulfonas (PES), polietileno y sus derivados (PE) y polipropileno (PP). Estas membranas son normalmente hidrofílicas, para evitar un ensuciamiento rápido de la membrana, aunque algunos de los materiales con los que se fabrican son hidrofóbicos, como puede ser el PVDF, PE y el PP, a los cuales se les aplica un tratamiento químico especial en su fabricación para que la superficie de la membrana sea hidrofílica, y por lo tanto en la membrana se comporten como tal (Judd, et al., 2006).

Las membranas inorgánicas, principalmente formadas por materiales cerámicos, como óxidos, nitruros o carburos de metales, como el aluminio, zirconio o titanio, materiales minerales como derivados de arcillas, materiales metálicos y de vidrio, generalmente poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica en comparación con los polímeros orgánicos. Presentan, sin embargo, la desventaja frente a estos de ser más frágiles y más caros que las membranas orgánicas. Se suelen aplicar en procesos de industria química,

tratamiento de fluidos agresivos o de alta temperatura y a las industrias farmacéuticas y lácteas donde se utilizan esterilizaciones térmicas, mientras que su uso en MBR está más limitado. Sin embargo en los últimos tiempos se está volviendo a investigar sobre la aplicación de membranas inorgánicas para aplicaciones concretas.

### 2.1.7. Configuraciones de membrana

Para obtener un rendimiento óptimo, las membranas usadas en el BMR deben cumplir una serie de requisitos indispensables:

- Deben ser inertes y no biodegradables.
- Deber ser resistentes a las sustancias químicas utilizadas para su limpieza, a altas presiones y elevadas temperaturas.
- La distribución de los poros ha de ser uniforme y la porosidad elevada, ya que así se consigue un mejor rendimiento de filtración.
- Las membranas tienen que ser neutras o bien tener una carga negativa para evitar la adsorción de los microorganismos, y preferiblemente hidrófilas.
- Deben tener una alta vida media para que sean rentables.

Atendiendo a la geometría que presenta la membrana, podemos encontrarnos módulos de membranas planas o cilíndricas, y dentro de estas tubulares, de disco rotatorio o de fibra hueca. Por otro lado, en función de la composición de las membranas, éstas pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica:

- Orgánica: la capa activa puede estar constituida por un polímero o copolímero hidrófilo (poliamidas, poliacrilnitrilo) o hidrófogo (polietileno,

polifluoruro de venildeno, politetrafluoretileno y policarbonato isopropileno).

- Inorgánica: suelen estar constituidas de cerámicas fundamentalmente.

Atendiendo al mecanismo de separación, se pueden clasificar según el poro de la membrana (porosas, y las no porosas o densas), o según la diferencia de solubilidad y difusividad de los materiales en la membrana.

Por su morfología, se distinguen las membranas isotrópicas y las anisotrópicas (asimétricas y mixtas).

Existen seis principales configuraciones actualmente empleadas en los procesos de membranas, las cuales todas tienen varios beneficios prácticos y limitaciones. Las configuraciones están basadas en una geometría plana o cilíndrica y abarcan (Judd, et al., 2006):

- Membrana plana (FS)
- Fibra hueca (HF)
- Multitubular (MT)
- Tubo capilar (CT)
- Cartucho de filtro plegado (FC)
- Arroyada en espiral (SW)

De las configuraciones descritas anteriormente, solamente las primeras tres son adecuadas en las tecnologías de biorreactores de membranas, principalmente porque los módulos deben permitir la promoción de turbulencia, limpieza y preferiblemente ambas (Judd, et al., 2006).

Las turbulencias se producen al hacer pasar el flujo de alimentación, o bien al hacer pasar una mezcla de agua y aire a lo largo de la membrana, lo cual favorece que el permeado la atraviese y reduce el ensuciamiento, por un mecanismo de cizalla. Este flujo cruzado es muy usado en tecnología de membranas, y se incrementa fácilmente al aumentar la distancia intersticial, la separación de las membranas (Arévalo, 2012).

#### 2.1.7.1. Membrana plana

La membrana plana está formada por paneles rectangulares cuyo material depende del fabricante, agrupados generalmente en módulos cúbicos o rectangulares a través de los cuales el fango activo circula, atravesando la membrana el agua y quedando retenidos los sólidos en su superficie debido a una fuerza de succión. En esta configuración pueden encontrarse membranas con muy diversos tamaños de poro, tanto en microfiltración como en ultrafiltración, con hasta 24 fabricantes en el mercado (Judd, et al., 2006).

#### 2.1.7.2. Membrana multitubo

En cuanto a las membranas con configuración en multitubo, consisten en un sistema MBR sumergido, consistente en módulos en forma de cilindro en los que se instalan tubos o cavidades internas. El fango activo es bombeado desde los reactores biológicos y circula a presión por dentro de estas cavidades, forzando el paso del agua y la retención de sólidos por la presión de bombeo que lleva el agua. El paso de agua es desde dentro del tubo hacia fuera, donde es recogida en el módulo y bombeada al exterior. La turbulencia generada en la superficie de la membrana es muy buena, e incluso dependiendo del fabricante puede acompañarse o no con el aporte de aire.

En lo referente al tamaño de poro, según el producto y el fabricante varía de la microfiltración a la ultrafiltración; los materiales también varían en cada producto pero en ninguno de ellos se realizan retrolavados. Actualmente existen en el mercado hasta 8 fabricantes que ofertan sus productos mediante este sistema (Judd, et al., 2006)

#### 2.1.7.3. Membrana de fibra hueca

Una importante ventaja de las membranas de fibra hueca es que se pueden formar módulos compactos con grandes áreas de superficie de membrana. No obstante, esta ventaja es contrarrestada por los bajos flujos que se generan, en comparación con las membranas planas hechas con los mismos materiales. El diámetro de las fibras huecas varía dentro de un amplio rango, desde 50 a 3000 µm. Dichas fibras pueden ser fabricadas con una densa y uniforme estructura, pero preferiblemente son formadas como estructuras microporosas, teniendo así una densa capa selectiva en el exterior e interior de su superficie.

La densa capa superficial puede ser también integrada con la fibra o bien como una capa separada recubierta encima del soporte poroso de la fibra. Muchas fibras deben ser empaquetadas y colocadas en tubos para formar un módulo de membrana. Debido a que cada módulo debe estar libre de fibras defectuosas, la producción de fibras huecas requiere una alta reproducibilidad y un riguroso control de calidad (Judd, et al., 2006).

Los elementos de filtración consisten en fibras que pueden ser presurizadas en el interior. El permeado se filtra a través de la fibra y fluye hacia fuera del contenedor. El material queda retenido y se recircula desde el tanque de membrana (Arévalo, 2012).

Para compensar el ensuciamiento de las membranas, estas pueden retrolavarse periódicamente. Sin embargo, el fluido de retrolavado debe estar filtrado, para eliminar las partículas que dañen la pared de la fibra porosa. El diseño de los módulos también determina otras características como la demanda de energía, la capacidad para separar los sólidos en suspensión, la facilidad para limpiarlos y reemplazarlos, la densidad de empaquetamiento, entre otros (Arévalo, 2012).

Figura 1. **Imágenes de biorreactores de membrana Zenon y Kubota**

Fuente: Debeocan S.L *Membranas de ultrafiltración y microfiltración*. http://debeocan.com/dbo/index.php?option=com_content&view=article&id=69&Itemid=84&lang=es. Consulta: 15 de noviembre del 2014.

Los módulos se diseñan, por lo tanto, para alcanzar tres objetivos esenciales:

- Asegurar a nivel de membrana una circulación suficiente de fluido que va a ser tratado, para limitar los fenómenos de concentración, polarización y

depósito de partículas.

- Producir un módulo compacto, por ejemplo, uno que provea máxima superficie de intercambio por unidad de volumen (máxima densidad compacta).

- Evitar cualquier fuga entre los compartimentos de alimentación y permeado.

Los dos primeros tienden a reducir el coste del módulo para producir un volumen determinado de fluido tratado, pero también tienden a aumentar el coste energético de la separación: alta velocidad de circulación y pequeñas secciones de paso producirán una gran pérdida de carga (Arévalo, 2012).

De estos productos descritos hay dos que destacan en el mundo de los biorreactores de membrana, el primero de ellos se trata de una membrana plana de microfiltración suministrada por Kubota y una membrana de ultrafiltración de fibra hueca fabricada por Zenon-GE. Estas dos compañías son las más importantes en esta tecnología, por diferentes motivos. Kubota es el productor que tiene instaladas un mayor número de plantas en el mundo, con el 39 % de las plantas construidas empleando esta membrana, mientras que Zenon-GE es el mayor productor mundial de agua tratada con MBR, representando un 46 % de la capacidad total instalada (Judd, et al., 2006).

#### 2.1.7.4. Membrana plana de microfiltración, Kubota

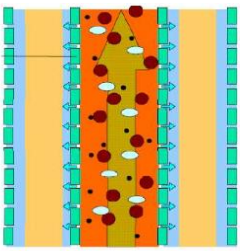
Kubota es una compañía japonesa fabricante de membranas de microfiltración, que fue pionera en este campo empujada por la iniciativa del gobierno japonés en los años 80-90 (Arévalo, 2012).

Esta tecnología consiste en membranas planas de microfiltración con un tamaño de medio de 0,4 µm. Es una membrana hidrofóbica fabricada en polietileno clorado (PE) sostenida en unos bastidores muy robustos que en su configuración dejan canales estrechos entre las placas de membrana que componen el módulo, a través de los cuales circula el fango a filtrar. (Arévalo, 2012).

Las características de la superficie de membrana van a determinar fuertemente el proceso de trabajo de esta. Esta membrana está fabricada en polietileno clorado (CPE), un derivado del polietileno (PE), mediante un proceso de hilado seco (*dry spinning*) que tiende a producir poros más alargados y una distribución del tamaño de poro más amplia, presentando una baja densidad de poros.

El polietileno presenta una alta hidrofobicidad que indica que presenta poca afinidad por el agua y una mayor afinidad por los compuestos del fango, lo que provoca que una membrana con una superficie hidrofóbica presente mayores tendencias al ensuciamiento de membrana. Para evitar disminuir esta tendencia hidrofóbica se somete a las membranas a un pos tratamiento en el que se modifican estas condiciones y se dota a la membrana de unas condiciones hidrofílicas que eviten su rápida colmatación por coloides y sustancias orgánicas, disminuyendo así su tendencia al ensuciamiento.

Figura 2. **Configuración de membrana de Kubota**



Fuente: ARÉVALO. Juan. *Aplicación de biorreactores de membrana al agua residual urbana: Consideraciones para la modificación de los parámetros del proceso*. p. 42.

El proceso de filtrado se corresponde con una tecnología fuera dentro, en el cual el fango circula y rodea las placas de membrana y atraviesa estas debido al vacío provocado por una bomba de succión o mediante gravedad, que fuerza al agua pasar a través de la membrana, quedando retenidos los sólidos en su superficie. El permeado producido en el filtrado es conducido por el interior del cartucho de la membrana y es evacuado de cada panel por un tubo en su parte superior. Los tubos salientes de cada panel de membranas se unen en una tubería de conducción del permeado central, a partir de la cual este es bombeado para evacuarlo fuera de la instalación.

En el proceso de funcionamiento de esta tecnología no existen los retrolavados, de forma que se busca generar una torta de sólidos sobre la superficie de la membrana que apoye en el proceso de filtración, por lo que en el proceso efectivo presenta un diámetro de poro menor que el nominal de la membrana, llegando a tamaños del rango de la ultrafiltración.

Para evitar los excesos de adherencia de sólidos a la superficie es necesario mantener un flujo de aire continuo sobre las membranas, para lo cual esta tecnología instala un sistema de difusores de aire bajo la base de las

membranas que producen un flujo de burbujas gruesas que peinan la superficie, arrastrando los excesos de fango adheridos (Arévalo, 2012).

La aireación de las membranas se produce mediante un sistema propio patentado que permite una limpieza de las conducciones mediante impulsos vigorosos. El sistema comprende una tubería central desde donde se abren vías secundarias en las que se instalan difusores bajo la base de las membranas. Para producir la limpieza del sistema, la tubería central está conectada a una válvula exterior que se abre brevemente para producir intensos reflujos que limpian el sistema de aireación.

Este tipo de membranas presentan la ventaja de los menores costes de producción comparados con los sistemas de fibra hueca. Sin embargo, la densidad de empaquetado es significativamente menor que en esta tecnología, lo que conlleva una ventaja comparativa en el caso de pequeñas y medianas plantas, pero una desventaja al subir el tamaño. Otra gran ventaja sobre la fibra hueca es que no se atascan con fibras y pelo, como lo que sucede en los módulos de fibra hueca (Judd, et al., 2006).

#### 2.1.7.5. Membrana de fibra hueca de ultrafiltración Zenon-GE

Zenon-Ge forma parte de la sección *Water and process technology* de la compañía General Electric. Produce membranas de fibra hueca de ultrafiltración y está considerada una de los mayores productores mundiales de membranas. Esta tecnología emplea membrana de fibra hueca en el rango de la ultrafiltración, con un tamaño medio de poro en torno a los 0,04 µm. Es una membrana moderadamente hidrofóbica con una trenza textil interior recubierta de una película de membrana de PDVF (Arévalo, 2012).

Las características que presenta la superficie de membrana van a determinar fuertemente el proceso de trabajo de esta, también en la tecnología de fibra hueca. Esta membrana está fabricada en polivinilideno fluoruro (PVDF), mediante un proceso de hilado húmedo (*wet spinning*) o por separación de fases inducida por temperatura (TIPS) (Lloyd and Kinzer, 1990; Bottino et al., 1991). Este proceso productivo permite una amplia variedad en las características de las membranas como la densidad de poros, eligiendo las condiciones de hilado (Pearce, 2007), para una mayor unidimensionalidad de los poros que los producidos mediante hilado en seco (Judd, et al., 2006).

El PVDF presenta una hidrofobicidad media que indica que presenta poca afinidad por el agua y una mayor afinidad por los compuestos del fango, lo que provoca que una membrana con una superficie hidrofóbica presente mayores tendencias al ensuciamiento de membrana (Yu et al., 2005; Sun et al., 2006).

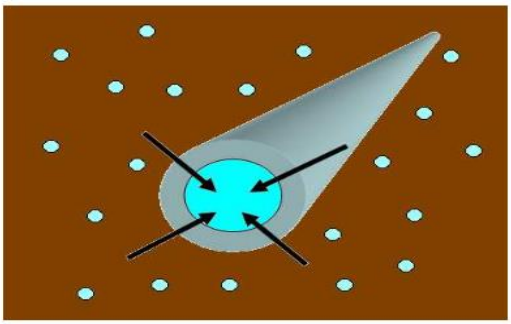
Para mejorar las condiciones de hidrofilicidad de la membrana se somete a estas a un pos tratamiento en el que se modifica este estado y se dota a la membrana de unas condiciones más hidrofílicas que eviten su rápida colmatación por coloides y sustancias orgánicas, disminuyendo así su tendencia al ensuciamiento, pero manteniendo ciertas características hidrofóbicas del material original, ya que los aditivos que la dotan de mayor hidrofilicidad tienden a debilitar la estructura.

Miles de estas fibras dispuestas en vertical se fijan a módulos plásticos que confieren la estructura, pegadas a estos módulos con resinas de poliuretano. Las fibras están unidas al módulo por la parte superior e inferior, manteniendo una movilidad lateral en su longitud. Este movimiento es posible, ya que el material de las membranas, el PDVF, es un compuesto muy flexible.

Entre las fibras que componen la membrana quedan espacios, por lo que circula el fango que rodea completamente las fibras y el proceso de filtrado se produce de fuera hacia dentro mediante succión provocada por bomba o por gravedad. Los sólidos quedan retenidos en la superficie, produciendo un permeado libre de sólidos. Este permeado, tras atravesar la barrera que supone la membrana, circula por el interior de esta y es evacuado por las dos fijaciones del pelo de la membrana, tanto por la parte superior como por la parte inferior.

Este sistema de doble vía de evacuación evita sobrepresiones en la longitud de la membrana, evitando la necesidad de un largo recorrido del agua por el interior de esta. Tras recogerlo, el permeado es recolectado en una tubería central y bombeado a un tanque de acumulación de permeado, en el cual se acumula una parte del agua producida, desde la que se toma para los procesos de limpieza y el resto es evacuado fuera de la instalación. En el circuito de permeado se instala un medidor de la presión transmembrana (TMP) que se registra en el circuito, que asesora la presión que sufren estas en el proceso de producción, de forma que se pueda actuar en caso de aumentos y peligro estructural sobre las membranas (Arévalo, 2012).

Figura 3. **Configuración de la membrana Zenon-GE**

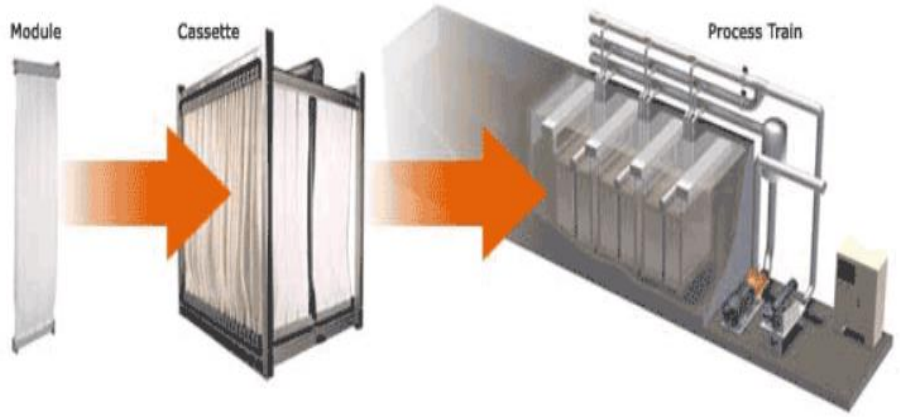


Fuente: ARÉVALO. Juan. *Aplicación de biorreactores de membrana al agua residual urbana: Consideraciones para la modificación de los parámetros del proceso*. p. 42.

El proceso de producción de esta tecnología consiste en períodos de producción relativamente cortos (5-10 minutos) seguidos de breves periodos de retrolavado, que actúan como mecanismo de limpieza. Tanto los tiempos de filtración como de retrolavado son programables, dependiendo de las condiciones de trabajo a las que se someta a la planta. En el retrolavado, la filtración es detenida y se mantienen las membranas bajo un flujo de burbujas gruesas que retiran los excesos de fango en su superficie, mientras que los retrolavados inyectan parte del permeado producido a contracorriente para retirar los sólidos de los poros y superficie de membrana (Arévalo, 2012).

Esta tecnología presenta ventajas de una alta densidad de empaquetamiento, lo cual proporciona grandes superficies de filtrado en poco volumen. Además, su sistema de aireación cíclica permite ahorros en aire añadido, por lo que adquiere ventaja al aumentar el tamaño de la instalación y la cantidad de agua a tratar.

Figura 4. **Configuración de módulo de membranas Zenon-GE**




Fuente: GE-Water. *Biorreactores de membrana sumergida*.
http://www.gewater.com/products/membrane-bioreactor-mbr.html
Consulta: 15 de noviembre de 2014.

## 2.2. Biorreactores de membranas sumergidas

Los MBR se basan en la utilización de membranas para el proceso de separación sólido-líquido imprescindible tras un tratamiento de fangos activos. Este tipo de tecnología está por tanto compuesta por dos partes principales que son la unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual, y el módulo de membrana encargado de llevar a cabo la separación física del fango activo (Molina, 2007).

El desarrollo de membranas operadas con presiones bajas con cortos ciclos de retrolavado combinados con aire, ha transformado la aplicación de las membranas de microfiltración y ultrafiltración en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Judd, et al., 2006).

## 2.3. Biorreactor con la membrana integrada o sumergida

La unidad de membrana que realiza la separación física está inmersa en el tanque biológico. La fuerza impulsora a través de la membrana es alcanzada presurizando el biorreactor o creando presión negativa en el lado permeado de la membrana (Rosenberger et al., 2002). Generalmente, se coloca un difusor de aire justo debajo del módulo de membrana para suministrar el aire necesario para homogeneizar el fango activo. Con esto también se consigue crear un régimen turbulento de aire en la capa límite de la membrana, que evita la formación de biopelícula que acaba por atorar la membrana.

En los MBR, la aireación del fango activo es aprovechada además para suministrar el oxígeno necesario para el proceso biológico y para reducir el ensuciamiento sobre la superficie de las membranas. Dicho ensuciamiento está influenciado por condiciones de operación del sistema (Molina, 2007).

## 2.4. Biorreactor con membrana externa o de recirculación

En este tipo de MBR, la membrana se encuentra fuera del reactor biológico, y el fango activo se recircula desde el biorreactor hasta el módulo de membrana. En los MBR con bucle externo, la fuerza impulsora es la presión creada por la alta velocidad del flujo de recirculación a través de la superficie de la membrana.

### 2.4.1. Fundamentos del proceso

Este apartado ha sido referenciado con base en el trabajo de Stephenson et. al. (2000).

### 2.4.2. Flujo

El fundamento teórico de operación en una membrana trata de un flujo que es transportado a través de una delgada película que causa una diferencia de presión; esto puede ser expresado de la siguiente manera:

Flujo = Fuerza x concentración x movilidad

Los elementos clave de cualquier proceso de membrana son la influencia de los siguientes parámetros en el total del flujo que atraviesa la membrana:

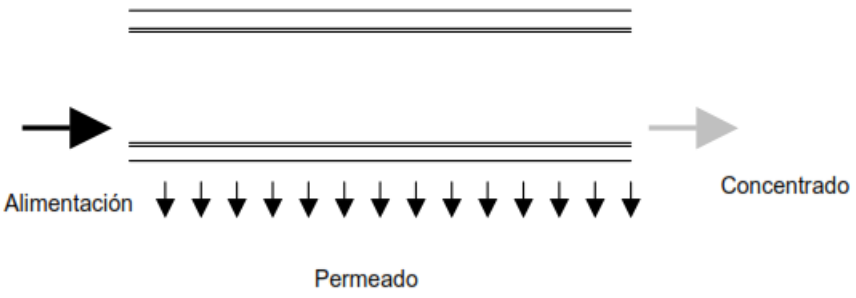
- La resistencia de la membrana.
- La fuerza operacional por unidad de membrana.
- Las condiciones hidrodinámicas en la membrana.
- El ensuciamiento y la consecuente limpieza de la superficie de la membrana.

El flujo es la cantidad de material que pasa a través de una unidad de área de la membrana por unidad de tiempo. Las unidades del SI en las que se mide el flujo son $m^3/m^2$ s.

### 2.4.3. Conversión

La combinación del flujo y de área total de la membrana determina el factor de conversión del proceso. La conversión (normalmente expresada como porcentaje) es la cantidad de agua de alimentación que es recuperada como permeado.

Figura 5. **Desarrollo del proceso**




Fuente: Centro Canario del Agua. *Introducción a los biorreactores de membrana.* p. 21.

Un balance de masas sencillo aplicado a la unidad de membrana dicta que:

$$Q = Q_p + Q_r$$

$$QC = Q_p C_p + Q_r C_r$$

Donde:

Q = caudal de alimentación

C = concentración de alimentación

$Q_p$ = caudal del permeado

$C_p$ = concentración del permeado

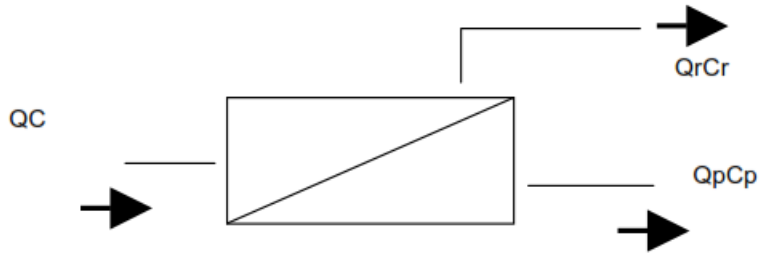
$Q_r$ = caudal retenido

$C_r$ = concentración de agua retenida

Donde el porcentaje de conversión es dado por,

$$\%\ conversión = \frac{Q_p}{Q} \times 100$$

Figura 6. **Balances de masas al módulo del agua**




Fuente: Centro Canario del Agua. *Introducción a biorreactores de membrana.* p. 21.

En los MBR la concentración del permeado $C_p$ es normalmente muy pequeña en comparación con la concentración del agua de alimentación, C. Además, el rango de producción de fango $Q_r$ es normalmente muy pequeño comparado con el caudal de entrada. Por lo tanto el proceso en MBR proporciona una muy sustanciosa eliminación de la materia biodegradable.

### 2.4.4. Rechazo

La membrana hace un barrido selectivo, que permite pasar a algunas sustancias a través de ella mientras rechaza otras. Esta propiedad se expresa normalmente como:

$$R = \frac{\left(1 - C_p\right)}{C} \times 100$$

Normalmente en los procesos MBR el rechazo de materia suspendida y demanda de oxígeno es muy alto.

### 2.4.5. Transporte de masa

Para que haya un paso a través de la membrana es necesario aplicar una fuerza que conduzca la materia a través de ella. La fuerza puede ser natural o impuesta artificialmente. Los dos mecanismos de transporte más importantes en un proceso de membrana para el tratamiento de las aguas residuales son la difusión y la convección. El régimen del flujo es dependiente del rango de flujo es decir, a rangos altos de flujo el régimen es turbulento mientras que a rangos bajos de flujo el régimen es laminar. Los rangos altos de flujo producen mayor eficiencia en el transporte de masas, por lo que es deseable promover la existencia de flujo turbulento.

### 2.4.6. Fuerza conductora

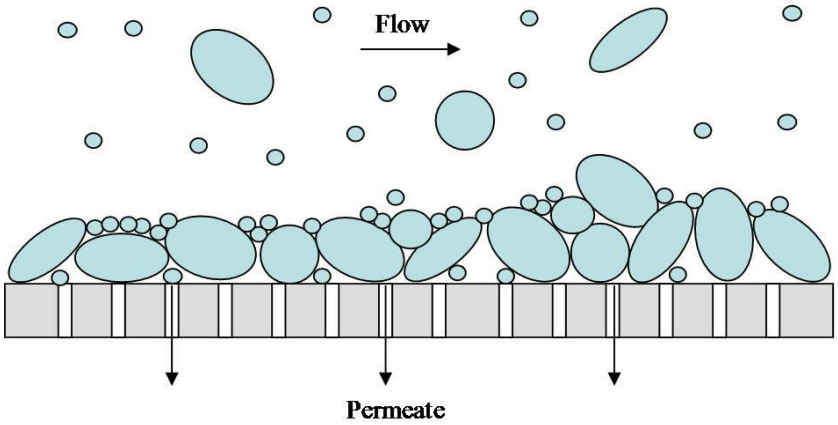
La fuerza conductora de la materia a través de la membrana es generalmente un gradiente de presión. Uno de los factores que se oponen a la fuerza conductora es el ensuciamiento de la membrana.

Se entiende por ensuciamiento al proceso por el cual especies presentes en el agua aumentan la resistencia de la membrana a la permeabilidad en su superficie. Cuando el ensuciamiento de la membrana es elevado, se produce una importante pérdida de carga que incrementa la resistencia a la permeabilidad, siendo necesario realizar limpieza química, utilizando soluciones como NaOH que contengan detergentes, sustancias quelantes o agentes dispersantes.

## 2.5. Ensuciamiento o *fouling*

El término ensuciamiento de membrana o *fouling* en sentido estricto es la cobertura, el relleno de la superficie de la membrana con depósitos que se adsorben en ella o simplemente se acumulan durante la operación. Sin embargo, el término es generalmente usado para todos aquellos fenómenos que llevan a una pérdida o disminución de la permeabilidad.

Figura 7. **Simulación de *fouling***




Fuente: Online MBR. *Fouling.*
http://www.onlinembr.info/Principles/Dynamic%20membrane.htm
Consulta: 10 de noviembre de 2014.

La presencia de estas partículas (sólidos en suspensión y materia disuelta) tiene una gran importancia sobre el flujo de permeado. Una primera disminución del flujo de permeado viene causada por la concentración-polarización; este término se utiliza para describir la tendencia del soluto a acumularse en la membrana. A medida que el permeado la atraviesa, los solutos que contenía se quedan en las proximidades de su superficie; este soluto forma una capa de líquido estancado cuya velocidad tiende a cero.

La presencia de sustancias disueltas en el agua residual puede causar una acumulación de solutos en el lado del retenido de la membrana. Por otro lado, los sólidos en suspensión son transportados hacia la superficie de la membrana formando una capa que reducirá la permeabilidad hidráulica y el flujo del permeado.

El *fouling* puede ser de dos formas, reversible e irreversible. El *fouling* irreversible es el producido por las partículas que penetran en la membrana y quedan retenidas en ella, produciendo una disminución del flujo que no es posible aumentar con lavados físicos de la membrana, y generalmente es parcialmente eliminado bajo regímenes de limpieza con agentes químicos. Mientras que el *fouling* reversible es el formado por la deposición de partículas sobre la superficie de la membrana, pudiendo ser eliminado mediante protocolos de limpieza físicos (Molina, 2007).

Es considerado uno de los mayores problemas operacionales detectados actualmente en los sistemas MBR, dado que suponen un problema añadido al proceso de filtración, lo cual incrementa los costes operacionales por gasto energético y acorta la vida media de las membranas. Debido a su impacto en el funcionamiento de los sistemas y la gran importancia operacional y económica

del ensuciamiento, este ha sido el mayor objetivo en las investigaciones relacionadas con los biorreactores de membrana de los últimos años.

### 2.5.1. Factores que afectan al *fouling*

Las causas del ensuciamiento de las membranas son muchas, muy diversas y complejas. Sin embargo, su principal efecto observable es un descenso en la carga específica de filtración, bien por el aumento de la presión transmembrana (TMP) o descenso de la carga orgánica (Arévalo, 2012).

Sin embargo, existen tres factores esenciales para entender por qué existe *fouling* o ensuciamiento en un proceso de membrana, estas son: las características de la membrana, la biomasa, factores de operación (Molina, 2007).

- En la membrana:
  - Su configuración
  - El material con que se fabricó
  - Hidrofobicidad
  - Porosidad y el tamaño del poro

- En la biomasa:
  - Sólidos suspendidos del fango activo (MLSS)
  - Sustancia polimérica extracelular
  - Tamaño de los flóculos
  - Materia disuelta

- Factores de operación:
  - Flujo cruzado

- Aireación
- Tiempo de retención celular (TRC)
- Tiempo de retención hidráulica (TRH)
- Presión transmembrana (TMP)

Las características de la membrana influyen de forma muy importante en el grado de ensuciamiento que llegan a sufrir, dadas las características de su superficie y su material. El material de la membrana muestra propensiones diferentes al ensuciamiento debido a su tamaño de poro, la morfología y la hidrofobia. En general, el ensuciamiento de la membrana se produce más fácilmente en membranas hidrofóbicas que en hidrofílicas, debido a la interacción hidrofóbica entre atascante y las membranas. Como resultado, se ha prestado mucha atención a reducir el ensuciamiento de membrana mediante la modificación de las características de las superficies de las membranas de hidrofóbicas a más hidrofílicas.

También es importante a la hora de evitar ensuciamientos el diseño de la instalación, en cuanto a la hidrodinámica en el tanque de membranas y sobre la superficie de membrana, junto con una correcta previsión y mantenimiento de la aireación de estas que reduzcan las sustancias adheridas (Le-Clech, et al., 2006).

La TMP indica el peligro que las membranas puedan ser dañadas estructuralmente por sobrepresiones. Conforme se ensucia la membrana, la TMP aumenta, de forma que es necesario limpiarla para recuperar las presiones iniciales y seguir produciendo. Sin embargo, la recuperación de los niveles iniciales de presión no es posible y se pierde poco a poco permeabilidad en las membranas, lo que a la larga marca el fin de la vida útil de la misma (Judd, et al., 2006).

El *fouling* puede reducirse de tres formas:

- Medios mecánicos: turbulencia.
- Medios físicos o químicos: reducción de partículas en el pretratamiento de las aguas.
- Minimizando el flujo entrante.

Estas operaciones generan costes adicionales al proceso, la operación de generar la turbulencia genera un coste operacional, las operaciones de eliminación de partículas y reducción del flujo generan coste en la inversión. Es esencial optimizar el sistema para eliminar el *fouling*, o reducir los problemas producidos por él, sin que esto genere costes excesivos (Stephenson, 2000).

En los MBR no es viable eliminar las partículas causantes del *fouling* por medio de un pretratamiento, debido a que estas constituyen una carga importante de materia orgánica necesaria para el tratamiento biológico (Stephenson, 2000).

La generación de turbulencia mediante el sistema de aireación es la forma más propia de los MBR. Por otro lado, la reducción del flujo, es la técnica utilizada por los MBR, ya que reducir el flujo conlleva operar con PTM inferiores, lo que provoca un menor ensuciamiento de las membranas (Molina, 2007).

## 2.6. Limpieza de las membranas

Las limpiezas para reducir el grado de atascamiento de las membranas se pueden categorizar en dos tipos, limpiezas llevadas a cabo con procesos físicos y con procesos químicos, si bien en la práctica se suelen emplear los dos sistemas. Además, durante el proceso de filtrado se suelen emplear

mecanismos para dificultar o disminuir el ensuciamiento, como la creación de flujos tangenciales a la membrana por las recirculaciones de fango o mediante flujos de burbujas gruesas que peinen las membranas.

Los procesos físicos de limpieza son empleados por todos los tipos de membrana y consisten en retrolavados o relajación de membranas, con o sin aire. En ambos casos, la adición de aire para apoyar la limpieza se basa en la instalación de difusores de burbuja gruesa bajo la membrana, que peinan flujo tangencial a la superficie, retirando el exceso de depósitos.

## 2.7. Retrolavado o *backwashing*

El procedimiento de retrolavado es utilizado para evitar la acumulación de partículas sólidas en la membrana. Al momento de filtrar, la bomba de succión retiene agua tratada del interior de la membrana con el fin de almacenarla y poder realizar un retrolavado.

La frecuencia de limpieza depende de las condiciones de operación. Por tanto, el retrolavado es un proceso completamente autocrítico. Para la mayoría de los casos, el retrolavado tiene lugar cada 30-60 minutos de trabajo, se hace durar un tiempo de 1 a 3 minutos. Si es insuficiente para restaurar el caudal, entonces se lleva a cabo la limpieza química de las membranas. Después de la limpieza química, se alcanza una parcial o plena restauración del caudal a través de la membrana.

La limpieza química de la membrana es requerida cada vez que el flujo de permeado disminuye un 20 % respecto del original esto viene a ser en la mayoría de los casos una vez cada 3 a 6 meses. Usualmente el hipoclorito de sodio (NaOCl) es el agente alcalino limpiador utilizado en la eliminación del

*fouling* orgánico, mientras que la limpieza ácida es utilizada para asegurar la eliminación de precipitados inorgánicos (Arévalo, 2012).

### 2.7.1. Limpieza química

Las limpiezas químicas incluyen la añadidura a las membranas de determinados productos químicos como hipoclorito sódico, peróxido de hidrógeno, ácido cítrico, ácido oxálico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico o hidróxido sódico, entre otros (Judd, et al., 2006). La elección del reactivo que se va a añadir a las concentraciones y el tiempo de contacto dependen de la naturaleza de la sustancia que ensucia la membrana, de la experiencia del operador y las recomendaciones del fabricante.

De forma más extendida, los reactivos químicos más empleados en la limpieza de membranas son el hipoclorito para contaminación orgánica y ácido cítrico para contaminación inorgánica. En el transcurso de la limpieza química se emplean junto con los procesos de las limpiezas físicas, en retrolavados o manteniendo las membranas en relajación con el reactivo y usualmente con adición de aire. Por lo general estos reactivos se diluyen en parte del permeado producido o en agua de servicio y se introducen en el interior de las membranas, bien en contralavado o en un baño químico, se mantiene un tiempo de contacto las membranas con la solución y se evacúa esta (Arévalo, 2012).

Las limpiezas químicas presentan el problema de la necesidad de adición de reactivos, lo que conlleva un gasto económico en la producción del efluente, a la vez que la utilización de estos mismos reactivos pueden causar problemas operacionales o de gestión de residuos. En el caso de algunos de los productos empleados, son tóxicos para la biomasa, por lo que se debe tratar de evitar su

contacto con esta. A su vez, al añadirle estos reactivos al permeado se generan subproductos, sobre todo de la cloración, que causan problemas en su posible reutilización o vertido al medio.

Las limpiezas químicas son actuaciones agresivas en las que un agente químico es aplicado sobre la membrana, de forma que se modifican las propiedades físicas y químicas de la membrana.

Se ha observado que esta aplicación de reactivos es capaz de eliminar eficazmente los ensuciamientos y disminuciones de flujo en membranas, si bien a su vez conlleva a situaciones que a la larga provocan un mayor grado de ensuciamiento y más dificultad en su eliminación, dado que se modifican las características químicas de la membrana, sus grupos funcionales y con ello el ángulo de contacto de las gotas con su superficie y un descenso en la resistencia mecánica de las membranas debido al gradual deterioro de los materiales. Por lo tanto es un procedimiento que conlleva un importante desgaste en las condiciones de las membranas (Arévalo, 2012).

