

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Inventario de tecnologías para plantas de tratamiento de agua residual municipal y su posible aplicación en Guatemala**

Trabajo de Graduación presentado por Mariafernanda Iriarte Mazariegos para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Guatemala,

2023



**Inventario de tecnologías para plantas de tratamiento de agua residual municipal y su posible aplicación en Guatemala**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Inventario de tecnologías para plantas de tratamiento de agua residual municipal y su posible aplicación en Guatemala**

Trabajo de Graduación presentado por Mariafernanda Iriarte Mazariegos para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Guatemala,

2023

Vo.Bo.:

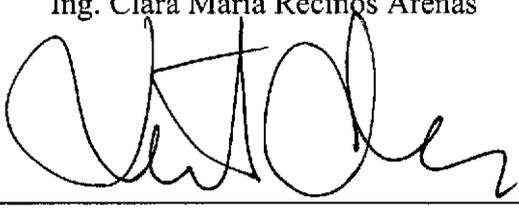
(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Clara María Recinos Arenas

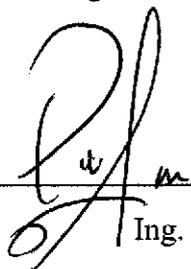
Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Clara María Recinos Arenas

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Roberto Godo Levensen

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Pedro Godoy

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de junio de 2023.

## **PREFACIO**

Esta investigación tiene como objetivo integrar en un inventario las tecnologías innovadoras disponibles y aplicables en el país para el tratamiento de agua residual municipal. Es decir, aquellas tecnologías establecidas e implementadas a gran escala en otros países, pero que no son utilizadas en Guatemala. Para ello se consideró el contexto guatemalteco, las características de diseño principales de las plantas de tratamiento utilizadas en la actualidad en el país y las limitaciones para el desarrollo o mejora de estas.

El trabajo se divide en 4 fases. La primera consistió en la recopilación de información acerca de las unidades de tratamiento de agua residual innovadoras existentes. La segunda fase constó en la clasificación preliminar de las tecnologías investigadas según el tipo de agua residual que tratan, su nivel de aplicación (escala piloto, en investigación o planta de tratamiento) y si corresponden a un proceso adaptativo, tecnología innovadora o a una utilizada en el país. Aquellas que no cumplieran con las siguientes características: ser utilizadas para el tratamiento de agua residual doméstica, aplicadas a gran escala en una planta de tratamiento y ser una tecnología innovadora; fueron categorizadas como “tecnologías no seleccionadas”. Sus características principales, clasificación, razón de descarte y usos se presentaron en fichas técnicas.

Para la tercera fase se realizó una investigación adicional de las tecnologías seleccionadas, basándose en bibliografía referente al tema, con el fin de obtener una descripción más detallada de estas. Sus características principales, especificaciones de diseño, usos, costos, nivel de tratamiento, eficiencias de remoción y una breve comparación con tecnologías aplicadas en el país se detallan mediante una ficha técnica. Posteriormente y con el fin de analizar la capacidad de aplicación de cada tecnología seleccionada, se realizó un FODA.

En la última fase se determinó, en base a las fichas técnicas y sus FODA correspondientes, qué tecnologías podrían resultar viables para aplicación y adaptación a las condiciones del país.

## CONTENIDO

### Página

<b>PREFACIO</b> .....	IV
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	VII
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> .....	XI
<b>RESUMEN</b> .....	XV
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	2
A. CASOS DE CONTAMINACIÓN POR AGUA RESIDUAL EN EL PAÍS.....	3
B. MAL FUNCIONAMIENTO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO .....	5
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	6
<b>IV. OBJETIVOS</b> .....	7
A. OBJETIVO GENERAL .....	7
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
<b>VI. MARCO TEÓRICO</b> .....	9
A. AGUA .....	9
1. Contaminación de agua .....	9
B. AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO .....	9
C. GOVERNABILIDAD DEL AGUA RESIDUAL .....	10
1. Políticas, legislación y normativa .....	10
2. Estado del marco regulatorio en Guatemala .....	13
D. CONTEXTO MUNDIAL DEL AGUA .....	13
E. CONTEXTO DEL AGUA EN GUATEMALA .....	15
1. Contaminación de los cuerpos de agua y escasez .....	15
F. AGUA RESIDUAL.....	16
1. Tipos de agua residual.....	16
2. Composición y contaminantes del agua residual municipal .....	17
3. Parámetros de calidad.....	19
a. Parámetros principales para definir la calidad del agua residual .....	19
b. Parámetros para aguas residuales y valores de descarga a cuerpos receptores.....	19
4. Consecuencias de una descarga sin tratamiento o con tratamiento inadecuado .....	19
5. Tratamiento .....	22
G. TECNOLOGÍAS MÁS UTILIZADAS A NIVEL MUNDIAL .....	24

H.	TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN GUATEMALA.....	26
1.	Planta de tratamiento ejecutada .....	31
<b>VII.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>33</b>
A.	CLASIFICACIÓN PRELIMINAR DE TECNOLOGÍAS .....	33
B.	TECNOLOGÍAS SELECCIONADAS .....	38
1.	Fichas técnicas .....	39
a.	Tratamiento primario.....	39
b.	Tratamiento secundario .....	47
c.	Tratamiento terciario .....	67
C.	FODA DE LAS TECNOLOGÍAS .....	83
1.	Tratamiento primario.....	84
2.	Tratamiento secundario .....	86
3.	Tratamiento terciario .....	92
<b>VIII.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>97</b>
A.	TRATAMIENTO PRIMARIO .....	98
1.	Comparación entre las tecnologías seleccionadas para el tratamiento primario.....	98
2.	Breve comparación de las tecnologías seleccionadas con tecnologías utilizada en el país para el tratamiento primario .....	98
B.	TRATAMIENTO SECUNDARIO .....	99
1.	Comparación entre las tecnologías seleccionadas para el tratamiento secundario .....	99
2.	Breve comparación de las tecnologías seleccionadas con tecnologías utilizadas en el país para el tratamiento secundario .....	100
C.	TRATAMIENTO TERCIARIO Y DESINFECCIÓN .....	101
1.	Comparación entre las tecnologías seleccionadas para el tratamiento terciario y desinfección .....	101
2.	Breve comparación de las tecnologías seleccionadas para el tratamiento terciario con una tecnología utilizada en el país.....	102
3.	Breve comparación de la tecnología seleccionada de desinfección con una tecnología utilizada en el país.....	103
D.	CAPACIDAD DE APLICACIÓN.....	103
<b>IX.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>106</b>
<b>X.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>107</b>
<b>XI.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>108</b>
<b>XII.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>121</b>
	ANEXO A. FICHAS TÉCNICAS TECNOLOGÍAS NO SELECCIONADAS .....	121
<b>XIII.</b>	<b>GLOSARIO .....</b>	<b>164</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Componentes típicos en las distintas fuentes de aguas residuales .....	17
2. Contaminantes principales en el agua residual, sus parámetros más representativos y efectos .....	18
3. Ejemplos de impactos negativos de las aguas residuales no tratadas .....	20
4. Nivel de tratamiento de agua residual y lo que se busca remover del agua .....	23
5. Ventajas y desventajas de determinadas unidades de tratamiento de agua residual .....	24
6. Eficiencias de remoción de las tecnologías utilizadas para el tratamiento primario .....	29
7. Eficiencias de remoción de las tecnologías utilizadas para el tratamiento secundario y terciario .....	30
8. Eficiencias de remoción de las tecnologías utilizadas para eliminar patógenos .....	30
9. Tecnologías y procesos utilizados para el tratamiento de agua residual .....	34
10. Tecnologías seleccionadas según nivel de tratamiento .....	38
11. Ficha técnica para la tecnología “Filtración por medios compresibles” .....	39
12. Ficha técnica para la tecnología “Filtro Salsnes” .....	43
13. Ficha técnica para la tecnología “Biotecnología de suelo” .....	47
14. Ficha técnica para la tecnología “Membrana de rotación de vacío” .....	50
15. Ficha técnica para la tecnología “Proceso biológico activado de múltiples etapas” .....	54
16. Ficha técnica para la tecnología “Reactor de biopelícula de membrana” .....	57
17. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaerobio de lecho granular expandido” .....	60
18. Ficha técnica para la tecnología “Reactor de esponja colgante de flujo descendente” ....	63
19. Ficha técnica para la tecnología “Arrastre con aire” .....	67

20. Ficha técnica para la tecnología “Desinfección con bromo” .....	71
21. Ficha técnica para la tecnología “Filtro de retrolavado automático” .....	74
22. Ficha técnica para la tecnología “Lodo granular aerobio” .....	77
23. Ficha técnica para la tecnología “Oxidación anaeróbica de amonio” .....	79
24. FODA Filtración por medios compresibles .....	84
25. FODA Filtro Salsnes .....	85
26. FODA Biotecnología de suelo o filtro construido de tierra .....	86
27. FODA Membrana de rotación de vacío .....	87
28. FODA Proceso biológico activado de múltiples etapas .....	88
29. FODA Reactor de biopelícula de membrana .....	89
30. FODA Reactor anaerobio de lecho granular expandido .....	90
31. FODA Reactor de esponja colgante de flujo descendente .....	91
32. FODA Arrastre con aire .....	92
33. FODA Desinfección con bromo .....	93
34. FODA Filtro de retrolavado automático .....	94
35. FODA Lodo granular aerobio .....	95
36. FODA Oxidación anaeróbica de amonio .....	96
37. Ficha técnica para la tecnología “Ácido Peracético” .....	121
38. Ficha técnica para la tecnología “Bardenpho (Cinco y cuatro etapas)” .....	122
39. Ficha técnica para la tecnología “Biorreactor de lecho móvil” .....	123
40. Ficha técnica para la tecnología “Biorreactor de membrana” .....	124
41. Ficha técnica para la tecnología “Carbón activado granular o en polvo” .....	125

42. Ficha técnica para la tecnología “Cloro, Hipoclorito” .....	126
43. Ficha técnica para la tecnología “Contactor biológico rotativo” .....	127
44. Ficha técnica para la tecnología “Desinfección Ultravioleta (UV)” .....	128
45. Ficha técnica para la tecnología “Desnitrificación y acumulación de fosfato en proceso anóxico” .....	129
46. Ficha técnica para la tecnología “Digestores que producen biogás/ digestor anaerobio” .....	130
47. Ficha técnica para la tecnología “Electro-coagulación” .....	131
48. Ficha técnica para la tecnología “Electro-deposición” .....	132
49. Ficha técnica para la tecnología “Electrodialisis” .....	133
50. Ficha técnica para la tecnología “Electro-oxidación” .....	134
51. Ficha técnica para la tecnología “Flotación por aire disuelto” .....	135
52. Ficha técnica para la tecnología “Filtración rápida por arena” .....	136
53. Ficha técnica para la tecnología “Filtro percolador” .....	137
54. Ficha técnica para la tecnología “Humedales artificiales” .....	138
55. Ficha técnica para la tecnología “Lodos activados de pozo profundo” .....	139
56. Ficha técnica para la tecnología “Ozono” .....	140
57. Ficha técnica para la tecnología “Proceso Actiflo” .....	141
58. Ficha técnica para la tecnología “Proceso convencional de reciclaje autótrofo mejorado de eliminación de nitrógeno” .....	142
59. Ficha técnica para la tecnología “Proceso de bioaumentación de regeneración/reaireación” .....	143
60. Ficha técnica para la tecnología “Proceso de eliminación biológico-químico de fósforo y nitrógeno” .....	144
61. Ficha técnica para la tecnología “Proceso de Johannesburgo” .....	145

62. Ficha técnica para la tecnología “Proceso de la Planta de Virginia” .....	146
63. Ficha técnica para la tecnología “Proceso Densadeg” .....	147
64. Ficha técnica para la tecnología “Proceso In-Nitri” .....	148
65. Ficha técnica para la tecnología “Proceso Kraus” .....	149
66. Ficha técnica para la tecnología “Proceso mejorado de bioaumentación secuencial” .....	150
67. Ficha técnica para la tecnología “Proceso modificado de la Universidad de Ciudad del Cabo” .....	151
68. Ficha técnica para la tecnología “Proceso modificado Ludzack-Ettinger” .....	152
69. Ficha técnica para la tecnología “Proceso Phoredox” .....	153
70. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaeróbico de flujo a pistón” .....	154
71. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaerobio con deflectores” .....	155
72. Ficha técnica para la tecnología “Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)” ...	156
73. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaerobio de lecho migrante” .....	157
74. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaerobio híbrido” .....	158
75. Ficha técnica para la tecnología “Reactor biológico discontinuo secuencial; Reactor discontinuo secuencial” .....	159
76. Ficha técnica para la tecnología “Reactor de circulación interna” .....	160
77. Ficha técnica para la tecnología “Reactor de lecho granular estático” .....	161
78. Ficha técnica para la tecnología “Tratamiento quimiostático automatizado” .....	162

## LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración	Página
1. Contaminación en río Las Vacas .....	2
2. Porcentaje de contaminación por emisión de plásticos al océano de los 10 ríos más contaminantes a nivel mundial. ....	14
3. Porcentaje de aguas residuales no tratadas a nivel mundial en 2015 y las aspiraciones para el 2030 .....	21
4. Esquematación del tratamiento de aguas residuales .....	27
5. Ficha técnica del sistema de tratamiento de aguas residuales “La Libertad” .....	31
6. Ficha técnica del sistema de tratamiento de aguas residuales “Buena Vista” .....	32
7. Diagrama esquemático de la operación de un filtro CMF .....	42
8. FiltraFast. Filtro de medio compresible.....	42
9. WWETCO Compressible media filtration.....	42
10. Filtro Salsnes SF2000, SF4000, SF6000 .....	45
11. Filtro Salsnes SFK .....	46
12. Filtro Salsnes SF1000 .....	46
13. Filtro Salsnes SFKC.....	46
14. Biotecnología de suelo .....	50
15. Reactor VRM.....	52
16. VRM ® HUBER.....	53
17. Principio de operación de VRM.....	53
18. Aplicación del sistema MSABP .....	56
19. Tecnología MSABP .....	56

20. Esquema de una membrana MABR .....	59
21. Disposición de los módulos. Tecnología ARoNite.....	59
22. Diagrama del reactor EGSB .....	62
23. Diseño de un reactor de esponjas colgantes .....	66
24. Variantes de torres de extracción por arrastre con aire .....	70
25. Bandejas apiladas y deslizantes.....	70
26. Tabletas de BCDMH.....	73
27. Filtro de retrolavado automático .....	76
28. Principio del proceso SHARON-Anammox.....	82
29. Tanque Anammox.....	82
30. Representación esquemática del catabolismo Anammox .....	82
31. Presentación del Ácido Peracético disponible en Guatemala. ....	121
32. Representación esquemática del proceso Bardenpho de 4 etapas .....	122
33. Representación esquemática del proceso Bardenpho de 5 etapas .....	122
34. Esquema de un biorreactor de lecho móvil.....	123
35. Biorreactor de membrana .....	124
36. Saco de presentación del carbón activado en ECOTEC .....	125
37. Presentación líquida de hipoclorito de calcio y sodio para venta.....	126
38. Presentación de hipoclorito de sodio .....	127
39. Diagrama de una unidad CBR.....	127
40. Lámparas UV utilizadas para desinfección .....	128
41. Modelo LBX200 para instalación en canal de hormigón .....	128
42. Diagrama de flujo del proceso DEPHANOX .....	129
43. Esquema general de un biodigestor .....	130
44. Planta de electro-coagulación para el tratamiento de aguas residuales del proceso armado e impresión de cajas de cartón corrugado.....	131

45. Esquema del proceso de electro-deposición .....	132
46. Representación gráfica de la electrodiálisis.....	133
47. Ejemplo de la configuración del proceso de electro-oxidación .....	134
48. Diagrama de flujo de una unidad de flotación de aire disuelto .....	135
49. Unidad de filtro de arena en una planta de lodos activados en Guandong, China.....	136
50. Esquema de un filtro percolador .....	137
51. Elementos típicos de un humedal artificial con flujo superficial .....	138
52. Elementos típicos de un humedal artificial con flujo subsuperficial.....	138
53. Configuración vertical de lodos activados.....	139
54. Ejemplo de un generador de ozono, Ozono-Tec.....	140
55. Proceso Actiflo.....	141
56. Diagrama de flujo del proceso MAUREEN .....	142
57. Representación esquemática del proceso BAR .....	143
58. Diagrama de flujo del proceso BCFS .....	144
59. Esquema del proceso Johannesburgo .....	145
60. Representación esquemática del proceso VIP .....	146
61. Diagrama de flujo proceso Densadeg .....	147
62. Diagrama de flujo del proceso In-Nitri.....	148
63. Esquema del proceso Kraus .....	149
64. Diagrama de flujo del proceso BABE .....	150
65. Proceso modificado de la Universidad de Ciudad del Cabo .....	151
66. Proceso modificado Ludzack-Ettinger .....	152
67. Esquema del proceso Phoredox.....	153
68. Montaje del equipo.....	154
69. Representación esquemática de un reactor .....	155

70. Representación esquemática de un reactor ABR.....	155
71. Representación esquemática del reactor UASB .....	156
72. Representación esquemática de un reactor anaerobio de lecho migrante .....	157
73. Representación esquemática de un reactor anaeróbico híbrido .....	158
74. Reactor biológico secuencial.....	159
75. Fases principales del ciclo de operación.....	159
76. Esquema de un reactor de circulación interna .....	160
77. Diagrama de un reactor SGBR.....	161
78. Tratamiento quimiostático automatizado .....	163

## **RESUMEN**

El siguiente trabajo presenta un inventario de tecnologías para plantas de tratamiento de agua residual municipal con desfogue a cuerpos receptores y su posible aplicación en Guatemala, utilizando como base los parámetros establecidos en el Artículo 21 “Límites máximos permisibles para entes generadores nuevos” del Acuerdo Gubernativo 236-2006. Se introduce de manera general el tratamiento de agua residual, su importancia, niveles y las consecuencias de no realizarlo. Se indican brevemente las normas y parámetros con los que se debe cumplir, así como el contexto mundial y nacional del agua y los contaminantes principales en el agua residual municipal.

Se investigaron 53 unidades de tratamiento que fueron clasificadas preliminarmente según el tipo de agua residual que pueden tratar, su nivel de aplicación (escala piloto o planta de tratamiento) y si corresponde a un proceso adaptativo, tecnología innovadora, en investigación o a una utilizada en el país. Las tecnologías que pueden ser utilizadas para el tratamiento de agua residual municipal y que ya han sido aplicadas a escala completa en una planta de tratamiento, fueron identificadas como tecnologías innovadoras y seleccionadas para mayor investigación. Sus características principales, especificaciones de diseño, usos, costos, nivel de tratamiento, eficiencias de remoción, y una breve comparación con tecnologías aplicadas en el país se detallan mediante una ficha técnica.

Finalmente, las 13 tecnologías seleccionadas se analizan mediante un FODA con el fin de determinar la viabilidad de su aplicación y adaptación a las condiciones del país.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental en la naturaleza que integra todos los ecosistemas naturales. Es esencial para que exista la vida en la Tierra e indispensable para la salud, el saneamiento y la actividad económica. Conforme pasan los años, secundario al cambio climático y a una mala gestión del recurso hídrico, cada vez es más difícil garantizar la disponibilidad del agua para la población mundial.

Guatemala está constituida por 23 lagos y 119 pequeñas lagunas con una superficie de agua de 950 kilómetros cuadrados. A pesar de poseer una oferta superficial de agua satisfactoria, la gestión integral deficiente del recurso hídrico provoca la escasez de este en ciertas regiones del país. Actualmente aproximadamente 95% de las corrientes subterráneas y superficiales se encuentran contaminadas y se estima que para el año 2025 se tenga un déficit de 200 millones de metros cúbicos de agua. (Paiz, s.f.; Morales Rodas, 2021)

En el país apenas 5% de las aguas residuales se tratan, el resto se vierten sin tratamiento a ríos y lagos. (Nájera, 2022) Un tratamiento deficiente o ausente del agua residual, así como la contaminación directa y el manejo inadecuado de los desechos sólidos, ha provocado que la calidad del agua empeore y su escasez aumente. Es necesario mejorar la gestión del recurso, fomentar el tratamiento adecuado de aguas residuales, determinar el destino final del agua tratada y las necesidades del tratamiento. La calidad final esperada se define según la normativa de descarga que aplique. En zonas con una escasez considerable del recurso es importante tomar en cuenta el tipo de reúso que se le puede dar.

El Acuerdo gubernativo 236-2006, reglamento de descargas y reúso de aguas residuales, lleva más de 16 años en espera de que los 340 municipios del país cuenten con plantas de tratamiento. Según las últimas prórrogas se espera que para el 2 de mayo de 2025 las comunas cuenten con sistemas de tratamiento completas en las dos descargas principales, para el 3 de mayo de 2027 tendrán que contar con sistemas de tratamiento en el 60% de las descargas y para el 2 de mayo de 2031 deberán tratar el 100% de las aguas residuales generadas en el municipio. Sin más prórrogas al acuerdo, el manejo adecuado del agua residual en el país tomaría al menos media década. Es responsabilidad de los entes generadores realizar el tratamiento de las aguas residuales y de las autoridades hacerlo cumplir.

## II. ANTECEDENTES

En promedio la ciudad de Guatemala utiliza 750,000 m<sup>3</sup> de agua al día de los cuales 70% son abastecidos por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA) y 30% es adquirida en empresas privadas. El 60% de este consumo se satisface con yacimientos de agua subterránea y 40% mediante aguas superficiales provenientes de cuencas externas, la del río Motagua, de la vertiente del Caribe; y la del río María Linda que drena hacia el Océano Pacífico. En muchas ocasiones el agua desechada en los drenajes de la Ciudad de Guatemala regresa a los ríos sin recibir algún tipo de tratamiento que permita su reutilización. Afectando principalmente el río Las Vacas, que lleva 62% de las aguas residuales, y el río Villalobos con el 38%. (Lozano E. , 2021)



Figura 1 Contaminación en río Las Vacas.  
(Lozano E., 2021)

La falta de tratamiento de agua residual ha repercutido en el abastecimiento de las industrias de agua potable. La contaminación del río Pixcayá, proveniente de Chimaltenango, secundaria al vertido de aguas residuales sin tratamiento y la presencia de tintes empleados en actividades de maquila, ha provocado que gran parte de su caudal deje de ser utilizado por EMPAGUA. Esto debido a que realizarle un tratamiento aumentaría los costos de purificación y consumo. (Lozano E. , 2021)

El Acuerdo Gubernativo 236-2006, “Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos”, lleva 16 años en espera de que los 340 municipios del país cuenten con plantas de tratamiento de agua residual. El plazo para que las alcaldías realizaran el tratamiento de al menos una fracción de las aguas residuales que generan se habría vencido en el presente año. Sin embargo, con el fin de apoyar a los gobiernos locales para que cumplan con la construcción de las plantas de tratamiento, y luego de un análisis técnico y jurídico, se emitió el Acuerdo Gubernativo 285-2022 proporcionando a las municipalidades nuevos plazos de cumplimiento.