## 2.8. Características de la membrana

A continuación se describen las características que se evaluarán a lo largo de esta investigación.

### 2.8.1. Hidrofobicidad

Desde que las interacciones hidrofóbicas tomaron lugar entre los solutos, células microbianas del EPS y la membrana del material, se espera que el ensuciamiento de membrana sea más severo con las membranas hidrofóbicas que con las membranas hidrofílicas (Judd, et al., 2006).

El cambio en la hidrofobicidad en la membrana ocurre también con otras modificaciones como el tamaño del poro, su morfología, las cuales hacen que la correlación entre la hidrofobicidad de la membrana y el ensuciamiento sea más difícil de evaluar. En un estudio reciente por ejemplo, la medida del ángulo de contacto mostró que la aparente hidrofobicidad de la membrana de polietersulfona (PES) disminuyó (de 55° a 47°).

El efecto de la hidrofobicidad de la membrana fue estudiado en detalle durante una comparación de dos membranas de ultrafiltración de características similares. Basado en el enorme rechazo y ensuciamiento del soluto y la resistencia de la capa de sólidos reportada para las membranas hidrofóbicas, los autores estuvieron dispuestos a postular en los efectos del ensuciamiento de la membrana en la disminución del desempeño del proceso de MBR. Esto concluyó en que el enorme rechazo del soluto fue debido a la capa dinámica formada por adsorción o tamizado en el grueso de sólidos formado en la membrana, y asimismo debido a la directa adsorción dentro de los poros de la membrana y la superficie.

Otros autores indicaron que las membranas de gran hidrofilicidad tienden a ser más vulnerables a la deposición de incrustante de naturaleza hidrofílica. En MBR, los fangos activos contienen cantidades sustanciales de EPS hidrofílico, que ha sido identificado como un importante atascante.

A pesar de la importancia de la hidrofobicidad de la membrana en las etapas iniciales del ensuciamiento, se espera que este parámetro tenga un papel mínimo durante períodos extendidos de filtración.

Una vez que el ensuciamiento haya iniciado, las características químicas de la membrana se vuelven secundarias para los materiales del fango que recubren la superficie de la membrana (Le-Clech, et al., 2006).

## 2.9. Características de la biomasa

La caracterización de las propiedades de la biomasa son esenciales para el reconocimiento de la problemática de ensuciamiento; a continuación se describen dichas propiedades.

### 2.9.1. Concentración y naturaleza de materia entrante

Mientras que el ensuciamiento de la membrana en la filtración de aguas residuales depende directamente en la calidad del agua, el ensuciamiento en las membranas en los MBR es mayoritariamente afectado por las interacciones entre la membrana y la suspensión biológica. Aguas más recalcitrantes tales como lixiviados de vertederos, pueden limitar la transformación bioquímica (Judd, y otros, 2006).

### 2.9.2. Concentración de sólidos suspendidos en fango activo (MLSS)

La concentración de sólidos suspendidos puede ser intuitivamente un indicador racional de que existe una tendencia al ensuciamiento de la membrana, sin embargo la relación entre el nivel de MLSS y la tendencia al ensuciamiento es compleja. Si otras características de la biomasa son ignoradas, el impacto en el aumento de MLSS puede ser negativo, positivo o insignificante en la permeabilidad de la membrana (Judd, et al., 2006).

La carencia de una correlación clara entre la concentración de MLSS y las características de cualquier incrustante específico indica que solamente la concentración de MLSS es un pobre indicador de tendencia al bioensuciamiento (Judd, et al., 2006).

### 2.9.3. Viscosidad

En el proceso convencional de fangos activos, la viscosidad de la biomasa cercanamente se relaciona con su concentración y contribuye al ensuciamiento. Mientras que se ha reportado que la viscosidad aumenta exponencialmente con la concentración de MLSS (Judd, et al., 2006).

### 2.9.4. Temperatura

La temperatura afecta a la filtración de la membrana a través de la viscosidad del permeado. Las bajas temperaturas en el medio pueden afectar de la siguiente manera:

- Afecta a la viscosidad del fango, más que en el permeado, la cual incrementa significativamente y reduce el esfuerzo de corte generado por el grosor de las burbujas como resultado.

- Intensifica la defloculación a bajas temperaturas, reduciendo así el tamaño de los flóculos liberando al mismo tiempo EPS a la solución.

- La biodegradación en la DQO, la cual decrece con la temperatura y resulta en altas concentraciones de soluto difícil de biodegradar.

Todos estos factores afectan directamente en el ensuciamiento de la membrana y, por ende, existe una deposición extensa de material incrustante en la superficie de la membrana a bajas temperaturas. La operación a altas temperaturas hace disminuir la viscosidad y aparentemente reduce también los niveles de SMP. Asimismo, a altas temperaturas, por lo menos en el rango de temperaturas mesofílicas, resultan en el incremento de la remoción de DQO (Judd, et al., 2006).

### 2.9.5. Oxígeno disuelto (OD)

La concentración de oxígeno disuelto en el biorreactor está controlada por la tasa de aireación, la cual provee oxígeno a la biomasa y también es utilizada para controlar el ensuciamiento en la membrana. El OD afecta al ensuciamiento a través de sistemas biológicos, estructuras de biopelículas, niveles de SMP y la distribución del tamaño del flóculo. Niveles más altos de OD generalmente proveen una mejor filtración. Asimismo, se ha encontrado que la contribución de los SMP a la mejor filtración de la membrana es menor que la que contribuye al tamaño de partículas y la porosidad.

La tasa de aireación controla directamente la cantidad y composición de SMP, EPS y el total de sustancias poliméricas en los flóculos biológicos y por último la relación proteína/carbohidrato en la superficie de la membrana (Judd, et al., 2006).

### 2.9.6. *Foaming* o espuma

La formación de espuma en las plantas de fangos activos es causada por los altos tiempos de retención de fangos (SRT), temperaturas medias, bajas relaciones de sustrato y microorganismos y altos niveles de MLSS, así como

aceite y grasas o surfactantes en el influente. Se ha reportado que el grado de formación de espuma se relaciona con la concentración de EPS (proteína). Asimismo, la espuma puede indicar la tendencia a ensuciamiento en una membrana (Judd, et al., 2006).

## 2.10. Características del flóculo

Las características del flóculo tales como su dimensión, la cantidad de oxígeno disuelto, hidrofobicidad, entre otros; condicionan el grado de taponamiento que puedan sufrir las membranas.

### 2.10.1. Tamaño del flóculo

Una distribución bimodal ha sido observada en los fangos de MBR (5-20 y 240 µm), la alta concentración de pequeños coloides, partículas y bacterias libres ha causado su completa retención en la membrana. Dado el gran tamaño de los sólidos floculantes comparado con el tamaño de poro de la membrana, la inserción de los flóculos en los poros no es posible. También fuerzas de arrastre y difusión de corte inducido han impedido la deposición en la superficie de la membrana. Sin embargo estos contribuyen al ensuciamiento a través de la producción de EPS y también afectan directamente al atasco en los canales de la membrana (Judd, et al., 2006).

### 2.10.2. Hidrofobicidad y carga de superficie

Un alto número de reportes se puede encontrar en la literatura científica que evidencia el ensuciamiento de membrana causado por flóculos altamente hidrofóbicos.

La relación de la hidrofobicidad de estos puede ser directamente medida por la adhesión/partición bacteriana, usando hidrocarburos tales como el hexano (Jang et al., 2005b), o determinando el ángulo de contacto. Sin embargo el efecto directo de la hidrofobicidad de los flóculos sobre el ensuciamiento de las membranas es difícil de evaluar. El nivel de EPS y bacterias filamentosas influye directamente en la hidrofobicidad de la masa y el potencial zeta. El crecimiento excesivo de bacterias filamentosas aumenta el nivel de EPS y disminuye el potencial zeta (Judd, et al., 2006).

### 2.10.3. Sustancias poliméricas extracelulares (EPS)

Las sustancias poliméricas extracelulares son los materiales de construcción para agregados microbianos como las biopelículas o flóculos. El término “EPS” es usado en general como concepto para diferentes clases de macromoléculas como los polisacáridos, proteínas, ácidos húmicos, ácidos nucleicos, fosfolípidos entre otros compuestos poliméricos que han sido encontrados en el exterior de la superficie de la célula y en el espacio intercelular de agregados microbianos. Estos consisten en materiales insolubles (vainas, polímeros capsulares, gel condensado, polímeros libres y material orgánico adjunto producido por la secreción activa, muda de material superficial celular o desintegración de la misma célula.

Las funciones del EPS son múltiples e incluyen adición de células bacterianas en flóculos y biopelículas, formación de una barrera protectora alrededor de la bacteria, retención de agua y adhesión a las superficies. Con esta naturaleza heterogénea y dinámica, los EPS pueden formar matrices de gel altamente hidratado en donde células microbianas están incrustadas. Por ende, pueden ser responsables por la creación de una barrera significativa que permee el flujo en un proceso de membrana.

Finalmente, los bioflóculos adjuntos a la membrana pueden ser una fuente importante de nutrientes durante la formación de la biopelícula en la superficie de la membrana (Le-Clech, et al., 2006).

Típicamente la solución que contiene EPS es posteriormente caracterizada por su contenido en proteínas (EPSp) y carbohidratos (EPSc), a través de espectrofotometría, no existiendo un método estándar de extracción.

Mientras que el EPSp generalmente muestra una tendencia hidrofóbica, el EPSc muestra una tendencia hidrofílica. La solución de EPS puede ser caracterizada también en términos de sus niveles de su carbono orgánico total (TOC), y también, pero en menor frecuencia, por su aromaticidad o hidrofobicidad.

Los EPS han demostrado ser un parámetro fundamental para evaluar el ensuciamiento en una membrana; recientemente se ha encontrado una relación funcional entre la resistencia específica, sólidos suspendidos volátiles (MLVSS) y la presión transmembrana (TMP), viscosidad del permeado y el EPS (Le-Clech, et al., 2006).

Desde que se demostró que el EPS tiene un rol esencial en las interacciones hidrofóbicas entre las células microbianas y en la formación de flóculos, fue propuesto que un descenso de los niveles de EPS puede causar una deterioración del flóculo (Le-Clech, et al., 2006).

Se presume que los EPS más grandes de 1000 kDa son los responsables del ensuciamiento en los MBR (Judd, et al., 2006). La repercusión de bajos niveles de EPS, y por tanto el deterioro de los flóculos en el ensuciamiento de la membrana puede ir en detrimento del desempeño del MBR. Esto también indica

que puede existir un nivel óptimo de EPS donde la estructura del flóculo se mantiene sin mostrar tendencias a un ensuciamiento de la membrana (Judd, et al., 2006).

Muchos parámetros incluyendo la dosificación de oxígeno y la composición del sustrato afectan las características del EPS en el MBR; sin embargo el SRT permanece como el más significativo de ellos. Una clara disminución de los niveles de EPS fue observado cuando había un mayor SRT, pero esta reducción no fue válida después de 30 días. Lee et al. observaron un incremento de la concentración de proteínas cuando el SRT incrementó (Judd, et al., 2006).

### 2.10.4. Productos microbianos solubles (SMP)

Los SMP se definen como componentes celulares solubles que se liberan durante la lisis o destrucción celular, se pierden durante la síntesis o son excretadas para algunos propósitos. En los sistemas MBR, pueden proveer de sustrato como alimento, por lo que hay una enorme aceptación de que los conceptos de EPS soluble y SMP son idénticos (Judd, et al., 2006). Durante la filtración, los SMP se absorben en la superficie de la membrana, donde pueden proveer una posible fuente de nutrientes a la formación de la biopelícula y una resistencia hidráulica al flujo permeado (Judd, et al., 2006).

## 2.11. Ultrasonido en la limpieza de membranas

Recientemente se han realizado investigaciones en la búsqueda de técnicas ambientalmente amigables para mejorar los periodos de filtración o reemplazar la limpieza química, una de ellas es la sonicación (Lodderer, et al., 2013).

La incorporación de la irradiación de ultrasonido (US) para la limpieza de membranas está empezando a tomar notoriedad en el campo de investigación y operación. El principio en utilizar ultrasonidos durante la filtración por membranas recae en los efectos de cavitación causados por estas ondas. Cuando un dispositivo ultrasónico emite ondas supersónicas suficientemente largas para vencer las fuerzas coercitivas en el agua, el agua sufre constantemente de presiones de extrusión y crea muchas burbujas microscópicas alrededor de la superficie de la membrana.

Estas pequeñas burbujas se forman y explotan bajo diferentes presiones, estas librean energía y causan vibraciones que liberan partículas que están sobre la superficie de la membrana, por lo que pueden reducir el ensuciamiento de la misma sin comprometer la eficiencia del tratamiento.

La irradiación de ultrasonido previene de la polarización y el ensuciamiento de la membrana proveyendo una capa de biosólidos menos comprimida, y disminuyendo la concentración de soluto cerca de la superficie de la membrana. Lamminen et al., (2007) categoriza los mecanismos de limpieza por ultrasonido en cuatro distintas vías:

- Corriente o flujo acústico
- Microflujo (*microstreaming*)
- Microsurtidores (*microstreamers*)
- *Microjets*

Solamente la corriente acústica no involucra el colapso de burbujas por cavitación. Las ondas de ultrasonido causan que masas de agua se muevan desde y hacia la superficie de la membrana, lo cual genera fuerzas de arrastre y empuje en las partículas sobre la superficie.

Las microcorrientes ocurren cuando las burbujas oscilan y crean fuerzas de corte significativas con un rango efectivo del diámetro de la burbuja. El fenómeno de los microsurtidores está definido como el viaje de las burbujas de cavitación en cadena; estas burbujas viajan vigorosamente alrededor de la superficie de la membrana. Estas burbujas tienden a la coalescencia y apartan partículas. Los *microjets* o microchorros ocurren cuando dos burbujas asimétricas de cavitación colapsan al mismo tiempo, o cuando una burbuja colapsa cerca de un sólido y crea un fuerte chorro de agua que aparta de la superficie de la membrana.

Numerosos investigadores han estado de acuerdo con que las bajas frecuencias de ultrasonido (US) exhiben una alta recuperación del flujo, que las altas frecuencias en la limpieza ultrasónica. El tratamiento con ultrasonido (US) ha sido combinado perfectamente con el retrolavado de membranas a nivel laboratorio, sin embargo esto no ha sido ampliamente comercializado debido a que ha presentado daños en la membrana en varias ocasiones.

No obstante, Lamminem et al. (2007) y Muthukumaran et al. (2004) establecieron que la limpieza por US no afecta la integridad de la membrana. La irradiación de US puede ser aplicada de modo intermitente o modo continuo. Las aplicaciones de uso intermitente de ultrasonido parecen energéticamente menos intensivas que las de uso continuo (Ng, y otros, 2013).

## 2.12. Frecuencia ultrasónica

Los efectos de la irradiación de ultrasonido a frecuencias desde 28 kHz a 1 MHz en la filtración de membranas han concluido que mientras más baja sea la frecuencia mejores eficiencias de limpieza se tendrán.

A pesar de que las frecuencias altas puedan tener más burbujas de cavitación colapsando, estas son pequeñas y su colapsan débilmente y no con vigorosidad. Estas no serán capaces de despegar las partículas de la superficie de la membrana como lo hacen a baja frecuencia.

De acuerdo con Mason y Lorimer (2005), un incremento en la frecuencia ultrasónica minimiza la producción e intensidad de cavitación en los líquidos. A muy altas frecuencias los ciclos de rarefacción (y de compresión) son demasiados cortos como para permitir que una burbuja crezca a un tamaño suficiente capaz de causar una disrupción en el líquido. Por tanto los efectos de cavitación resultantes serán menores a altas frecuencias (Kyllönen, y otros, 2005).

La frecuencia ultrasónica es un factor muy importante en el proceso de limpieza por ultrasonido. Los efectos del flujo permeado con irradiación de ultrasonido a tres diferentes frecuencias, 28, 45 y 100 kHz fueron estudiados, y los resultados demostraron que no había un efecto significativo en el flujo a una frecuencia de 100 kHz, pero sí habían desempeños importantes a 28 y 45 kHz.

Lamminen et al. (2004) investigaron los efectos en un rango de frecuencias que va desde 0 a 1200 kHz y encontraron que las recuperaciones del flujo incrementaron mientras la frecuencia ultrasónica disminuía. Muthukumaran et al. (2007) estudiaron los efectos en frecuencias de 50 kHz y 1 MHz, con irradiación intermitente en el proceso de limpieza de membranas (Cai, y otros, 2010).

Los procedimientos de limpieza son significativamente optimizados por la cavitación y la corriente acústica inducida por las ondas de ultrasonido.

Las radiaciones acústicas de alta densidad causan varios cambios cuando se propagan a través del medio. Estos cambios ocurren como resultado de varios mecanismos, los cuales pueden ser resumidos de la siguiente manera (Masselin, y otros, 2001):

- Calentamiento: es generalmente aceptado que la temperatura incrementa debido a la adsorción de las ondas de sonido o la compresión adiabática del medio en el campo de la acústica, depende de la naturaleza del medio y la interface líquido/membrana.

- Efectos estructurales: cuando los fluidos son puestos bajo campos acústicos de alta intensidad (frecuencias mayores a 18 kHz), la agitación dinámica y la fuerza de corte producida afecta sus propiedades estructurales, particularmente su viscosidad.

- Compresión y rarefacción: cuando las ondas de energía acústica de alta intensidad viajan a través de un medio sólido, ocurre una rápida y sucesiva compresión y rarefacción, las velocidades de estas dependen de la frecuencia. Materiales densos usualmente se “fracturan” bajo estrés acústico.

- Turbulencia: el ultrasonido a alta intensidad en líquidos y gases de baja viscosidad produce una violenta agitación que puede ser utilizada para dispersar partículas. En las interfaces líquido/sólido, gas/sólido, las ondas acústicas causan extrema turbulencia conocida como “*acoustic streaming”* o “*microstreaming”.*

- Cavitación: la cavitación acústica es la formación, crecimiento y colapso violento de pequeñas burbujas o vacíos en líquidos como resultado de la

fluctuación de la presión. Entre otros efectos, la cavitación puede dañar superficies.

## 2.13. Intensidad de poder ultrasónico

La intensidad del poder es una medida de la energía que las ondas de sonido producen. En el sentido más estricto, la intensidad es la cantidad de energía de la onda por segundo por unidad de área. La unidad usual de la intensidad del sonido es $Wcm^{-2}$. La intensidad del poder puede determinarse simplemente desde la entrada o la salida de poder del sonificador por unidad de área de la superficie del transductor (Kyllönen, y otros, 2005).

# 3. DISEÑO METODOLÓGICO

## 3.1. Variables

De acuerdo con la investigación teórica realizada, las variables de este trabajo se clasifican en variables de control, independientes y de respuesta. Las variables de control son aquellas que son constantemente monitoreadas que siendo diferentes unas de otras poseen una valoración puntual para poder así obtener resultados, o bien variables de respuesta. Asimismo, las variables independientes son los valores de los que dependen los resultados.

### 3.1.1. Variables de control

A continuación se muestran las variables de control utilizadas en los procedimientos de esta investigación, en tablas, respectivamente.

Tabla I. **Variables de control en el procedimiento de obtención de la hidrofobicidad relativa**

| Núm. | Variable | Unidades | Descripción |
|---|---|---|---|
| 1 | Volumen de muestra | Ml | Se utilizó 1 ml de fango activo para la determinación del porcentaje de hidrofobicidad |
| 2 | Tiempo de centrifugación | Min | Se trabajó con tiempos de 10 minutos |
| 3 | Velocidad de centrifugación | Rpm | Se trabajó a una velocidad de 1760 rpm |

Continuación de la tabla I.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 4 | Relación solución *buffer* PUM: octano | PUM: octano | Se trabajó con una relación 5:1 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Valores de control en la obtención de SMP y EPS**

| No. | Variable | Unidades | Descripción |
|---|---|---|---|
| 1 | Volumen de muestra | Ml | Se utilizó 20 ml de fango activo para la obtención de SMP y EPS |
| 2 | Tiempo de centrifugación | Min | Se trabajó con tiempos de centrifugación fueron de 10 minutos |
| 3 | Velocidad de centrifugación | Rpm | Se trabajó a una velocidad de 5000 (SMP) y 7000 (EPS) |
| 4 | Temperatura de calentamiento | °C | Se trabajó con una temperatura de 80°C |
| 5 | Tiempo de calentamiento | Min | Se trabajó con tiempos de calentamiento de 10 minutos |

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables de control en la caracterización de la hidrofobicidad relativa**

| Núm. | Variable | Unidades | Descripción |
|---|---|---|---|
| **ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA** | | | |
| 1 | Longitud de onda | Nm | Se trabajó con una longitud de onda de 600 nm |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Valores de control en la caracterización del SMP y EPS**

| Núm. | Variable | Unidades | Descripción |
|---|---|---|---|
| 1 | Volumen de muestra | ml | El analizador utiliza 10 ml de muestra |
| 2 | Temperatura de incineración | °C | El analizador incinera la muestra una temperatura de 900 °C |

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Valores de control en la granulometría del fango activo**

| Núm. | Variable | Unidades | Descripción |
|---|---|---|---|
| 1 | Volumen de muestra | Ml | El análisis requería entre 20 – 25 ml |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Valores de control en la obtención de la viscosidad del fango activo**

| Núm. | Variable | Unidad | Descripción |
|---|---|---|---|
| 1 | Volumen de muestra | Ml | Se utilizaron 16 ml para la medición de viscosidad |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Valores de control en la obtención de sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles y sólidos suspendidos totales**

| No. | Variable | Unidades | Descripción |
|---|---|---|---|
| 1 | Volumen de muestra | Ml | Se utilizaron 50 ml de muestra |

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Variables independientes y variables de respuesta

Las diferentes frecuencias de ultrasonido que se utilizaron para cada módulo de membrana se describen en la siguiente tabla.

Tabla VIII. **Frecuencias de ultrasonido utilizadas**

| Módulo de membrana | Frecuencia (Hz) |
|---|---|
| Módulo A | 40 Hz |
| Módulo B | 30 Hz |
| Módulo C | 20 Hz |

Fuente: elaboración propia.

Las variables respuesta son aquellos parámetros que fueron analizados para el análisis de la efectividad de la aplicación de ultrasonido en las membranas, estas son: porcentaje de hidrofobicidad relativa, cantidad de SMP y EPS, viscosidad, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, sólidos suspendidos totales y el tamaño de partículas.

## 3.2. Delimitación del campo de estudio

La delimitación del campo de estudio es la clasificación que el trabajo de investigación debe tener de acuerdo con ell área, industria, proceso y etapa del proceso en el cual su enfoque se encuentra.

- Área: tratamiento de aguas residuales.

- Industria: microfiltración con biorreactores de membrana sumergida.

- Proceso: limpieza por ultrasonido en membranas sumergidas.

- Etapa del proceso: evaluación del uso de diferentes frecuencias de ultrasonido en la limpieza continua de los biorreactores de membrana sumergida.

- Ubicación: los análisis correspondientes se realizan en el laboratorio de tecnologías del medio ambiente, de la ETSI Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

## 3.3. Recursos humanos disponibles

Los recursos humanos disponibles son las personas involucradas en el trabajo de investigación en calidad de asesores e investigadores.

- Investigador: Br. Haniel Isaac Girón De León.
- Asesor ETSI Caminos, Canales y Puertos, UGR: Dr. Miguel Ángel Gómez Nieto.
- Asesor Escuela de Ingeniería Química, USAC: MSc. Luis Rodolfo Castro García.

## 3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, reactivos y cristalería)

El equipo, reactivos y cristalería utilizada fueron provistos por el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, de la Universidad de Granada para el desarrollo de este trabajo de investigación. Los cuales se muestran a continuación:

- Materia prima

- Aguas residuales provenientes de la estación depuradora de aguas residuales de Granada, EDAR-Sur (Churriana).

- Materiales auxiliares
  - Tubos tipo Falcón 50 cónico
  - Recipientes desechables de 50 ml
  - Recipientes desechables de 100 ml
  - Envase, tarro estrella 50 ml
  - Pipetas de 10 ml, 5 ml, 1 ml
  - Filtros esterilizados de 0.45 µm
  - Filtros de fibra de vidrio de 0.22 µm

- Cristalería
  - *Beakers* de 50 ml y 100 ml

- Reactivos
  - Agua destilada
  - Solución tampón de fosfato, urea y sulfato de magnesio (PUM)
  - 2,2,4-trimetilpentano (Iso-octano)

- Equipo
  - Centrifugadora
  - Horno y desecador con sílica gel
  - Baño termostatizador analógico
  - Kitasato
  - Agitador (vórtex)
  - Espectrofotómetro
  - Analizador de carbono orgánico total (TOC)
  - Analizador de tamaño y distribución de partículas *Master Sizer* 2000

- Viscosímetro
- Balanza digital

## 3.5. Técnicas cuantitativas

Las técnicas cuantitativas son los métodos aplicados para la obtención y caracterización de resultados en las propiedades del fango activo a estudiar, bajo la influencia de la ultrasonificación en los biorreactores de membranas sumergidas.

### 3.5.1. Viscosidad

Para la medida de la viscosidad, tanto de las muestras de fango activo como de las de efluente, se ha utilizado un viscosímetro rotacional de la marca Fungilab, modelo Smart, basado en el principio de medida del torque de un husillo girando en una muestra a una velocidad determinada. Dadas las características de las muestras analizadas, se utiliza un adaptador de baja viscosidad (LCP) que permite medidas más precisas que las que se pueden obtener utilizando los husillos estándar.

Con el fin de homogeneizar los resultados y realizar todos los análisis a temperatura estándar para que resulten comparables entre sí, las muestras se introducen previamente en un baño termostatizado en el que se selecciona una temperatura de 20 ºC y permanecen en su interior hasta que alcanzan dicha temperatura. Posteriormente se introducen 16 ml de muestra en el viscosímetro y se mide la resistencia que opone al movimiento del husillo, determinando la viscosidad con base en ello.

### 3.5.2. Sólidos en suspensión totales (SST), volátiles (SSV)

Para determinar la concentración de sólidos en suspensión en las muestras de fango activo procedentes de cada uno de los módulos, el método empleado es el de filtración-secado-pesada descrito por la APHA (1992). Se trata de un proceso de separación sólido-líquido mediante evaporación, en el que se separan los sólidos de la fase acuosa mediante filtración por un tamaño de poro de 0,45 µm.

Una vez separados los sólidos, se elimina el agua retenida introduciendo los filtros en una estufa a 105 ºC y secándola durante una hora, tiempo tras el cual se dejan enfriar en el interior de un desecador y se pesa el filtro con los sólidos secos retenidos en él. Posteriormente se introduce nuevamente el filtro en la estufa durante 15 minutos, se enfría y se pesa, repitiendo esta operación hasta obtener un peso constante. La medida se expresa en mg/L mediante la siguiente ecuación:

$$SST\ \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{(peso_{después\ estufa} - peso_{inicial\ filtro})}{Volumen\ muestra} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Previamente a la determinación de los sólidos en suspensión se debe preparar los filtros con el objetivo de arrastrar las fibras sueltas y estabilizar el peso de los mismos.

Los VSS se han analizado también mediante el método de filtración-secado-pesada descrito anteriormente pero añadiendo una fase posterior de incineración en un horno mufla (APHA, 1992). La determinación se basa en la pérdida de peso de una muestra de sólidos al incinerarla, introduciendo los filtros previamente secados en la mufla a 550 ºC, de manera que los

compuestos orgánicos se volatilizan tras su combustión, pasando a $CO_2$ y $H_2O$, mientras que la materia inorgánica permanece como materia fija.

En este caso, se obtiene el valor de los sólidos inorgánicos inertes mediante la siguiente ecuación:

$$ISS\ \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{(peso_{después\ mufla} - peso_{inicial\ filtro})}{Volumen\ muestra} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Los VSS se determinan como la diferencia entre los sólidos totales y los inertes:

$$VSS\ \left(\frac{mg}{L}\right) = TSS - ISS \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

### 3.5.3. Distribución de tamaño de partículas

El análisis de distribución de partículas permite analizar el tamaño, distribución y abundancia de las partículas presentes en las muestras de efluente. El analizador de partículas con el cual se han llevado a cabo estos análisis dispone de un medidor marca Malvern, modelo MasterSizer, capaz de medir mediante extinción del rayo de luz láser, partículas de tamaños comprendidos entre 0,01 µm a 3000 µm.

Se inyectan aproximadamente 20 ml de muestra en el tanque homogeneizador que luego pasa a través de los sensores del haz de luz. Los resultados son registrados por el software del equipo que procesa los datos y agrupa la cantidad de partículas medidas por tamaños.

Dichos datos son exportados a una hoja de cálculo de Excel, para poder desarrollar las gráficas respectivas, así como para encontrar los porcentajes en

función del tamaño de partículas, debido a la composición de la muestra, las gráficas corresponden a una campana de Gauss.

### 3.5.4. Extracción de SMP

Para la extracción de SMP del fango activo se ha seguido el procedimiento descrito por Judd (2006). Para ello se ha sometido a 10 ml de fango activo procedente del reactor aireado a una centrifugación a 5000xg durante 10 minutos. Posteriormente, el sobrenadante fue filtrado mediante filtros Millipore de 0,22 µm y el *pellet* fue reservado para la extracción de EPS.

La disolución de SMP obtenida fue caracterizada en un analizador de carbono orgánico total.

### 3.5.5. Extracción de EPS

El método utilizado para la extracción de EPS (Judd, 2006) consiste en resuspender con agua Mili-Q el pellet reservado anteriormente de la extracción del SMP en el mismo volumen de la muestra original de fango activo. Luego este se calienta en un baño termostatizador a 80 °C durante 10 minutos; posteriormente se centrifuga a 7000xg durante 10 minutos; por último el sobrenadante es filtrado mediante filtros Millipore de 0,22 µm. Se descarta el *pellet* y se analiza el sobrenadante.

### 3.5.6. Hidrofobicidad relativa (HR)

Se ha realizado el análisis de la hidrofobicidad relativa según el método BATH (*Bacterial adhesion to hydrocarbons*) descrito por Rosenberg et al. (1980) y optimizado para fangos activos por Liu et al. (2010).

Una muestra de fango activo es centrifugada a 1760xg durante 10 minutos. El *pellet* del fango es resuspendido en el volumen original con *buffer* PUM (*phosphate-urea-magnesium).* Este proceso es repetido dos veces. El fango lavado es sonicado durante 3 minutos y diluido en *buffer* PUM hasta conseguir una absorbancia inicial de 0,200 aproximadamente a 600 nm (Absi).

Posteriormente, se añade n-octano en la suspensión del fango con un ratio entre el volumen de la solución hidrofóbica y la solución acuosa de 1/5 y la mezcla se lleva al agitador durante 120 segundos. Finalmente, la absorbancia (Abse) de la fase acuosa es medida tras 20 minutos a 600 nm. La hidrofobicidad relativa (HR) es determinada según la siguiente ecuación:

$$RH = \left(1 - \frac{Abs_e}{Abs_i}\right) * 100\% \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

## 3.6. Recolección y ordenamiento de la información

En esta sección se presenta la información recolectada a lo largo del período de experimentación, en la cual se sistematizaron los datos en orden cronológico.

### 3.6.1. Hidrofobicidad

La hidrofobicidad es la tendencia a repeler las partículas de agua; a continuación se presentan los datos obtenidos en los diferentes módulos de experimentación. Información colectada desde el mes de noviembre del año 2014 hasta febrero del año 2015.

Tabla IX. **Valores resultantes de la hidrofobicidad relativa para el módulo de membranas A**

| FECHA | Porcentaje (%) |
|---|---|
| 07-11-14 | 51,92 |
| 10-11-14 | 49,44 |
| 13-11-14 | 35,14 |
| 14-11-14 | 19,35 |
| 17-11-14 | 36,25 |
| 19-11-14 | 37,14 |
| 21-11-14 | 49,12 |
| 24-11-14 | 70,64 |
| 26-11-14 | 63,89 |
| 28-11-14 | 62,15 |
| 01-12-14 | 50,34 |
| 03-12-14 | 33,82 |
| 09-12-14 | 54,42 |
| 10-12-14 | 62,27 |
| 17-12-14 | 76,00 |
| 18-12-14 | 65,91 |
| 07-01-15 | 45,88 |
| 12-01-15 | 22,58 |
| 14-01-15 | 57,62 |
| 21-01-15 | 51,35 |
| 26-01-15 | 64,00 |
| 28-01-15 | 73,11 |
| 30-01-15 | 75,59 |
| 02-02-15 | 62,72 |
| 20-02-15 | 59,07 |
| 23-02-15 | 66,74 |
| 25-02-15 | 63,64 |
| 27-02-15 | 54,47 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla X. **Valores resultantes de la hidrofobicidad relativa para el módulo de membranas B**

| FECHA | Porcentaje (%) |
|---|---|
| 07-11-14 | 42,86 |
| 10-11-14 | 47,03 |
| 13-11-14 | 36,23 |
| 14-11-14 | 37,93 |
| 17-11-14 | 29,73 |
| 19-11-14 | 57,22 |
| 21-11-14 | 42,06 |
| 24-11-14 | 67,37 |
| 26-11-14 | 54,51 |
| 28-11-14 | 52,10 |
| 01-12-14 | 55,45 |
| 03-12-14 | 50,83 |
| 09-12-14 | 50,20 |
| 10-12-14 | 62,17 |
| 17-12-14 | 78,40 |
| 18-12-14 | 53,76 |
| 07-01-15 | 56,11 |
| 12-01-15 | 43,24 |
| 14-01-15 | 63,45 |
| 21-01-15 | 50,99 |
| 26-01-15 | 54,79 |
| 28-01-15 | 72,79 |
| 30-01-15 | 75,97 |
| 02-02-15 | 66,38 |
| 20-02-15 | 55,13 |
| 23-02-15 | 66,40 |
| 25-02-15 | 51,81 |
| 27-02-15 | 60,07 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XI. **Valores resultantes de la hidrofobicidad relativa para el módulo de membranas C**

| FECHA | Porcentaje (%) |
|---|---|
| 07-11-14 | 49,45 |
| 10-11-14 | 40,00 |
| 13-11-14 | 29,69 |
| 14-11-14 | 22,22 |
| 17-11-14 | 28,42 |
| 19-11-14 | 41,84 |
| 21-11-14 | 54,87 |
| 24-11-14 | 70,23 |
| 26-11-14 | 56,52 |
| 28-11-14 | 54,32 |
| 01-12-14 | 58,19 |
| 03-12-14 | 40,43 |
| 09-12-14 | 53,94 |
| 10-12-14 | 69,29 |
| 17-12-14 | 76,49 |
| 18-12-14 | 68,45 |
| 07-01-15 | 61,99 |
| 12-01-15 | 45,56 |
| 14-01-15 | 53,52 |
| 21-01-15 | 43,37 |
| 26-01-15 | 64,18 |
| 28-01-15 | 72,80 |
| 30-01-15 | 78,47 |
| 02-02-15 | 68,33 |
| 20-02-15 | 59,59 |
| 23-02-15 | 62,81 |
| 25-02-15 | 51,61 |
| 27-02-15 | 61,15 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XII. **Valores resultantes de la hidrofobicidad relativa para el módulo de membranas Kubota**

| FECHA | Porcentaje (%) |
|---|---|
| 07-11-14 | 49,45 |
| 10-11-14 | 40,00 |
| 13-11-14 | 29,69 |
| 14-11-14 | 22,22 |
| 17-11-14 | 28,42 |
| 19-11-14 | 41,84 |
| 21-11-14 | 54,87 |
| 24-11-14 | 70,23 |
| 26-11-14 | 56,52 |
| 28-11-14 | 54,32 |
| 01-12-14 | 58,19 |
| 03-12-14 | 40,43 |
| 09-12-14 | 53,94 |
| 10-12-14 | 69,29 |
| 17-12-14 | 76,49 |
| 18-12-14 | 68,45 |
| 07-01-15 | 61,99 |
| 12-01-15 | 45,56 |
| 14-01-15 | 53,52 |
| 21-01-15 | 43,37 |
| 26-01-15 | 64,18 |
| 28-01-15 | 72,80 |
| 30-01-15 | 78,47 |
| 02-02-15 | 68,33 |
| 20-02-15 | 59,59 |
| 23-02-15 | 62,81 |
| 25-02-15 | 51,61 |
| 27-02-15 | 61,15 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

### 3.6.2. Carbono orgánico total en SMP

La cantidad de carbono orgánico total en SMP se logró determinar mediante la cantidad total de carbono menos el carbono inorgánico en la muestra.