Los gobiernos locales tienen hasta el 30 de mayo de 2024 para contar con un inventario de las redes de alcantarillado público, las descargas con y sin tratamiento en su jurisdicción y las condiciones actuales de los sistemas de tratamiento de agua residual. Se espera que

para el 2 de mayo del 2025 las comunas tengan en operación sistemas de tratamiento completos en las dos principales descargas del inventario, para el 3 de mayo de 2027 cumplan con sistemas de tratamiento en 60% de las descargas y para el 2 de mayo de 2031 con el 100% de las aguas residuales generadas en el municipio. El objetivo de los nuevos plazos es que las municipalidades consigan el financiamiento necesario, teniendo como prioridad la protección del recurso hídrico y la búsqueda de un tratamiento adecuado. (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales , 2022)

#### **A. Casos de contaminación por agua residual en el país**

La contaminación de los ríos de La Pasión y Mora, en Petén y Escuintla respectivamente, fue la causante de casos de mortandad de peces en el año 2016. Evidenciando la precaria situación que atravesaban los mantos acuíferos del país. El informe ambiental más reciente, para ese entonces, realizado por el Gobierno y presentado en el 2011, concluía que la contaminación de los cuerpos de agua era de 90% y que la mayoría era secundaria al mal manejo de aguas residuales domiciliarias, industriales y agroindustriales. El informe también especificaba que desde el 2011 el agua de 19 ríos del país, entre los que se encontraba el Motagua, ya no era apta para consumo humano. Ese mismo año se reportó contaminación en el río Los Esclavos, Santa Rosa, debido a la ausencia de plantas de tratamiento en la mayoría de las municipalidades. (Q., 2016)

Gran parte de la contaminación que sufrió el Lago de Amatitlán provenía de la desembocadura del río Villalobos. Debido a la ausencia o deficiencia en el tratamiento del agua residual generada por las comunas aledañas, el efluente del río se introducía al lago con cargas altas de materia fecal y metales pesados. (Pérez Marroquín , 2017) Según la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán (AMSA) el río Villalobos inyecta entre 1,500-2000 L de agua contaminada por segundo al Lago de Amatitlán. (Pérez Marroquín, 2018) A pesar de ello, el agua del río seguía siendo utilizada para riego agrícola y, en algunos casos, para consumo humano representando un riesgo para los consumidores.

La contaminación debida al agua residual de los beneficios de café en Esquipulas, en 2018, provocó la muerte masiva de especies en el río Lempa. Este río nace en Guatemala, sigue por Honduras y desemboca en el Pacífico de El Salvador. Tiene una longitud total de 422 kilómetros y es importante para los tres países, ya que es utilizado para irrigar cultivos, en plantas hidroeléctricas y abastecer de agua para consumo a los pobladores de El Salvador. Los peces del río murieron por asfixia debido a que la interacción del agua residual de los beneficios procesadores y el agua del río eliminaba el oxígeno. Estudios de la Universidad de San Carlos de Guatemala determinaron que el río Lempa se encuentra contaminado de forma permanente. (Redacción AFP , 2018)

En Quetzaltenango, la falta de tratamiento de desechos, acumulación de basura y agua residual perjudicó el río seco. A pesar de los esfuerzos de la municipalidad de iniciar con la construcción de la planta de tratamiento, el no contar con el terreno adecuado lo imposibilita. Según una consultoría realizada por la comuna del municipio se necesitarían al menos 7.5 hectáreas para la construcción de la planta. (Longo, 2018)

Luisa Cifuentes, directora de la Autoridad de la Cuenca del Lago de Atitlán (AMSCLAE), indicó en el 2019 que Sololá no trata ni el 50% de las aguas residuales que genera. Únicamente 28% pasan por plantas de tratamiento, 46% recibe un tratamiento natural que ya no resulta suficiente y 26% llega directamente al lago. (Mazariegos Rivas, 2019) En octubre de 2020 el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) verificó una denuncia realizada referente a la contaminación del Lago de Atitlán en el municipio de San Marcos La Laguna, Sololá. Los representantes del MARN ubicaron un caudal de agua gris, sin olor fétido, debajo del embarcadero principal. Secundario a esto, y junto con el apoyo de la municipalidad, se realizó el rastreo de conexiones domiciliarias no autorizadas con el fin de evitar que aguas residuales sin tratamiento lleguen al lago y lo contaminen. De igual forma el gobierno local indicó que desarrolló distintas campañas de sensibilización con el fin de que la población conecte sus drenajes al sistema de alcantarillado municipal para recibir un tratamiento posterior. (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2020)

Pese a las medidas tomadas, en febrero 2021 se reportaron nuevos casos de contaminación del lago, esta vez en el municipio de Panajachel, Sololá. Se documentó la desembocadura de aguas residuales al lago en el embarcadero Tzanjuyú. Las muestras realizadas al agua residual entrante excedían los límites máximos permisibles del Acuerdo Gubernativo 236-2006. La materia orgánica excedía 13 veces lo permitido y la inorgánica y orgánica oxidable 11 veces el nivel aceptado, siendo esto un indicador de que la planta de tratamiento municipal no se encontraba en funcionamiento. (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2021)

Según la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno (AMSCLAE) de los 19 municipios alrededor de este cuerpo de agua únicamente 4 de ellos cuentan con plantas de tratamiento autorizadas por el Ministerio de Ambiente. La falta de tratamiento, contaminación directa y los desechos sólidos han provocado que la calidad del agua en el lago empeore. Para el año 2020, se reportó que de las 11 playas alrededor de este cuerpo de agua, 4 tenían índices de contaminación bajos, 5 tenían un nivel medio y 2 una calificación “mala” de agua debido a la alta presencia de coliformes (materia fecal) y de bacteria *E. Coli*. (Maldonado Valle, 2022)

## **B. Mal funcionamiento en plantas de tratamiento**

En el año 2012 se construyó la planta de tratamiento de agua residual “Los Cebollales” en la desembocadura del río San Francisco, Panajachel, Sololá. Desde su construcción hasta el 2013 esta no había sido utilizada debido a que presentaba fallas en el sistema eléctrico. Sin el servicio correspondiente la infraestructura no operaba y el Lago de Atitlán seguía contaminándose. Adicionalmente, las autoridades correspondientes expresaban su preocupación por el costo al que se incurriría para cubrir el mantenimiento de la planta de tratamiento, ya que este rondaba alrededor de los Q100 mil mensuales. (Julajuj, 2013)

Poco tiempo después, en el 2014, vecinos cercanos a la planta de tratamiento indicaron que había un incremento de olores fétidos. Estos podían ser percibidos a 200 metros a la redonda. Los pobladores pedían a las autoridades correspondientes encontrar una solución, ya que la cantidad de moscas y mosquitos era vasta y representaba un riesgo de epidemias. Un integrante del Comité Comunitario de Desarrollo del barrio Juncayá, Israel Juncayá, expuso que los vecinos llevaban 5 meses afectados por el mal funcionamiento de la planta debido a que esta no recibía el tratamiento adecuado. (Julajuj, 2014)

### III. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, aproximadamente 95% de las corrientes subterráneas y superficiales están contaminadas y se estima que para el año 2025 el déficit de agua sea de 200 millones de metros cúbicos. (Paiz, s.f.; Morales Rodas, 2021) De acuerdo con un estudio mundial realizado por la organización internacional no gubernamental, “The Ocean Cleanup” (OCU), Guatemala cuenta con 11 de los 25 ríos en Centroamérica que más plástico acarrearán hacia los océanos. De estos los 3 más contaminados son el río costero María Linda, Escuintla, con una emisión plástica anual de 1,258,000 kg; el río Samalá, Retalhuleu, con 626,000 kg/año; y el Naranjo, San Marcos, con una emisión de 522 kg de desechos plásticos al año. (Rodríguez, 2020)

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) documentó que para mayo 2019 se tenían 252 plantas de tratamiento ejecutadas por municipalidades a nivel nacional. De estas, 2 se encontraban en construcción, 4 pendientes de construir, 1 en remozamiento, 2 en periodo de prueba, 43 inactivas y 200 que funcionaban total o parcialmente. (Mazariegos Rivas, 2019) Según Gerson Ochaeta Constanza, asesor de la Autoridad para la Cuenca del Lago de Petén Itzá, con esta cantidad se cubre menos del 5% de las aguas residuales generadas en el país. (Rodríguez, 2020)

Investigadores de la Unidad de Hidroquímica del INSIVUMEH indicaron que 13 de cada 15 ríos se encuentran contaminados bacteriológicamente, así como con componentes de jabones y detergentes, botellas plásticas y residuos fertilizantes. (Patzán, 2016) Demostrando que el país no cuenta con suficientes plantas de tratamiento en las municipalidades por donde recorren los ríos o en su defecto estas no reciben el mantenimiento adecuado ya sea por falta de insumos, un conocimiento deficiente del tratamiento que se realiza o una mala gestión por parte de las autoridades correspondientes.

Con base en esta información se determina la necesidad de realizar un inventario de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales que se adapten al contexto guatemalteco y permitan controlar los puntos más vulnerables de los cuerpos de agua. Generando la posibilidad de aminorar los distintos contaminantes y desarrollar soluciones ante la problemática identificada. Esto permitiría conocer las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías dependiendo del tipo de contaminante que más afecta la región y la zona en la que está ubicada.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. Objetivo general**

Integrar en un catálogo las tecnologías disponibles y aplicables en el país para el tratamiento de agua residual doméstica.

### **B. Objetivos específicos**

- Identificar las tecnologías disponibles para el tratamiento de agua residual y sus características principales.
- Estructurar criterios de análisis para determinar la adaptación de las tecnologías al país.
- Clasificar las tecnologías para plantas de tratamiento de aguas residuales según su adaptación al contexto guatemalteco.

## V. ALCANCE

Guatemala cuenta con 97,120 millones de metros cúbicos de agua de los cuales únicamente 10% son aprovechados. (MARN, 2022) La mala gestión y carencia de leyes efectivas en relación con el recurso hídrico ha resultado en escasez, un aumento en la contaminación de las fuentes de agua subterráneas y superficiales e incumplimiento de las normativas correspondientes por parte de los entes generadores.

El presente trabajo está dedicado a la investigación de las tecnologías innovadoras para el tratamiento de agua residual municipal y su capacidad de ser aplicadas en el país. Se presenta un compendio de las tecnologías y procesos identificados, así como su clasificación preliminar y datos relevantes en fichas técnicas. Así como un análisis de su aplicación con base en la situación actual del país y los problemas enfrentados regularmente en la instalación o actualización de las plantas de tratamiento de agua residual.