Tabla XIII. **Valores de TOC para los SMP en el módulo A**

| FECHA | Carbono inorgánico (mg) | Carbono orgánico (mg) | Carbono total (mg) |
|---|---|---|---|
| 03-11-14 | 19,67 | 12,84 | 32,51 |
| 07-11-14 | 19,19 | 34,47 | 53,66 |
| 10-11-14 | 17,56 | 13,8 | 31,36 |
| 13-11-14 | 23,12 | 18,83 | 41,95 |
| 14-11-14 | 25,03 | 18,75 | 43,78 |
| 17-11-14 | 30,46 | 25,38 | 55,84 |
| 19-11-14 | 36,93 | 26,19 | 63,12 |
| 21-11-14 | 29,68 | 53,58 | 83,26 |
| 24-11-14 | 18,58 | 15,45 | 34,03 |
| 26-11-14 | 20,43 | 16,14 | 36,57 |
| 29-11-14 | 19,81 | 18,54 | 38,35 |
| 01-12-14 | 13,01 | 16,47 | 29,48 |
| 03-12-14 | 14,79 | 16,85 | 31,64 |
| 09-12-14 | 27,83 | 18,13 | 45,96 |
| 10-12-14 | 32,52 | 27,73 | 60,25 |
| 17-12-14 | 17,62 | 16,41 | 34,03 |
| 18-12-14 | 21,51 | 18,55 | 40,06 |
| 07-01-15 | 10,93 | 12,87 | 2,80 |
| 08-01-15 | 14,67 | 17,28 | 31,95 |
| 12-01-15 | 27,45 | 24,07 | 51,52 |
| 14-01-15 | 26,41 | 19,15 | 45,56 |
| 21-01-15 | 16,76 | 15,3 | 32,06 |
| 26-01-15 | 30,69 | 22,00 | 52,69 |
| 28-01-15 | 32,89 | 28,12 | 61,01 |
| 30-01-15 | 20,33 | 51,95 | 72,28 |
| 02-02-15 | 13,60 | 25,59 | 39,19 |

Continuación de la tabla XIII.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 20-02-15 | 62,17 | 41,27 | 103,44 |
| 23-02-15 | 56,19 | 33,96 | 90,15 |
| 25-02-15 | 49,19 | 30,2 | 79,39 |
| 27-02-15 | 38,52 | 30,91 | 69,43 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XIV. **Valores de TOC para los SMP en el módulo B**

| FECHA | Carbono inorgánico (mg) | Carbono orgánico (mg) | Carbono total (mg) |
|---|---|---|---|
| 03-11-14 | 19,16 | 15,68 | 34,84 |
| 07-11-14 | 19,42 | 49,04 | 68,46 |
| 10-11-14 | 18,39 | 15,01 | 33,40 |
| 13-11-14 | 23,47 | 19,78 | 43,25 |
| 14-11-14 | 27,86 | 20,82 | 48,68 |
| 17-11-14 | 32,30 | 24,13 | 56,43 |
| 19-11-14 | 35,49 | 23,62 | 59,11 |
| 21-11-14 | 29,52 | 30,61 | 60,13 |
| 24-11-14 | 19,20 | 15,91 | 35,11 |
| 26-11-14 | 20,35 | 15,67 | 36,02 |
| 29-11-14 | 19,64 | 17,90 | 37,54 |
| 01-12-14 | 13,62 | 16,83 | 30,45 |
| 03-12-14 | 15,5 | 17,99 | 33,49 |
| 09-12-14 | 23,70 | 16,44 | 40,14 |
| 10-12-14 | 35,46 | 160,02 | 195,48 |
| 17-12-14 | 13,25 | 20,13 | 33,38 |
| 18-12-14 | 23,13 | 17,99 | 41,12 |
| 07-01-15 | 13,12 | 16,10 | 29,22 |
| 08-01-15 | 16,21 | 17,07 | 33,28 |
| 12-01-15 | 23,45 | 19,36 | 42,81 |
| 14-01-15 | 28,36 | 21,13 | 49,49 |
| 21-01-15 | 17,44 | 15,25 | 32,69 |

Continuación de la tabla XIV.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 26-01-15 | 0,43 | 22,85 | 23,28 |
| 28-01-15 | 30,53 | 24,13 | 54,66 |
| 30-01-15 | 22,79 | 26,92 | 49,71 |
| 02-02-15 | 13,44 | 23,61 | 37,05 |
| 20-02-15 | 63,50 | 42,23 | 105,73 |
| 23-02-15 | 54,44 | 30,96 | 85,40 |
| 25-02-15 | 52,83 | 31,06 | 83,89 |
| 27-02-15 | 42,40 | 32,95 | 75,35 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XV. **Valores de TOC para los SMP en el módulo C**

| FECHA | Carbono inorgánico (mg) | Carbono orgánico (mg) | Carbono total (mg) |
|---|---|---|---|
| 03-11-14 | 21,95 | 14,63 | 36,58 |
| 07-11-14 | 20,48 | 39,05 | 59,53 |
| 10-11-14 | 18,56 | 14,24 | 32,8 |
| 13-11-14 | 24,88 | 20,08 | 44,96 |
| 14-11-14 | 26,89 | 19,11 | 46 |
| 17-11-14 | 30,24 | 22,74 | 52,98 |
| 19-11-14 | 34,69 | 22,99 | 57,68 |
| 21-11-14 | 29,86 | 26,11 | 55,97 |
| 24-11-14 | 19,36 | 17,3 | 36,66 |
| 26-11-14 | 19,96 | 14,95 | 34,91 |
| 29-11-14 | 19,62 | 17,46 | 37,08 |
| 01-12-14 | 14,5 | 17,28 | 31,78 |
| 03-12-14 | 13,75 | 15,63 | 29,38 |
| 09-12-14 | 30,53 | 20,42 | 50,95 |
| 10-12-14 | 31,17 | 30,59 | 61,76 |
| 17-12-14 | 19,42 | 16,96 | 36,38 |
| 18-12-14 | 22,69 | 17,39 | 40,08 |
| 07-01-15 | 11,4 | 13,77 | 25,17 |

Continuación de la tabla XVI.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 08-01-15 | 14,67 | 16,73 | 31,4 |
| 12-01-15 | 25,81 | 20,62 | 46,43 |
| 14-01-15 | 30,12 | 22,43 | 52,55 |
| 21-01-15 | 17,99 | 16,97 | 34,96 |
| 26-01-15 | 29,96 | 22,64 | 52,60 |
| 28-01-15 | 31,01 | 24,43 | 55,44 |
| 30-01-15 | 24,58 | 24,66 | 49,24 |
| 02-02-15 | 13,13 | 27,8 | 40,93 |
| 20-02-15 | 63,23 | 41,54 | 104,77 |
| 23-02-15 | 51,60 | 28,6 | 80,20 |
| 25-02-15 | 54,72 | 33,19 | 87,91 |
| 27-02-15 | 44,66 | 33,33 | 77,99 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XVI. **Valores de TOC para los SMP en el módulo Kubota**

| FECHA | Carbono inorgánico (mg) | Carbono orgánico (mg) | Carbono total (mg) |
|---|---|---|---|
| 03-11-14 | 24,29 | 15,08 | 39,37 |
| 07-11-14 | 20,54 | 23,56 | 44,1 |
| 10-11-14 | 18,61 | 14,99 | 33,6 |
| 13-11-14 | 24,49 | 20,07 | 44,56 |
| 14-11-14 | 28,56 | 20,46 | 49,02 |
| 17-11-14 | 29,33 | 22,6 | 51,93 |
| 19-11-14 | 36,34 | 24,68 | 61,02 |
| 21-11-14 | 31,27 | 23,08 | 54,35 |
| 24-11-14 | 19,45 | 14,42 | 33,87 |
| 26-11-14 | 19,67 | 14,7 | 34,37 |
| 29-11-14 | 19,14 | 16,85 | 35,99 |
| 01-12-14 | 16,67 | 15,85 | 32,52 |
| 03-12-14 | 13,8 | 15,28 | 29,08 |
| 09-12-14 | 26,95 | 18,76 | 45,71 |

Continuación de tabla XVI.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 10-12-14 | 31,07 | 23,79 | 54,86 |
| 17-12-14 | 2,17 | 15,85 | 18,02 |
| 18-12-14 | 23,04 | 16,99 | 40,03 |
| 07-01-15 | 12,12 | 15,44 | 27,56 |
| 08-01-15 | 14,88 | 17,00 | 31,88 |
| 12-01-15 | 25,99 | 21,00 | 46,99 |
| 14-01-15 | 27,53 | 21,04 | 48,57 |
| 21-01-15 | 17,89 | 15,53 | 33,42 |
| 26-01-15 | 42,56 | 31,88 | 74,44 |
| 28-01-15 | 31,66 | 24,16 | 55,82 |
| 30-01-15 | 23,57 | 24,52 | 48,09 |
| 02-02-15 | 12,72 | 26,23 | 38,95 |
| 20-02-15 | 63,40 | 39,51 | 102,91 |
| 23-02-15 | 52,11 | 29,2 | 81,31 |
| 25-02-15 | 54,05 | 31,09 | 85,14 |
| 27-02-15 | 45,23 | 36,71 | 81,94 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

### 3.6.3. 3.6.3. Carbono orgánico en EPS

Mediante un analizador TOC se logró determinar la cantidad de carbono orgánico e inorgánico del EPS de las muestras.

Tabla XVII. **Valores de TOC para los EPS en el módulo A**

| FECHA | Carbono inorgánico (mg) | Carbono orgánico (mg) | Carbono total (mg) |
|---|---|---|---|
| 03-11-14 | 2,08 | 98,89 | 82,21 |
| 07-11-14 | 1,49 | 116,22 | 135,09 |
| 10-11-14 | 2,5 | 89,09 | 87,2 |

Continuación de la tabla XVII.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 13-11-14 | 1 | 37,28 | 38 |
| 14-11-14 | 3,89 | 34,88 | 34,84 |
| 17-11-14 | 10,16 | 68,34 | 77,31 |
| 19-11-14 | 7,44 | 40,24 | 47,48 |
| 21-11-14 | 1,18 | 47,96 | 44,59 |
| 24-11-14 | 12,69 | 61,08 | 71,98 |
| 26-11-14 | 2,4 | 47,04 | 47,45 |
| 29-11-14 | 4,41 | 68,01 | 73,09 |
| 01-12-14 | 5,19 | 70,00 | 71,01 |
| 03-12-14 | -0,66 | 31,23 | 21,56 |
| 09-12-14 | 0,67 | 53,15 | 46,71 |
| 10-12-14 | 2,58 | 59,49 | 59,51 |
| 17-12-14 | 0,46 | 70,23 | 66,87 |
| 18-12-14 | -0,3 | 31,24 | 53,53 |
| 07-01-15 | 0,74 | 50,71 | 45,07 |
| 12-01-15 | 0,68 | 23,01 | 22,57 |
| 14-01-15 | 1,15 | 49,97 | 51,21 |
| 21-01-15 | 0,87 | 44,75 | 44,98 |
| 26-01-15 | 2,25 | 42,3 | 87,67 |
| 28-01-15 | 4,88 | 91 | 75,30 |
| 30-01-15 | 3,13 | 99,12 | 99,92 |
| 02-02-15 | 3,38 | 74,08 | 71,16 |
| 20-02-15 | 7,00 | 54,26 | 58,45 |
| 23-02-15 | 14,88 | 55,43 | 96,21 |
| 25-02-15 | 8,93 | 76,4 | 83,20 |
| 27-02-15 | 16,05 | 59,56 | 104,78 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XVIII. **Valores de TOC para los EPS en el módulo B**

| FECHA | Carbono inorgánico (mg) | Carbono orgánico (mg) | Carbono total (mg) |
|---|---|---|---|
| 03-11-14 | 3,29 | 98,89 | 102,18 |
| 07-11-14 | 0,91 | 116,22 | 117,13 |
| 10-11-14 | 2,03 | 89,09 | 91,12 |
| 13-11-14 | 1,2 | 37,28 | 38,48 |
| 14-11-14 | 3,82 | 34,88 | 38,7 |
| 17-11-14 | 10,36 | 68,34 | 78,7 |
| 19-11-14 | 6,67 | 40,24 | 46,91 |
| 21-11-14 | 0,88 | 47,96 | 48,84 |
| 24-11-14 | 9,12 | 61,08 | 70,2 |
| 26-11-14 | 1,08 | 47,04 | 48,12 |
| 29-11-14 | 2,36 | 68,01 | 70,37 |
| 01-12-14 | 0 | 70 | 74 |
| 03-12-14 | 0,01 | 31,23 | 31,24 |
| 09-12-14 | 0,67 | 53,15 | 53,82 |
| 10-12-14 | 0,98 | 59,49 | 60,47 |
| 17-12-14 | 0,15 | 70,23 | 70,38 |
| 18-12-14 | 0 | 31,24 | 31,24 |
| 07-01-15 | 0.44 | 50,71 | 51,15 |
| 12-01-15 | 0.48 | 23,01 | 23,49 |
| 14-01-15 | 0.97 | 49,97 | 50,94 |
| 21-01-15 | 0.47 | 44,75 | 45,22 |
| 26-01-15 | -0,55 | 42,3 | 41,75 |
| 28-01-15 | 3,88 | 91 | 94,88 |
| 30-01-15 | 2,46 | 99,12 | 101,58 |
| 02-02-15 | 1,29 | 74.08 | 75,37 |
| 20-02-15 | 7,78 | 54,26 | 62,04 |
| 23-02-15 | 12,89 | 55,43 | 68,32 |
| 25-02-15 | 8,97 | 76,4 | 85,37 |
| 27-02-15 | 13,50 | 59,56 | 73,06 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR)..

Tabla XIX. **Valores de TOC para los EPS en el módulo C**

| FECHA | Carbono inorgánico (mg) | Carbono orgánico (mg) | Carbono total (mg) |
|---|---|---|---|
| 03-11-14 | 2,04 | 108,84 | 110,88 |
| 07-11-14 | 0,73 | 112,8 | 113,53 |
| 10-11-14 | 0,81 | 81,41 | 82,22 |
| 13-11-14 | 1,23 | 36,31 | 37,54 |
| 14-11-14 | 3,50 | 34,66 | 38,16 |
| 17-11-14 | 10,15 | 70,04 | 80,19 |
| 19-11-14 | 7,25 | 45,86 | 53,11 |
| 21-11-14 | 0,96 | 46,4 | 47,36 |
| 24-11-14 | 8,61 | 66,62 | 75,23 |
| 26-11-14 | 1,87 | 62,57 | 64,44 |
| 29-11-14 | 3,09 | 63,44 | 66,53 |
| 01-12-14 | 3,86 | 73,24 | 77,1 |
| 03-12-14 | 0,45 | 37,75 | 38,2 |
| 09-12-14 | 0,80 | 52,96 | 53,76 |
| 10-12-14 | 1,13 | 52,22 | 53,35 |
| 17-12-14 | 0,41 | 77,11 | 77,52 |
| 18-12-14 | -0,74 | 42,75 | 42,01 |
| 07-01-15 | 0,38 | 47,68 | 48,06 |
| 12-01-15 | 0,55 | 25,72 | 26,27 |
| 14-01-15 | 1,07 | 51,76 | 52,83 |
| 21-01-15 | 0,46 | 43,93 | 44,39 |
| 26-01-15 | 2,63 | 92,51 | 95,14 |
| 28-01-15 | 2,88 | 90,22 | 93,10 |
| 30-01-15 | 4,19 | 94,26 | 98,45 |
| 02-02-15 | 1,31 | 78,9 | 80,21 |
| 20-02-15 | 5,83 | 53,54 | 59,37 |
| 23-02-15 | 11,47 | 58,21 | 69,68 |
| 25-02-15 | 8,91 | 83,03 | 91,94 |
| 27-02-15 | 8,21 | 72,58 | 80,79 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XX. **Valores de TOC para los EPS en el módulo Kubota**

| FECHA | Carbono inorgánico (mg) | Carbono orgánico (mg) | Carbono total (mg) |
|---|---|---|---|
| 03-11-14 | 3,15 | 95,38 | 98,53 |
| 07-11-14 | 0,54 | 103,47 | 104,01 |
| 10-11-14 | 1,03 | 63,03 | 64,06 |
| 13-11-14 | 1,74 | 50,16 | 51,9 |
| 14-11-14 | 2,67 | 37,51 | 40,18 |
| 17-11-14 | 5,72 | 62,06 | 67,78 |
| 19-11-14 | 6,44 | 44,05 | 50,49 |
| 21-11-14 | 0,71 | 49,72 | 50,43 |
| 24-11-14 | 8,13 | 62,61 | 70,74 |
| 26-11-14 | 1,36 | 57,82 | 59,18 |
| 29-11-14 | 2,56 | 70,26 | 72,82 |
| 01-12-14 | 4,38 | 77,2 | 81,58 |
| 03-12-14 | 0,22 | 32,99 | 33,21 |
| 09-12-14 | 0,27 | 44,84 | 45,11 |
| 10-12-14 | 0,62 | 55,14 | 55,76 |
| 17-12-14 | -0,09 | 71,94 | 71,85 |
| 18-12-14 | -0,74 | 34,58 | 33,84 |
| 07-01-15 | 0,43 | 55,59 | 56,02 |
| 12-01-15 | 0,33 | 21,04 | 21,37 |
| 14-01-15 | 1,19 | 56,02 | 57,21 |
| 21-01-15 | 0,49 | 44,72 | 45,21 |
| 26-01-15 | 3,44 | 108,53 | 111,97 |
| 28-01-15 | 3,10 | 86,46 | 89,56 |
| 30-01-15 | 3,04 | 87,44 | 90,48 |
| 02-02-15 | 1,50 | 79,81 | 81,31 |
| 20-02-15 | 6,76 | 46,22 | 52,98 |
| 23-02-15 | 13,52 | 52,34 | 65,86 |
| 25-02-15 | 11,02 | 72,92 | 83,94 |
| 27-02-15 | 8,83 | 80,52 | 89,35 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

### 3.6.4. Temperatura

Los valores de la temperatura se presentan a continuación.

Tabla XXI. **Valores de la temperatura en el módulo de membranas A**

| FECHA | Temperatura (°C) |
|---|---|
| 07-nov | 18,85 |
| 10-nov | 17,25 |
| 13-nov | 17 |
| 14-nov | 19,55 |
| 17-nov | 17,8 |
| 19-nov | 16,65 |
| 21-nov | 20,35 |
| 24-nov | 22,1 |
| 26-nov | 19,95 |
| 28-nov | 18,05 |
| 01-dic | 18,4 |
| 03-dic | 16,8 |
| 09-dic | 14,67 |
| 10-dic | 12,1 |
| 17-dic | 14,45 |
| 18-dic | 17 |
| 07-ene | 19,5 |
| 12-ene | 15,5 |
| 14-ene | 16,8 |
| 21-ene | 12,05 |
| 26-ene | 13,25 |
| 28-ene | 14,55 |
| 30-ene | 15,7 |
| 02-feb | 15,62 |
| 20-feb | 17,05 |
| 23-feb | 16,85 |

Continuación de la tabla XXI.

| | |
|---|---|
| 25-feb | 17,25 |
| 27-feb | 21,45 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXII. **Valores de la temperatura en el módulo de membranas B**

| FECHA | Temperatura (°C) |
|---|---|
| 07-nov | 19,15 |
| 10-nov | 17,6 |
| 13-nov | 17,3 |
| 14-nov | 19,95 |
| 17-nov | 18,05 |
| 19-nov | 17,05 |
| 21-nov | 20,1 |
| 24-nov | 22,25 |
| 26-nov | 20,1 |
| 28-nov | 18,3 |
| 01-dic | 18,45 |
| 03-dic | 17,2 |
| 09-dic | 14,43 |
| 10-dic | 11,9 |
| 17-dic | 13,85 |
| 18-dic | 16,5 |
| 07-ene | 20,5 |
| 12-ene | 15 |
| 14-ene | 16,15 |
| 21-ene | 11,7 |
| 26-ene | 13,35 |
| 28-ene | 14,45 |
| 30-ene | 15,7 |
| 02-feb | 14,7 |
| 20-feb | 16,45 |

Continuación de la tabla XXII.

| | |
|---|---|
| 23-feb | 16,65 |
| 25-feb | 16,95 |
| 27-feb | 19,15 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXIII. **Valores de la temperatura en el módulo de membranas C**

| FECHA | Temperatura (°C) |
|---|---|
| 07-nov | 19,05 |
| 10-nov | 17,50 |
| 13-nov | 17,20 |
| 14-nov | 19,80 |
| 17-nov | 18,00 |
| 19-nov | 17,15 |
| 21-nov | 20,20 |
| 24-nov | 22,15 |
| 26-nov | 19,95 |
| 28-nov | 18,20 |
| 01-dic | 18,30 |
| 03-dic | 17,25 |
| 09-dic | 14,50 |
| 10-dic | 11,70 |
| 17-dic | 14,15 |
| 18-dic | 16,75 |
| 07-ene | 19,20 |
| 12-ene | 15,10 |
| 14-ene | 16,25 |
| 21-ene | 11,55 |
| 26-ene | 13,90 |
| 28-ene | 13,65 |
| 30-ene | 16,05 |
| 02-feb | 14,50 |

Continuación de la tabla XXIII.

| | |
|---|---|
| 20-feb | 16,4 |
| 23-feb | 16,35 |
| 25-feb | 16,65 |
| 27-feb | 18,8 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXIV. **Valores de la temperatura en el módulo de membranas Kubota**

| FECHA | Temperatura (°C) |
|---|---|
| 07-nov | 17,19 |
| 10-nov | 15,71 |
| 13-nov | 17,59 |
| 14-nov | 18,06 |
| 17-nov | 15,33 |
| 19-nov | 17,05 |
| 21-nov | 17,96 |
| 24-nov | 19,59 |
| 26-nov | 18,47 |
| 28-nov | 15,83 |
| 01-dic | 16,35 |
| 03-dic | 15,56 |
| 09-dic | 13,66 |
| 10-dic | 14,16 |
| 17-dic | 15,62 |
| 18-dic | 16,03 |
| 07-ene | 13,29 |
| 12-ene | 15,20 |
| 14-ene | 15.33 |
| 21-ene | 9,51 |
| 26-ene | 13,92 |

Continuación de la tabla XXIV.

| | |
|---|---|
| 28-ene | 14,80 |
| 30-ene | 15,23 |
| 02-feb | 11,90 |
| 20-feb | 14,66 |
| 23-feb | 14,31 |
| 25-feb | 14,23 |
| 27-feb | 17,06 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

### 3.6.5. Viscosidad de fango

Se define la viscosidad como la oposición de un flujo a deformaciones tangenciales. Con un viscosímetro rotacional y un adaptador de baja viscosidad de determinó la viscosidad de las muestras de fango, debido a que los valores obtenidos son bajos la dimensional utilizada fueron micropascales (mPas).

Tabla XXV. **Valores de viscosidad del fango en el módulo de membranas A**

| FECHA | Viscosidad (mPa s) |
|---|---|
| 07-nov | 3,27 |
| 10-nov | 2,88 |
| 13-nov | 1,79 |
| 14-nov | 1,75 |
| 17-nov | 2,22 |
| 19-nov | 2,13 |
| 21-nov | 1,67 |
| 24-nov | 1,91 |
| 26-nov | 1,98 |

Continuación de la tabla XXV.

| | |
|---|---|
| 28-nov | 2,15 |
| 01-dic | 2,35 |
| 03-dic | 1,99 |
| 09-dic | 2,2 |
| 10-dic | 2,12 |
| 17-dic | 2,54 |
| 18-dic | 2,66 |
| 07-ene | 2,17 |
| 12-ene | 1,72 |
| 14-ene | 1,91 |
| 21-ene | 2,16 |
| 26-ene | 2,92 |
| 28-ene | 2,7 |
| 30-ene | 2,86 |
| 02-feb | 2,82 |
| 20-feb | 2,81 |
| 23-feb | 2,9 |
| 25-feb | 2,88 |
| 27-feb | 2,8 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXVI. **Valores de viscosidad del fango en el módulo de membranas B**

| FECHA | Viscosidad (mPa s) |
|---|---|
| 07-nov | 3,37 |
| 10-nov | 3 |
| 13-nov | 1,79 |
| 14-nov | 1,72 |
| 17-nov | 2,22 |
| 19-nov | 2,08 |

Continuación de la tabla XXVI.

| | |
|---|---|
| 21-nov | 1,7 |
| 24-nov | 1,87 |
| 26-nov | 2 |
| 28-nov | 2,23 |
| 01-dic | 2,39 |
| 03-dic | 1,98 |
| 09-dic | 2,29 |
| 10-dic | 2,09 |
| 17-dic | 2,55 |
| 18-dic | 2,65 |
| 07-ene | 2,13 |
| 12-ene | 1,7 |
| 14-ene | 1,93 |
| 21-ene | 2,18 |
| 26-ene | 3,01 |
| 28-ene | 2,92 |
| 30-ene | 2,86 |
| 02-feb | 2,87 |
| 20-feb | 2,69 |
| 23-feb | 2,88 |
| 25-feb | 2,95 |
| 27-feb | 2,67 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXVII. **Valores de viscosidad del fango en el módulo de membranas C**

| FECHA | Viscosidad (mPa s) |
|---|---|
| 07-nov | 3,61 |
| 10-nov | 3,07 |
| 13-nov | 1,79 |

Continuación de la tabla XXVII.

| | |
|---|---|
| 14-nov | 1,78 |
| 17-nov | 2,21 |
| 19-nov | 2,25 |
| 21-nov | 1,76 |
| 24-nov | 1,94 |
| 26-nov | 2,12 |
| 28-nov | 2,14 |
| 01-dic | 2,43 |
| 03-dic | 1,95 |
| 09-dic | 2,36 |
| 10-dic | 2,14 |
| 17-dic | 2,68 |
| 18-dic | 2.62 |
| 07-ene | 2,20 |
| 12-ene | 1,74 |
| 14-ene | 1,99 |
| 21-ene | 2,19 |
| 26-ene | 2,91 |
| 28-ene | 2,88 |
| 30-ene | 2,93 |
| 02-feb | 2,96 |
| 20-feb | 2,82 |
| 23-feb | 2,81 |
| 25-feb | 3,06 |
| 27-feb | 2,91 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXVIII. **Valores de viscosidad del fango en el módulo de membranas Kubota**

| FECHA | Viscosidad (mPa s) |
|---|---|
| 07-nov | 2,79 |
| 10-nov | 2,1 |
| 13-nov | 1,81 |
| 14-nov | 1,68 |
| 17-nov | 2,24 |
| 19-nov | 2,22 |
| 21-nov | 1,81 |
| 24-nov | 2,02 |
| 26-nov | 2,05 |
| 28-nov | 2,17 |
| 01-dic | 2,41 |
| 03-dic | 2,02 |
| 09-dic | 2,15 |
| 10-dic | 2,13 |
| 17-dic | 2,64 |
| 18-dic | 2,71 |
| 07-ene | 2,21 |
| 12-ene | 1,72 |
| 14-ene | 1,91 |
| 21-ene | 2,12 |
| 26-ene | 2,35 |
| 28-ene | 2,8 |
| 30-ene | 2,81 |
| 02-feb | 2,79 |
| 20-feb | 2,82 |
| 23-feb | 2,95 |
| 25-feb | 2,89 |
| 27-feb | 2,72 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

### 3.6.6. Viscosidad del efluente

De la misma manera que se logró obtener los valores de la viscosidad del fango, se obtuvieron los de la viscosidad del efluente; sin embargo éstos presentaron valores menores a los anteriores.

Tabla XXIX. **Valores de viscosidad del efluente procedente del módulo de membranas A**

| FECHA | Viscosidad (mPa s) |
|---|---|
| 07-nov | 1,45 |
| 10-nov | 1,43 |
| 13-nov | 1,41 |
| 14-nov | 1,41 |
| 17-nov | 1,58 |
| 19-nov | 1,47 |
| 21-nov | 1,35 |
| 24-nov | 1,41 |
| 26-nov | 1,41 |
| 28-nov | 1,45 |
| 01-dic | 1,47 |
| 03-dic | 1,48 |
| 09-dic | 1,65 |
| 10-dic | 1,51 |
| 17-dic | 1,43 |
| 18-dic | 1,51 |
| 07-ene | 1,59 |
| 12-ene | 1,53 |
| 14-ene | 1,51 |
| 21-ene | 1,65 |
| 26-ene | 1,59 |
| 28-ene | 1,58 |
| 30-ene | 1,43 |
| 02-feb | 1,5 |
| 20-feb | 1,57 |

Continuación de la tabla XXIX.

| | |
|---|---|
| 23-feb | 1,55 |
| 25-feb | 1,5 |
| 27-feb | 1,46 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXX. **Valores de viscosidad del efluente procedente del módulo de membranas B**

| FECHA | Viscosidad (mPa s) |
|---|---|
| 07-nov | 1,45 |
| 10-nov | 1,41 |
| 13-nov | 1,43 |
| 14-nov | 1,42 |
| 17-nov | 1,55 |
| 19-nov | 1,43 |
| 21-nov | 1,37 |
| 24-nov | 1,44 |
| 26-nov | 1,44 |
| 28-nov | 1,47 |
| 01-dic | 1,47 |
| 03-dic | 1,47 |
| 09-dic | 1,67 |
| 10-dic | 1,51 |
| 17-dic | 1,44 |
| 18-dic | 1,54 |
| 07-ene | 1,61 |
| 12-ene | 1,54 |
| 14-ene | 1,53 |
| 21-ene | 1,66 |
| 26-ene | 1,58 |
| 28-ene | 1,57 |

Continuación de la tabla XXX.

| | |
|---|---|
| 30-ene | 1,45 |
| 02-feb | 1,51 |
| 20-feb | 1,55 |
| 23-feb | 1,54 |
| 25-feb | 1,51 |
| 27-feb | 1,46 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXXI. **Valores de viscosidad del efluente procedente del módulo de membranas C**

| FECHA | Viscosidad (mPa s) |
|---|---|
| 07-nov | 1,45 |
| 10-nov | 1,39 |
| 13-nov | 1,45 |
| 14-nov | 1,39 |
| 17-nov | 1,53 |
| 19-nov | 1,46 |
| 21-nov | 1,36 |
| 24-nov | 1,41 |
| 26-nov | 1,41 |
| 28-nov | 1,49 |
| 01-dic | 1,49 |
| 03-dic | 1,48 |
| 09-dic | 1,67 |
| 10-dic | 1,54 |
| 17-dic | 1,45 |
| 18-dic | 1,53 |
| 07-ene | 1,66 |
| 12-ene | 1,55 |
| 14-ene | 1,51 |

Continuación de la tabla XXXI.

| | |
|---|---|
| 21-ene | 1,63 |
| 26-ene | 1,59 |
| 28-ene | 1,57 |
| 30-ene | 1,44 |
| 02-feb | 1,53 |
| 20-feb | 1,55 |
| 23-feb | 1,59 |
| 25-feb | 1,5 |
| 27-feb | 1,47 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXXII. **Valores de viscosidad del efluente procedente del módulo de membranas Kubota**

| FECHA | Viscosidad (mPa s) |
|---|---|
| 07-nov | 1,47 |
| 10-nov | 1,43 |
| 13-nov | 1,4 |
| 14-nov | 1,36 |
| 17-nov | 1,54 |
| 19-nov | 1,44 |
| 21-nov | 1,34 |
| 24-nov | 1,45 |
| 26-nov | 1,42 |
| 28-nov | 1,49 |
| 01-dic | 1,49 |
| 03-dic | 1,49 |
| 09-dic | 1,65 |
| 10-dic | 1,53 |
| 17-dic | 1,51 |
| 18-dic | 1,55 |
| 07-ene | 1,6 |

Continuación de la tabla XXXII.

| | |
|---|---|
| 12-ene | 1,56 |
| 14-ene | 1,52 |
| 21-ene | 1,7 |
| 26-ene | 1,6 |
| 28-ene | 1,67 |
| 30-ene | 1,49 |
| 02-feb | 1,63 |
| 20-feb | 1,57 |
| 23-feb | 1,64 |
| 25-feb | 1,53 |
| 27-feb | 1,5 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR)..

### 3.6.7. Sólidos en suspensión

La determinación de sólidos en suspensión se realizó con un método de secado y evaporación, la cual varía dependiendo de la concentración de carga orgánica que la muestra presenta.

Tabla XXXIII. **Valores resultantes de sólidos en suspensión totales en el módulo de membranas A**

| FECHA | SST (g) |
|---|---|
| 07-nov | 3,94 |
| 10-nov | 2,64 |
| 13-nov | 1,47 |
| 14-nov | 1,5 |
| 17-nov | 2,12 |
| 19-nov | 2,18 |

Continuación de la tabla XXXIII.

| | |
|---|---|
| 21-nov | 1,66 |
| 24-nov | 1,64 |
| 26-nov | 1,78 |
| 28-nov | 2,78 |
| 01-dic | 2,58 |
| 03-dic | 1,6 |
| 09-dic | 1,68 |
| 10-dic | 1,92 |
| 17-dic | 2,78 |
| 18-dic | 2,88 |
| 07-ene | 1,62 |
| 12-ene | 0,9 |
| 14-ene | 1,48 |
| 21-ene | 1,32 |
| 26-ene | 3 |
| 28-ene | 2,96 |
| 30-ene | 2,78 |
| 02-feb | 2,65 |
| 20-feb | 0,84 |
| 23-feb | 0,94 |
| 25-feb | 0,64 |
| 27-feb | 1,16 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXXIV. **Valores resultantes de sólidos en suspensión totales en el módulo de membranas B**

| FECHA | SST (g) |
|---|---|
| 07-nov | 4,12 |
| 10-nov | 2,76 |
| 13-nov | 1,45 |

Continuación de la tabla XXXIV.

| | |
|---|---|
| 14-nov | 1,44 |
| 17-nov | 2,36 |
| 19-nov | 2,12 |
| 21-nov | 1,88 |
| 24-nov | 1,84 |
| 26-nov | 2 |
| 28-nov | 2,4 |
| 01-dic | 2,38 |
| 03-dic | 1,44 |
| 09-dic | 1,88 |
| 10-dic | 1,86 |
| 17-dic | 2,68 |
| 18-dic | 2,88 |
| 07-ene | 1,6 |
| 12-ene | 0,9 |
| 14-ene | 1,46 |
| 21-ene | 1,34 |
| 26-ene | 3,14 |
| 28-ene | 3,02 |
| 30-ene | 2,8 |
| 02-feb | 1,87 |
| 20-feb | 2,7 |
| 23-feb | 2,76 |
| 25-feb | 3,9 |
| 27-feb | 2,66 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXXV. **Valores resultantes de sólidos en suspensión totales en el módulo de membranas C**

| FECHA | SST (g) |
|---|---|
| 07-nov | 4,5 |
| 10-nov | 3,02 |
| 13-nov | 1,38 |
| 14-nov | 1,58 |
| 17-nov | 2,38 |
| 19-nov | 2,46 |
| 21-nov | 1,9 |
| 24-nov | 1,8 |
| 26-nov | 2,16 |
| 28-nov | 2,6 |
| 01-dic | 2,3 |
| 03-dic | 1,62 |
| 09-dic | 1,76 |
| 10-dic | 1,7 |
| 17-dic | 2,8 |
| 18-dic | 2,74 |
| 07-ene | 1,68 |
| 12-ene | 1,4 |
| 14-ene | 1,62 |
| 21-ene | 1,48 |
| 26-ene | 3,22 |
| 28-ene | 3,2 |
| 30-ene | 3,22 |
| 02-feb | 2,5 |
| 20-feb | 2,8 |
| 23-feb | 2,76 |
| 25-feb | 3,1 |
| 27-feb | 2,68 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Tabla XXXVI. **Valores resultantes de sólidos en suspensión totales en el módulo de membranas Kubota**

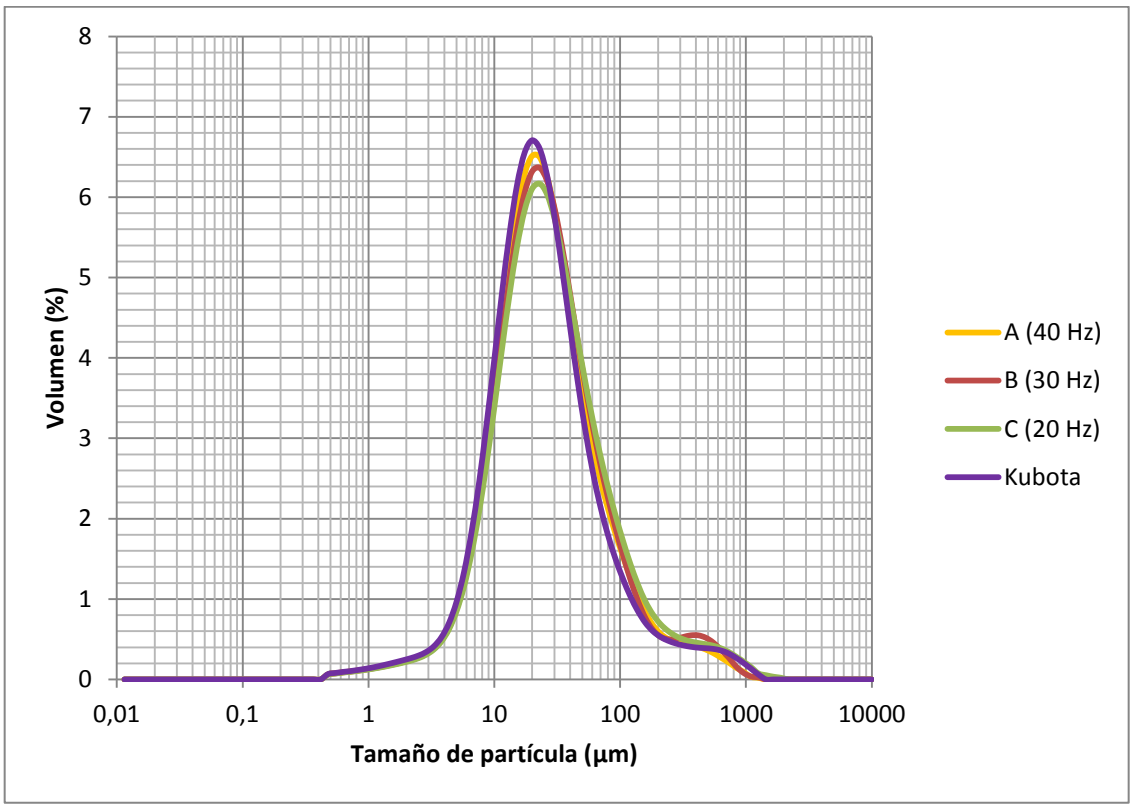
| FECHA | SST (g) |
|---|---|
| 07-nov | 3,24 |
| 10-nov | 2,18 |
| 13-nov | 3,04 |
| 14-nov | 3,08 |
| 17-nov | 2,32 |
| 19-nov | 2,32 |
| 21-nov | 1,86 |
| 24-nov | 1,08 |
| 26-nov | 2,26 |
| 28-nov | 2,18 |
| 01-dic | 2,46 |
| 03-dic | 1,82 |
| 09-dic | 1,8 |
| 10-dic | 1,9 |
| 17-dic | 2,78 |
| 18-dic | 2,8 |
| 07-ene | 1,86 |
| 12-ene | 1,32 |
| 14-ene | 1,58 |
| 21-ene | 1,36 |
| 26-ene | 3,14 |
| 28-ene | 2,96 |
| 30-ene | 2,48 |
| 02-feb | 2,26 |
| 20-feb | 3,08 |
| 23-feb | 2,94 |
| 25-feb | 2,96 |
| 27-feb | 2,66 |

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

### 3.6.8. Tamaño de partículas

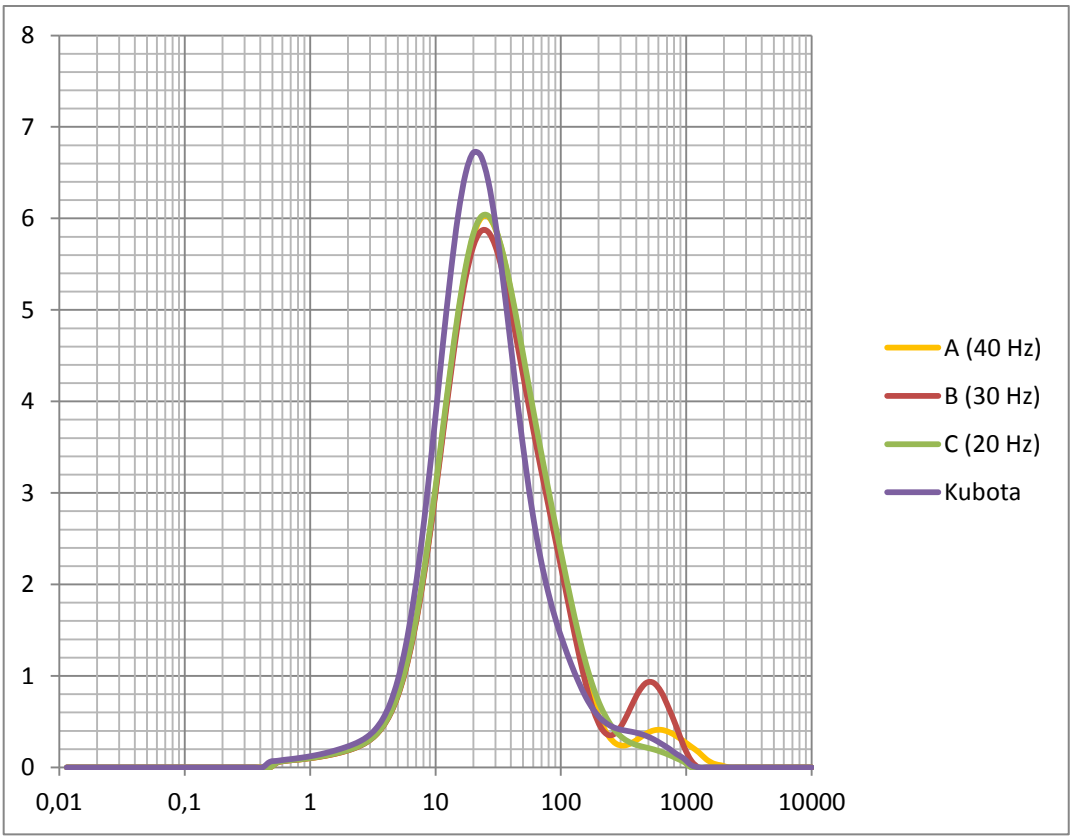
El tamaño de partículas en una muestra se logró determinar con instrumentación especializada, en este caso se utilizó un *Master Sizer*, el cual determinó el tamaño de las mismas en función del diámetro promedio que pudiesen presentar. La tendencia que demuestran las gráficas refiere a una campana de Gauss, concentrándose la mayoría de partículas en el rango de 10 a 100 µm en el tamaño de partícula.

Figura 8. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día dieciocho de noviembre del 2014**



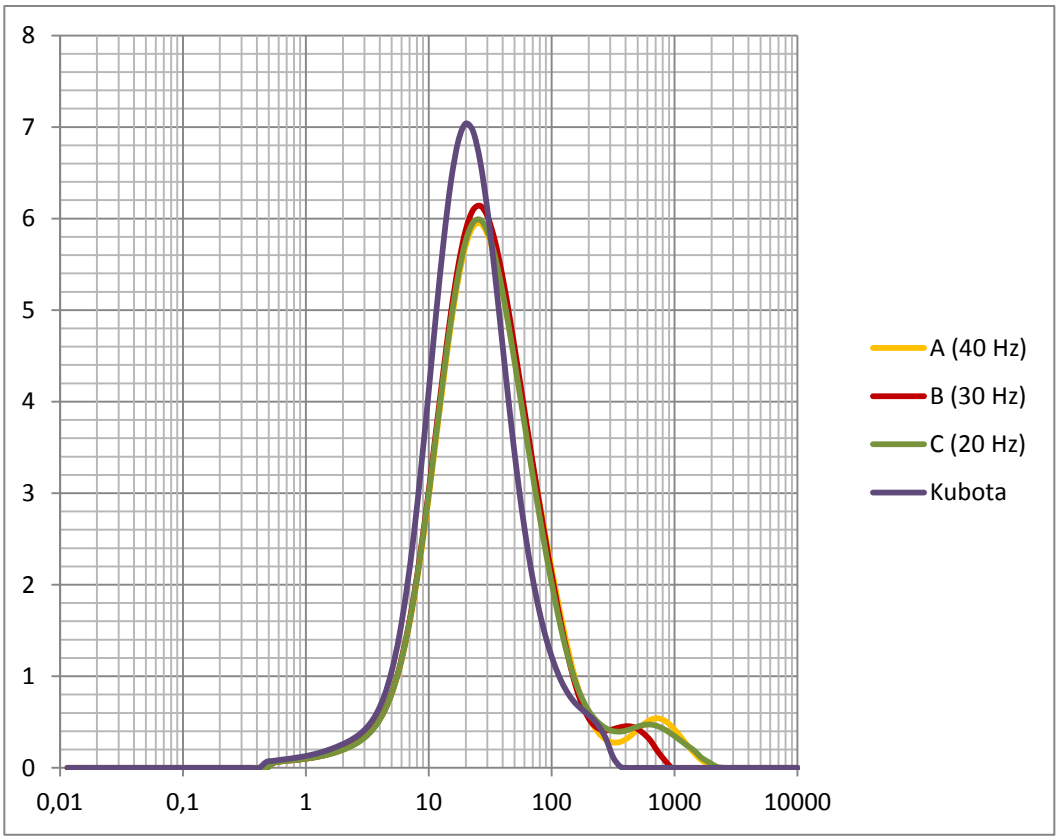

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 9. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día veinticinco de noviembre del 2014**



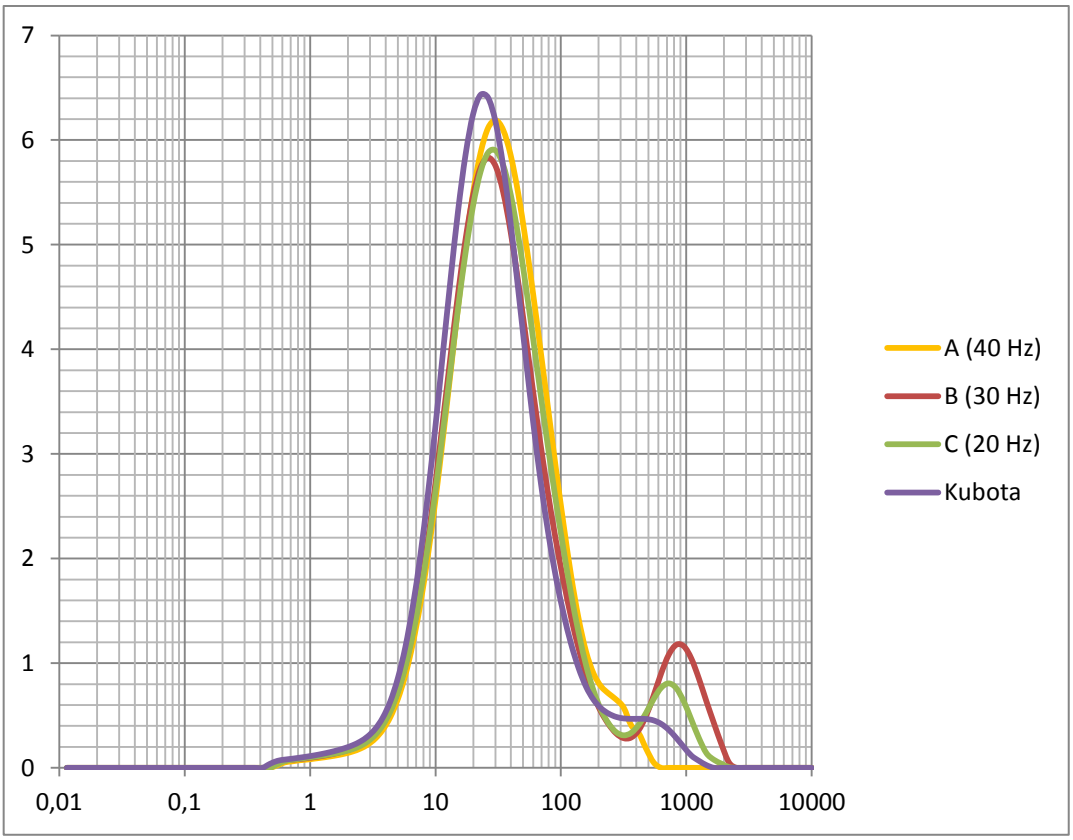

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 10. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día dos de diciembre del 2014**



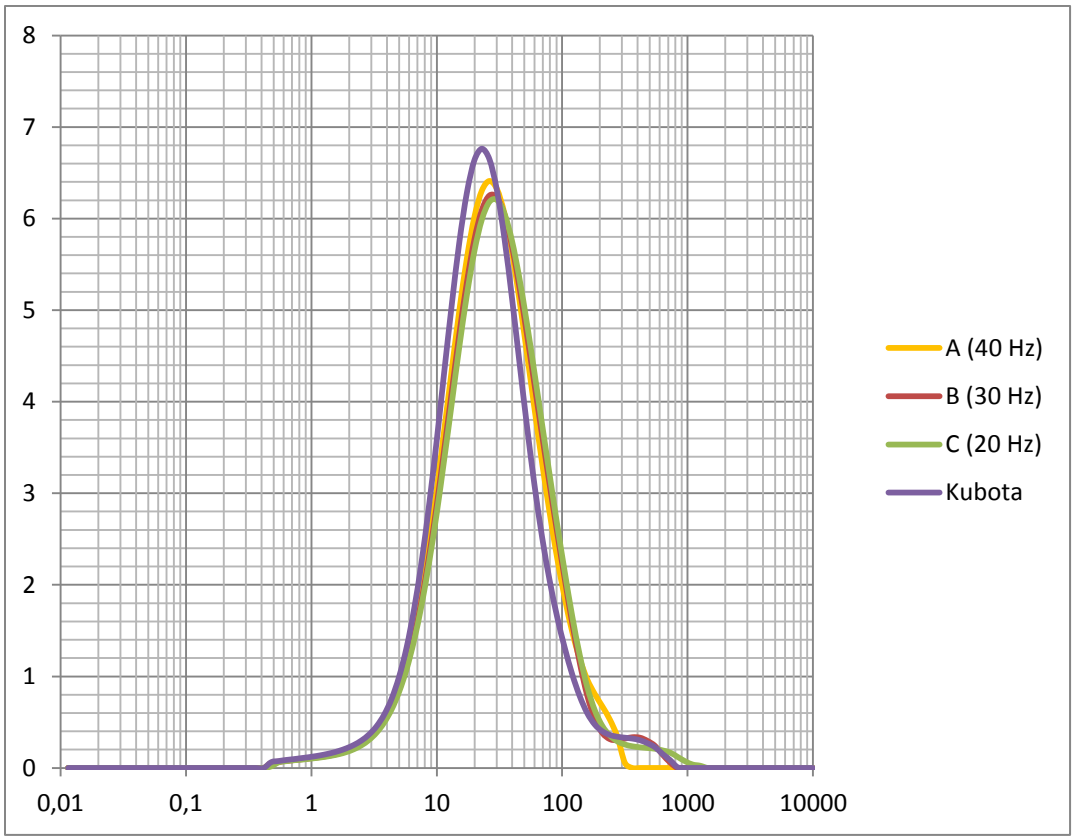

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 11. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día nueve de diciembre del 2014**



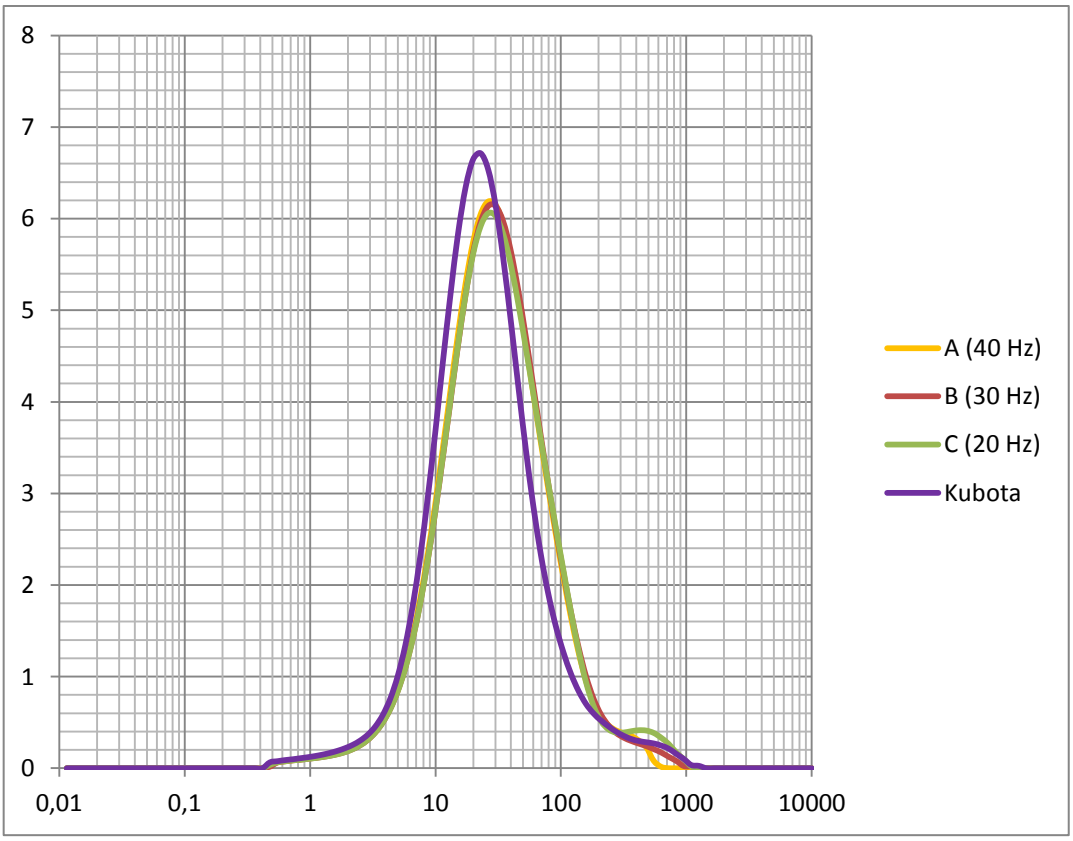

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 12. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día dieciséis de diciembre del 2014**



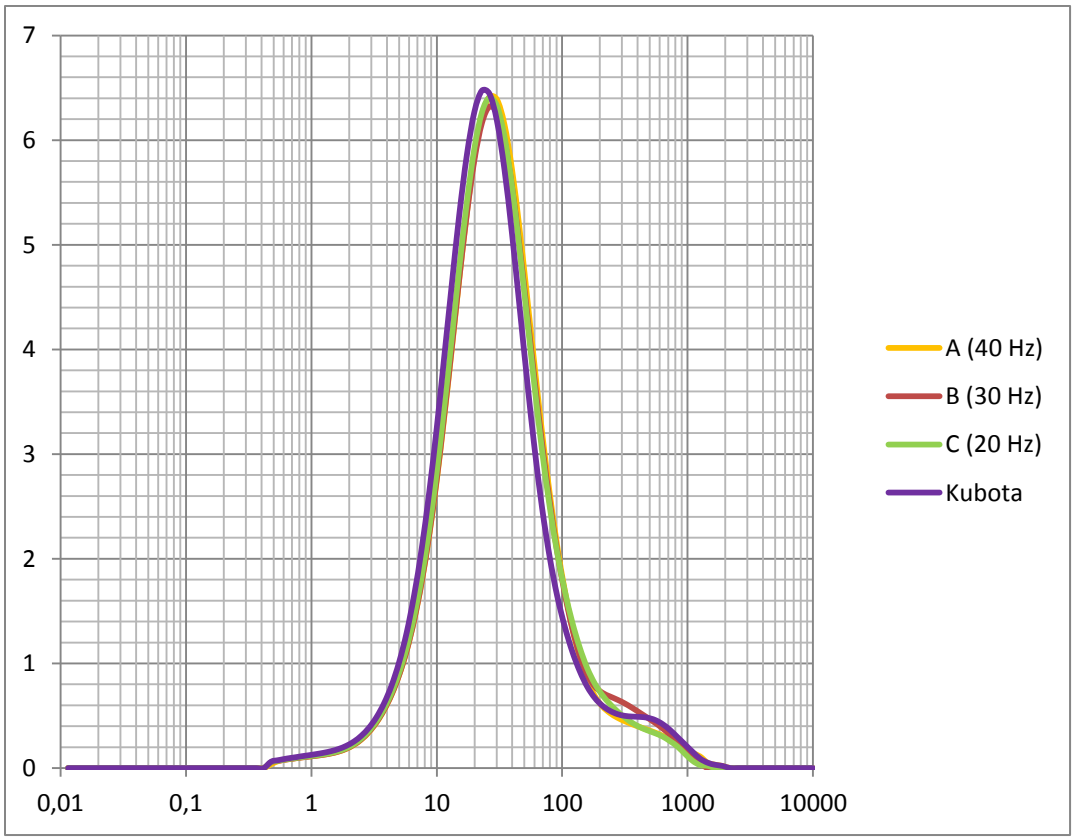

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 13. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día dieciocho de diciembre del 2014**



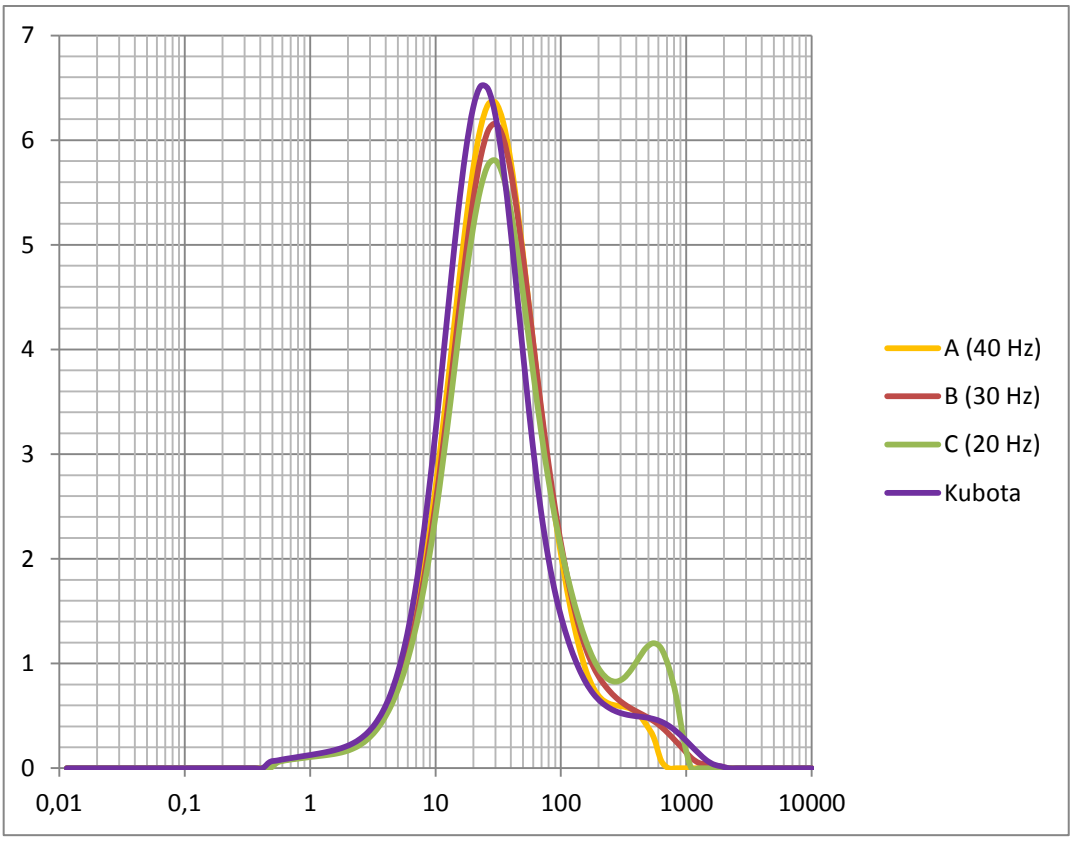

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 14. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día nueve de enero del 2015**



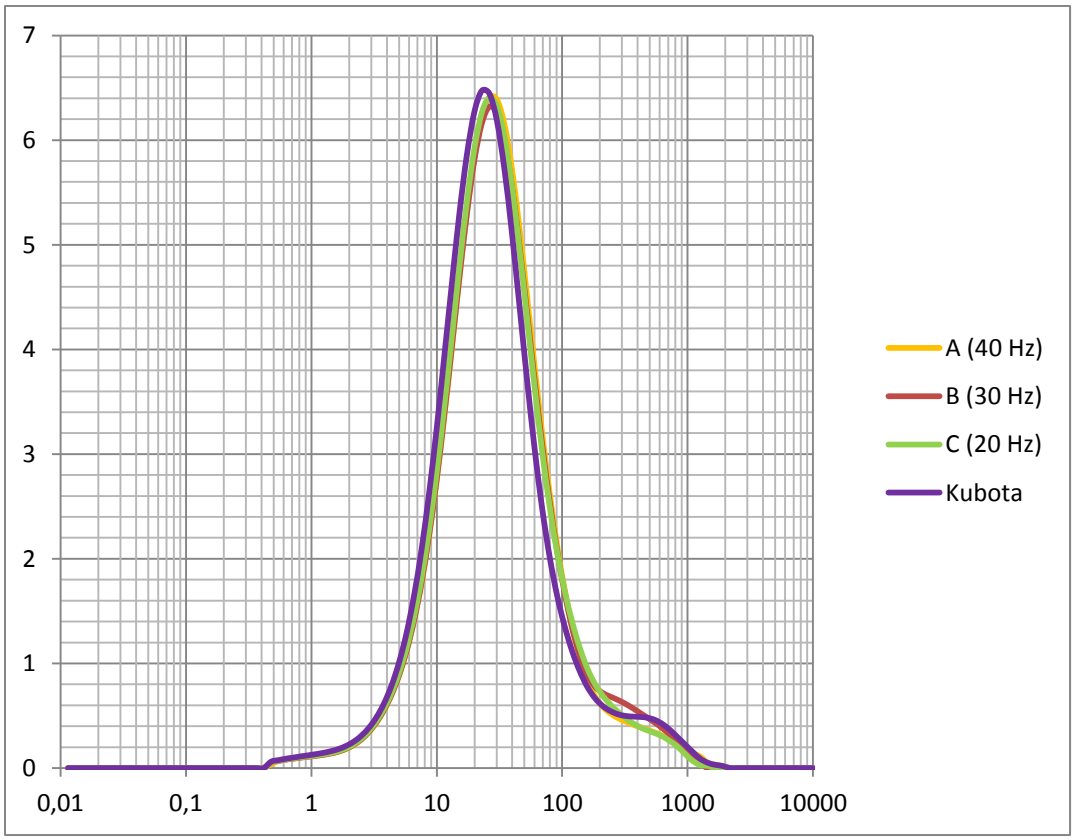

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 15. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día trece de enero del 2015**



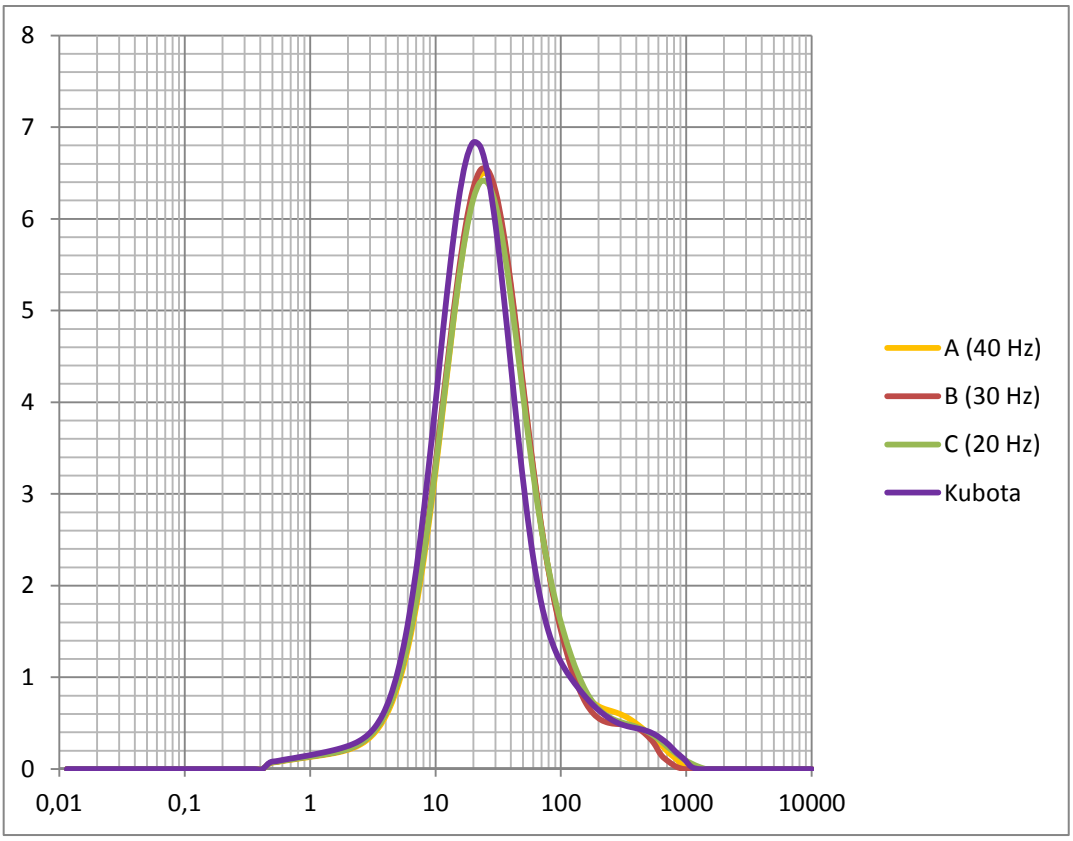

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 16. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día veintidós de enero del 2015**



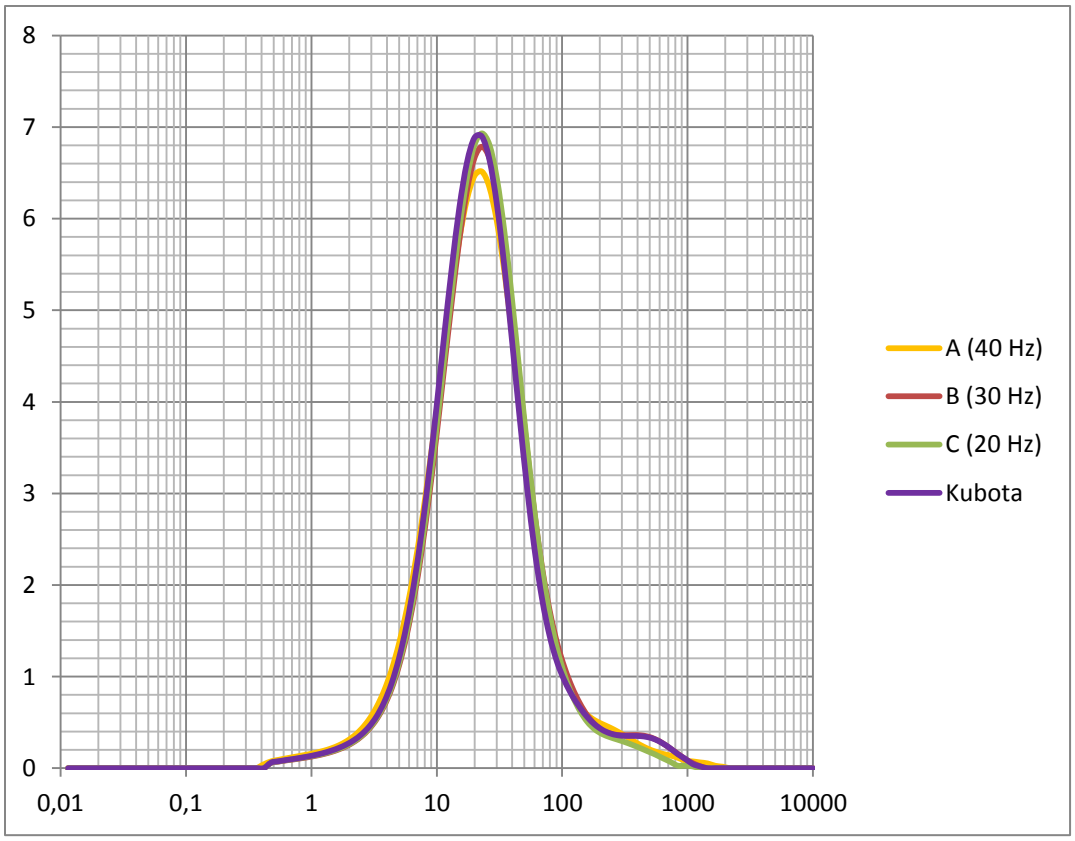

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 17. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día veintisiete de enero del 2015**



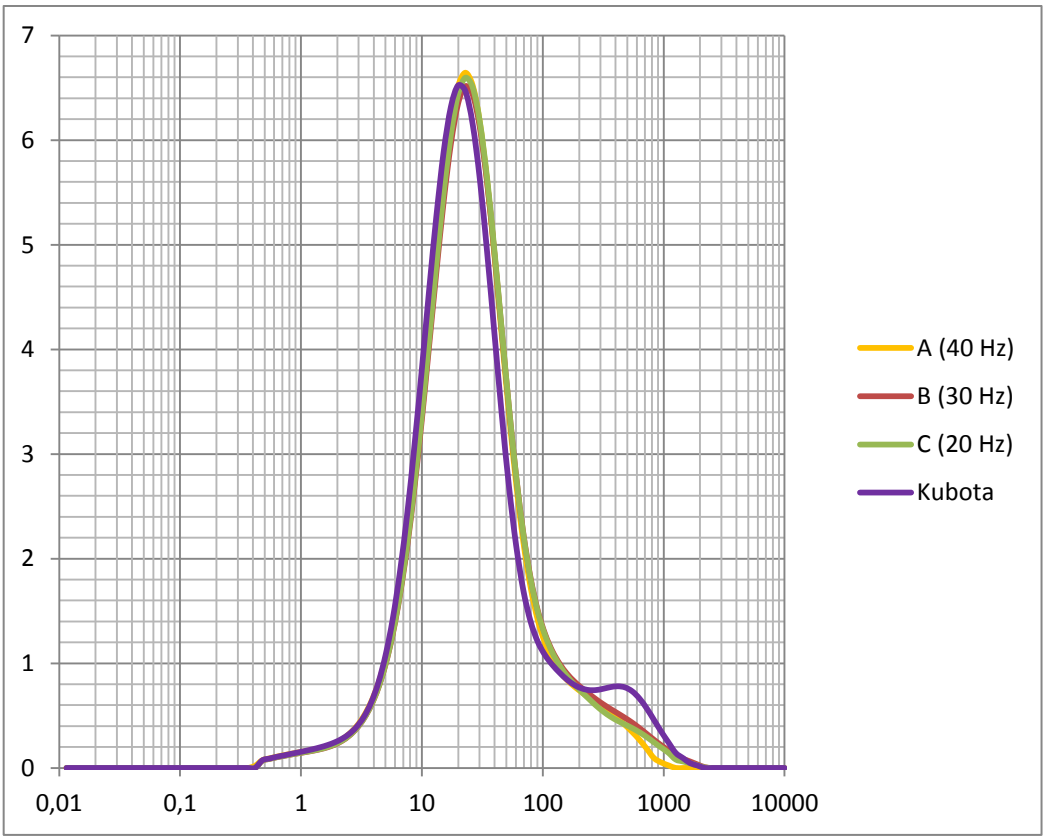

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 18. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día tres de febrero del 2015**



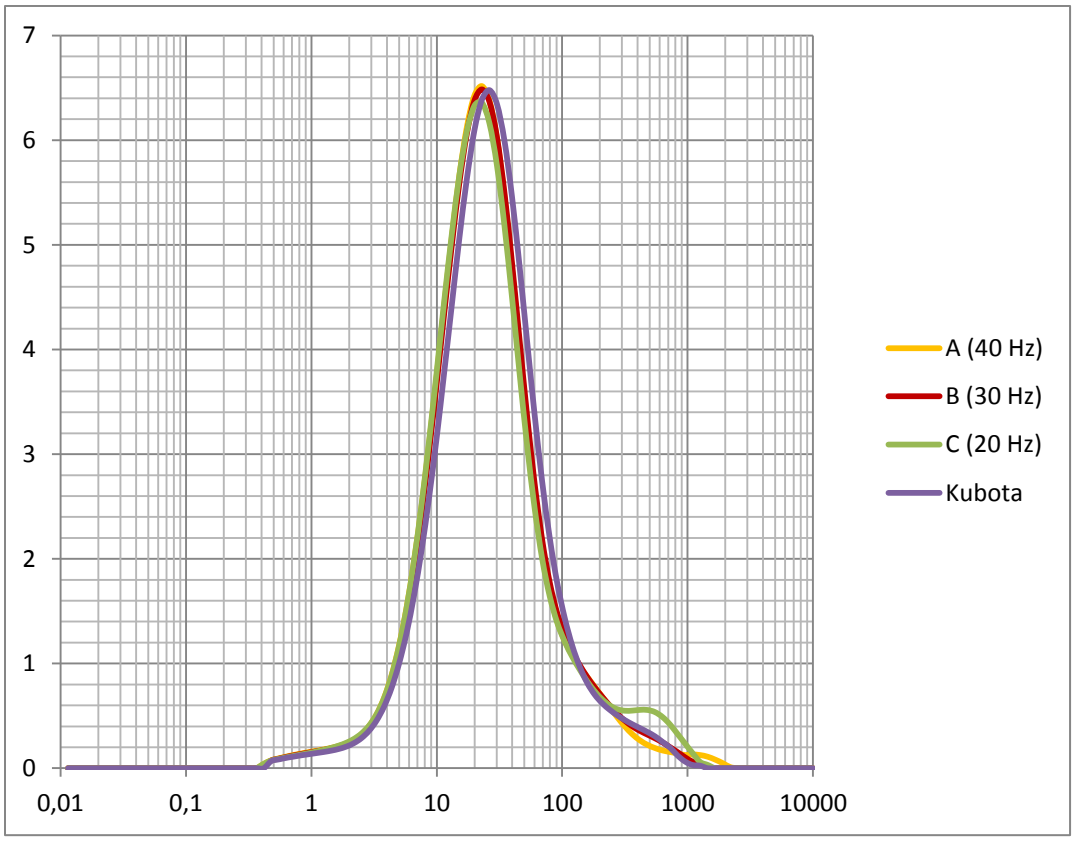

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 19. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día diecinueve de febrero del 2015**




Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

Figura 20. **Tamaño de partículas en módulos A, B, C y Kubota del día veinticuatro de febrero del 2015**




Fuente: elaboración propia, datos obtenidos en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (UGR).