## **VI. MARCO TEÓRICO**

### **A. Agua**

El agua es un recurso natural limitado, y un bien público, fundamental para la vida en la tierra, la salud, el desarrollo de la sociedad y de los ecosistemas. (Nájera, 2022) El derecho humano al agua es el derecho de todos a disponer de suficiente agua, que sea salubre, aceptable, accesible y asequible para uso personal y doméstico. Es necesario para asegurar una vida digna y una condición esencial para otros derechos. (Naciones Unidas, 2002)

Su calidad es resultado de la acción humana y diversos fenómenos naturales y se encuentra en función del uso de la tierra en la zona de captación. La calidad de esta que se desee obtener, o su calidad deseada, depende del uso que se le espera dar a la misma. Esta depende de sus características físicas, químicas, biológicas y radiológicas, las cuales se deben comparar con valores definidos en normas o leyes para determinar si cumple o no con lo requerido. (Reyes, 2021)

El valor del agua es prácticamente infinito, ya que es necesaria para diversas finalidades y para el ejercicio de los derechos de las personas. Es utilizada para producir alimentos y para procurar la higiene y el medio de subsistencia de la población. (Naciones Unidas, 2002) Reconocer, medir, expresar su valor y considerarlo durante la toma de decisiones es elemental para alcanzar la gestión sostenible y equitativa del recurso hídrico. (Naciones Unidas, 2021)

#### **1. Contaminación de agua**

La contaminación del agua se puede definir como aquella que ocurre luego de que una o varias sustancias que modifican su estado se descarguen en ella provocando que esta no pueda ser utilizada para tomarse, cocinar, limpiar, nadar, entre otras actividades. Dicha contaminación se puede clasificar como puntual y no puntual o difusa. En la primera, los contaminantes corresponden a una fuente única, mientras que en la segunda estos pueden ser emitidos por diversas fuentes. (Crini & Lichtfouse, 2018)

La contaminación del agua puede ocurrir por actividades mineras, desechos industriales, agua residual, pesticidas, fertilizantes químicos, desechos radioactivos, el desarrollo urbano, entre otros. (Crini & Lichtfouse, 2018) Puede provocar problemas en la salud de las personas, así como el envenenamiento de la fauna y distintos daños al ecosistema a largo plazo. Según la Organización Mundial de la Salud, al menos 2000 millones de personas ingieren agua proveniente de fuentes contaminadas por heces que pueden transmitir enfermedades como el cólera y la fiebre tifoidea. (Nunez, 2022)

### **B. Agua para el consumo humano**

La norma COGUANOR 29001-2013 define el agua para consumo humano como “aquella que por sus características organolépticas, físicas, químicas y bacteriológicas, no representa

un riesgo para la salud del consumidor y cumple con lo establecido en la presente norma”. Por otro lado, el Acuerdo Gubernativo 113-2009 en el artículo 4 la define como: “Aquella que es distribuida por medio de un servicio de abastecimiento, destinada para su ingestión, preparación de alimentos y/o higiene personal o domiciliar”.

El Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales estableció un contenido mínimo del derecho al agua. Este comprende las siguientes obligaciones básicas:

1. Garantizar el acceso a la cantidad esencial mínima de agua, que sea suficiente y apta para el uso personal y doméstico y prevenir enfermedades; garantizar además el acceso físico y suministro suficiente y regular de agua salubre.
2. Asegurar el acceso al agua y las instalaciones y servicios de agua sobre una base no discriminatoria.
3. Adoptar programas de agua orientados a fines concretos y de relativo bajo costo y medidas para prevenir, tratar y controlar las enfermedades asociadas al agua, en particular velando por el acceso a servicios de saneamiento adecuados.

(Naciones Unidas, 2002)

## **C. Gobernabilidad del agua residual**

### **1. Políticas, legislación y normativa**

#### **a. Acuerdo de descargas de aguas residuales en la cuenca del lago de Atitlán**

La cuenca de Atitlán es una cuenca cerrada, no tiene salida superficial, por lo que las condiciones de calidad de agua que se deben alcanzar son más estrictas. (INFOM, 2020)

#### **b. Acuerdo Gubernativo No. 19-2021**

El Acuerdo Gubernativo No. 19-2021, disposiciones para la preservación y conservación de las cuencas, acuerda emitir disposiciones para promover la protección y conservación de cuencas hidrográficas de la República de Guatemala mediante un proceso continuo que permite elaborar y actualizar los diagnósticos de las cuencas hidrográficas como “base para la implementación de planes de manejo de recursos naturales enfocados en resolver problemas de degradación ambientales”. Es responsabilidad del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) coordinar por que se cumplan las disposiciones del acuerdo. (Acuerdo Gubernativo Número 19-2021, 2021)

#### **c. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006**

El Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, aprobado el 5 de mayo del 2006, proporciona el reglamento para las descargas y reúso de aguas residuales y disposición de lodos. Su objetivo

es establecer los criterios y requisitos que se deben cumplir con el fin de proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana, recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización y promover el desarrollo del recurso hídrico con una visión de gestión integrada. (Acuerdo Gubernativo 236-2006, 2006) La última enmienda (Acuerdo Gubernativo 285-2022) indica que las municipalidades tienen hasta el 30 de mayo de 2024 para contar con un inventario de las redes de alcantarillado público, las descargas sin tratamiento y las condiciones de los sistemas de tratamiento de agua residual; y con estudios técnicos que determinen el número de descargas residuales en su jurisdicción. (Acuerdo Gubernativo 285-2022, 2022).

Se espera que para el 2 de mayo del 2025 las municipalidades deben tener sistemas de tratamiento completas en las dos descargas principales de su inventario. Para el 3 de mayo de 2027 tendrán que contar con sistemas de tratamiento en el 60% de las descargas y para el 2 de mayo del 2031 deberán tratar el 100% de las aguas residuales generadas en el municipio. (Acuerdo Gubernativo 285-2022, 2022)

El Acuerdo Gubernativo 236-2006 debe aplicarse a:

1. Los entes generadores de aguas residuales
2. Las personas que descarguen sus aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público
3. Las personas que produzcan aguas residuales para reúso
4. Las personas que reúsen parcial o totalmente aguas residuales
5. Las personas responsables del manejo, tratamiento y disposición final de lodos

No establece parámetros para contaminantes emergentes como fármacos, disruptores endocrinos y nanopartículas, ni pruebas de ecotoxicidad, entre otros. No asegura que estos no estén presentes en el efluente. (Basterrechea & Guerra Noriega, 2019)

#### **d. Acuerdo Ministerial No. 37-2021**

El acuerdo establece que, “el Estado, las Municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga la contaminación del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico”. Establece la creación del Sistema General de Entes Generadores de Aguas Residuales (SIGEGAR) al cual es posible acceder a través del portal web del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Este debe ser utilizado por los entes generadores y/o las personas que descargan al alcantarillado público. (Acuerdo Ministerial 37-2021, 2021)

El propósito del sistema es que las personas individuales y/o jurídicas, públicas o privadas, de entes generadores de aguas residuales coloquen la información de las descargas que realizan, reuso y disposición de lodos. Lo indicado anteriormente debe cumplir con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 y el Acuerdo Gubernativo 12-2011. El incumplimiento de los artículos por parte de los entes generadores estará sujeto a las sanciones establecidas en el artículo 29-36 de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente. Este Acuerdo Ministerial entra en vigor el día después de que sea publicado en el Diario de Centro América. (Acuerdo Ministerial 37-2021, 2021)

#### e. Agenda 2030

La Agenda 2030, un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, es parte de los marcos de políticas mundiales para el agua residual. En esta se plantean 17 objetivos con 169 metas que abarcan la esfera económica, social y ambiental. (Naciones Unidas, 2015) Cada organismo regional y gobierno nacional es el encargado de reflejar los objetivos de la agenda mundial en sus políticas de gestión de recursos hídricos, el suministro de agua y la gestión de aguas residuales y residuos sólidos. (WWAP, 2017)

#### f. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales cuenta con la Dirección de Monitoreo y Vigilancia del Agua. Este se divide en los siguientes departamentos:

- **Departamento de control y monitoreo del recurso hídrico.** Responsable de controlar y monitorear que se cumpla la regulación vigente relacionada a las descargas de agua residual y cuerpos de agua. Su objetivo es fomentar la protección del recurso hídrico, realizar procesos de capacitación de control y monitoreo de agua residual y desarrollar un sistema de geoposicionamiento de entes generadores de aguas residuales. (MARN, 2022)
- **Departamento de investigación y normatividad del agua.** Es un departamento creado recientemente, en el año 2021, responsable de desarrollar y fomentar la investigación relacionada con la protección de los recursos hídricos. Este debe elaborar propuestas de regulación y actualización de la normativa vigente. La investigación y monitoreo del recurso hídrico debe coordinar con el Laboratorio de Calidad del Agua y el Departamento de Control y Monitoreo. (MARN, 2022)
- **Departamento para la protección, conservación y mejoramiento territorial del recurso hídrico.** Entre sus funciones principales se encuentra coadyuvar en la implementación de políticas, planes, programas e instrumentos relacionados al mejoramiento, conservación y protección del recurso hídrico y cuencas hidrográficas; coordinar e implementar capacitaciones y asistencia técnica relacionadas al recurso hídrico; verificar el cumplimiento de las regulaciones y normativas vigentes para la protección y conservación de las cuencas; entre otros.

#### g. Tratados mundiales para la gestión del agua dulce transfronteriza

Las leyes relacionadas con el control de contaminación son elaboradas a nivel nacional o local. Sin embargo, en el caso de cuencas transfronterizas es necesario considerar el efecto que el agua residual vertida en un país puede tener en otro. (WWAP, 2017) Los tratados mundiales para la gestión del agua dulce transfronteriza son pertinentes cuando el agua residual fluye hacia ríos y lagos internacionales o acuíferos. Estos son:

- **Convención sobre el Derecho de los Usos de los Cursos de Agua Internacionales para Fines Distintos de la Navegación.** Entró en vigor en 2014 y exige, en su artículo 7, que los Estados cuenten con las medidas adecuadas para evitar el “daño considerable” a otros Estados que comparten un curso de agua internacional. Además, establece en el artículo

8 la necesidad de que los Estados cooperen para proteger los cursos de agua internacionales. (WWAP, 2017)

- **Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales.** Desarrollado por la Comisión Económica para Europa. Entró en vigor en 1996 y desde el 2013 para los Estados Miembros de la ONU. En su artículo 2 aborda los impactos transfronterizos, principios de sostenibilidad y precaución de “quien contamina paga”. Además, estipula las obligaciones de controlar emisiones de contaminantes y tener una autorización previa del vertido del agua residual. (WWAP, 2017)

Alrededor de dos tercios de los ríos transfronterizos del mundo no tienen un marco de gestión cooperativa. (Naciones Unidas, 2018)

## **2. Estado del marco regulatorio en Guatemala**

El tratamiento del agua residual es responsabilidad de los entes generadores y la falta de una ley que regule el recurso hídrico es el obstáculo principal para mejorar su gestión. La coordinación interinstitucional referente al manejo y gestión del agua es deficiente. Son varias las entidades responsables y es esencial contar con un espacio adecuado que facilite la creación de un plan de manejo del agua en el que todos los responsables alcancen un objetivo común y deje de ser alcanzado de forma aislada por cada uno. (Morales Rodas, 2021) Con el fin de propiciar una gestión adecuada del recurso hídrico y promover la seguridad hídrica en todas sus dimensiones es necesario contar con una autoridad facilitadora y reguladora, un marco legislativo eficiente, diálogo, organización y participación social, infraestructura verde y gris para la gestión del agua, generación de información, planificación e inversión y el tratamiento y reuso de aguas residuales. (Nájera, 2022)

## **D. Contexto mundial del agua**

El agua se relaciona con la mayoría de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Es fundamental para el desarrollo socioeconómico, energía, producción de alimentos, ecosistemas y la supervivencia de los seres humanos. (Naciones Unidas, 2018) Sin embargo, a pesar de su importancia, casi 2000 millones de personas dependen de centros de atención a la salud sin servicios básicos de agua y viven en países con escasez de agua (Naciones Unidas, 2018) y 3600 millones carecen de instalaciones básicas para lavarse las manos (Banco Mundial, 2021). Como consecuencia, alrededor de 827,000 personas en países en desarrollo mueren anualmente (Banco Mundial, 2021).