## 3.7. Análisis estadístico

Todos los datos obtenidos a lo largo de la fase experimental se sometieron a un tratamiento estadístico asistido por ordenador, dado el carácter comparativo de los estudios realizados en la investigación.

Las fases de estudio obtenidas son comparadas con base en los parámetros controlados durante el estudio. Dicho análisis comparativo se basa en un análisis de varianza (Anova) de una vía, siendo la variable dependiente el parámetro a estudiar y la independiente en la fase de estudio. Asimismo, en caso de no haber normalidad en los datos se utilizó la prueba de Kruskall-Wallis, la cual es un método no paramétrico que no asume normalidad los datos provenientes de la misma población. De esta forma se determinó la presencia de diferencias estadísticamente significativas entre grupos con base en los parámetros de estudio.

Para el tratamiento estadístico de los datos obtenidos se emplearon los programas de Microsoft Excel y STATGRAPHICS XVII.

### 3.7.1. Análisis estadístico para la variable de hidrofobicidad en los distintos módulos de membranas

El tratamiento estadístico para la variable de hidrofobicidad tuvo como objetivo principal identificar cuantitativamente la variación que esta podía tener a lo largo del período de experimentación.

Tabla XXXVII. **Resumen estadístico de la variable de hidrofobicidad**

| Módulo | Recuento | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango | Sesgo estandarizado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 28 | 54,0918 | 15,0583 | 27,8384 % | 19,35 | 76,0 | 56,65 | -1,50332 |
| B | 28 | 54,8207 | 11,779 | 21,4863 % | 29,73 | 78,4 | 48,67 | 0,0803365 |
| C | 28 | 54,9189 | 14,5196 | 26,4383 % | 22,22 | 78,47 | 56,25 | -1,08387 |
| Kubota | 29 | 53,3897 | 15,3243 | 28,7027 % | 15,0 | 77,2 | 62,2 | -1,54694 |
| Total | 113 | 54,2972 | 14,0723 | 25,9173 % | 15,0 | 78,47 | 63,47 | -2,37446 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Curtosis estandarizada de la variable de hidrofobicidad**

| Módulo | Curtosis estandarizada |
|---|---|
| A | -0,0694229 |
| B | -0,128876 |
| C | -0,264862 |
| Kubota | 0,351734 |
| Total | 0,00310594 |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sesgo y la curtosis estandarizada están dentro del rango de -2 a +2 se puede afirmar que hay normalidad en los datos obtenidos, por tanto puede realizarse una prueba Anova, la cual descompone la varianza de la variable hidrofobicidad entre grupos y un componente entre grupos.

Tabla XXXIX. **Tabla Anova de la variable de hidrofobicidad**

| Fuente | Suma de cuadrados | Gl | Cuadrado medio | Razón-F | Valor P |
|---|---|---|---|---|---|
| Entre grupos | 43,5641 | 3 | 14,5214 | 0,07 | 0,9751 |
| Intragrupos | 22 135,9 | 109 | 203,081 | | |
| Total (corr.) | 22 179,4 | 112 | | | |

Fuente: elaboración propia.

La razón-F, que en este caso es igual a 0,07, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor P de la razón-F es mayor que 0,05, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la hidrofobicidad entre un módulo y otro, con un nivel del 5 % de significación.

Tabla XL. **Verificación de la varianza de la variable de hidrofobicidad**

| Test | Valor | Valor P |
|---|---|---|
| Levene's | 0,768684 | 0,513973 |

Fuente: elaboración propia.

Se realizó una verificación de varianza mediante el test de Levene, para contrastar si las muestras tienen la misma varianza, es decir si existe homogeneidad de varianzas, de particular interés es el valor P, el cual es de 0,513973, por lo que se cumple el criterio.

Tabla XLI. **Comparación de desviaciones típicas de la variable de hidrofobicidad**

| **Comparación** | **Sigma1** | **Sigma2** | **F-Ratio** | **P-Valor** |
|---|---|---|---|---|
| A / B | 15,0583 | 11,779 | 1,63432 | 0,2083 |
| A / C | 15,0583 | 14,5196 | 1,07558 | 0,8513 |
| A / Kubota | 15,0583 | 15,3243 | 0,965586 | 0,9294 |
| B / C | 11,779 | 14,5196 | 0,658119 | 0,2832 |
| B / Kubota | 11,779 | 15,3243 | 0,590818 | 0,1754 |
| C / Kubota | 14,5196 | 15,3243 | 0,897738 | 0,7812 |

Fuente: elaboración propia.

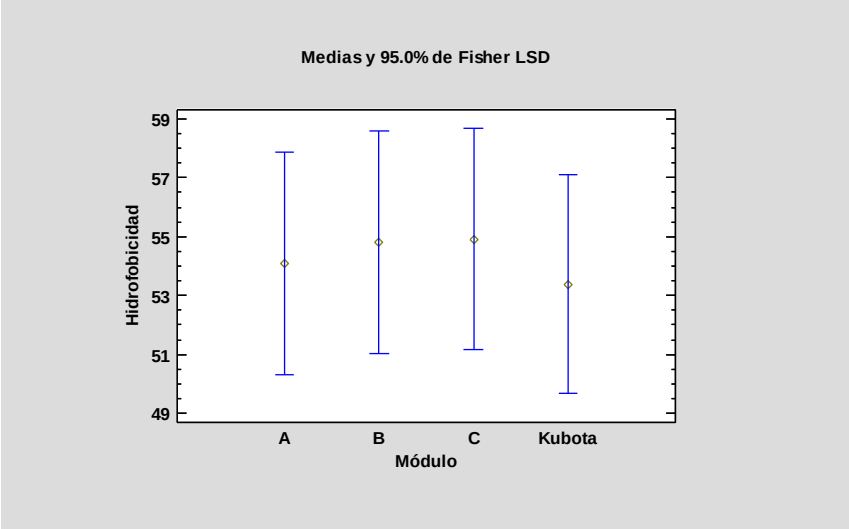
En la tabla se muestra una comparación de desviaciones típicas para cada par de módulos. Los P-valores por debajo de 0,05, indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5 % de significación, sin embargo ninguna pareja de módulos está por debajo de este valor. Por tanto, no hay diferencia significativa.

Tabla XLII. **Medias con intervalos de confianza al 95 % de la variable de hidrofobicidad**

| | | | Error Est. | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Módulo** | **Casos** | **Media** | **(s agrupada)** | **Límite inferior** | **Límite superior** |
| A | 28 | 54,0918 | 2,69312 | 50,3175 | 57,8661 |
| B | 28 | 54,8207 | 2,69312 | 51,0464 | 58,595 |
| C | 28 | 54,9189 | 2,69312 | 51,1446 | 58,6932 |
| Kubota | 29 | 53,3897 | 2,64628 | 49,681 | 57,0983 |
| Total | 113 | 54,2972 | | | |

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Medias y 95 % de Fisher LSD de la variable de hidrofobicidad**




Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2. Análisis estadístico para la variable de carbono orgánico en los SMP de los distintos módulos de membranas

Se desarrolló el tratamiento estadístico a los valores obtenidos de carbono orgánico en los SMP, con el objetivo de determinar el nivel de correlación que éstos pudiesen presentar entre sí.

Tabla XLIII. **Resumen estadístico de la variable de carbono orgánico en los SMP**

| Módulo | Recuento | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango | Sesgo estandarizado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 28 | 24,6664 | 10,6403 | 43,1368 % | 12,87 | 53,58 | 40,71 | 3,09133 |
| B | 28 | 28,1586 | 27,1171 | 96,3014 % | 15,01 | 160,02 | 145,01 | 9,87624 |
| C | 28 | 22,9386 | 7,34348 | 32,0137 % | 13,77 | 41,54 | 27,77 | 2,18523 |
| Kubota | 29 | 21,2983 | 6,1301 | 28,7822 % | 14,42 | 39,51 | 25,09 | 2,44635 |
| Total | 113 | 24,2392 | 15,2809 | 63,042 % | 12,87 | 160,02 | 147,15 | 28,3982 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Curtosis estandarizada de la variable de carbono orgánico en los SMP**

| Módulo | Curtosis estandarizada |
|---|---|
| A | 1,91305 |
| B | 24,3485 |
| C | 0,514874 |
| Kubota | 1,48382 |
| Total | 121,622 |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sesgo y la curtosis estandarizada no están dentro del rango de -2 a +2, no existe normalidad en los datos obtenidos, por tanto debe

realizarse una prueba Kruskal-Wallis, la cual compara las medianas en vez de las medias.

Tabla XLV. **Prueba de Kruskal-Wallis de la variable de carbono orgánico en los SMP**

| Módulo | Tamaño muestra | Rango promedio |
|---|---|---|
| A | 28 | 59,7321 |
| B | 28 | 59,75 |
| C | 28 | 57,7857 |
| Kubota | 29 | 50,9483 |
| Estadístico = 1,39744 | | Valor P = 0,706132 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de SMP orgánico dentro de cada uno de los 4 módulos son iguales. Puesto que el valor P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0 % de confianza. La comparación del módulo A respecto al módulo B demuestra una diferencia de -0.0148571 (valor cercano a cero) por lo que expone que no existe alguna coyuntura significativa.

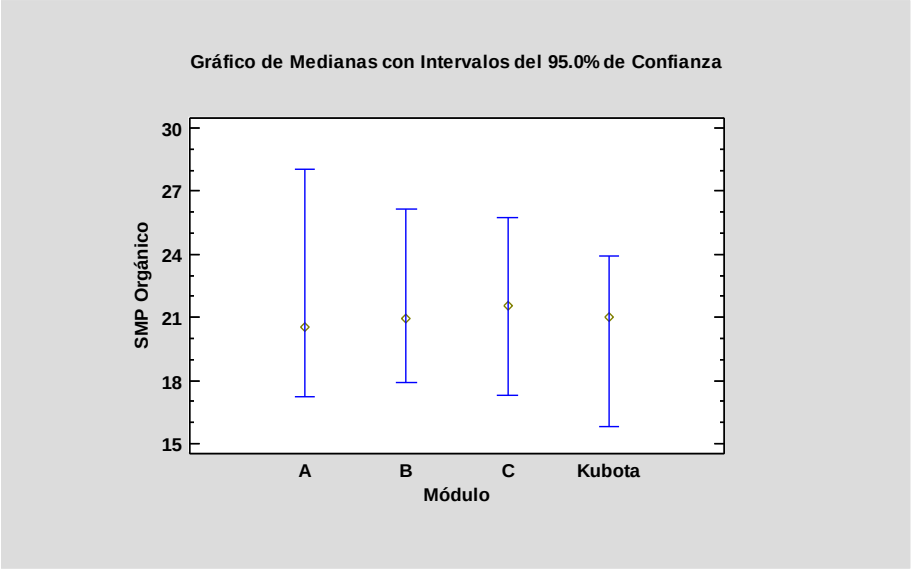
Tabla XLVI. **Comparación de pares de la variable de carbono orgánico en los SMP**

| Contraste | Sig. | Diferencia | +/- Límites |
|---|---|---|---|
| A – B | | -0,0178571 | 23,1023 |
| A – C | | 1,94643 | 23,1023 |
| A - Kubota | | 8,78387 | 22,9023 |
| B – C | | 1,96429 | 23,1023 |
| B - Kubota | | 8,80172 | 22,9023 |
| C - Kubota | | 6,83744 | 22,9023 |

Fuente: elaboración propia.

El desplegado muestra comparaciones por pares entre los rangos promedio de los 4 grupos. Con el procedimiento de Bonferroni, ninguna de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95.0 %.

Figura 22. **Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable de carbono orgánico en los SMP**




Fuente: elaboración propia.

### 3.7.3. Análisis estadístico para la variable de carbono orgánico en los EPS de los distintos módulos de membranas

Los valores obtenidos del carbono orgánico en los EPS fueron sometidos a una evaluación estadística, con el fin de determinar la variación de los datos a lo largo del período de experimentación.

Tabla XLVII. **Resumen estadístico de la variable de carbono orgánico en los EPS**

| Módulo | Recuento | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango | Sesgo estandarizado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 28 | 62,6918 | 24,3456 | 38,8337 % | 21,56 | 135,09 | 113,53 | 1,63626 |
| B | 28 | 58,7882 | 21,9187 | 37,2842 % | 23,01 | 116,22 | 93,21 | 1,64143 |
| C | 28 | 62,4457 | 21,1595 | 33,8846 % | 25,72 | 112,8 | 87,08 | 0,91597 |
| Kubota | 29 | 61,3748 | 21,2685 | 34,6534 % | 21,04 | 108,53 | 87,49 | 1,07169 |
| Total | 113 | 61,3256 | 21,9571 | 35,8041 % | 21,04 | 135,09 | 114,05 | 2,63298 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Curtosis estandarizada de la variable de carbono orgánico en los EPS**

| Módulo | Curtosis estandarizada |
|---|---|
| A | 1,64191 |
| B | 0,534295 |
| C | -0,375348 |
| Kubota | -0,123517 |
| Total | 0,795273 |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sesgo y la curtosis estandarizada no están dentro del rango de -2 a +2 en uno de los módulos (A), no existe normalidad en los datos obtenidos, por tanto debe realizarse una prueba Kruskal-Wallis, la cual compara las medianas en vez de las medias.

Tabla XLIX. **Prueba de Kruskal-Wallis de la variable de carbono orgánico en los EPS**

| Módulo | Tamaño muestra | Rango promedio |
|---|---|---|
| A | 28 | 58,6786 |
| B | 28 | 52,75 |

Continuación de la tabla XLIX.

| | | |
|---|---|---|
| C | 28 | 59,0357 |
| Kubota | 29 | 57,5172 |
| Estadístico = 0,65993 | | Valor P = 0,882 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de EPS orgánico dentro de cada uno de los 4 módulos son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0 % de confianza.

Tabla L. **Comparación de pares de la variable de carbono orgánico en los EPS**

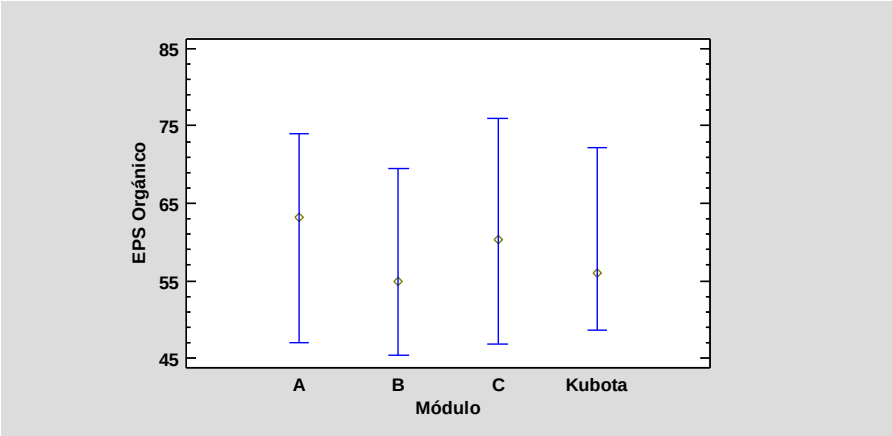
| Contraste | Sig. | Diferencia | +/- Límites |
|---|---|---|---|
| A - B | | 5,92857 | 23,1023 |
| A - C | | -0,357143 | 23,1023 |
| A - Kubota | | 1,16133 | 22,9023 |
| B - C | | -6,28571 | 23,1023 |
| B - Kubota | | -4,76724 | 22,9023 |
| C - Kubota | | 1,51847 | 22,9023 |

Fuente: elaboración propia.

El desplegado muestra comparaciones en pares entre rangos promedio de los 4 grupos. Usando el procedimiento de Bonferroni, ninguna de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95,0 %.

.

Figura 23. **Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable de carbono orgánico en los EPS**




Fuente: elaboración propia.

### 3.7.4. Análisis estadístico para la variable de viscosidad del fango de los distintos módulos de membranas

En los distintos módulos de membranas se obtuvieron diversos coeficientes de variación, sin embargo, pruebas como la de curtosis estandarizada y Kruskal-Wallis ayudan a identificar la normalidad de los datos.

Tabla LI. **Resumen estadístico de la variable de viscosidad de fango**

| Módulo | Recuento | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango | Sesgo estandarizado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 28 | 2,36643 | 0,455974 | 19,2685 % | 1,67 | 3,27 | 1,6 | 0,347938 |
| B | 28 | 2,38286 | 0,478755 | 20,0916 % | 1,7 | 3,37 | 1,67 | 0,496803 |
| C | 28 | 2,4375 | 0,496966 | 20,3883 % | 1,74 | 3,61 | 1,87 | 0,791299 |
| Kubota | 29 | 2,31586 | 0,39016 | 16,8473 % | 1,68 | 2,95 | 1,27 | 0,390761 |
| Total | 113 | 2,37513 | 0,452645 | 19,0577 % | 1,67 | 3,61 | 1,94 | 1,23569 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Curtosis estandarizada de la variable de viscosidad de fango**

| Módulo | Curtosis estandarizada |
|---|---|
| A | -1,33998 |
| B | -1,19879 |
| C | -0,749115 |
| Kubota | -1,39801 |
| Total | -1,99993 |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sesgo y la Curtosis estandarizada no están dentro del rango de -2 a +2 en tres de los módulos (A, B y C), no existe normalidad en los datos obtenidos, por tanto debe realizarse una prueba Kruskal-Wallis, la cual compara las medianas en vez de las medias.

Tabla LIII. **Prueba de Kruskal-Wallis de la variable de viscosidad de fango**

| Módulo | Tamaño muestra | Rango promedio |
|---|---|---|
| A | 28 | 55,9286 |
| B | 28 | 57,5536 |
| C | 28 | 61,9107 |
| Kubota | 29 | 52,7586 |
| Estadístico = 1,15321 | | Valor P = 0,7642 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de la viscosidad del fango dentro de cada uno de los 4 módulos son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor.

Luego se calcula el rango promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0 % de confianza.

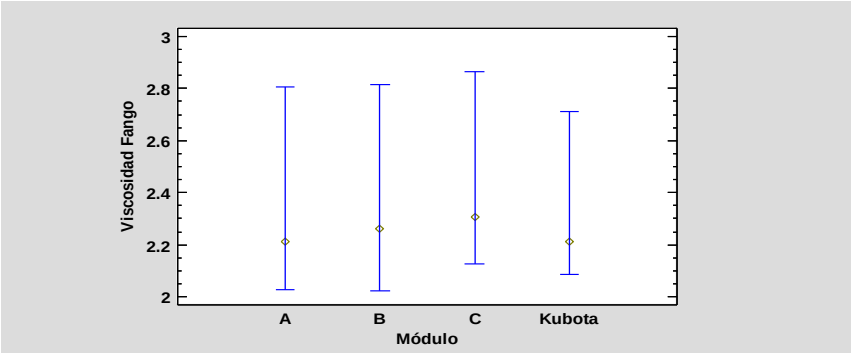
Tabla LIV. **Comparación de pares de la variable de viscosidad de fango**

| Contraste | Sig. | Diferencia | +/- Límites |
|---|---|---|---|
| A - B | | -1,625 | 23,1023 |
| A - C | | -5,98214 | 23,1023 |
| A - Kubota | | 3,16995 | 22,9023 |
| B - C | | -4,35714 | 23,1023 |
| B - Kubota | | 4,79495 | 22,9023 |
| C - Kubota | | 9,15209 | 22,9023 |

Fuente: elaboración propia.

El desplegado muestra comparaciones por pares entre los rangos promedio de los 4 grupos. Con el procedimiento de Bonferroni, ninguna de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95.0 %.

Figura 24. **Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable de viscosidad de fango**




Fuente: elaboración propia.

### 3.7.5. Análisis estadístico para la variable de viscosidad del efluente en los distintos módulos de membranas

Los datos de la viscosidad del efluente fueron sometidos a un tratamiento estadístico en el que se incluían análisis para identificar la normalidad de sus datos.

Tabla LV. **Resumen estadístico de la variable de viscosidad del efluente**

| Módulo | Recuento | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango | Sesgo estandarizado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 28 | 1,49571 | 0,0770968 | 5,15451% | 1,35 | 1,65 | 0,3 | 0,770825 |
| B | 28 | 1,50071 | 0,0745817 | 4,96975% | 1,37 | 1,67 | 0,3 | 1,28318 |
| C | 28 | 1,50321 | 0,0806939 | 5,36809% | 1,36 | 1,67 | 0,31 | 0,680658 |
| Kubota | 29 | 1,52655 | 0,0956659 | 6,2668% | 1,34 | 1,7 | 0,36 | 0,194389 |
| Total | 113 | 1,50673 | 0,0823152 | 5,46318% | 1,34 | 1,7 | 0,36 | 1,55644 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Curtosis estandarizada de la variable de viscosidad del efluente**

| Módulo | Curtosis estandarizada |
|---|---|
| A | -0,569115 |
| B | -0,0784834 |
| C | -0,418691 |
| Kubota | -0,563215 |
| Total | -0,894937 |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sesgo y la curtosis estandarizada están dentro del rango de -2 a +2 se puede afirmar que hay normalidad en los datos obtenidos, por tanto puede realizarse una prueba Anova, la cual descompone la varianza de la variable hidrofobicidad entre grupos y un componente entre grupos.

Tabla LVII. **Tabla Anova de la variable de viscosidad del efluente**

| Fuente | Suma de cuadrados | Gl | Cuadrado medio | Razón-F | Valor P |
|---|---|---|---|---|---|
| Entre grupos | 0,0161512 | 3 | 0,00538373 | 0,79 | 0,5020 |
| Intragrupos | 0,742737 | 109 | 0,0068141 | | |
| Total (Corr.) | 0,758888 | 112 | | | |

Fuente: elaboración propia.

La razón-F, que en este caso es igual a 0,79, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor P de la razón-F es mayor que 0.05, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la hidrofobicidad entre un módulo y otro, con un nivel del 5 % de significación.

Tabla LVIII. **Verificación de la varianza de la variable de viscosidad del efluente**

| | Prueba | Valor P |
|---|---|---|
| Levene's | 0,545871 | 0,651962 |

Fuente: elaboración propia.

Se realizó una verificación de varianza mediante el test de Levene, para contrastar si las muestras tienen la misma varianza, es decir si existe homogeneidad de varianzas, de particular interés es el valor P, el cual es de 0.904498; por lo que se cumple el criterio.

Tabla LIX. **Comparación de desviaciones típicas de la variable de viscosidad del efluente**

| Comparación | Sigma1 | Sigma2 | F-Ratio | P-Valor |
|---|---|---|---|---|
| A / B | 0,0770968 | 0,0745817 | 1,06858 | 0,8644 |
| A / C | 0,0770968 | 0,0806939 | 0,912832 | 0,8144 |
| A / Kubota | 0,0770968 | 0,0956659 | 0,649468 | 0,2656 |
| B / C | 0,0745817 | 0,0806939 | 0,854247 | 0,6852 |
| B / Kubota | 0,0745817 | 0,0956659 | 0,607785 | 0,1996 |
| C / Kubota | 0,0806939 | 0,0956659 | 0,711487 | 0,3794 |

Fuente: elaboración propia.

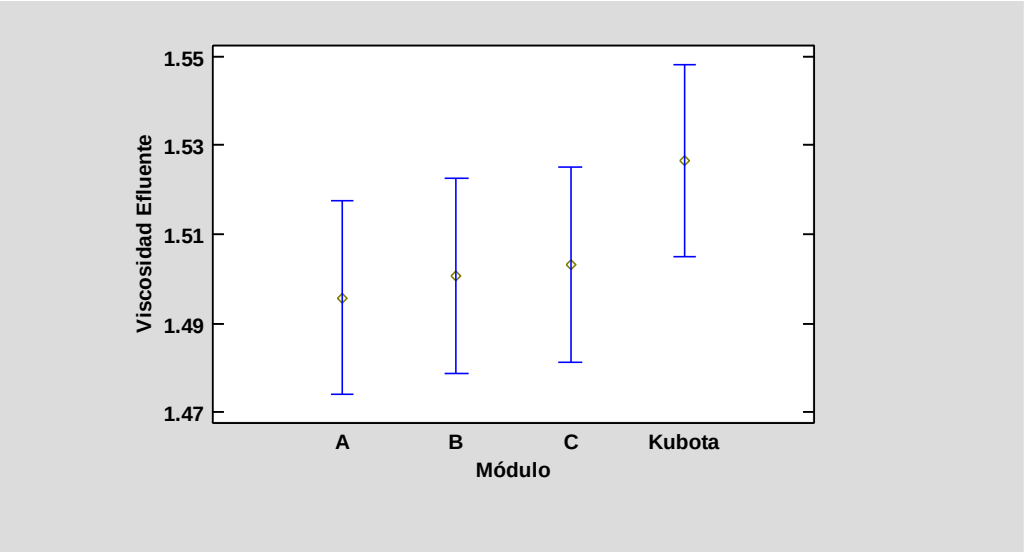
En la tabla se muestra una comparación de desviaciones típicas para cada par de módulos. Los P-valores por debajo de 0,05, indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5 % de significación, sin embargo ninguna pareja de módulos está por debajo de este valor. Por tanto, no hay diferencia significativa.

Tabla LX. **Medias con intervalos de confianza al 95 % de la variable de viscosidad del efluente**

| | | | *Error est.* | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Módulo* | *Casos* | *Media* | *(s agrupada)* | *Límite inferior* | *Límite superior* |
| A | 28 | 1,49571 | 0,0156 | 1,47385 | 1,51758 |
| B | 28 | 1,50071 | 0,0156 | 1,47885 | 1,52258 |
| C | 28 | 1,50321 | 0,0156 | 1,48135 | 1,52508 |
| Kubota | 29 | 1,52655 | 0,0153287 | 1,50507 | 1,54803 |
| Total | 113 | 1,50673 | | | |

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Medias y 95 % de Fisher LSD de la variable de viscosidad del efluente**




Fuente: elaboración propia.

### 3.7.6. Análisis estadístico para la variable de sólidos suspendidos totales de los distintos módulos de membranas

La variación de los sólidos en suspensión se debe a la variabilidad de la carga orgánica que presentaban las muestras a lo largo de la experimentación, es por ello que se sometieron a análisis de normalidad de datos, con el fin de reconocer que las desviaciones estuvieran dentro de un rango aceptable.

A continuación se presenta el resumen estadístico y los resultados de los análisis realizados en función de los sólidos en suspensión de las muestras.

Tabla LXI. **Resumen estadístico de la variable de SST**

| Módulo | Recuento | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango | Sesgo estandarizado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 28 | 1,98 | 0,809522 | 40,885% | 0,64 | 3,94 | 3,3 | 0,79972 |
| B | 28 | 2,27286 | 0,766994 | 33,7458% | 0,9 | 4,12 | 3,22 | 1,17877 |
| C | 28 | 2,37 | 0,7407 | 31,2532% | 1,38 | 4,5 | 3,12 | 1,56087 |
| Kubota | 29 | 2,3131 | 0,629405 | 27,2104% | 1,08 | 3,24 | 2,16 | -0,606834 |
| Total | 113 | 2,23469 | 0,744209 | 33,3025% | 0,64 | 4,5 | 3,86 | 1,26403 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Curtosis estandarizada de la variable de SST**

| Módulo | Curtosis estandarizada |
|---|---|
| A | -0,432859 |
| B | 0,185836 |
| C | 0,832919 |
| Kubota | -1,11988 |
| Total | -0,179089 |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sesgo y la curtosis estandarizada están dentro del rango de -2 a +2, se puede afirmar que hay normalidad en los datos obtenidos, por tanto puede realizarse una prueba Anova, la cual descompone la varianza de la variable hidrofobicidad entre grupos y un componente entre grupos.

Tabla LXIII. **Tabla Anova de la variable de SST**

| Fuente | Suma de cuadrados | Gl | Cuadrado medio | Razón-F | Valor P |
|---|---|---|---|---|---|
| Entre grupos | 2,54802 | 3 | 0,849341 | 1,56 | 0,2042 |
| Intragrupos | 59,4828 | 109 | 0,545714 | | |
| Total (Corr.) | 62,0308 | 112 | | | |

Fuente: elaboración propia.

La razón-F, que en este caso es igual a 1,55639, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de MLSS entre un nivel de módulo y otro, con un nivel del 5 % de significación.

Tabla LXIV. **Verificación de la varianza de la variable de SST**

| Test | Valor | Valor P |
|---|---|---|
| Levene's | 0,771144 | 0,512581 |

Fuente: elaboración propia.

Se realizó una verificación de varianza mediante el test de Levene, para contrastar si las muestras tienen la misma varianza, es decir si existe homogeneidad de varianzas, de particular interés es el valor P, el cual es de 0,512581; por lo que se cumple el criterio.

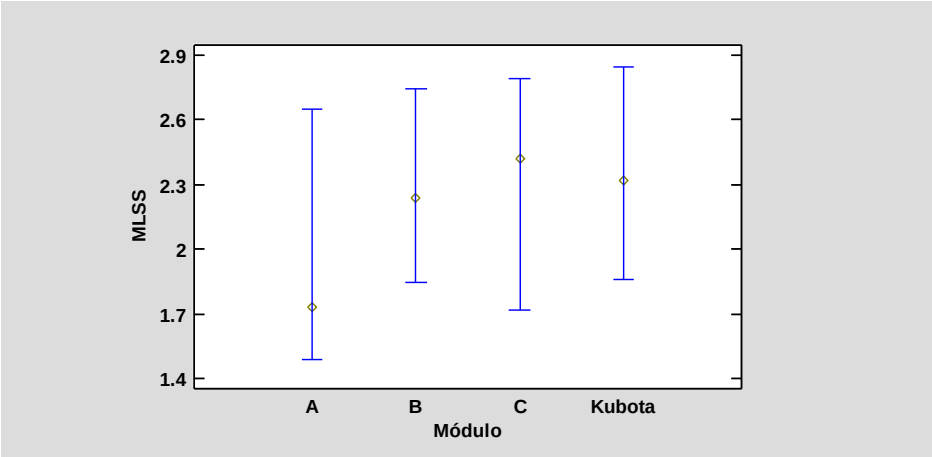
Tabla LXV. **Comparación de pares de la variable de SST**

| Comparación | Sigma1 | Sigma2 | F-Ratio | P-Valor |
|---|---|---|---|---|
| A / B | 0,809522 | 0,766994 | 1,11397 | 0,7812 |
| A / C | 0,809522 | 0,7407 | 1,19446 | 0,6476 |
| A / Kubota | 0,809522 | 0,629405 | 1,65423 | 0,1918 |
| B / C | 0,766994 | 0,7407 | 1,07226 | 0,8575 |
| B / Kubota | 0,766994 | 0,629405 | 1,48499 | 0,3042 |
| C / Kubota | 0,7407 | 0,629405 | 1,38492 | 0,3968 |

Fuente: elaboración propia.

El desplegado muestra comparaciones por pares entre los rangos promedio de los 4 grupos. Usando el procedimiento de Bonferroni, ninguna de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95,0 %.

Figura 26. **Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable de SST**




Fuente: elaboración propia.

### 3.7.7. Análisis estadístico para la variable temperatura en los distintos módulos de membranas

La temperatura dentro de los módulos de las membranas se mantiene constante, sin embargo fue necesario realizar un análisis de normalidad para determinar la formalidad de los valores obtenidos.

Tabla LXVI. **Resumen estadístico de la variable temperatura**

| Módulo | Recuento | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango | Sesgo estandarizado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 27 | 17,1063 | 2,53124 | 14,7971% | 12,05 | 22,1 | 10,05 | -0,311609 |
| B | 27 | 16,9815 | 2,62082 | 15,4334% | 11,7 | 22,25 | 10,55 | -0,45043 |
| C | 27 | 16,8796 | 2,54756 | 15,0925% | 11,55 | 22,15 | 10,6 | -0,626036 |
| Kubota | 29 | 15,2797 | 2,32769 | 15,2339% | 9,51 | 19,59 | 10,08 | -1,70808 |
| Total | 110 | 16,5385 | 2,58564 | 15,6341% | 9,51 | 22,25 | 12,74 | -1,04342 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. **Curtosis estandarizada de la variable temperatura**

| Módulo | Curtosis estandarizada |
|---|---|
| A | -0,0210031 |
| B | -0,266745 |
| C | 0,00391095 |
| Kubota | 1,28949 |
| Total | 0,284994 |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sesgo y la curtosis estandarizada están dentro del rango de -2 a +2 se puede afirmar que hay normalidad en los datos obtenidos, por tanto puede realizarse una prueba Anova, la cual descompone la varianza de la variable hidrofobicidad entre grupos y un componente entre grupos.

Tabla LXVIII. **Tabla Anova de la variable temperatura**

| Fuente | Suma de cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor P |
|---|---|---|---|---|---|
| Entre grupos | 63,1009 | 3 | 21,0336 | 3,35 | 0,0218 |
| Intragrupos | 665,622 | 106 | 6,27945 | | |
| Total (Corr.) | 728,723 | 109 | | | |

Fuente: elaboración propia.

La razón-F, que en este caso es igual a 3,35, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor P de la razón-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la hidrofobicidad entre un módulo y otro, con un nivel del 5% de significación.

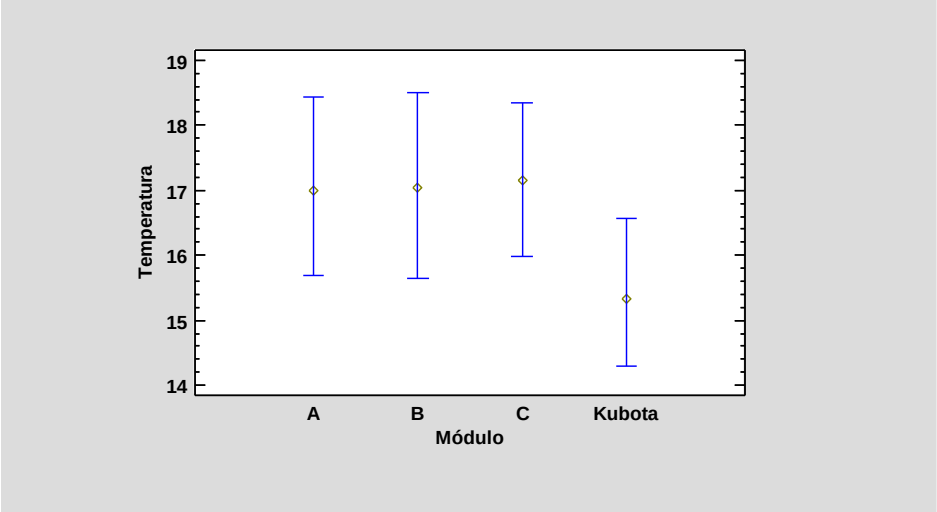
Tabla LXIX. **Comparación de pares de la variable temperatura**

| Comparación | Sigma1 | Sigma2 | F-Ratio | P-Valor |
|---|---|---|---|---|
| A / B | 2,53124 | 2,62082 | 0,932811 | 0,8606 |
| A / C | 2,53124 | 2,54756 | 0,987232 | 0,9741 |
| A / Kubota | 2,53124 | 2,32769 | 1,18254 | 0,6626 |
| B / C | 2,62082 | 2,54756 | 1,05834 | 0,8862 |
| B / Kubota | 2,62082 | 2,32769 | 1,26772 | 0,5384 |
| C / Kubota | 2,54756 | 2,32769 | 1,19784 | 0,6388 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. P-valores por debajo de 0.05, de los cuales hay 0, indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5 % de nivel de significación.

Figura 27. **Medianas y 95 % de Fisher LSD de la variable temperatura**




Fuente: elaboración propia.

### 3.7.8. Análisis de componentes principales en el módulo A

Se desarrolló un análisis de componentes principales en el módulo A, para determinar la correlación que tenían las diferentes variables entre sí y así determinar variables dependientes e independientes.

Tabla LXX. **Valores de componentes principales en el módulo A**

| Componente número | Eigenvalor | Porcentaje de Varianza | Porcentaje acumulado |
|---|---|---|---|
| 1 | 2,70682 | 38,669 | 38,669 |
| 2 | 1,63336 | 23,334 | 62,003 |
| 3 | 1,03112 | 14,730 | 76,733 |
| 4 | 0,660691 | 9,438 | 86,171 |
| 5 | 0,599183 | 8,560 | 94,731 |
| 6 | 0,231182 | 3,303 | 98,034 |
| 7 | 0,137636 | 1,966 | 100,000 |

Fuente: elaboración propia.