Un estudio publicado por “Science Advances” en 2021 presentó un listado de los países con la mayor emisión anual de plástico al océano. En los primeros 10 lugares se encuentra: Malasia, Filipinas, India, China, Indonesia, Brasil, Vietnam, Bangladesh, Nigeria, Camerún, Sri Lanka, Turquía y Tailandia. Más de 1000 ríos alrededor del mundo son responsables del 80% de la contaminación por emisión de plásticos al océano. (MARN, 2022)

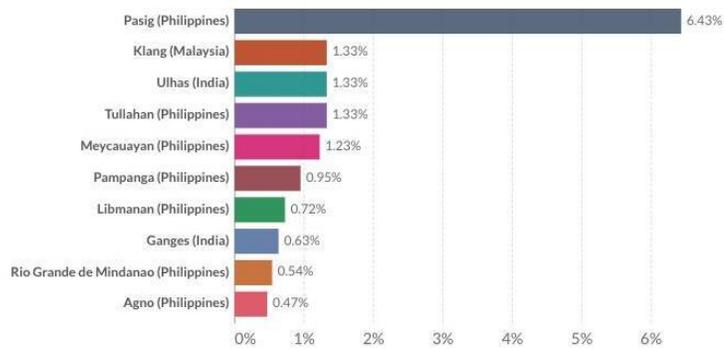


Figura 2 Porcentaje de contaminación por emisión de plásticos al océano de los 10 ríos más contaminantes a nivel mundial. (MARN, 2022)

La Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció, en julio de 2010, el derecho humano al agua y saneamiento. Afirmando que: todos los seres humanos tienen el derecho a tener acceso a una cantidad suficiente de agua para uso doméstico y personal (50-100 litros de agua por persona y día), segura, aceptable y asequible (su costo no debería ser mayor al 3% de los ingresos del hogar) y accesible físicamente (la fuente debe estar a menos de 1000 metros del hogar y recogerla no debería superar los 30 minutos) (Naciones Unidas, 2018).

La contaminación del agua y la ausencia de saneamiento básico obstaculizan la erradicación de la pobreza y enfermedades en los países más pobres. Para el 2017, 2000 millones de personas no contaban con las instalaciones básicas de saneamiento (baños o letrinas) y 673 millones practicaban la defecación al aire libre. (Naciones Unidas, 2002) Además, 1.5 millones de niños mueren al año secundario al agua no potable y saneamiento deficiente. (Naciones Unidas, 2018)

En países en desarrollo se generan 14,000 millones de litros de agua residual no tratada al día, en promedio 6 L por persona. (Thomas, 2021) Debido a la ausencia de datos fiables aún no se conoce exactamente hacia donde fluyen todos los desechos humanos, contribuyendo al incremento de enfermedades diarreicas como cólera, fiebre tifoidea y rotavirus. Las tasas más altas de muerte infantil por diarreas se tienen en las comunidades más pobres como Afganistán, India y la República Democrática del Congo. (Thomas, 2021)

Según datos reportados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2018, los desafíos del agua a nivel mundial son:

- 2,100 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable
  - 4,500 millones de personas carecen de servicios de saneamiento
  - 340,000 niños menores de 5 años mueren anualmente por enfermedades diarreicas
  - La escasez del agua afecta 4 de cada 10 personas
  - El 90% de los desastres naturales se relaciona con el agua
  - El 80% de las aguas residuales generadas retornan al ecosistema sin recibir un tratamiento o ser reutilizadas
  - Alrededor de 2/3 de los ríos transfronterizos del mundo no cuentan con un marco de gestión cooperativa
- (Lozano E. , 2021)

## **E. Contexto del agua en Guatemala**

Guatemala está conformada por 38 cuencas hidrográficas y 194 cuerpos de agua de los cuales 7 corresponden a lagos, 109 lagunetas, 19 lagunas costeras, 7 embalses y 3 lagunas temporales. Se estima que de estos el 95% se encuentra contaminado, siendo la falta de drenajes y plantas de tratamiento en los municipios del país una de las causas principales. (INFOM, 2020) Anualmente se producen alrededor de 1540 millones de m<sup>3</sup> de agua residual (Basterrechea & Guerra Noriega, 2019), de los cuales solo el 20% recibe tratamiento previo a su disposición al ambiente (Morales Rodas, 2021). El volumen de agua contaminada descargada a las cuencas proviene de los municipios (40%), actividades agropecuarias (40%), industrias (13%) y agroindustrias (13%). (Basterrechea & Guerra Noriega, 2019)

El viceministro del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Martín Méndez, indicó que Guatemala es de los países con más riesgo de quedarse sin agua, a pesar de que 26% del territorio nacional tiene un potencial alto de ser zona de recarga hídrica. De los 97,120 millones de metros cúbicos de agua disponible en el país, únicamente el 10% se utiliza. (MARN, 2022) Existen algunos sectores con desabastecimiento y áreas en las que el agua solo cae algunos días o pocas horas a día, principalmente en las zonas con mayor densidad poblacional y bajos ingresos económicos. (Lozano E. , 2021)

Según la Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI-2011) la cobertura nacional de los sistemas de alcantarillado es del 38%. El resto de la población cubre las necesidades de saneamiento domiciliario a través del uso de letrinas, pozos ciegos, excusados lavables e inodoros conectados a la fosa séptica. (INFOM, 2020) El viceministro del Agua, Martín Méndez, presentó en 2021 datos estadísticos sobre la situación nacional del agua resaltando que, 58.9% cuenta con agua para consumo del hogar y 55.6% tiene un servicio sanitario. (MARN, 2021)

De acuerdo con el Fondo de Agua de la Región Metropolitana de Guatemala (Funcagua) la disponibilidad de agua enfrenta presiones por contaminación. El mal tratamiento de las aguas residuales puede provocar la escasez del líquido, agravando así los problemas sociales que enfrenta el país. Con el tiempo la falta de este bien es recurrente, principalmente en las áreas urbanas. (Morales Rodas, 2021)

### **1. Contaminación de los cuerpos de agua y escasez**

Guatemala tiene una oferta anual de agua de 97,120-110,340 millones de m<sup>3</sup>. Su consumo representa únicamente 10-22% de la disponibilidad total. (Nájera, 2022) De acuerdo con Segeplan, el agua para consumo humano representa el 16.2% del consumo, el sector agropecuario 72.1% y la industria 6.7%. (Nájera, 2022) La escasez hídrica que enfrenta el país es provocada por un manejo inadecuado del recurso y no por una ausencia de este. (Morales Rodas, 2021)

Gran parte de la población rural no tiene acceso a servicios de agua potable y saneamiento. En el caso de la ciudad de Guatemala, las zonas 21, 12, 7 y 18 son las que presentan mayor escasez del recurso y la mayor demanda debido a su densidad poblacional. (Lozano, 2021)

La región metropolitana es el área en la que más días al mes carecen del recurso, 8.1 días en promedio. Esta escasez ha generado la necesidad de abastecerse mediante toneles y camiones cisterna. (Nájera, 2022) En los últimos 80 años han desaparecido 25 lagunas en el país debido a la urbanización acelerada y contaminación. (Hemeroteca PL, 2015)

Actualmente las cuencas que surten de agua a la ciudad de Guatemala se encuentran amenazadas por una serie de problemas sociales, económicos y ambientales. Esto se debe principalmente al desfogue de aguas residuales sin tratamiento que contaminan los cuerpos de agua. Como consecuencia, la industria de agua potable se ha visto en la necesidad de obtener el recurso de nuevas fuentes. Esto, sumado al hecho de que no se cuentan con proyectos de recarga hídrica, ha provocado que la profundidad de los pozos aumente. Un estudio hidrogeológico realizado en el país en 1979 registró que las profundidades de los pozos eran de 300 pies. Ahora estas se encuentran entre 1200 y 1500 pies, demostrando que existe una sobreexplotación del recurso hídrico en el país. (Lozano, 2021) Se saca más agua de la que se recarga. (Morales Rodas, 2021)

La explotación indiscriminada de los recursos naturales y pesqueros y la aplicación deficiente de la legislación ambiental han contribuido a una mala gestión del recurso hídrico y su consiguiente contaminación. Después del Lago de Amatitlán y Atitlán, el más contaminado es el de Izabal. Investigaciones realizadas por el MARN indicaron que los desechos y aguas servidas de 16 de los 19 municipios de su cuenca llegan al lago sin recibir algún tipo de tratamiento. Las muestras tomadas en sus aguas revelaron la presencia de nutrientes, macroalgas, cobalto, cromo y zinc en exceso. El manto de Petén Itzá y el Lago de Güija, Asunción Mita, Jutiapa, también se han visto afectados por las descargas de residuos líquidos y sólidos, en especial plásticos. (Hemeroteca PL, 2015)

## **F. Agua residual**

El agua residual, también conocida como agua servida o efluente, se define como aquella que proviene de actividades domésticas, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias o de cualquier otra actividad que, por el uso que han tenido, contienen materia orgánica y otras sustancias químicas que alteran su calidad original. (Gobierno de la ciudad de México, 2014) Es un componente crítico del ciclo del agua y debe ser tomada en cuenta durante todo el ciclo de gestión del agua. (WWAP, 2017)

### **1. Tipos de agua residual**

Generalmente se distinguen cuatro categorías de agua residual: de lluvia (pluvial o blanca), doméstica, de agricultura e industrial. (Crini & Lichtfouse, 2018) Siguiendo lo estipulado por el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, el agua residual se clasifica como tipo especial u ordinario. El agua residual de tipo especial es “generada por servicios públicos municipales y actividades de servicios, industriales, agrícolas, pecuarias, hospitalarias y todas aquellas que no sean de tipo ordinario”. Mientras que el agua residual de tipo ordinaria es aquella “generada por actividades domésticas, tales como uso en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de estas, que se conduzcan a través de un alcantarillado”. (Acuerdo Gubernativo 236-2006, 2006)

Categorías de agua residual:

- **Doméstica.** Procedente de heces y orina humanas, aseo personal, cocina y actividades cotidianas. Están compuestas por una gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, restos de jabones, detergentes, lejía y grasa. (Espigares García & Pérez López, s.f.)
- **Blanca.** Procedente de la atmósfera (lluvia, nieve o hielo) o riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. Generalmente cuando son abundantes se separan en su propio sistema de alcantarillado. (Espigares García & Pérez López, s.f.)
- **Industrial.** Procedentes de fábricas y establecimientos industriales. Generalmente contienen aceites, detergentes, ácidos, grasas, productos y subproductos de origen mineral, químico vegetal o animal, entre otros. Su composición varía dependiendo de la actividad industrial que se realiza. (Espigares García & Pérez López, s.f.)
- **Agrícola.** Procedente de labores agrícolas en zonas rurales. (Espigares García & Pérez López, s.f.)

## 2. Composición y contaminantes del agua residual municipal

La composición del agua residual se encuentra en función del uso al que estuvo sujeta y la fuente de la que proviene. Varía en relación con el clima, los hábitos sociales y económicos de la población. Usualmente se cree que el agua residual está compuesta por agua en un 99% y que el 1% restante corresponde a sólidos en suspensión, coloidales y disueltos. (WWAP, 2017) Generalmente las aguas residuales domésticas y municipales contienen cargas bacterianas altas. Mientras que las aguas residuales provenientes de actividades industriales y mineras pueden contener compuestos orgánicos tóxicos como hidrocarburos, bifenilos policlorados, contaminantes orgánicos persistentes (COP), compuestos orgánicos volátiles (COV) y disolventes clorados. (WWAP, 2017)

Cuadro 1. Componentes típicos en las distintas fuentes de aguas residuales.

Fuentes de aguas residuales	Componentes típicos
<b>Agua residual doméstica</b>	Excrementos humanos (microorganismos patógenos), nutrientes y materia orgánica. Pueden contener contaminantes emergentes.
<b>Agua residual municipal</b>	Amplia gama de contaminantes como microorganismos patógenos, nutrientes y materia orgánica, metales pesados y contaminantes emergentes.
<b>Agua residual industrial</b>	Sus contaminantes dependen del tipo de industria que los genera.

(WWAP, 2017)

Investigaciones recientes han revelado que los contaminantes PFAS (poli y perfluoroalquilos) son más comunes en el agua de grifo de lo que se esperaba. Estos se utilizan para que los artículos de uso cotidiano se vuelvan resistentes a la humedad, al calor

y las manchas. Algunas de estas sustancias químicas tienen una vida media tan larga que se las conoce como "la sustancia química eterna". (Nunez, 2022)

Para realizar el diseño de una planta de tratamiento de agua residual no es necesario realizar pruebas de laboratorio para determinar los distintos compuestos que la conforman. Es suficiente con utilizar parámetros indirectos que representen el potencial de contaminación del agua residual de interés. Estos parámetros definen la calidad del agua residual y se pueden dividir en tres categorías: físicos, químicos y biológicos. (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005)

Cuadro 2. Contaminantes principales en el agua residual, sus parámetros más representativos y efectos.

<b>Contaminante</b>	<b>Parámetro representativo</b>	<b>Posibles efectos</b>
<b>Sólidos suspendidos</b>	Sólidos suspendidos totales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problemas estéticos</li> <li>- Depósitos de lodos</li> <li>- Adsorción de contaminantes</li> <li>- Protección para patógenos</li> </ul>
<b>Materia orgánica biodegradable</b>	Demanda bioquímica de oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumo de oxígeno</li> <li>- Muerte de peces</li> <li>- Condiciones sépticas</li> </ul>
<b>Nutrientes</b>	Nitrógeno, Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Crecimiento excesivo de algas</li> <li>- Toxicidad en peces (amonio)</li> <li>- Enfermedades en recién nacidos (nitrato)</li> <li>- Contaminación de agua subterránea</li> </ul>
<b>Patógenos</b>	Coliformes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfermedades de transmisión por agua</li> </ul>
<b>Materia orgánica no biodegradable</b>	Pesticidas, detergentes, otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toxicidad</li> <li>- Espuma (detergentes)</li> <li>- Reducción de transferencia de oxígeno (detergentes)</li> <li>- Mal olor (fenoles)</li> </ul>
<b>Metales</b>	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toxicidad</li> <li>- Inhibición del tratamiento biológico de agua residual</li> <li>- Contaminación de agua subterránea</li> </ul>

Contaminante	Parámetro representativo	Posibles efectos
Sólidos inorgánicos disueltos	Sólidos disueltos totales, conductividad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Salinidad excesiva</li> <li>- Toxicidad en plantas (iones)</li> <li>- Problemas de permeabilidad (sodio)</li> </ul>

(von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005)

### 3. Parámetros de calidad

#### a. *Parámetros principales para definir la calidad del agua residual*

Actualmente la política europea sobre el agua resulta del “Water Framework Directive of 2000”. Este establece las guías para la protección de agua superficial, subterránea y costera en Europa. Clasifica los químicos en dos listas de prioridad de sustancias, la lista negra y gris. La primera involucra las sustancias peligrosas prioritarias que se considera que son persistentes, altamente tóxicas o que conllevan a bio acumulación. La segunda incluye sustancias que pueden representar un riesgo significativo para el ambiente. (Crini & Lichtfouse, 2018)

#### b. *Parámetros para aguas residuales y valores de descarga a cuerpos receptores*

En conformidad con el Artículo 21 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, los entes generadores nuevos deberán cumplir desde el inicio de sus operaciones con una máximo de 3000 kg por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que 200 mg/L de demanda bioquímica de oxígeno. (Crini & Lichtfouse, 2018)

### 4. Consecuencias de una descarga sin tratamiento o con tratamiento inadecuado

La descarga de agua residual con un tratamiento deficiente o ausente a distintos cuerpos de agua provoca cambios significativos en su calidad, así como la contaminación de las aguas superficiales, el suelo y las aguas subterráneas. Una vez vertidas, estas se diluyen y son transportadas aguas abajo, o se infiltran a los acuíferos afectando la calidad y disponibilidad de los suministros de agua dulce. El destino final del agua residual que se vierte en ríos y lagos es, generalmente, el océano. (WWAP, 2017)

Las consecuencias de un vertido de agua residual sin tratamiento o con tratamiento deficiente se clasifica en tres grupos según su efecto.

- **Efectos para la salud humana.** Los riesgos a la salud pública permanecen debido a la mala contención, fugas durante el vaciado y el transporte y tratamiento ineficaz. Se estima que únicamente 26% de los servicios urbanos de saneamiento y 34% de los rurales, a nivel mundial, previenen de manera efectiva el contacto de los humanos con excremento. En zonas en las que la cobertura de los servicios de saneamiento y aguas residuales son

bajos es común que se desarrollen enfermedades como el cólera. Se estima que, en 2012, en países de ingresos medios y bajos, 842,000 personas murieron debido a la ingesta de agua potable contaminada. (WWAP, 2017)

- **Efectos ambientales.** Verter agua residual no tratada al medio ambiente impacta de manera directa la calidad del agua y la cantidad de recursos hídricos disponibles para uso directo. Desde 1990 la contaminación de agua en ríos de África, Asia y América Latina ha aumentado debido al aumento en la generación de agua residual y su consiguiente vertido sin tratamiento o cumpliendo niveles mínimos. Aproximadamente 245,000 km<sup>2</sup> de ecosistemas marinos alrededor del mundo están afectados por la formación de zonas muertas desoxigenadas. (WWAP, 2017)
- **Efectos en actividades económicas.** La mala calidad del agua constituye un obstáculo adicional al desarrollo económico, ya que dificulta la productividad agrícola en entornos naturales y periurbanos. Puede afectar la producción industrial, pesca, acuicultura y el turismo. (WWAP, 2017)

Cuadro 3. Ejemplos de impactos negativos de las aguas residuales no tratadas.

<b>Impacto en</b>	<b>Ejemplos de impactos</b>
<b>Salud</b>	Aumento de la carga de morbilidad debido a: la reducción de la calidad del agua potable, la reducción de la calidad del agua de baño, alimentos nocivos (pescado contaminado, verduras y otros productos de regadío) Aumento del riesgo de morbilidad al trabajar o jugar en un área irrigada por aguas residuales
<b>Medio ambiente</b>	Disminución de la biodiversidad Degradación de los ecosistemas acuáticos Olores desagradables Disminución de oportunidades recreativas Aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero Aumento de la temperatura del agua Bioacumulación de toxinas
<b>Economía</b>	Reducción de: productividad industrial y agrícola, el valor de mercado de los cultivos cosechados al usar aguas peligrosas para el riego, las oportunidades de actividades recreativas acuáticas, las capturas de peces y mariscos o el valor de mercado de pescados y mariscos Aumento de: la carga financiera sobre la asistencia sanitaria, las barreras al comercio internacional

Impacto en	Ejemplos de impactos
<b>Economía</b>	Costos más altos de tratamiento de agua (para suministro humano y otros usos) Reducción de precios de propiedades cerca de masas de agua contaminadas

(WWAP, 2017)

El 25 de septiembre de 2015 se adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Esta incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), basados en los progresos y lecciones aprendidas de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), que buscan poner fin a la pobreza, proteger el medio ambiente y garantizar la prosperidad para todos. Se esperaba que para el año 2015, en concordancia con la Meta 7c de los ODM, se redujera a la mitad la proporción de personas sin acceso a agua potable y a los servicios básicos de saneamiento. La meta relacionada con el agua potable se alcanzó tres años antes del plazo, mientras que la meta de saneamiento no se logró. Aproximadamente 2.400 millones de personas aún no tienen acceso a saneamiento mejorado. (WWAP, 2017)

El ODS 6 “Agua Limpia y Saneamiento” ha abordado el tema de abastecimiento y saneamiento del agua de manera amplia, inclusiva e integrada, mediante la mejora en la gestión de recursos hídricos. Sus metas cubren aspectos del ciclo de agua y los sistemas de saneamiento. La meta 6.3 indica: “Para 2030, mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos, la reducción a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y un aumento sustancial del reciclado y la reutilización en condiciones de seguridad a nivel mundial”. Dicha meta es la más vinculada a la gestión de aguas residuales y cuenta con dos indicadores globales para monitorear su progreso, estos son: la proporción de aguas residuales tratadas de forma segura y la proporción de las masas de agua con buena calidad de agua ambiental. (WWAP, 2017)

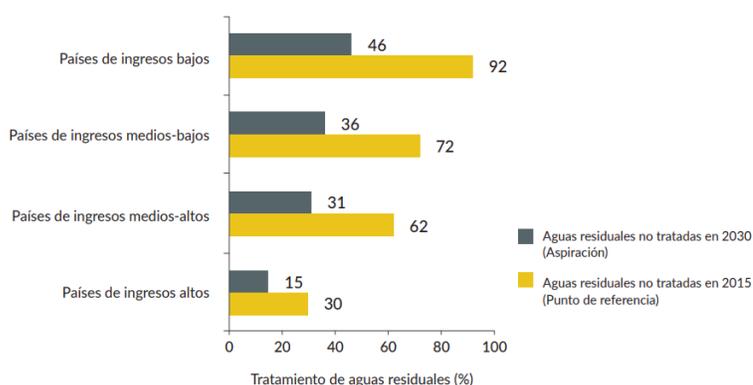


Figura 3 Porcentaje de aguas residuales no tratadas a nivel mundial en 2015 y las aspiraciones para el 2030.