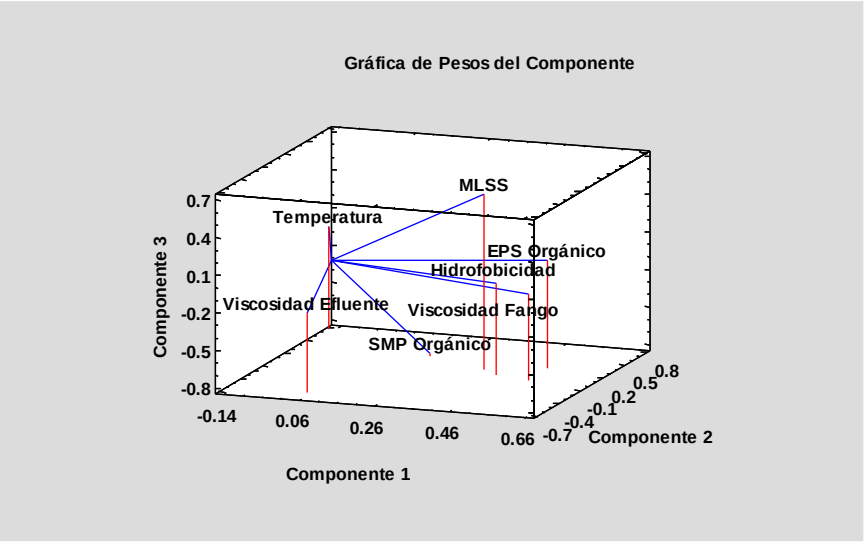
El propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 7 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos. En conjunto ellos explican 76,73 % de la variabilidad en los datos originales.

Tabla LXXI. **Pesos de los componentes en el módulo A**

| | Comp. 1 | Comp. 2 | Comp. 3 |
|---|---|---|---|
| Hidrofobicidad | 0,442346 | -0,0237882 | -0,0682579 |
| SMP orgánico | 0,214248 | 0,249287 | -0,771387 |
| EPS orgánico | 0,538187 | 0,197652 | 0,0610235 |
| Temperatura | -0,132767 | 0,645978 | 0,022921 |
| Viscosidad fango | 0,540221 | -0,0809535 | -0,107176 |
| Viscosidad efluente | 0,0699836 | -0,685012 | -0,163857 |
| MLSS | 0,392962 | 0,0717029 | 0,598095 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Vectores de componentes principales en el módulo A**




Fuente: elaboración propia, con Statgraphics XVII.

En la gráfica se puede observar que hay una tendencia a que mientras mayor sea la hidrofobicidad, mayor será la viscosidad del fango, así como los EPS orgánicos, la viscosidad del efluente se ve afectada por la cantidad de MLSS que hay en el medio, la temperatura condiciona la viscosidad del fango siendo su tendencia inversamente proporcional.

### 3.7.9. Análisis de componentes principales en el módulo B

Se desarrolló un análisis de componentes principales en el módulo B, para determinar la correlación que tenían las diferentes variables entre sí y así determinar variables dependientes e independientes.

Tabla LXXII. **Valores de componentes principales en el módulo B**

| Componente Número | Eigenvalor | Porcentaje de Varianza | Porcentaje acumulado |
|---|---|---|---|
| 1 | 2,68808 | 38,401 | 38,401 |
| 2 | 1,70447 | 24,350 | 62,751 |
| 3 | 1,04245 | 14,892 | 77,643 |
| 4 | 0,828575 | 11,837 | 89,480 |
| 5 | 0,354825 | 5,069 | 94,549 |
| 6 | 0,305283 | 4,361 | 98,910 |
| 7 | 0,0763052 | 1,090 | 100,000 |

Fuente: elaboración propia.

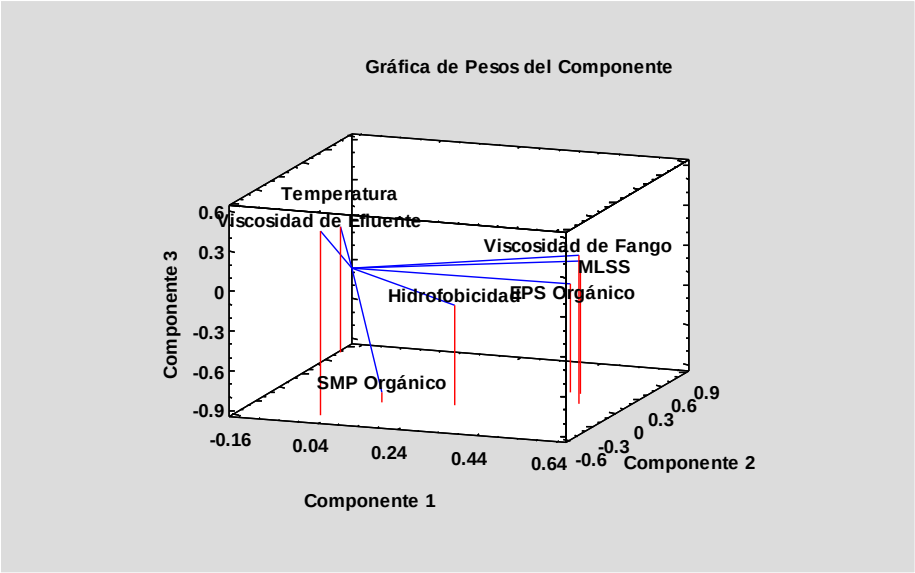
El propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 7 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos. En este caso, 3 componentes se han extraído puesto que 3 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1,0. En conjunto ellos explican 77,65 % de la variabilidad en los datos originales.

Tabla LXXIII. **Pesos de los componentes en el módulo B**

| | *Componente* 1 | *Componente* 2 | *Componente* 3 |
|---|---|---|---|
| Hidrofobicidad | 0,298651 | -0,213227 | -0,141871 |
| SMP Orgánico | 0,128565 | -0,266524 | -0,822767 |
| EPS Orgánico | 0,508032 | 0,219992 | -0,0842396 |
| Temperatura | -0,157484 | 0,668887 | 0,0467367 |
| Viscosidad de Fango | 0,570504 | 0,00295974 | 0,224192 |
| Viscosidad de Efluente | 0,0344237 | -0,587488 | 0,482935 |
| MLSS | 0,533593 | 0,206256 | 0,100786 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Vectores de componentes principales en el módulo B**




Fuente: elaboración propia, con Statgraphics XVII.

Existe una tendencia a que los EPS, los MLSS y la viscosidad del fango se comporten de manera similar, aumentando proporcionalmente, lo cual explica uno de los componentes principales, por otro lado, la hidrofobicidad y la temperatura presentan un comportamiento inversamente proporcional.

### 3.7.10. Análisis de componentes principales en el módulo C

Se desarrolló un análisis de componentes principales en el módulo C, para determinar la correlación que tenían las diferentes variables entre sí y así determinar variables dependientes e independientes.

Tabla LXXIV. **Valores de componentes principales en el módulo C**

| Componente número | Eigenvalor | Porcentaje de Varianza | Porcentaje acumulado |
|---|---|---|---|
| 1 | 3,28458 | 46,923 | 46,923 |
| 2 | 1,65729 | 23,676 | 70,598 |
| 3 | 0,843519 | 12,050 | 82,649 |
| 4 | 0,585104 | 8,359 | 91,007 |
| 5 | 0,418702 | 5,981 | 96,989 |
| 6 | 0,145539 | 2,079 | 99,068 |
| 7 | 0,0652574 | 0,932 | 100,000 |

Fuente: elaboración propia.

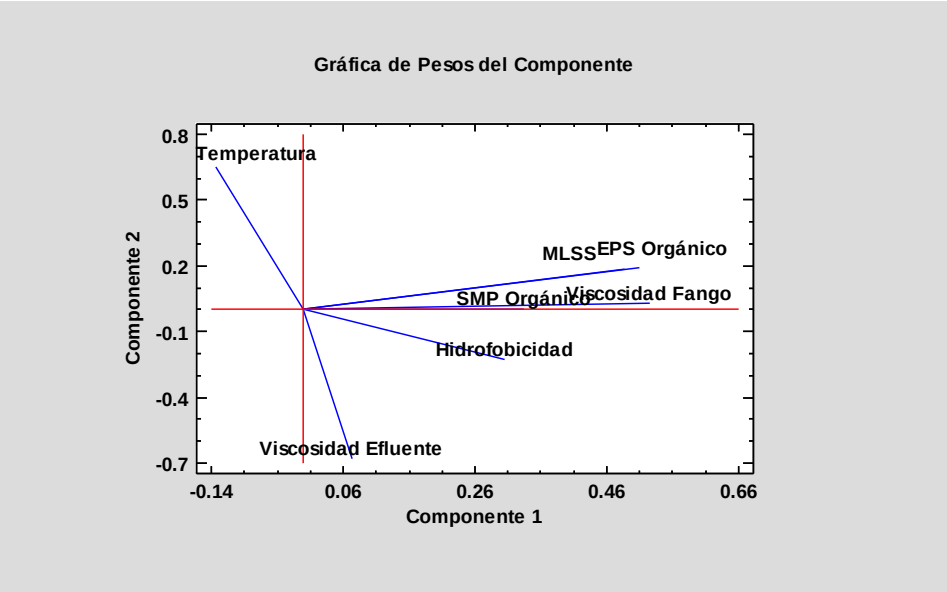
En este caso, 2 componentes se han extraído puesto que 2 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1,0. En conjunto ellos explican 70,51 % de la variabilidad en los datos originales.

Tabla LXXV. **Pesos de los componentes en el módulo C**

| | Variable. 1 | Variable. 2 |
|---|---|---|
| Hidrofobicidad | 0,304224 | -0,225195 |
| SMP orgánico | 0,334283 | 0,00553564 |
| EPS orgánico | 0,486948 | 0,184569 |
| Temperatura | -0,133144 | 0,648999 |
| Viscosidad fango | 0,525099 | 0,0285635 |
| Viscosidad efluente | 0,0731788 | -0,675632 |
| MLSS | 0,509678 | 0,191566 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Vectores de componentes principales en el módulo C**




Fuente: elaboración propia, con Statgraphics XVII.

El componente uno, explica la relación que hay entre los MLSS, EPS, SMP, hidrofobicidad y viscosidad del fango. Sin embargo el aislamiento que la temperatura muestra en la componente dos demuestra que a mayor temperatura menor viscosidad se encontrará en el fango.

### 3.7.11. Análisis de componentes principales en el módulo Kubota

Se desarrolló un análisis de componentes principales en el módulo Kubota, para determinar la correlación que tenían las diferentes variables entre sí y así determinar variables dependientes e independientes.

Tabla LXXVI. **Valores de componentes principales en el módulo Kubota**

| Componente número | Eigenvalor | Porcentaje de Varianza | Porcentaje acumulado |
|---|---|---|---|
| 1 | 2,65532 | 37,933 | 37,933 |
| 2 | 1,81639 | 25,948 | 63,882 |
| 3 | 1,00585 | 14,369 | 78,251 |
| 4 | 0,677325 | 9,676 | 87,927 |
| 5 | 0,549607 | 7,852 | 95,778 |
| 6 | 0,173409 | 2,477 | 98,256 |
| 7 | 0,122102 | 1,744 | 100,000 |

Fuente: elaboración propia.

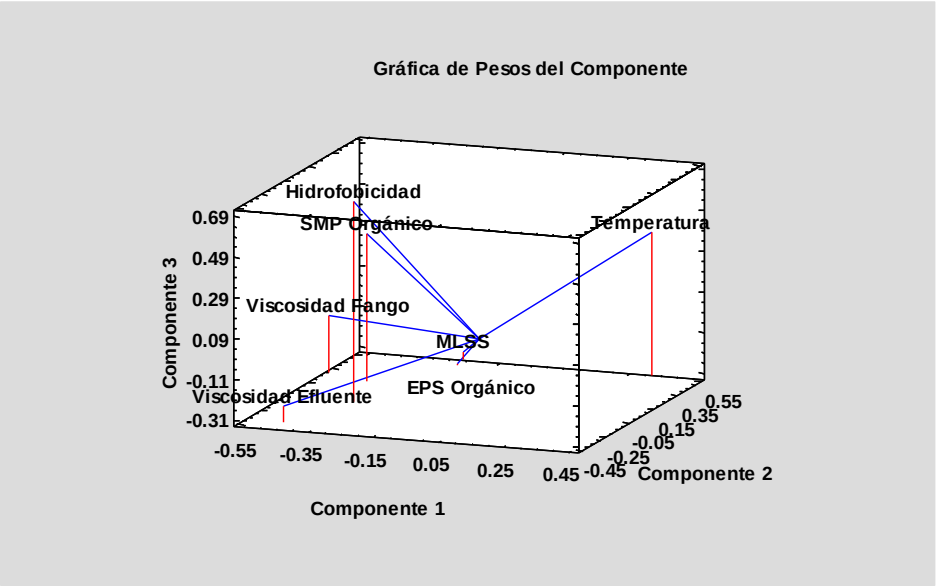
En este caso, 3 componentes se han extraído puesto que 3 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1,0. En conjunto ellos explican 78,251 % de la variabilidad en los datos originales.

Tabla LXXVII. **Pesos de los componentes en el módulo Kubota**

| | Componente 1 | Componente 2 | Componente 3 |
|---|---|---|---|
| Temperatura | 0,349614 | 0,494927 | 0,396303 |
| Hidrofobicidad | -0,343018 | -0,118356 | 0,668328 |
| SMP orgánico | -0,400309 | 0,151691 | 0,413561 |
| EPS orgánico | -0,228345 | 0,439716 | -0,302028 |
| Viscosidad fango | -0,546185 | 0,22466 | -0,0313744 |
| Viscosidad efluente | -0,437888 | -0,447388 | -0,2361 |
| MLSS | -0,240117 | 0,523498 | -0,278029 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Vectores de componentes principales en el módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia, con Statgraphics XVII.

La componente número tres muestra una relación directamente proporcional de la hidrofobicidad con los SMP. Por otro lado, de acuerdo a la gráfica el comportamiento de un ascenso de temperatura explica la disminución de la viscosidad del efluente y viscosidad del fango; los datos de los sólidos totales y el EPS presentan una fuerte correlación.

### 3.7.12. Análisis estadístico para el tamaño de partículas de los módulos A, B, C y Kubota

La cantidad de partículas en función de su tamaño se mostraba variable en cada uno de los módulos, es por ello que se sometió a un análisis estadístico, para determinar su grado de variabilidad.

Tabla LXXVIII. **Resumen estadístico del tamaño de partículas**

| | Recuento | Promedio | Desviación estándar | Coeficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango | Sesgo estandarizado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 99 | 1,0101 | 1,65365 | 163,712% | 0 | 5,54901 | 5,54901 | 6,9112 |
| B | 99 | 1,0101 | 1,58151 | 156,57% | 0 | 5,4025 | 5,4025 | 6,9757 |
| C | 99 | 1,0101 | 1,59968 | 158,368% | 0 | 5,5376 | 5,5376 | 6,95855 |
| Kubota | 99 | 1,0101 | 1,71269 | 169,556% | 0 | 6,01754 | 6,01754 | 7,65177 |
| Total | 396 | 1,0101 | 1,63145 | 161,514% | 0 | 6,01754 | 6,01754 | 14,1533 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIX. **Curtosis estandarizada del tamaño de partículas**

| | Curtosis estandarizada |
|---|---|
| A | 3,02712 |
| B | 3,36314 |
| C | 3,35231 |
| Kubota | 4,59084 |
| Total | 6,89529 |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sesgo y la curtosis estandarizada no están dentro del rango de -2 a +2 en todos los módulos, no existe normalidad en los datos obtenidos, por tanto debe realizarse una prueba Kruskal-Wallis, la cual compara las medianas en vez de las medias.

Tabla LXXX. **Prueba de Kruskal-Wallis del tamaño de partículas**

| | Tamaño de muestra | Rango promedio |
|---|---|---|
| A | 99 | 196,636 |
| B | 99 | 201,576 |
| C | 99 | 200,242 |
| Kubota | 99 | 195,545 |
| Estadístico = 0.196488 | | Valor P = 0.9781 |

Fuente: elaboración propia.

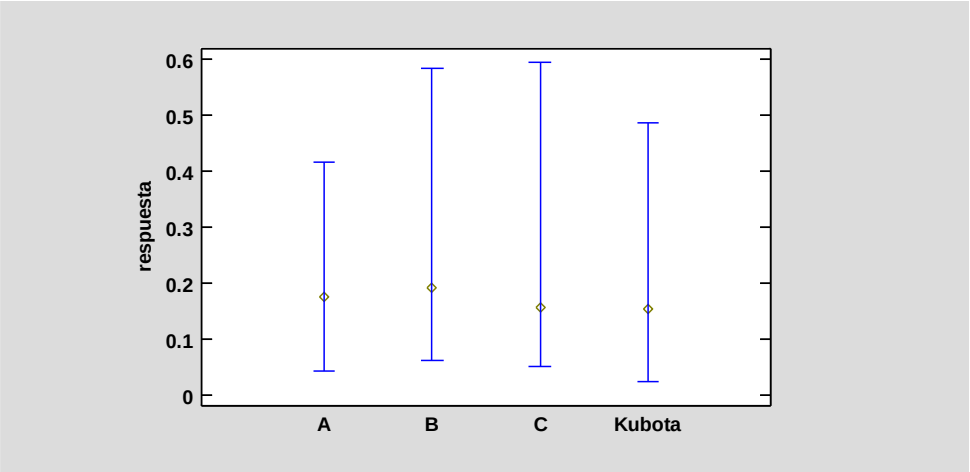
Puesto que el valor P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla LXXXI. **Comparación de pares del tamaño de partículas**

| Contraste | Sig. | Diferencia | +/- Límites |
|---|---|---|---|
| A – B | | -4,93939 | 42,9208 |
| A – C | | -3,60606 | 42,9208 |
| A - Kubota | | 1,09091 | 42,9208 |
| B – C | | 1,33333 | 42,9208 |
| B - Kubota | | 6,0303 | 42,9208 |
| C - Kubota | | 4,69697 | 42,9208 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Medianas y 95 % de Fisher LSD del tamaño de partículas**



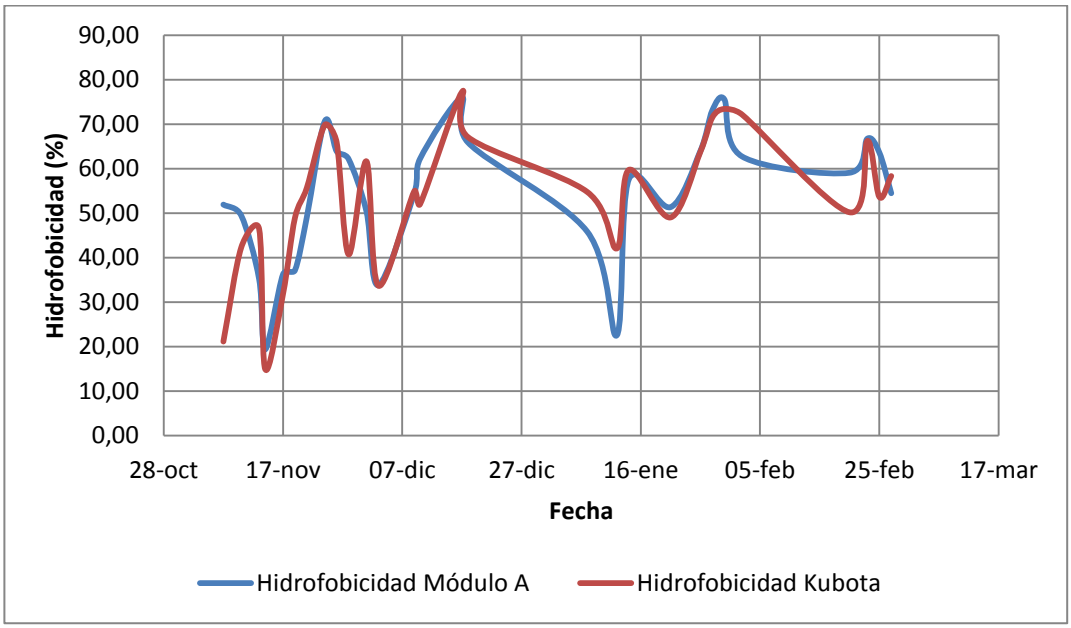

Fuente: elaboración propia.

# 4. RESULTADOS

## 4.1. Hidrofobicidad relativa

La evaluación de la hidrofobicidad en los lodos activos se realizó por el método de adhesión bacteriana a hidrocarbonos (BATH); a continuación se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, hubo 2 períodos en los que no se tomaron mediciones, las cuales comprenden del 18 de diciembre del 2014 al 07 de enero del 2015 y del 02 de febrero al 20 de febrero del 2015.

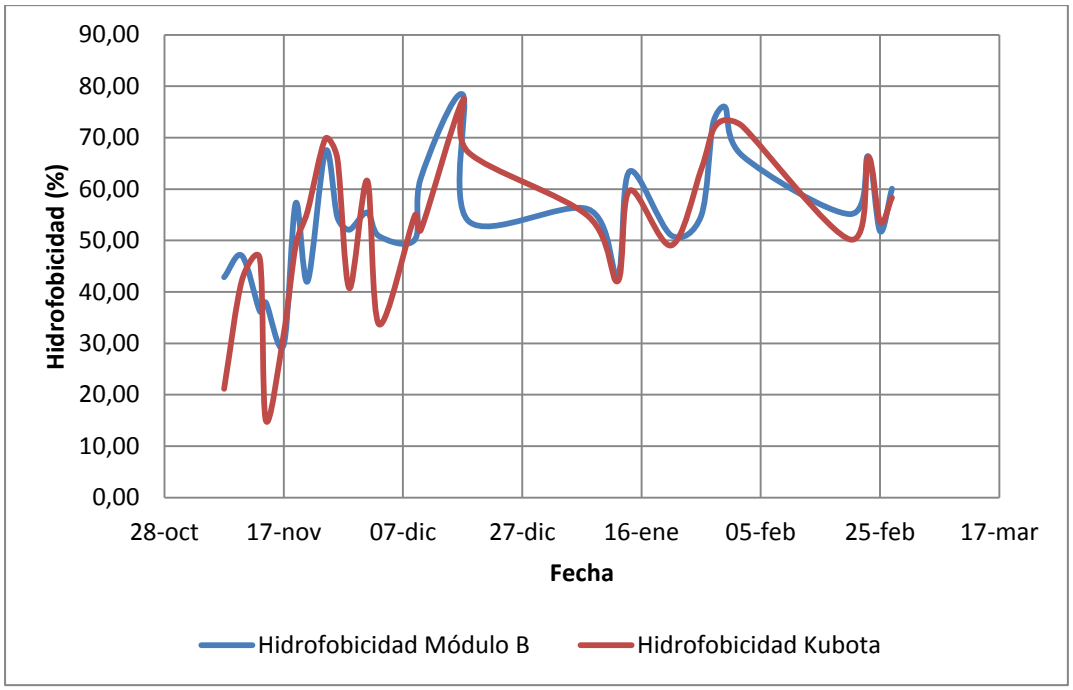
Figura 33. **Gráfico de hidrofobicidad en el módulo A y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

La figura 33 muestra la variación de la hidrofobicidad en el módulo A respecto al módulo control o Kubota; la primera medición muestra que teniendo el módulo control una hidrofobicidad de 21,15 %. A muestra en contraposición una alta hidrofobicidad siendo ésta de 51,92 %, sin embargo a partir del 13 de noviembre en adelante puede apreciarse un comportamiento similar en ambas medidas, se aprecia que en el periodo del 18 de diciembre al 7 de enero, la hidrofobicidad desciende considerablemente, probablemente se deba a la propagación de bacterias filamentosas y a las bajas temperaturas registradas; debe tomarse en cuenta que en el periodo del 02 al 20 de febrero no hubo mediciones, debido a que la planta no estuvo en funcionamiento por problemas técnicos.

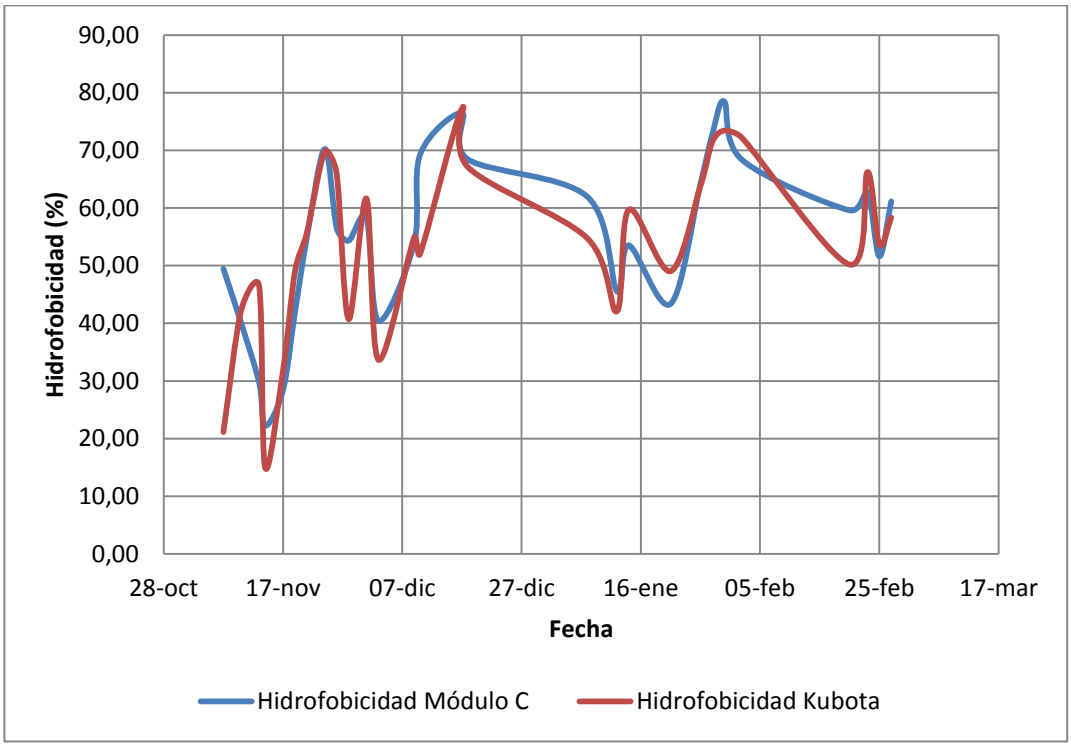
Figura 34. **Gráfico de hidrofobicidad en el módulo B y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

La figura 34 indica que el comportamiento de los datos del módulo B son congruentes con los datos del módulo control; cabe mencionar que los valores no son similares entre sí, sin embargo la tendencia de los datos es la misma a través del tiempo, lo cual se ve respaldado por el análisis estadístico realizado, en el cual no se encuentra alguna diferencia estadísticamente significativa entre los valores.

Figura 35. **Gráfico de hidrofobicidad en el módulo C y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

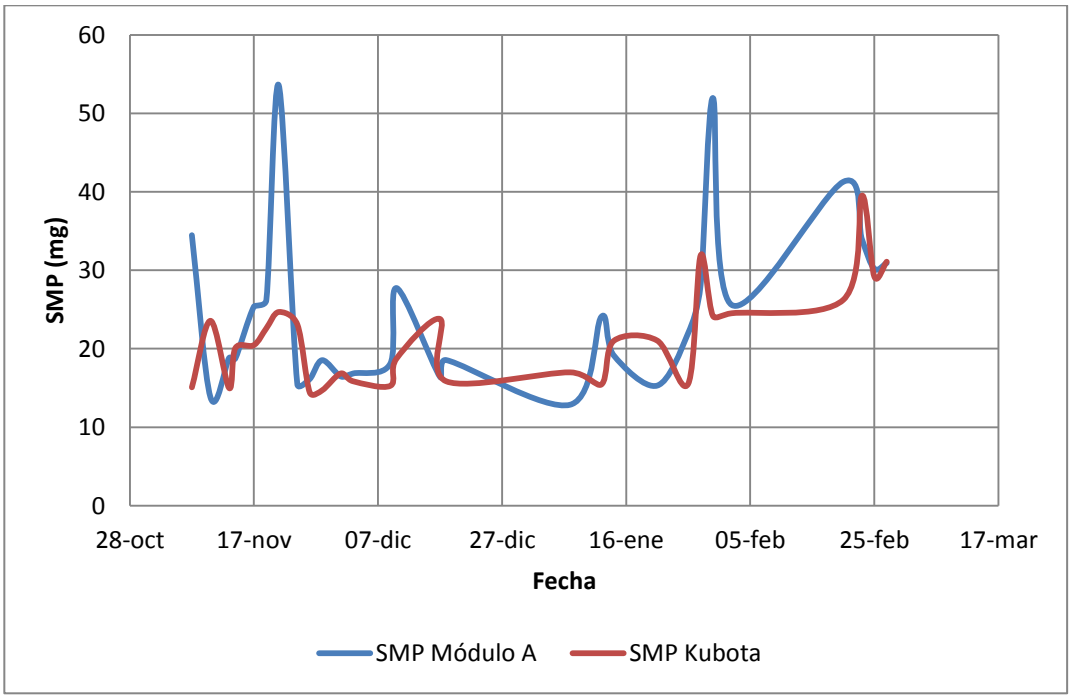
Las primeras muestras analizadas revelan que la hidrofobicidad relativa en el módulo C y el módulo control no tenían una relación directamente proporcional, tal como lo muestra la figura 35. Sin embargo, la tendencia se

percibe mejor a partir del 17 de noviembre. El dato mínimo obtenido fue de 22,22 % y un máximo de 78,47 % para el módulo C, y para el módulo control fue de 15 % y un máximo de 73,42 %.

## 4.2. Productos microbianos solubles (SMP)

Los productos microbianos solubles (SMP) están definidos como componentes celulares que son liberados durante el metabolismo del sustrato y la lisis celular, a través de un análisis de carbono orgánico total se reconoció el valor de este parámetro, el cual tuvo no tenía una variación significativamente estadística en relación con el módulo control y los módulos evaluados.

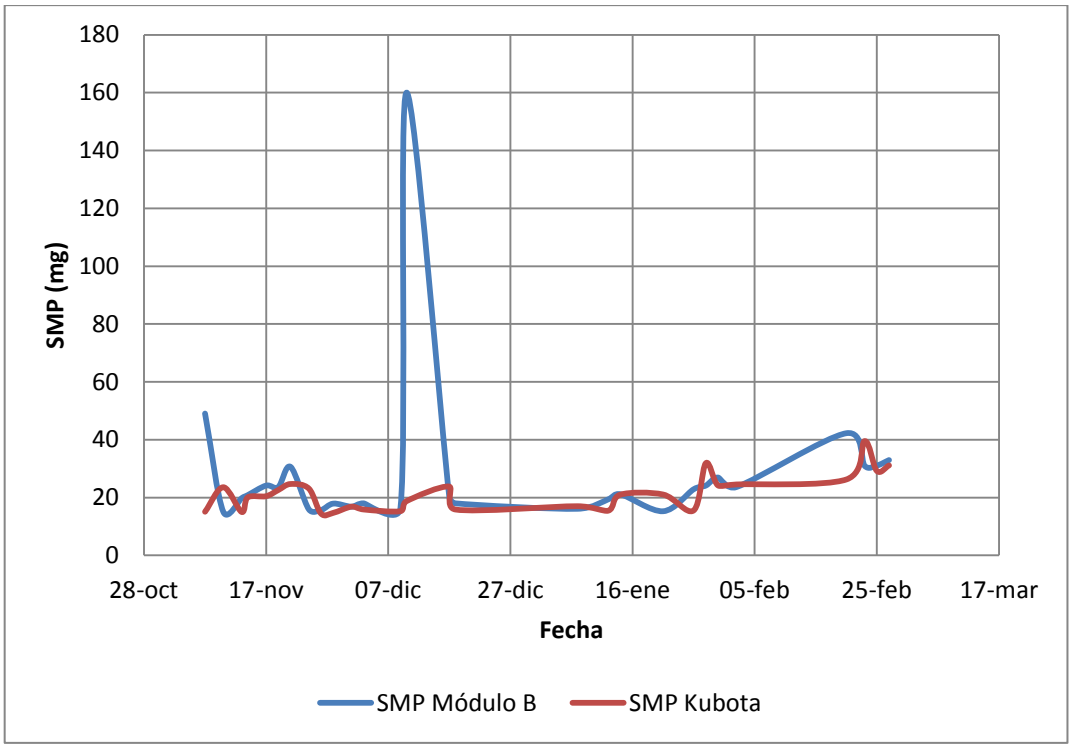
Figura 36. **Gráfico de productos microbianos solubles en el módulo A y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

Los valores del módulo control en el período del 7 de noviembre hasta el 26 de enero están dentro de un rango de 15 a 25 mg, mientras que después existe una leve subida de cantidad de SMP en los fangos. Por otro lado, del módulo A se obtienen datos en los que los que se puede apreciar máximos y mínimos pronunciados; puede apreciarse en la figura 36 que existen dos máximos que no poseen un comportamiento al módulo control, quizás se deba a que la recolección de fango es aleatoria, es decir no existe una altura estándar para recolectarla. En términos estadísticos, dichos datos son muy dispersos para la tendencia que la variable muestra a través del tiempo, por lo que no presentan una variación significativa.

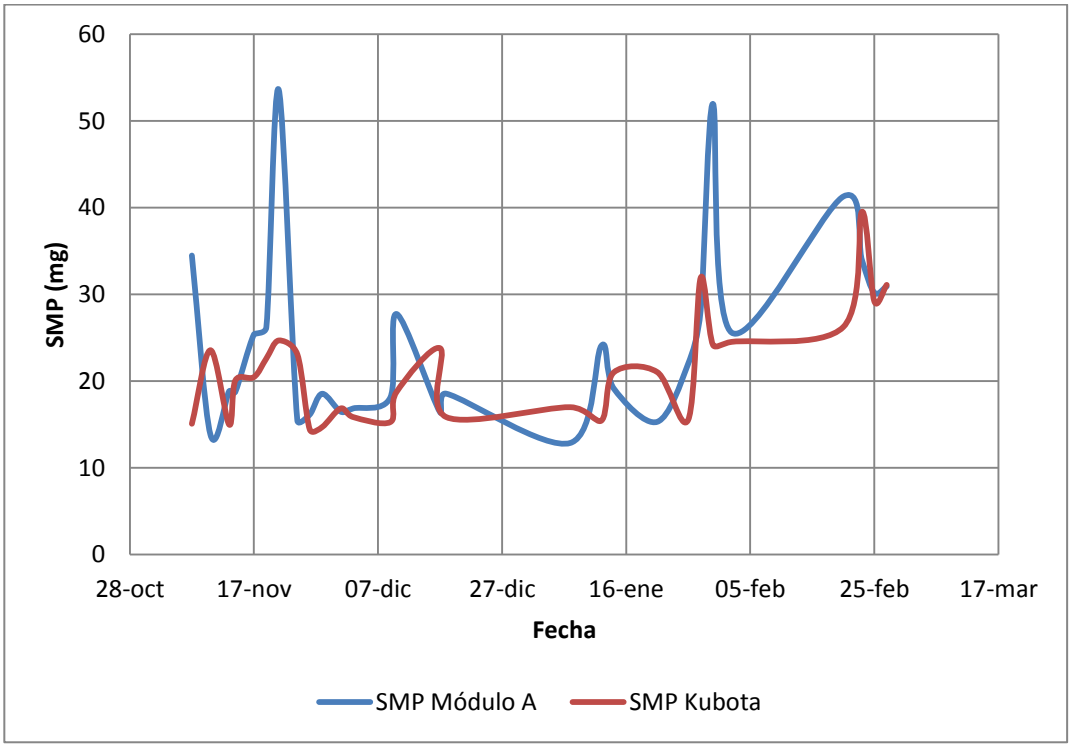
Figura 37. **Gráfico de productos microbianos solubles en el módulo B y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

En la figura 37 el SMP del módulo control y el módulo B muestran una tendencia similar, a excepción de un máximo de 160 mg que fue registrado el 10 de diciembre para el módulo B, puede atribuirse a un error aleatorio en la toma de la muestra, ya que parece ser un dato muy disperso respecto de la muestra en general. Los datos se encuentran en un rango de 15 a 25 mg, sin embargo, después del 20 de febrero esta tendencia cambia debido a que los valores obtenidos son mayores.