(WWAP, 2017)

## 5. Tratamiento

La mayoría de las actividades domésticas e industriales generan agua residual con contaminantes, por lo que es necesario tratarla. El tratamiento de las aguas residuales puede permitir la separación del agua y otros componentes que pueden llegar a ser reutilizados o eliminados (WWAP, 2017). Los métodos de tratamiento actuales involucran una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos, así como diversos procesos para la remoción de partículas insolubles y solubles del efluente. (Crini & Lichtfouse, 2018)

- **Procesos físicos.** La eliminación de las sustancias se hace mediante el uso de fuerzas naturales (gravedad) y barreras físicas (filtros y membranas). (WWAP, 2017)
- **Procesos químicos.** Generalmente utilizados para la desinfección y eliminación de metales pesados. (WWAP, 2017)
- **Procesos biológicos.** Reproducen la degradación que ocurre naturalmente en ríos, lagos y arroyos. (WWAP, 2017)

El tratamiento de agua residual convencional consiste en 5 pasos: tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario o purificación, tratamiento terciario o final y tratamiento de los lodos formados (reciclaje o incineración). (Crini & Lichtfouse, 2018) El tipo de sistema de recolección y posterior tratamiento del agua residual puede ser de dos tipos: ex situ (el residuo se transporta a través de una red de alcantarillado a una planta de tratamiento punto de eliminación) e in situ (los residuos se acumulan en una letrina o fosa séptica). (WWAP, 2017)

- **Tratamiento preliminar.** Consiste en la eliminación de elementos de separación rápida por medios físicos y acondicionar el agua para el tratamiento en unidades posteriores. Generalmente está compuesto por una rejilla, desarenador y trampa de grasa. (Recinos, 2022; Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Laroj, & Salazar Ortiz, 2003)
- **Tratamiento primario.** Su principal objetivo es remover los sólidos, sedimentables y particulados, que van en el agua y realizar la degradación anaeróbica de materia orgánica. (Recinos, 2022) Se trata básicamente de un proceso de sedimentación. En algunas ocasiones se incorporan unidades de filtración, flotación y precipitación. (INFOM, 2020) Las principales unidades de tratamiento son el sedimentador primario, fosa séptica y Tanque Imhoff.
- **Tratamiento secundario.** Es el proceso utilizado para remover materia orgánica y sólidos solubles y particulados en suspensión. (Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Laroj, & Salazar Ortiz, 2003) Para ello es necesario generar un ambiente propicio para que las bacterias sean capaces de alimentarse de dicha materia. (INFOM, 2020) Las unidades de tratamiento más comunes son RAFA, filtro percolador, lodos activados, lagunas y humedales.
- **Tratamiento terciario.** Mediante este proceso se realiza la remoción de nutrientes, patógenos y metales con el fin de alcanzar la calidad física, química y biológica necesaria

para realizar la descarga a cuerpos receptores. (INFOM, 2020) Dependiendo de las condiciones del agua y el uso que se le dará posterior al tratamiento se pueden incluir sistemas de desinfección (cloración u otro) para eliminar microorganismos. Normalmente consiste en remover nutrientes (nitrógeno y fósforo) del agua. (Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Larroj, & Salazar Ortiz, 2003)

- **Tratamiento de lodos.** Consiste en el tratamiento de los sólidos removidos del agua contaminada. La finalidad es secar los lodos y tratarlo mediante un proceso que requiere tiempo y temperatura para eliminar patógenos. Puede incluir patios de secado o deshidratación, espesadores y digestión. (INFOM, 2020; Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Larroj, & Salazar Ortiz, 2003)

Cuadro 4. Nivel de tratamiento de agua residual y lo que se busca remover del agua.

<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Principio de tratamiento</b>	<b>Remoción</b>
<b>Preliminar</b>	Físico	Sólidos suspendidos gruesos (materiales grandes y arena)
<b>Primario</b>	Físico Biológico	Sólidos suspendidos sedimentables DBO (Demanda biológica de oxígeno) particulada asociada al componente de materia orgánica en los sólidos suspendidos sedimentables.
<b>Secundario</b>	Físico Biológico Químico	DBO (Demanda biológica de oxígeno) particulada asociada al componente de materia orgánica en el agua residual o la parte no sedimentable de la materia orgánica DBO soluble asociado a la materia orgánica en la forma de sólidos disueltos
<b>Terciario</b>	Físico Biológico Químico	Nutrientes Organismos patógenos Compuestos no bio degradables Metales Sólidos disueltos inorgánicos Sólidos suspendidos restantes

(von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005)

El tratamiento biológico del agua residual se encuentra influenciado por el clima. La temperatura tiene un rol determinante en el proceso del tratamiento, en especial en los tratamientos naturales y no mecanizados. Las temperaturas cálidas tienen algunas ventajas como: disminuir los requisitos de la tierra, mejorar los procesos de conversión, aumentar la eficiencia de remoción y hacer que algunos tratamientos sean factibles, como el uso de reactores anaeróbicos para el tratamiento de agua residual diluida. (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005)

## G. Tecnologías más utilizadas a nivel mundial

La red de alcantarillado que se utilice para el transporte y recolección de aguas residuales puede ser separativo o combinado. En los sistemas separados se utilizan tuberías distintas para transportar las aguas residuales y la escorrentía por agua de lluvia. En los sistemas combinados ambos flujos se transportan juntos. El propósito de utilizar sistemas separados es reducir la cantidad de agua residual que se debe tratar y así evitar desbordamientos. Sin embargo, estos sistemas no funcionan adecuadamente cuando no se tiene un control adecuado sobre el mismo y se realizan conexiones ilegales a las tuberías de escorrentía. (WWAP, 2017)

El tratamiento de agua residual puede ser centralizado o descentralizado. En los sistemas centralizados el agua residual se recolecta para un gran número de usuarios y se tratan conjuntamente en uno o más sitios. Por otro lado, los sistemas descentralizados son utilizados generalmente para viviendas individuales, comunidades dispersas y de baja densidad y en zonas rurales. (WWAP, 2017)

Algunas de las ventajas y desventajas de las unidades de tratamiento utilizadas con frecuencia se presentan a continuación.

Cuadro 5. Ventajas y desventajas de determinadas unidades de tratamiento de agua residual.

Tipo	Naturaleza del agua residual	Ventajas	Desventajas	Componentes eliminados
Sistemas sépticos	Doméstica	Simple Duradero Fácil mantenimiento Requiere espacio pequeño	Baja eficiencia de tratamiento Requiere tratamiento secundario Efluente no inodoro	DQO DBO TSS Grasa
Sanitarios de compostaje	Excrementos humanos, papel higiénico, aditivo de carbono,	Reduce consumo de desechos Apoya el reciclaje de nutrientes	Requiere diseño y mantenimiento adecuado	Volumen reducido de 10% a 30% Patógenos

<b>Tipo</b>	<b>Naturaleza del agua residual</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Componentes eliminados</b>
	residuos de alimentos.			
Filtro anaeróbico	Doméstica Industrial	Simple y duradero Alta eficiencia de tratamiento Requiere poca superficie	El material puede ser costoso Se puede obstruir el filtro Efluente no inodoro	DBQ Sólidos disueltos totales TSS
Tratamiento anaeróbico (biodigestor, RAFA)	Excrementos humanos, desechos animales y agrícolas	El gas se puede usar para generar energía	Funcionamiento y mantenimiento complejo Poca eliminación de nutrientes	DQO DBQ TSS Grasa
Estanques de estabilización  Estanques anaeróbicos facultativos y de maduración	Doméstica Industrial Agrícola	Los de maduración pueden tener buena eliminación bacteriana El biogás se puede recuperar como fuente de energía	Uso intensivo de tierra	DBO SS TN TP
Humedales artificiales	Doméstica Agrícola Para pequeñas comunidades Para tratamiento terciario de industrias	Baja o ninguna necesidad de energía Costos de mantenimiento bajos Valor estético y comercial	Uso intensivo de tierra El sistema se puede obstruir	TSS DQO TN TP
Tratamiento biológico aeróbico	Doméstica Industrial	Rápido y económico Libre de olores Buena eliminación de DBO Puede eliminar nitrógeno y fósforo	Requisitos de mantenimiento altos Poca eliminación de cargas bacterianas Alta producción de lodos	DBO SS TN TP

Tipo	Naturaleza del agua residual	Ventajas	Desventajas	Componentes eliminados
<p>Sistema de membrana:</p> <p>Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa</p>	<p>Agua residual depositada previamente</p>	<p>Producen agua de alta pureza para reúso Se puede combinar con procesos biológicos (MBR, MBBR)</p>	<p>Costos más altos Mayores requisitos en funcionamiento, mantenimiento y consumo energético</p>	<p>Microfiltración y ultrafiltración eliminan todos los agentes biológicos y macromoléculas. La nanofiltración elimina moléculas orgánicas simples La ósmosis inversa elimina iones inorgánicos</p>

(WWAP, 2017)

## H. Tecnologías utilizadas en Guatemala

En Guatemala el agua residual generada en el área doméstica debería ser recolectada en cada casa para posteriormente conectarse a la red de drenajes, generalmente de los municipios. (INFOM, 2020) Estos sistemas de drenaje se pueden dividir en: sanitarios, pluviales o combinados. En la Figura 3 se muestra un esquema del funcionamiento de un sistema de drenaje. En caso de que sea únicamente sanitario el agua de lluvia no se mezclaría con la red y sería alcantarillado separativo, de lo contrario se trata de un sistema combinado. (INFOM, 2020) Existe la posibilidad de que la industria vierta aguas residuales al sistema de alcantarillado municipal. Todos los entes generadores de agua residual deben cumplir con lo establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

El tipo de tecnología seleccionada para realizar el tratamiento de aguas residuales depende del tipo de componentes, la carga contaminante, la disponibilidad de espacio para las instalaciones y los recursos financieros y humanos disponibles. (WWAP, 2017)

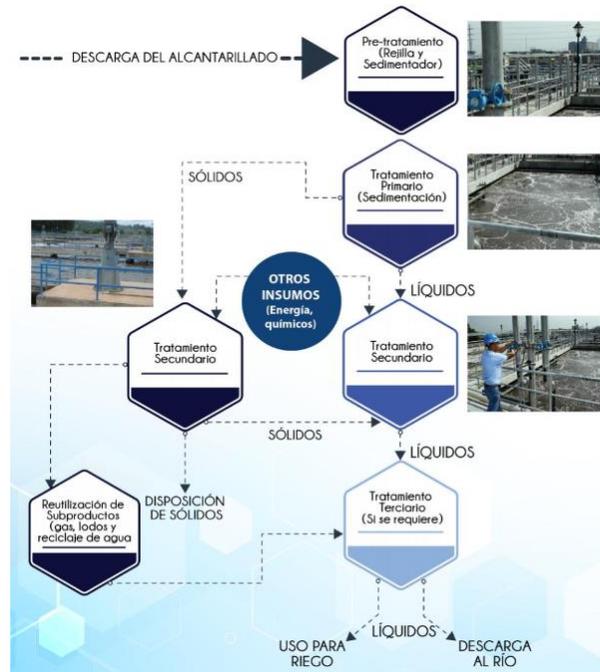


Figura 4 Esquematzación del tratamiento de aguas residuales.

(INFOM, 2020)

A continuación, se presentan los sistemas de tratamiento de aguas residuales más utilizados en Centroamérica según su nivel de tratamiento. (Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Laroj, & Salazar Ortiz, 2003)

#### i. Tratamiento preliminar

- **Caja derivadora.** Estructura que recibe agua de los colectores para ser introducida a la planta de tratamiento o derivada nuevamente al canal de vertido. (Gobierno del Estado de Guerrero , 2015)
- **Canal de rejas.** Su objetivo es remover materiales gruesos que podrían perjudicar el sistema de la planta de tratamiento. (Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Laroj, & Salazar Ortiz, 2003)
- **Desarenador.** Es utilizado para extraer la arena que se encuentra en el agua residual. Si no se eliminan se podrían tener dificultades operacionales en tanques de sedimentación y en la digestión de lodos debido a que se acumularían alrededor de las tuberías de entrada. (Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Laroj, & Salazar Ortiz, 2003)
- **Trampa de grasa.** Utilizado para la eliminación de aceites y grasas, ya que estos dificultan los procesos aeróbicos, la difusión de oxígeno en el agua y la degradación de la materia orgánica. (ECODENA, 2023)

## ii. Tratamiento primario

- **Fosa séptica con pozo de absorción.** Utilizado para sistemas de tratamiento pequeños (domésticos individuales) sin conexión a drenaje.
- **Sedimentador primario.** Generalmente utilizado en sistemas de tratamiento de agua residual municipal. Consiste en la sedimentación de sólidos, sin almacenarlos, y su posterior extracción. Es la forma más barata de remover la carga orgánica del agua. (Recinos, 2022)
- **Tanque IMHOFF.** Utilizado en sistemas de tratamiento domésticos para separar los sólidos sedimentables orgánicos y reducir el volumen de lodos. (Recinos, 2022) Dentro del tanque se realiza el proceso de sedimentación en la parte superior y digestión en la parte inferior. (INFOM, 2020)
- **Laguna anaerobia primaria.** Primera fase de tratamiento. Se puede considerar como digestor. Debido a que generan malos olores es necesario localizarlas por lo menos a 500 metros de la casa más cercana. (INFOM, 2020)