Figura 38. **Gráfico de productos microbianos solubles en el módulo C y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

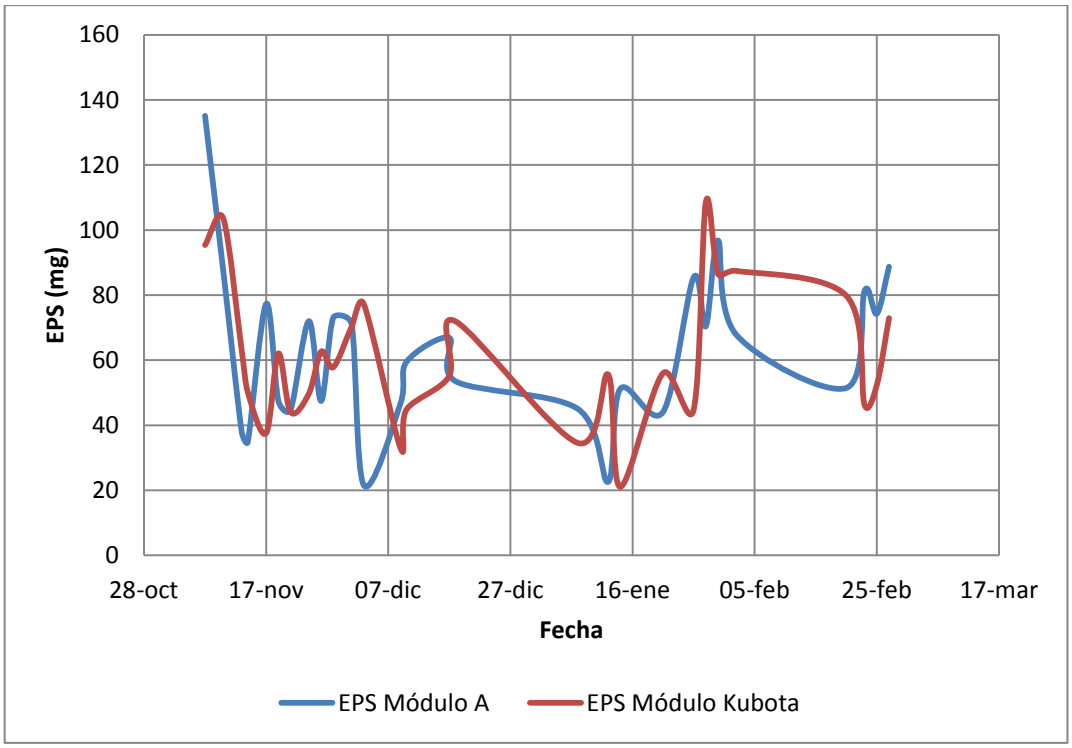
La cantidad de SMP en los fangos del módulo C, muestra valores similares al módulo control, en la figura 38 se aprecian tres valores máximos

que llaman la atención debido a lo disperso que pueden estar de la tendencia de la muestra, sin embargo al realizar el análisis estadístico se demuestra que no hay variación estadísticamente significativa.

## 4.3. Productos solubles extracelulares (EPS)

Los productos solubles extracelulares (EPS) están cercanamente relacionados, los EPS tienen origen biológico, participan en la formación de agregados microbianos; es por ello que el rango de valores obtenidos es considerablemente más alto que los obtenidos en los SMP.

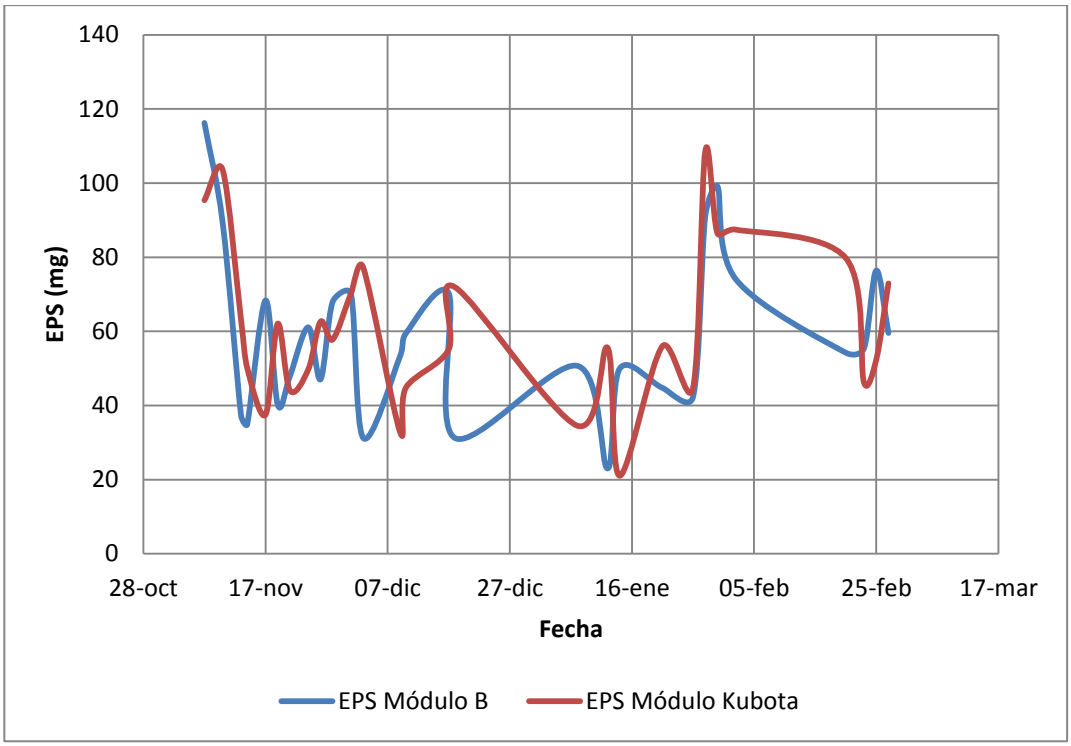
Figura 39. **Gráfico de productos solubles extracelulares en el módulo A y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

La gráfica de la figura 39 demuestra que el comportamiento de los datos obtenidos para el módulo A no es muy diferente que el propuesto por el módulo control. Desde el 7 al 10 de noviembre hay un descenso considerable de EPS en el módulo A, asimismo hay una relación directamente proporcional con los SMP de este módulo tal y como se muestra en la figura 38; desde el 14 de noviembre al 01 de diciembre se puede apreciar que los datos de ambos módulos no comprenden la misma tendencia, sino que muestran una tendencia inversamente proporcional, hay un leve descenso de EPS en los módulos durante el período del 7 al 21 de enero, sin embargo en el próximo período puede apreciarse un ascenso significativo en los valores obtenidos.

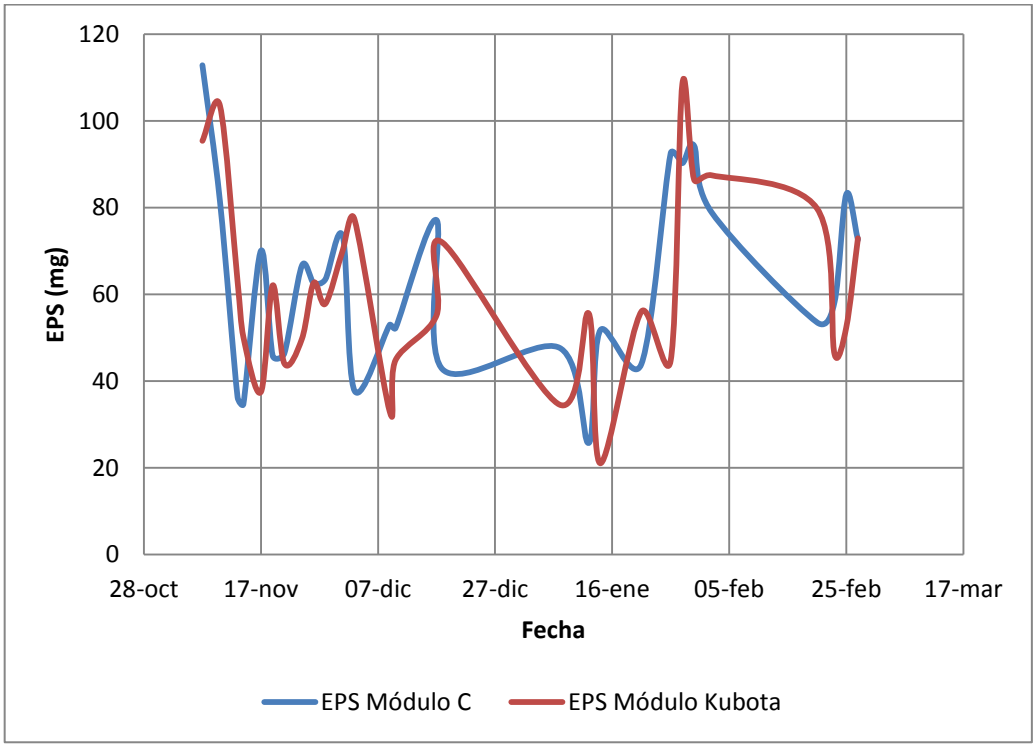
Figura 40. **Gráfico de productos solubles extracelulares en el módulo B y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de los EPS en la figura 40 es similar al que tenía el módulo A respecto del módulo Kubota en la gráfica anterior, se observa nuevamente que en la primera fase existe una tendencia mutuamente inversa en ambos módulos, tanto en el de evaluación como en el de control. No existen puntos dispersos que no puedan corresponder al comportamiento normal de los EPS, cabe mencionar que el rango de valores de los productos solubles extracelulares está entre 20 y 120 mg.

Figura 41. **Gráfico de productos solubles extracelulares en el módulo C y módulo Kubota**




Fuente: elaboración propia.

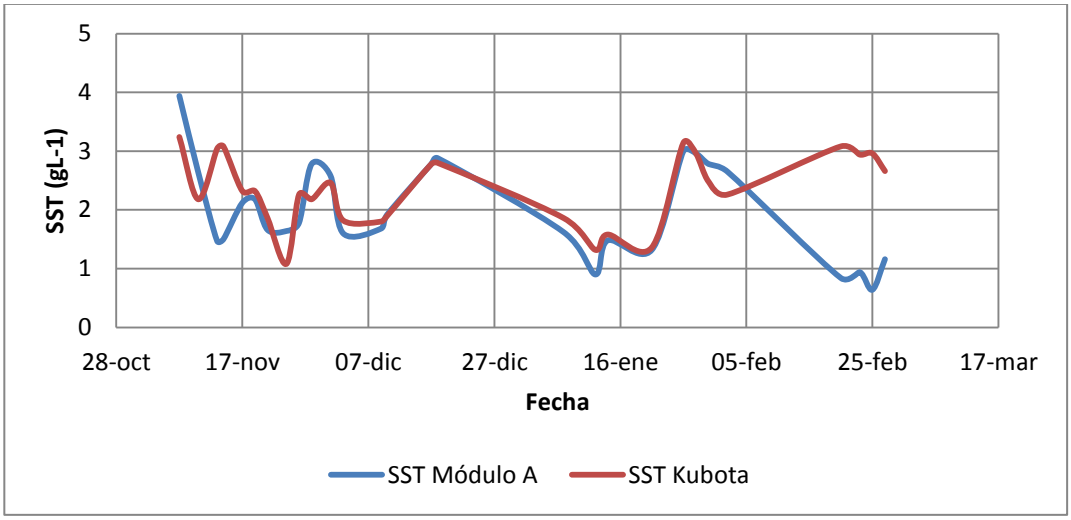
A diferencia de los otros módulos, en la primera fase se observa que la cantidad de EPS en el módulo C tiende a tener un comportamiento similar, al

llegar a la segunda fase (después del primer paro de planta) que comprende del 17 de diciembre al 7 de enero se encuentra una baja cantidad de EPS para ambos módulos. El 14 de enero se aprecia un resultado opuesto entre los módulos ya que el módulo control presenta 21.04 mg mientras que el módulo C, 51.6 mg; nótese que el valor de EPS del módulo en prueba el día 27 de febrero es cercano al valor que propone el módulo control.

## 4.4. Sólidos suspendidos totales

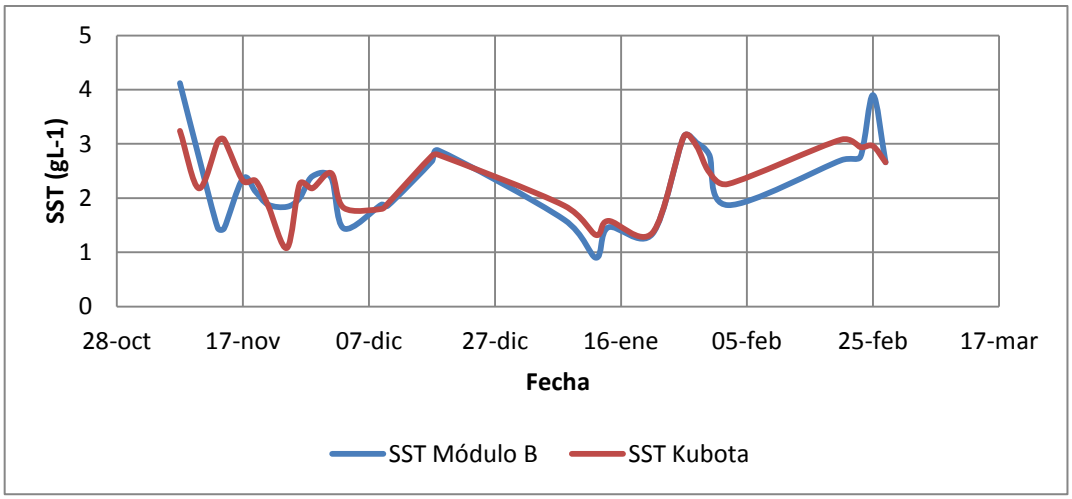
El comportamiento de los sólidos suspendidos totales dependerá de la carga orgánica que exista en el medio, es por ello que las gráficas muestran significativos altibajos a lo largo del periodo de experimentación, que usualmente coincide el módulo control con respecto a los módulos experimentales.

Figura 42. **Gráfico de sólidos suspendidos totales en los módulos A y Kubota**



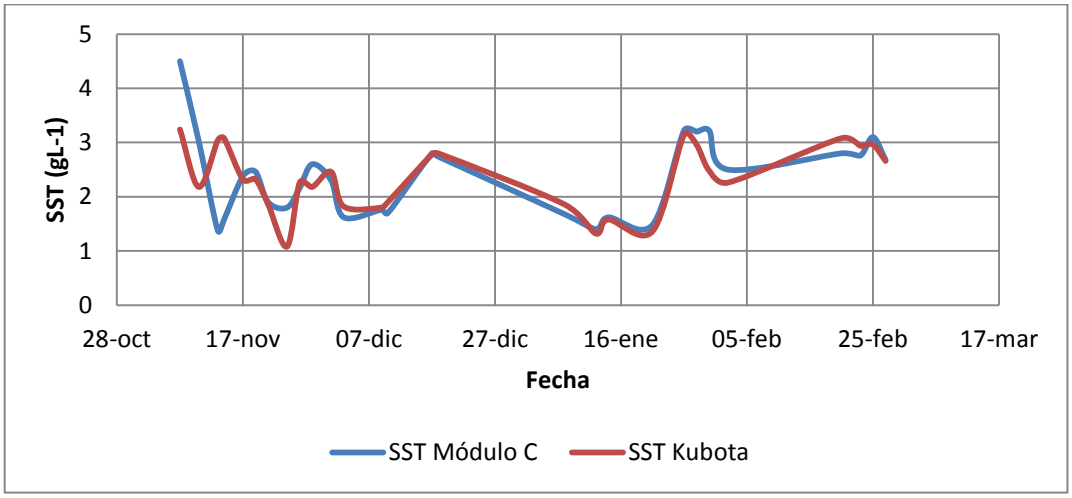

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Gráfico de sólidos suspendidos totales en los módulos B y Kubota**




Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Gráfico de sólidos suspendidos totales en los módulos C y Kubota**



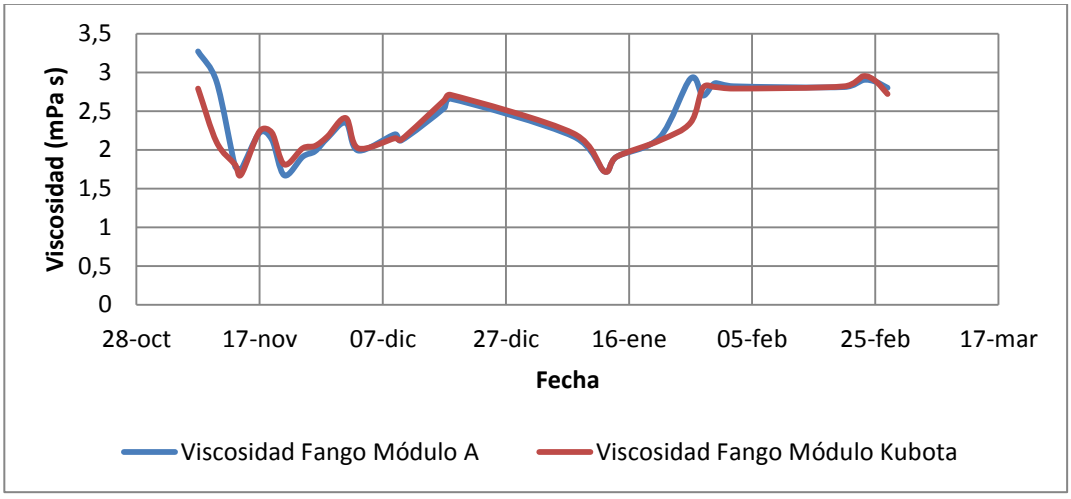

Fuente: elaboración propia.

Las figuras 43 y 44 muestran la evolución de los sólidos en suspensión totales (SST) en los módulos A, B C, respecto del módulo Kubota; en la primera fase de la gráficas se observa que siendo mayor o menor la cantidad de sólidos que hay en los módulo A, B, C, existe una tendencia a comportarse de la misma forma que el módulo control, sin embargo después del 9 de diciembre los valores para los módulos evaluados en función a Kubota son muy cercanos, por lo que no existe evidencia de que haya una diferencia estadísticamente significativa en ambas mediciones. A excepción de la primera muestra, el rango de SST está entre 1000 y 3500 mg/L.

## 4.5. Viscosidad del fango

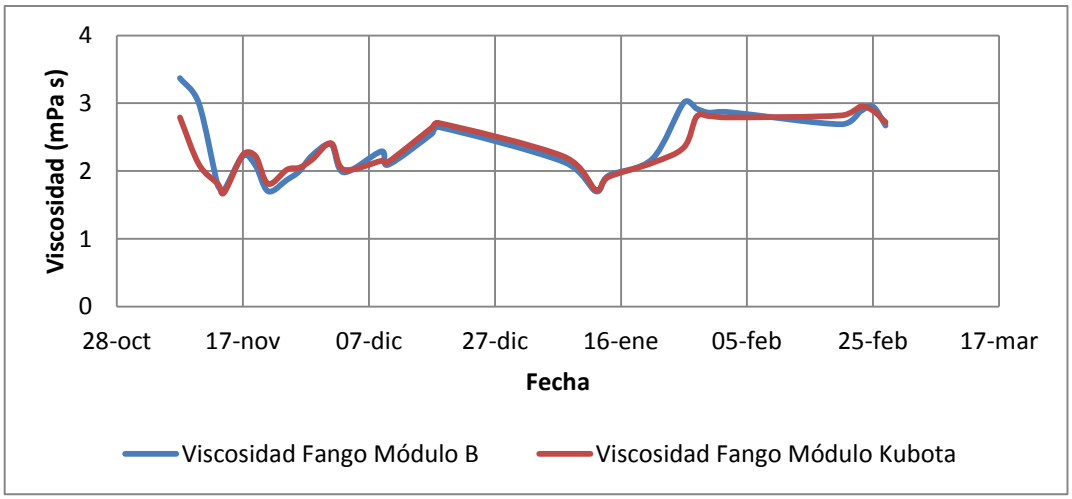
La viscosidad del fango en los módulos experimentales es similar a la del módulo experimental a lo largo del período de recolección de datos.

Figura 45. **Gráfico de viscosidad del fango en los módulos A y Kubota**



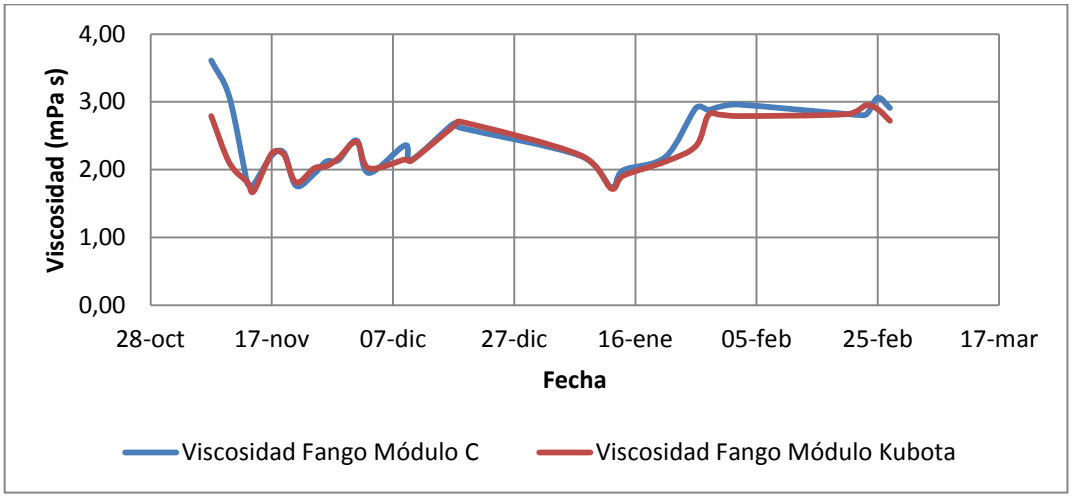

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Gráfico de viscosidad del fango en los módulos B y Kubota**




Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Gráfico de viscosidad del fango en los módulos C y Kubota**



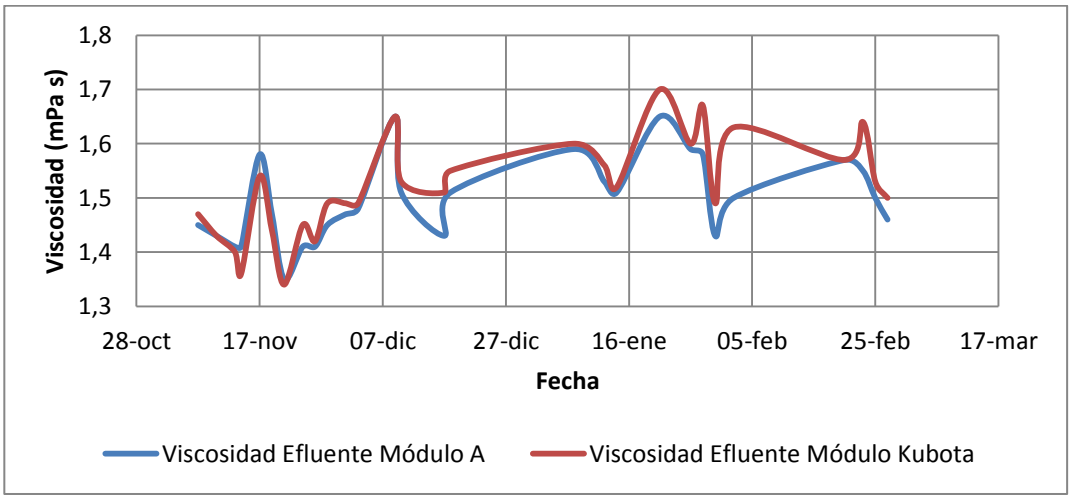

Fuente: elaboración propia.

Como ya se ha mencionado antes, la viscosidad aumenta exponencialmente con la concentración de MLSS de acuerdo con los reportes anteriores. Asimismo las figuras 45, 46 y 47 muestran que los módulos A, B, C y Kubota tienen una directa relación con la cantidad de sólidos suspendidos, ya que mientras más sólidos hay, así mismo aumenta la viscosidad del fango en los módulos. Sin embargo, el ultrasonido no parece tener ningún efecto directo sobre ello, ya que estadísticamente no hay alguna diferencia significativa.

## 4.6. Viscosidad del efluente

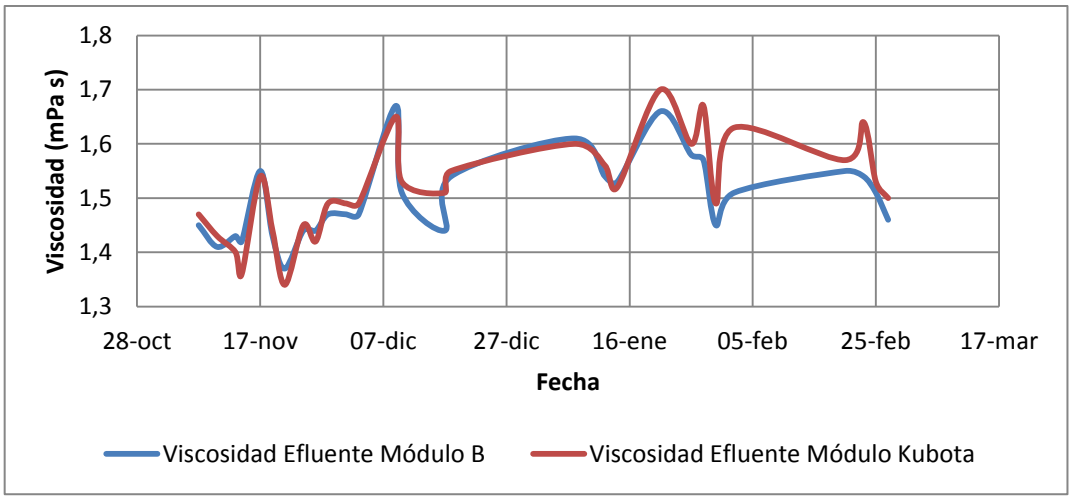
La viscosidad del efluente es menor a la viscosidad dentro de los módulos experimentales lógicamente, sin embargo muestran tendencias erráticas durante el lapso experimental.

Figura 48. **Gráfico de viscosidad del efluente en los módulos A y Kubota**



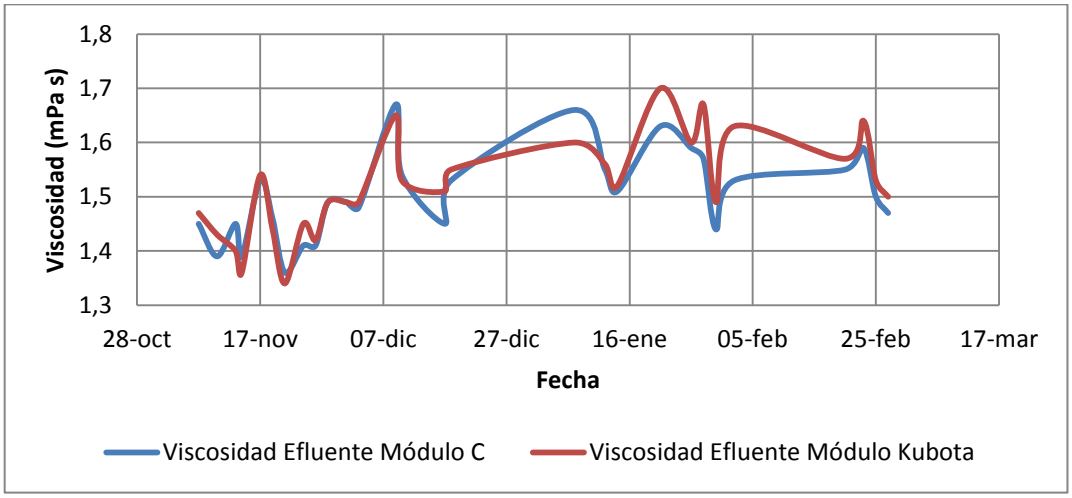

Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Gráfico de viscosidad del efluente en los módulos B y Kubota**




Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Gráfico de viscosidad del efluente en los módulos C y Kubota**



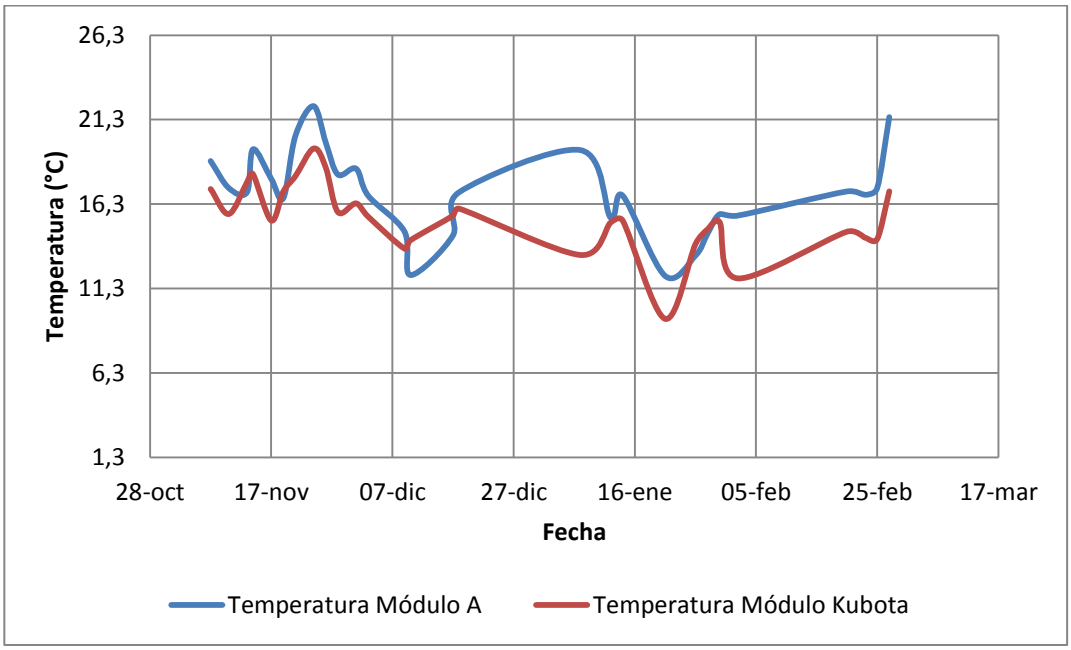

Fuente: elaboración propia.

La viscosidad del efluente en el módulos A, B y C respecto del módulo control es similar; sin embargo, no tiene un comportamiento tal como lo tenía la viscosidad del fango en relación con los MLSS, esto quizá se deba a que si la viscosidad del fango era directamente proporcional a la cantidad de sólidos en la muestra; al pasar el agua por una membrana, lógicamente gran parte de los sólidos quedan retenidos y la viscosidad del efluente no dependería de los MLSS.

## 4.7. Temperatura

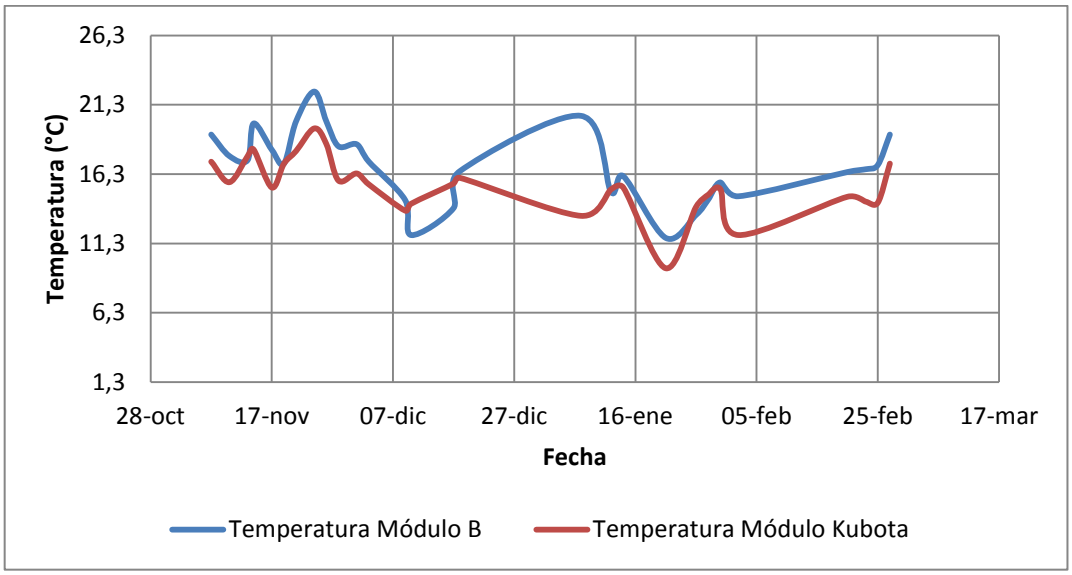
La temperatura se mantuvo en un rango entre 11.3 °C a 21.5 °C dentro de los módulos experimentales, sin embargo presentan notables diferencias respecto al módulo control.

Figura 51. **Gráfico de temperatura en los módulos A y Kubota**



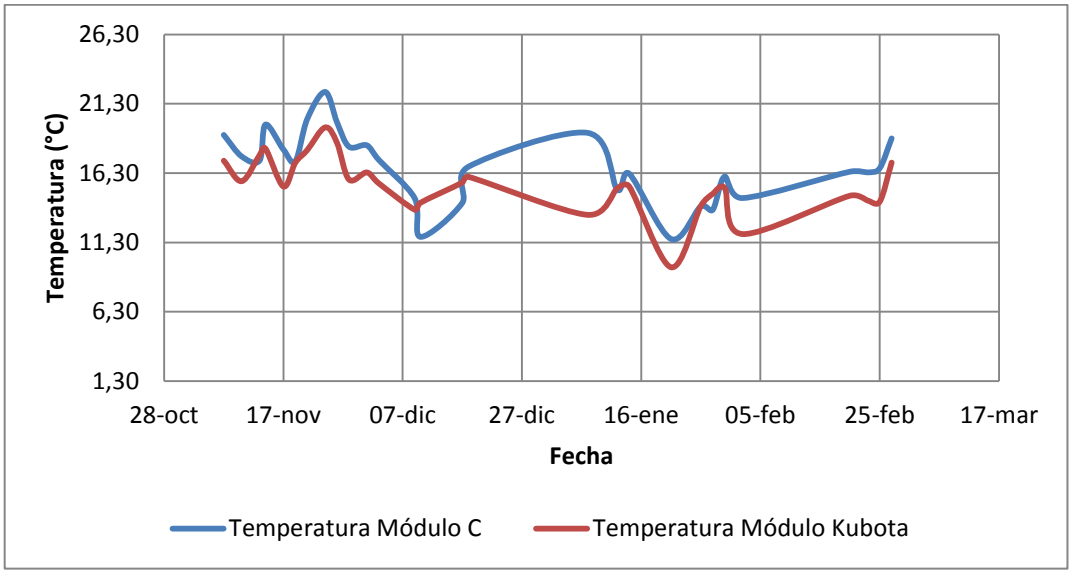

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Gráfico de temperatura en los módulos B y Kubota**




Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Gráfico de temperatura en los módulos C y Kubota**



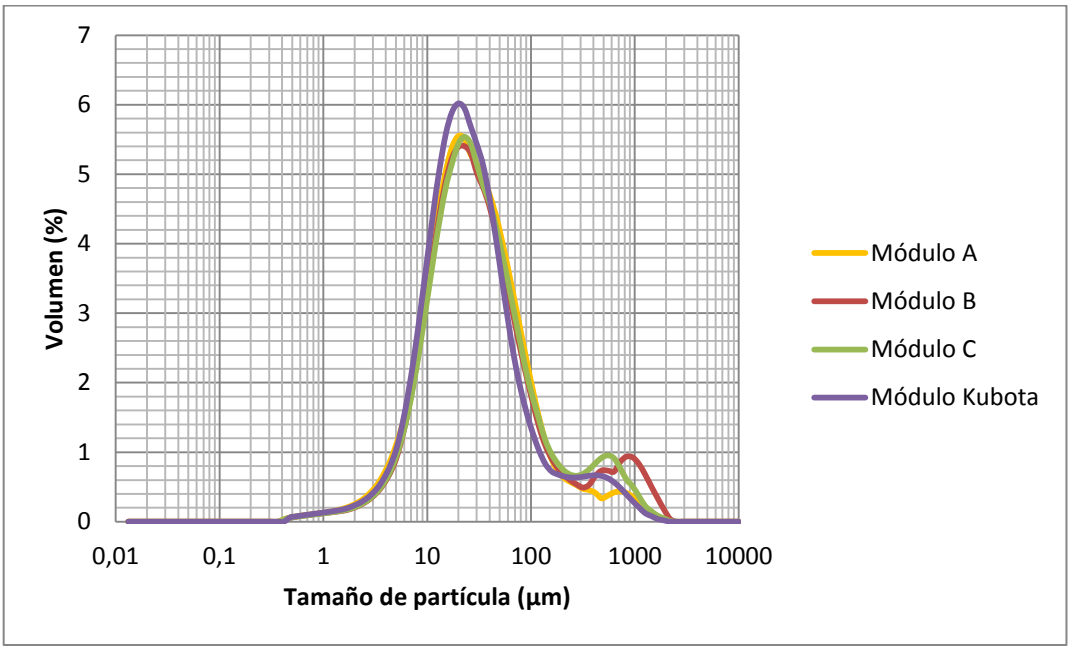

Fuente: elaboración propia.

Las temperaturas en los módulos A, B, C son similares, las tres gráficas demuestran un comportamiento similar respecto del módulo control, la temperatura tiende a ser mayor que la que está en Kubota, aproximadamente 1,5 a 2 °C. El incremento de la temperatura se debe a que la exposición a ultrasonido aumenta la energía cinética en el agua y por tanto una elevación de la temperatura, la cual es constante en los tres módulos, sin importar la frecuencia a la que se haya expuesto la muestra.

## 4.8. Tamaño de partículas

El tamaño de partículas en los módulos con ultrasonido mostró una leve diferencia respecto del módulo control tal como lo demuestra la siguiente gráfica.

Figura 54. **Tamaño de partículas en los módulos A, B, C y Kubota**

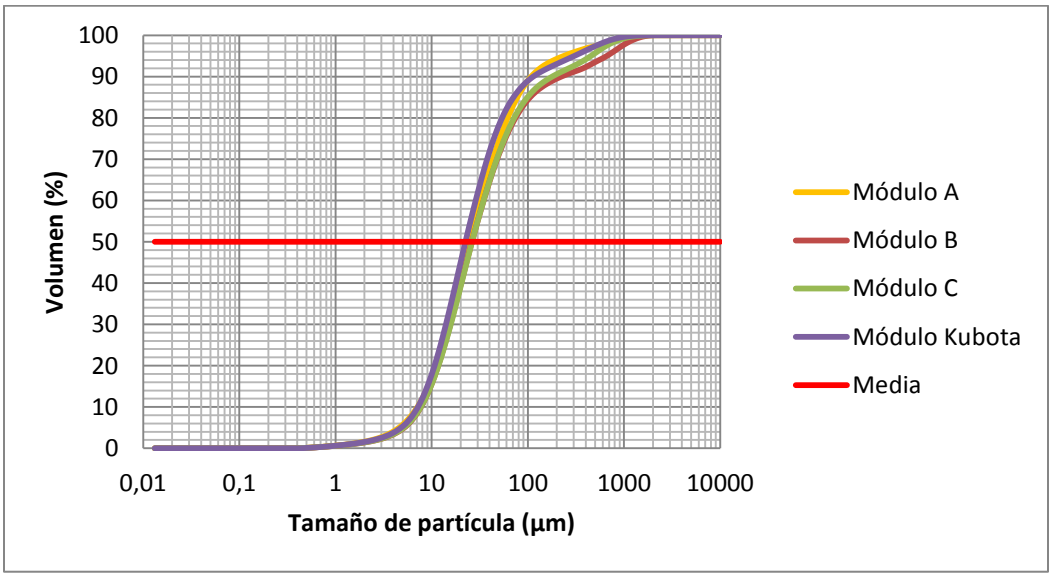



Fuente: elaboración propia.

Los ensayos de tamaño de partículas se realizaron en un analizador *Master Sizer* 2000; el tratamiento estadístico de datos ayudó a que se pudiese minimizar la cantidad de información recolectada, la figura 54 muestra las curvas de distribución de partículas por tamaño en porcentaje de volumen, tomando los datos más altos obtenidos por cada rango del tamaño de partícula, el módulo Kubota muestra que el 44,94 % está por debajo de 19.95 µm, empero el módulo A obtiene un 41,73 % de las partículas iguales o menores de 22,91 µm, mientras que el módulo B mantiene que un 44,84 % de sus partículas son menores o igual tamaño de 22,91 µm; por último el módulo C tiene como resultado final que el 44,61 % de sus partículas es menor o igual a 22,91 µm.

Sin embargo, el módulo B presenta una mayor cantidad de partículas de tamaño entre 800 a 1100 µm.

Figura 55. **Porcentaje acumulado, tamaño de partículas en módulos A,B,C y Kubota**




Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la gráfica anterior, el 50 % de las partículas en los diferentes módulos se distribuyen de la siguiente manera: módulo Kubota = 22,91 µm, módulo A = 24,24 µm, módulo B = 26,31 µm, módulo C = 26,31 µm.

# 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

## 5.1. Tamaño de partículas

El tamaño de partícula en los fangos activos fue evaluado en un rango de 0,01 a 10000 µm. Como se muestra en la figura 54, la distribución del tamaño de partículas en los tres módulos en evaluación (A, B y C) es similar, mientras que el módulo control o Kubota muestra un ligero desplazamiento hacia la izquierda y una menor cantidad de partículas de mayor tamaño, el 50 % de sus partículas poseen un tamaño de 22,91 µm, mientras que el módulo A tiene una media de 24,24 µm, el módulo B tiene 26,31 µm, y el C presenta 26,31 µm, los cuales son valores mucho más bajos que los fangos activos de un proceso convencional (Bae, et al., 2005).

La granulometría de las partículas es directamente proporcional a los esfuerzos de corte y el tiempo de experimentación (Wisknivieski, et al., 1996).

Los flóculos de fangos activos son el resultado de interacciones fisicoquímicas entre microorganismos, partículas inorgánicas (silicatos, fosfatos de calcio y óxidos de hierro), polímeros exocelulares y cationes multivalentes (Wisknievski, et al., 1996), los cuales pueden ser desestructurados por la aireación en los módulos de membrana, ya que generalmente la intensidad de la aireación en los sistemas de reactores de membrana sumergida es mucho más alto que en procesos convencionales de fangos activos, debido a la necesidad de controlar el ensuciamiento de las mismas (Bae, et al., 2005).

La irradiación de ultrasonido en el agua produce diferentes fenómenos físicos que permiten eliminar las partículas acumuladas en la superficie de la membrana de poros pequeños.

Se percibe una mejora en las membranas con tamaño de poro menor que las partículas en el influente (Ng, et al., 2012), los módulos con ultrasonido tienen partículas generalmente más grandes que el módulo que no posee tratamiento ultrasonido, módulo Kubota, lo cual puede observarse en la distribución de partículas mayores a 300 µ; esta tendencia puede explicarse por el posible desprendimiento de EPS de la superficie de la membrana a causa del efecto ultrasónico. Sin embargo, estadísticamente dicha diferencia no es significativa, para ninguno de los módulos evaluados respecto del módulo Kubota, tampoco entre sí.

El tamaño de los coloides que están cerca de la superficie de la membrana influye en el efecto del ultrasonido. Con un tamaño promedio pequeño de la partícula, el campo ultrasónico puede promover suficiente movimiento cerca de la superficie de la membrana, causando así que las partículas se mantengan en suspensión (Kyllönen, et al., 2005), lo cual permite que el uso de ultrasonido en la limpieza de las membranas sea viable, evitando así la formación de la capa biológica de ensuciamiento.

## 5.2. Temperatura

El comportamiento de esta variable en los tres módulos evaluados con ultrasonido evaluados, demostró que la temperatura es mayor al aplicar ultrasonido, debido al aumento de energía cinética en el agua; en la literatura existe información acerca de los mecanismos y ventajas de que el influente tenga una temperatura alta, sin embargo no hay evidencia que relacione

directamente cómo la temperatura es afectada por el ultrasonido. De acuerdo con Mason y Lorimer (2010), se sabe que la temperatura afecta al umbral de cavitación. En general, se ha encontrado que el límite de este incrementa cuando la temperatura decae (Kyllönen, et al., 2005).

Desde el punto de vista de un proceso de limpieza, altas temperaturas promueven mayor difusión, altas solubilidades, incremento del número de Reynolds y el descenso de la viscosidad (Kyllönen, et al., 2005); por tanto si la temperatura se ve afectada por el ultrasonido, asimismo se verá afectada la viscosidad, en beneficio de una mayor solubilidad en el medio, más movimiento de las partículas en suspensión produciendo que la formación de una capa de ensuciamiento se forme en un tiempo mayor que si tuviera una temperatura menor. De acuerdo con el análisis estadístico realizado, existe una diferencia significativa en función del módulo control empero a escala industrial, dicha diferencia sería insignificante en comparación.

La limpieza por ultrasonido, es causada principalmente por la cavitación ultrasónica y la explosión de burbujas acústicamente excitadas. Un incremento en la temperatura de la solución promueve un incremento en la presión de vapor saturado in la burbuja, lo cual hace que descienda la intensidad de choque durante la explosión de la burbuja (Kyllönen, et al., 2005).

Sin embargo el módulo A tenía una frecuencia de 40 kHz, en el módulo B la frecuencia fue de 30 kHz y en el módulo C la frecuencia más baja durante la evaluación, 20 kHz; *a priori* no existe ninguna diferencia de temperatura, en función de la frecuencia aplicada, los datos demostraron que las ondas ultrasónicas en el rango de 20 a 40 kHz elevan la temperatura de 1,5 a 2 °C, es probable que mayores frecuencias puedan promover un cambio de temperatura más alto.

Según los análisis de componentes principales realizados a los distintos módulos, demuestra que hay una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la viscosidad del efluente, para la componente 2, no obstante en la relación entre la componente 1 y la componente 2 claramente indica que al aumentar la temperatura, la viscosidad del fango desciende. Aunque ambas variables no puedan explicar la varianza en una sola componente.

## 5.3. Hidrofobicidad

En varios estudios reportados la hidrofobicidad se ve afectada por características como el tamaño del poro de la membrana y la morfología; por tanto la correlación entre la hidrofobicidad y el ensuciamiento es difícil de comprobar (Le-Clech, et al., 2006), durante el período de evaluación, los módulos A, B, C y Kubota presentaron resultados distintos, el módulo A (40 kHz) obtuvo valores en la hidrofobicidad fluctuantes respecto de Kubota, de acuerdo con la figura 33, que muestran valores iguales o menores a los del módulo control, sin embargo tal diferencia no es significativa estadísticamente, por lo que se descarta la posibilidad de que la aplicación de ultrasonido afecte directamente a este parámetro.

Esto puede ser debido al crecimiento de bacterias filamentosas del género *nocardia,* la cual es bien conocida como una bacteria filamentosa promotora del ensuciamiento de membranas, debido a que excreta biosurfactantes hidrofóbicos para estabilizar la espuma generada (You, et al., 2009), el tipo de bacterias que hay en el influente depende de las características del mismo; sin embargo se ha demostrado que el género de los nocardioformes predomina en la planta donde esta investigación se realiza; ya que las características del influente a temperaturas entre 15 y 20 °C son principalmente responsables por

el crecimiento masivo de bacterias filamentosas (Parrada-Albarracín, et al., 2012)

La hidrofobicidad en los módulos subsecuentes, presentan comportamientos similares en función al módulo control, sin embargo el módulo C tiene valores ligeramente mayores a módulo Kubota aunque su divergencia no sea estadísticamente notable, los análisis de componentes principales demuestran que hay una correlación en los módulos A, B y C entre la hidrofobicidad y los SMP.

En los reactores de membrana sumergida, los lodos activos normalmente tienen importantes cantidades de EPS, por lo que se ha identificado que este es causante principal del ensuciamiento en membranas (Le-Clech, et al., 2006), no obstante el tratamiento con ultrasonido no afecta a la hidrofobicidad del fango activo.

## 5.4. EPS y SMP

Las características del fango están influenciadas entre sí; las mediciones de hidrofobicidad del fango y las soluciones de EPS han revelado que el descenso de la hidrofobicidad relativa de los EPS puede causar deterioro en el flóculo (Le-Clech, et al., 2006), así como el nivel de EPS y bacterias filamentosas tienen una influencia directa en la hidrofobicidad y potencial zeta del flóculo, es por ello que el exceso de bacterias filamentosas es el responsable del ensuciamiento severo en las membranas, resultando así en niveles altos de EPS, potenciales zetas bajos, figuras irregulares del flóculo y una alta hidrofobicidad (Wisknivieski, et al., 1996).

Algunos SMP pueden ser absorbidos por flóculos de fango activo, convirtiéndose así en EPS. El SMP puede significativamente promover el ensuciamiento por EPS. (Lin, et al., 2014), las gráficas muestran una comparación entre un módulo bajo ultrasonido y el módulo control, el caso del módulo A, la cantidad de SMP muestra dos picos importantes, que en el módulo control no se encuentran, lo cual evidencia la existencia de partículas microbianas solubles en el medio, que potencialmente pueden adherirse a los EPS.

En el primer periodo de evaluación se observa que en el EPS el comportamiento del módulo A respecto de Kubota es inverso, queriendo decir que mientras existe una cantidad baja de EPS en Kubota hay una cantidad alta en el módulo A, lo cual haría pensar que el ultrasonido promueve la adhesión de SMP a flóculos de fango activo, convirtiéndolos así en EPS. Sin embargo, solamente se habla de una tendencia, debido a que estadísticamente no existe alguna diferencia significativa en la producción de EPS entre los módulos, esto también ocurre en los módulos B y C.

Los análisis de componentes principales revelan que en el módulo A, B y C que existe una leve correlación proporcional entre los SMP y los EPS, ya que no corresponden en el mismo componente, por lo que no son variables independientes entre sí.

## 5.5. Viscosidad del fango y del efluente

La evaluación de la viscosidad es útil para verificar los efectos del ultrasonido sobre los fangos activos, así también esta variable como se ha mencionado antes, tiene una relación inversamente proporcional a la temperatura, mientras más alta es la temperatura, menor será la viscosidad y

mayor solubilidad habrá en el medio. La importancia de la viscosidad radica en que esta puede modificar el tamaño de las burbujas y repercutir en el movimiento a través de las fibras huecas en las membranas. El resultado de este fenómeno sería una gran tasa de ensuciamiento. Incrementar la viscosidad reduce la eficiencia de transferencia de masa del oxígeno y puede tener efectos negativos en el oxígeno disuelto (Le-Clech, et al.,2006).

La viscosidad del fango en el módulo A como lo muestra la Figura 45 tiene una tendencia a incrementar a través del tiempo, a pesar de que existen fluctuaciones importantes, la comparación del módulo en evaluación y el módulo Kubota demuestra que hay una relación proporcional entre ellas, sin embargo la viscosidad del efluente del módulo con una frecuencia de ultrasonido de 40 kHz (módulo A) resulta ser menor, debido a la variación de temperatura producido por el ultrasonido. Los valores asimismo, disminuyen, ya que la carga de materia orgánica disminuye considerablemente. El rango de viscosidad está entre 1.35 a 1.7 mPas.

El comportamiento de los módulos B y C sugieren que la tendencia a disminuir la viscosidad del fango persista; sin embargo, la información estadística demuestra que la diferencia que puede percibirse no es significativa, aunque haya una tendencia a haberla desde luego, tal como lo demostró Pham et al en su proyecto donde la viscosidad del fango decrece debido a un pretratamiento con ultrasonido (Pham, et al.,2008).

# CONCLUSIONES

1. Los parámetros de hidrofobicidad, sólidos suspendidos totales, productos microbianos solubles (SMP), sustancias poliméricas extracelulares (EPS), viscosidad de fango y efluente; y tamaño de partículas no presentaron diferencia estadísticamente significativa en los módulos con ultrasonido, respecto del módulo control.

2. La aplicación de ondas ultrasónicas en los módulos de membrana demostró que hay una elevación aproximadamente entre 1,5 °C a 2 °C en la temperatura de los fangos activos, debido al incremento de energía cinética en el medio.

3. Los módulos evaluados demuestran una notable cantidad de partículas de gran tamaño (mayores de 300 μm), por tanto el ultrasonido promueve la aglomeración de partículas pequeñas para formar flóculos de mayor tamaño, reduciendo así el riesgo de ensuciamiento biológico irreversible.

4. Las frecuencias utilizadas en los distintos módulos de membranas (20 kHz, 30 kHz, 40 kHz) exponen que no existe *a priori* una relación con el incremento de partículas de mayor tamaño.

5. Se demostró que el tratamiento con ultrasonido en la limpieza de membranas sumergidas no afecta las características físicas y químicas del fango activo.

# RECOMENDACIONES

1. Debido a que solamente se tomaron muestras durante un corto periodo, se recomienda dar seguimiento a la recolección y análisis de muestras para conocer el comportamiento de los parámetros evaluados a lo largo de un año completo.

2. La presión transmembrana (TMP) es un parámetro que no se midió durante esta investigación; sin embargo si se toma en cuenta dicho parámetro se podría conocer si la presión aplicada es un factor determinante en el ensuciamiento de las membranas.

3. Investigar acerca de otros factores que puedan influir en el crecimiento excesivo de bacterias filamentosas en aguas con alta carga orgánica, ya que la temperatura y el sustrato no son los únicos factores que promueven dicho crecimiento.

4. Realizar autopsias a las membranas caducas para conocer el potencial zeta que estas poseen al final de su tiempo de vida; esto para conocer cuantitativamente el efecto del ensuciamiento irreversible sobre la membrana.

# BIBLIOGRAFÍA


1. ARÉVALO, Juan. *Aplicación de biorreactores de membrana al agua residual urbana: consideraciones para la modificación de los parámetros del proceso.* Granada: Editorial de la Universidad de Granada, 2012. 150 p.

2. BAE, Tae-Hyun; TAK, Tae-Moon. *Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor. Corea del Sur: Elsevier, 2005. 160 p.*

3. BAKER, Richard. *Membrane technology and applications.* Chennai, India: Laserwords Private Limited, 2012. 575 p.

4. Centro Canario del Agua. *Introducción a los biorreactores de membrana.* s.l.: España: Fundación Centro Canario del Agua, 2003. 43 p.

5. JUDD, Simon; JUDD, Claire. *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment.* United Kingdom: Elsevier, 2006. 519 p.

6. LARA CAI, Ming et al. *Mechanisms for the enhancement of ultrafiltration and membrane.*Elsevier, 2010. 138 p.

7. LE-CLECH, Pierre. et al. *Fouling in membrane bioreactors uses in wastewater treatment.* Australia: Elsevier, 2006. 53 p.

8. LIN, Hongjun et al. *A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies.* Guanzhou, China: Elsevier, 2014.125 p.

9. LODERER, Charles. et al. *Dynamic filtration – ultrasonic cleaning in a continuous operated filtration process under submerged conditions.* s.l.: Elsevier, 2013. 81 p.

10. MASSELIN, Isabelle, et al. *Effect of sonication on polymeric membranes.* s.l.: Elsevier, 2001. 220 p.

11. MOLINA, Marisa Luisa. *Estudio de los procesos microbianos implicados en el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante biorreactores de membrana sumergida.* Granada, España : Editorial de la Universidad de Granada, 2007. 176 p.

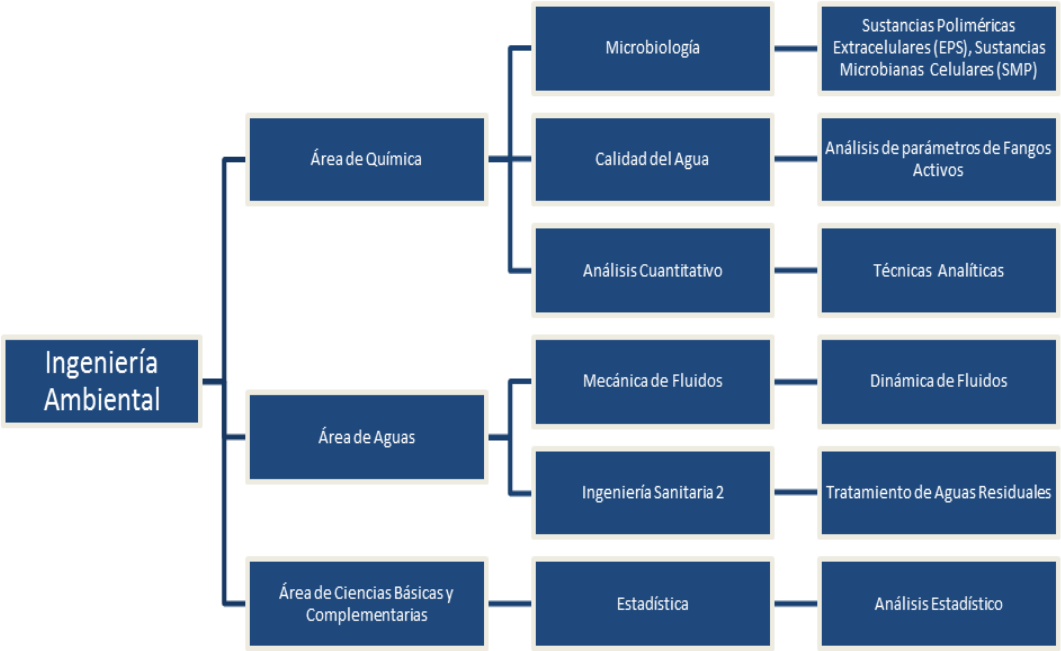
12. STEPHENSON, Tom. *Membrane Bioreactors for wastewater treatment.* s.l.: USA: IWA Publishing, 2000. 192 p.

13. WISKNIEVSKI, Carl. ; GRASMICK, Alexander. *Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling.* Francia: Elsevier, 1998. 411 p.

14. YOU, Son.Jum.; SUE, Walt Met. *Filamentous bacteria in a foaming membrane reactor.* Taiwan: Elsevier, 2009. 49 p.

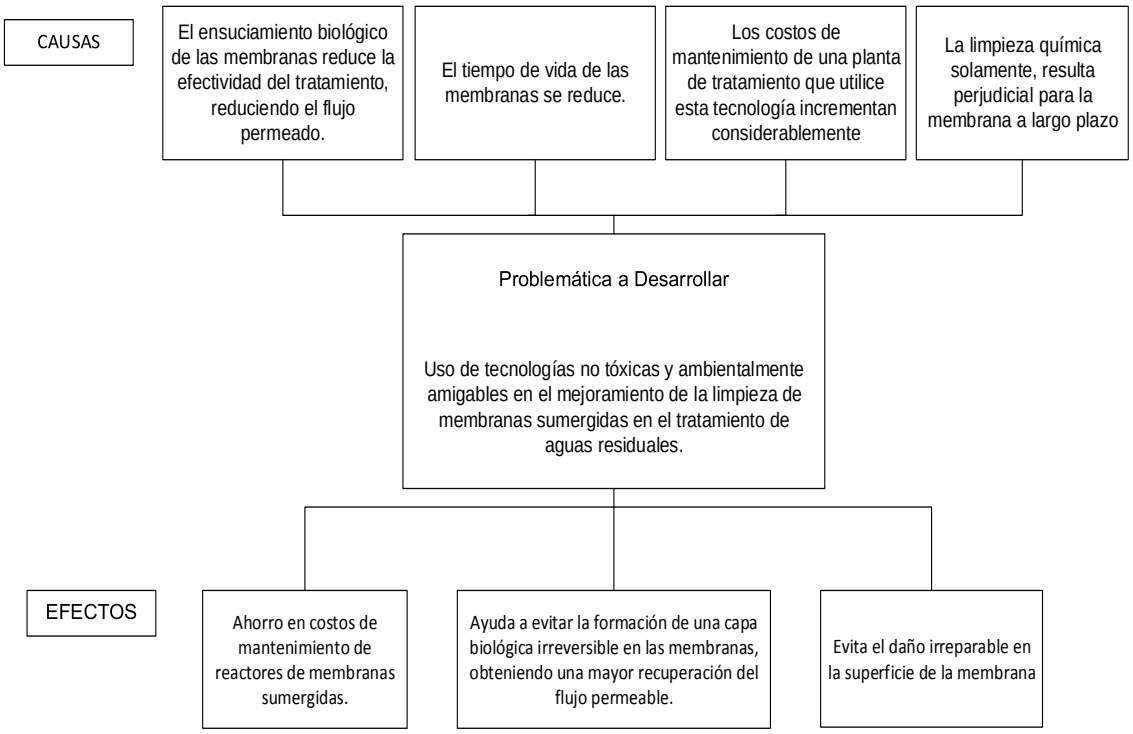
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Requisitos académicos




Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Árbol de problemas




Fuente: elaboración propia.

# ANEXOS

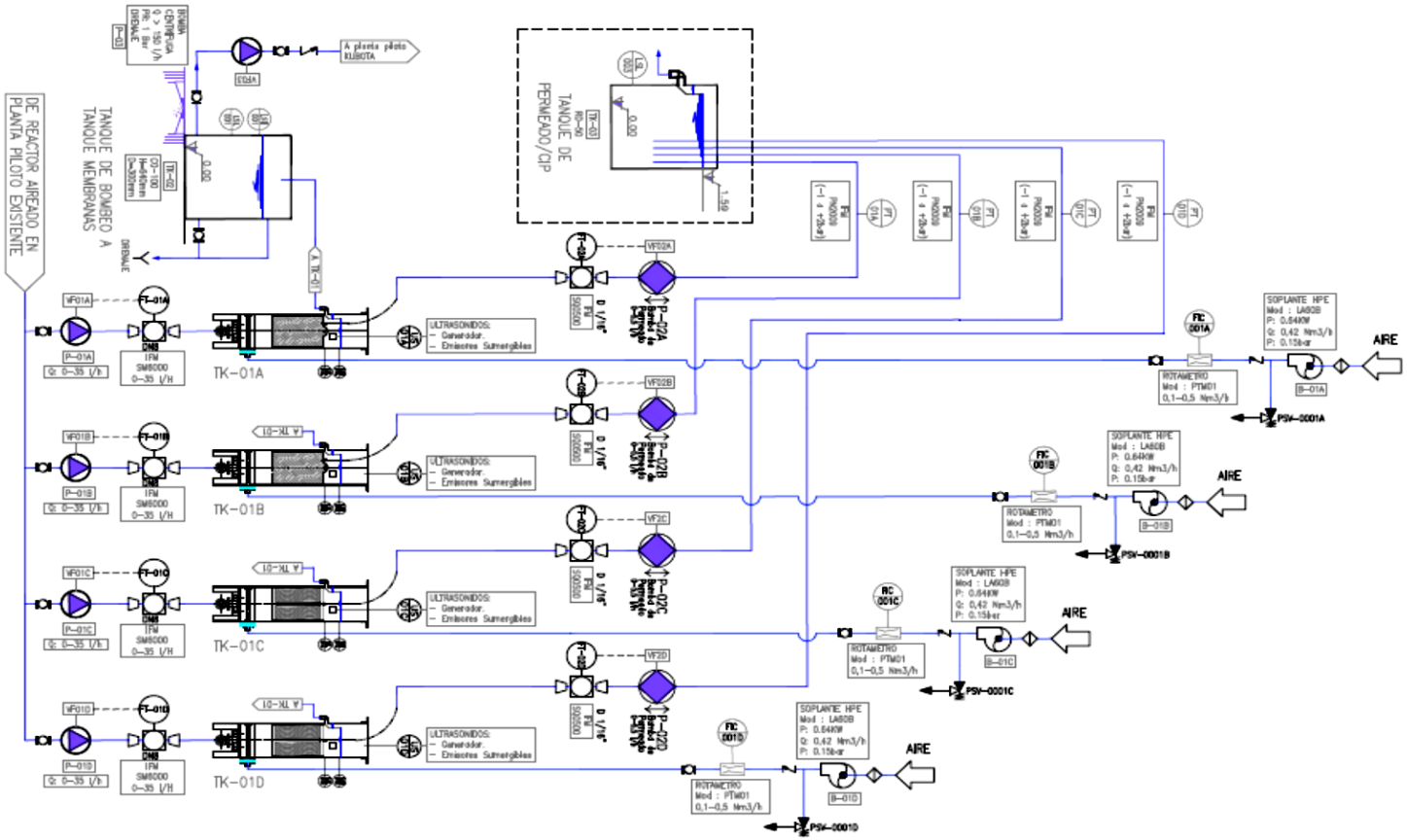
## Anexo 1. Descripción de la instalación experimental

Esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la estación depuradora de aguas residuales de Granada, EDAR-Sur (Churriana), en un sistema experimental que incluye 4 módulos a escala laboratorio que trabajan en paralelo y en los que es posible instalar tanto membranas de ultrafiltración de fibra hueca como membranas planas de microfiltración. El anexo 1a muestra una imagen general de dicho sistema y el anexo 1b su correspondiente diagrama de flujo.

### Anexo 1a. **Vista general de la instalación experimental**

Fuente: EDAR-Sur (Churriana) Granada, España.

Anexo 1b. **Diagrama de flujo de la instalación experimental**




Fuente: EDAR-Sur (Churriana) Granada, España.

Este sistema está conectado a una instalacion experimental de tamaño industrial de la cual toman el fango activo, asegurando así que el influente sea el mismo para los cuatro módulos experimentales.

Cada uno de los módulos está abierto por la parte superior para facilitar la colocación de las membranas y consiste en un depósito de acero inoxidable 316L con capacidad para aproximadamente 32 L.

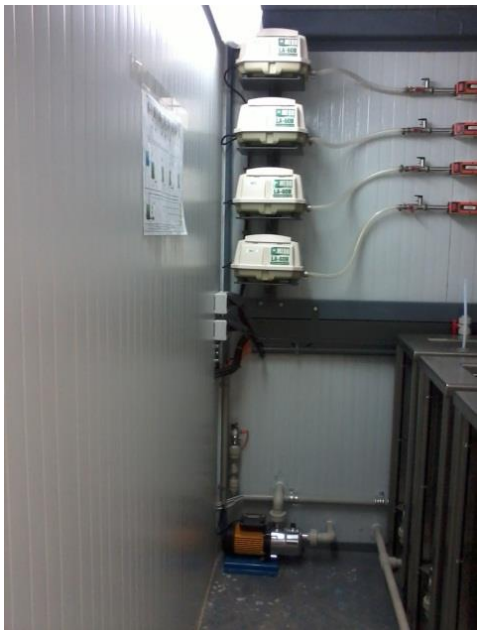
Este material fue seleccionado para la construcción de los depósitos debido a que la exposición a radiación ultrasónica requiere materiales metálicos. En el interior de cada módulo se introduce la membrana, ya sea de ultrafiltración o de microfiltración, y se sujeta gracias a un soporte construido especialmente para ello y del mismo material que el depósito. Cada una de las membranas está conectada al circuito común de permeado mediante colectores de conexión rápida. El anexo 1c muestra un detalle de la sujeción de la membrana en el interior de cada uno de los módulos.

Anexo 1c. **Detalle de la colocación de la membrana en el interior del módulo**

Fuente: EDAR-Sur (Churriana) Granada, España.

Por otro lado, la agitación en el interior de estos depósitos está asegurada por la recirculación de fango activo, por la aireación con burbuja gruesa y, en el caso de las membranas de microfiltración, por los contralavados de las membranas en los que se utiliza efluente. La aireación en cada uno de los módulos está suministrada por sendas soplantes de la marca MEDO, modelo LA-60B, capaces de suministrar hasta 60 L/min de aire.

Anexo 1d. **Detalle de los soplantes**



Fuente: EDAR-Sur (Churriana) Granada, España.

Cada uno de los módulos está dotado de un generador de ultrasonidos de hasta 2000 W de potencia acústica que funcionan a distintas frecuencias: 20, 30 y 40 kHz, a excepción del módulo control. Estos generadores tienen un circuito interno muy robusto que garantiza el uso de la frecuencia de resonancia durante la operación.

Anexo 1e. **Generadores de ultrasonidos**

Fuente: EDAR-Sur (Churriana) Granada, España.

Cada uno de los módulos dispone de dos placas desmontables de transductores piezoeléctricos que transformaran la senal electrica en mecanica. Estas placas están fijadas mediante pernos de 8 mm y colocadas en posición vertical orientada con el fin de evitar la anulación de las ondas entre sí por acoplamiento. Las dimensiones de cada una de estas placas son 240 x 360 x 3 cm (largo x alto x ancho), lo que permite asegurar que toda la superficie de la membrana está dentro de la zona de cavitación activa, dando lugar a una distribución homogénea de los ultrasonidos.

Anexo 1f. **Detalle de la placa de transductores piezoeléctricos**

Fuente: EDAR-Sur (Churriana) Granada, España.

Tanto la alimentación a los módulos de membranas como la salida de permeados se lleva a cabo mediante bombas peristálticas marca ESPA, modelos XHM, construidas también en acero inoxidable 316L y elastómeros de EPDM.

Las primeras tienen 2 rodillos, mientras que las segundas son reversibles y disponen de 3 rodillos para homogeneizar el caudal. Además, a la salida de cada bomba peristaltica se han incorporado amortiguadores de pulsaciones estaticos para fluidos, de construccion lineal y fabricados en acero inoxidable, para convertir en caudal constante un caudal pulsante, lo que permite disminuir la pulsación del fluido y asegurar el correcto funcionamiento de accesorios y sensores tales como manómetros, caudalimetros, rotámetros, entre otros.

Anexo 1g. **Bombas peristálticas de alimentación y permeado**

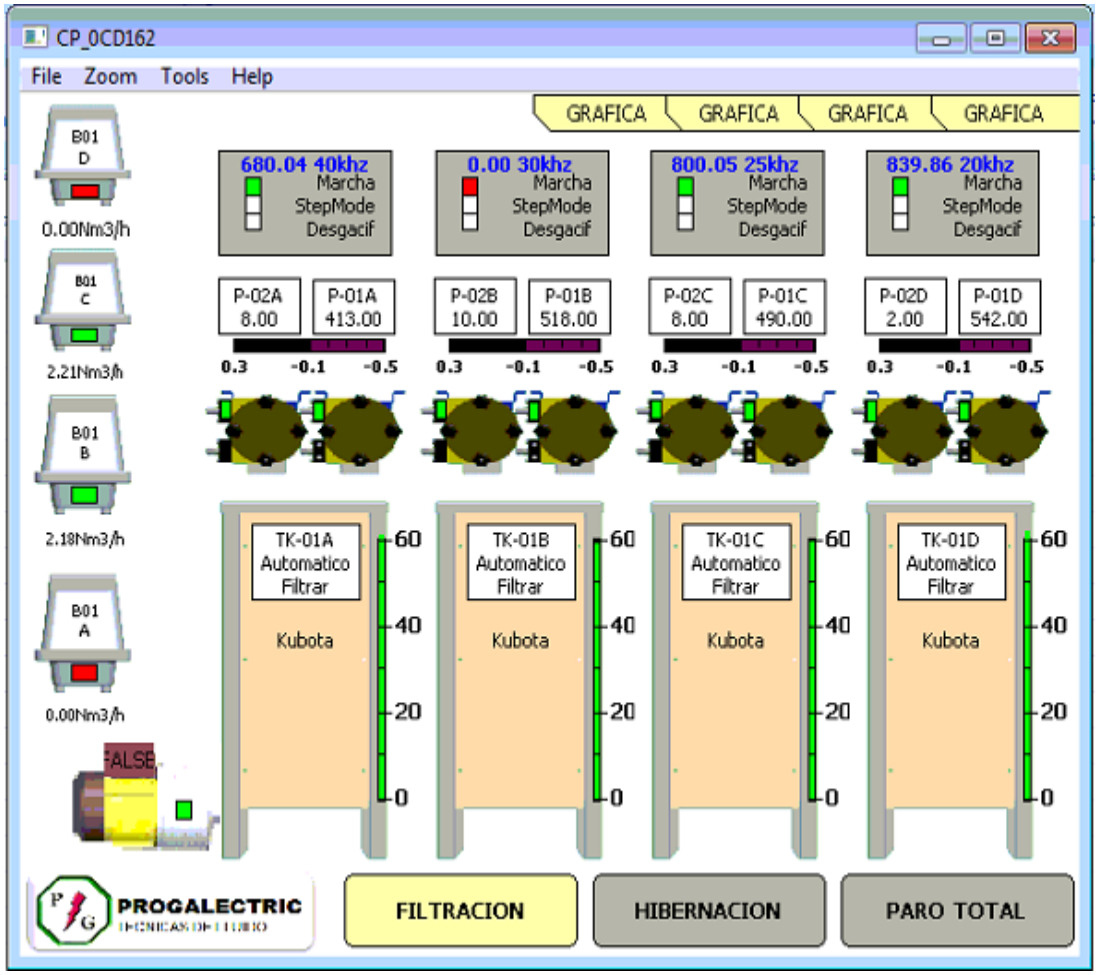
Fuente: EDAR-Sur (Churriana) Granada, España.

La instalación experimental se encuentra completamente automatizada y controlada mediante un PLC que controla toda la planta y un software SCADA que permite la visualización, monitorización y control remoto del sistema. Además, dispone de instrumentos tales como sensores de nivel, caudalímetros de entrada y salida, caudalímetros de aire o medidores de presión en la linea de permeado (PTM). Las señales de cada uno de estos instrumentos son enviadas al sistema de control y quedan registradas de manera continua.

A través de este software se pueden modificar y seleccionar las principales condiciones operacionales de cada uno de los módulos de manera independiente. En primer lugar, es posible seleccionar el modo de funcionamiento de los módulos, que puede ser manual o automático y, en segundo lugar, es posible seleccionar los valores de caudales de aire, de

entrada y de salida, el tipo de membrana a utilizar, los tiempos de aireación, ciclos de operación (filtración/relax/retrolavado), condiciones para la aplicación de ultrasonidos (tiempos de marcha/paro, potencia, modo de aplicación constante o en rampa, entre otras).

Anexo 1h. **Pantalla principal de SCADA**




Fuente: EDAR-Sur (Churriana) Granada, España.