## iii. Tratamiento secundario

- **Filtro percolador.** También se conoce como filtro biológico o de lechos bacterianos. Consiste en el crecimiento de microorganismos sobre la superficie de un lecho de material grueso, como rocas, grava, material plástico u otro, sobre el cual se aplica el agua residual en forma de gotas o chorros llevando a cabo procesos de auto depuración del agua. (Sainz Sastre, 2005)
- **Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA).** Se caracteriza por tener un flujo ascendente y formar un manto de lodo floculento o granular con buena capacidad de sedimentación en el que se realiza la actividad biológica. (Calvache, y otros, 2002)
- **Sedimentador secundario.** Tiene dos funciones principales: clarificar el agua tratada y espesar los lodos separados. Es crítico en el proceso de lodos activados para alcanzar la eficiencia deseada. (Recinos, 2022)
- **Lagunas y humedales.** Los tratamientos de aguas residuales con lagunas mecanizadas pueden ser: anaerobias, facultativas y de maduración. La laguna anaeróbica es un proceso de tratamiento lento que remueve la materia orgánica mediante sedimentación y degradación anaeróbica. La laguna facultativa puede funcionar de manera aeróbica o anaeróbica, dependiendo de la producción de oxígeno, para remover materia orgánica. (Recinos, 2022) Los humedales se utilizan para eliminar contaminantes mediante distintos procesos como la sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización. Estos pueden llegar a reemplazar el tratamiento secundario y, bajo las condiciones adecuadas, el terciario y primario. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

- **Lodos activados.** Se utiliza con frecuencia para el tratamiento de agua residual urbana e industrial contaminada por materia orgánica biodegradable. La eliminación de la materia orgánica se hace a través de una biomasa o conjunto de microorganismos que la utilizan como sustrato o fuente de alimentación. (Sainz Sastre, 2005)

#### iv. Tratamiento terciario

- **Laguna de maduración.** Tiene como principal objetivo remover organismos patógenos. (Recinos, 2022)
- **Biofiltros y humedales.** Los biofiltros son humedales artificiales de flujo subterráneo con poca profundidad y rellenas con un material utilizado como lecho filtrante. En su superficie se siembran plantas de pantano. Son utilizados para remover los contaminantes en el agua residual. (WSP , 2006)

Cuadro 6. Eficiencias de remoción de las tecnologías utilizadas para el tratamiento primario.

Tecnología	Eficiencias de remoción (%)						
	SS	DQO	DBO	DBO5	Amoníaco	NT	PT
Fosa séptica	40-60	20-40	30	20-40	< 30	< 30	< 35
Sedimentador primario	50-65	30	30	-	-	-	-
Tanque Imhoff	60	35-60	40	-	-	-	-
Laguna anaerobia primaria	95-100	-	95	-	-	-	-

(Recinos, 2022; von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005; Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Larroj, & Salazar Ortiz, 2003)

Cuadro 7. Eficiencias de remoción de las tecnologías utilizadas para el tratamiento secundario y terciario.

Tecnología	Nivel de tratamiento	Eficiencia de remoción (%)					
		SS	DQO	DBO5	Amoníaco	NT	PT
<b>Filtro percolador de alta tasa</b>	Primario avanzado, secundario o terciario	87-93	70-87	80-90	< 50	< 60	< 35
<b>RAFA</b>	Primario avanzado	65-80	55-70	60-75	< 50	< 60	< 35
<b>Laguna facultativa</b>	Primario, secundario y terciario	70-80	65-80	75-85	<50	< 60	< 35
<b>Humedales artificiales</b>	Secundario y terciario	87-93	75-85	80-90	< 50	< 60	< 35
<b>Lodos activados</b>	Secundario	87-93	80-90	85-93	> 80	< 60	< 35

(von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005; INFOM, 2020)

Cuadro 8. Eficiencias de remoción de las tecnologías utilizadas para eliminar patógenos.

Tecnología	Eficiencia de remoción (%)		
	Coliformes	Protozoos y helmintos	Patógenos
Laguna de maduración	99.99	100	95-99.99
Biofiltros (filtro percolador)	-	-	30-40%

(Arriaza, Stanley Cáceres, Dueñas, Gil Larroj, & Salazar Ortiz, 2003)

## 1. Planta de tratamiento ejecutada

En el presente apartado, se muestran dos ejemplos de plantas de tratamiento de agua residual ejecutadas en el municipio de Mixco. La información fue recabada del Estudio Técnico preliminar de caracterización de efluentes, descargas, aguas para reúso y lodos de la Municipalidad de Mixco, el cual fue elaborado en mayo 2015 por el licenciado José Fernando Iriarte Colmenares.

01 PLANTA DE TRATAMIENTO "LA LIBERTAD"							
							
PLANO DE UBICACIÓN				FOTOGRAFÍAS EXTERIORES			
DESCRIPCIÓN:							
ESTATUS:		FUNCIONANDO		RESPONSABLE		MUNICIPALIDAD DE MIXCO	
TRATAMIENTO:		AEROBIA					
FASES DE TRATAMIENTO							
PRETRATAMIENTO		TRATAMIENTO PRIMARIO		TRATAMIENTO SECUNDARIO		OTROS	
RETENCION DE SOLIDOS EN SUSPENSION		PROCESO DE REMOCION DESECHOS BIODEGRADABLES		PROCESO PARA REMOCION DE CONTAMINANTES ORGANICOS,		OBRAS DE INFRAESTRUCTURA	
Caja colectora		El Tanque Imhoff se divide en 3 Compartimientos		Sedimentador Secundario		MALLA PERIMETRAL	
Canal de Rejas		1. Cámara de digestión		Digestor aerobio con bacterias		2 motores de 4 HP	
Desarenador		2. Cámara de sedimentación		Patio de Secado de lodos		CASETA MOTORES	
Retencion de grasas		Bomba de oxigenacion de 4 HP		Bomba de oxigenacion de 20 HP		CASETA GUARDIA Y OPERADOR	
DESFOGUE:		LINEA DE DESCARGA A RIO MARISCAL - VILLA LOBOS					
DATOS DE DISEÑO:				PARAMETROS:			
EVALUACION AMBIENTAL		DBO - DQO		horas de trabajo		24 x 24	
DQO salida (mg/L)		340		CAUDAL (L/min)		227.1	
RELACION DBO/DBQ		0.29		CARGA (KG/día)		33	
EQUIPO INSTALADO							
MOTOR		20 HP					
DOCUMENTOS							
MANUAL DE OPERACIÓN Y MANT	SI	PLANOS PLANTA	SI	PLANOS RED	NO	ESTUDIO TECNICO	EN EJECUCION
EFICIENCIA DE LA PLANTA							
DBO entrada (mg/L)		220					
DBO salida (mg/L)		100					
EFICIENCIA DEL SISTEMA EN REDUCCION DBO		55%					
DATOS DEL INMUEBLE:							
DIRECCIÓN		1era ave y 22 calle A colonia la Libertad zona 10 de Mixco					
PERSONAL ENCARGADO							
		NOMBRE PERSONAL ASIGNADO			Francisco Camey		
		NOMBRE SUPERVISOR DE PTAR			Moises Grave		
		NOMBRE JEFE TRATAMIENTO AGUAS			Lic. Fernando Iriarte		

Figura 5 Ficha técnica del sistema de tratamiento de aguas residuales "La Libertad".  
(Iriarte Colmenares, 2015)

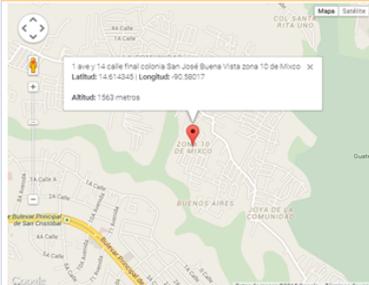
02 PLANTA DE TRATAMIENTO "BUENA VISTA"							
							
PLANO DE UBICACIÓN				FOTOGRAFÍAS EXTERIORES			
DESCRIPCIÓN:							
ESTATUS:		FUNCIONANDO		RESPONSABLE		MUNICIPALIDAD DE MIXCO	
TRATAMIENTO:		ANAEROBIA					
FASES DE TRATAMIENTO							
PRETRATAMIENTO		TRATAMIENTO PRIMARIO		TRATAMIENTO SECUNDARIO		OTROS	
RETENCION DE SOLIDOS EN SUSPENSION		PROCESO DE REMOCION DESECHOS BIODEGRADABLES		PROCESO PARA REMOCION DE CONTAMINANTES ORGANICOS,		OBRAS DE INFRAESTRUCTURA	
Caja colectora Canal de Rejas Desarenador		El Tanque Imhoff se divide 1. Cámara de digestión 2. Cámara de sedimentación 3. Área de respiración y		Sedimentador Secundario Digestor Anaerobio con Patio de Secado de lodos 2 pozos de absorcion		Caseta del operador	
DESFOGUE:		LINEA DE DESCARGA A RIO MARISCAL - VILLA LOBOS					
DATOS DE DISEÑO:				PARAMETROS:			
EVALUACION AMBIENTAL		DBO - DQO		horas de trabajo		24 x 24	
DQO salida (mg/L)		640		CAUDAL (L/min)		39,16	
RELACION DBO/DBQ		0,33		CARGA (kg/día)		12	
EQUIPO INSTALADO							
MOTOR		n.a.					
DOCUMENTOS							
MANUAL DE OPERACIÓN Y MANT	SI	PLANOS PLANTA	SI	PLANOS RED	NO	ESTUDIO TECNICO	EN EJECUCION
EFICIENCIA DE LA PLANTA							
DBO entrada (mg/L)		300					
DBO salida (mg/L)		210					
EFICIENCIA DEL SISTEMA EN REDUCCION DBO		38%					
DATOS DEL INMUEBLE:							
DIRECCIÓN	1era ave y 14 calle final colonia San José Buena Vista zona 10 de Mixco						
PERSONAL ENCARGADO							
	NOMBRE PERSONAL ASIGNADO			Walter Coco			
	NOMBRE SUPERVISOR DE PTAR			Moises Grave			
	NOMBRE JEFE TRATAMIENTO AGUAS			Lic. Fernando Iriarte			

Figura 6 Ficha técnica del sistema de tratamiento de aguas residuales "Buena Vista".  
(Iriarte Colmenares, 2015)

## VII. METODOLOGÍA

En la siguiente sección se muestra el proceso de selección de las tecnologías para el tratamiento de agua residual municipal. Se identifican tres supuestos sobre los cuales se trabaja. El primero es que el agua residual municipal corresponde al tipo ordinario; agua residual generada por actividades domésticas, tales como el uso de servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares. El segundo considera que el tipo de drenaje es separativo. Es decir, que no existe mezcla entre el agua residual doméstica y la escorrentía por lluvia. El tercer, y último supuesto, indica que el tipo de sistema de manejo que se tendrá del agua residual es centralizado. Considerando que es recolectada para recibir tratamiento en instalaciones municipales. No se asume que todos los domicilios cuentan con una fosa séptica o alguna forma de tratamiento y que no hay infiltraciones o conexiones ilícitas al sistema de drenaje municipal.

### A. Clasificación preliminar de tecnologías

En base a distintas bibliografías, y a los supuestos mencionados con anterioridad, fue posible hacer un compendio de aquellas unidades de tratamiento innovadoras o emergentes. Estas fueron clasificadas en cinco categorías. Cada una se define como sigue:

- 1. Proceso adaptativo.** Corresponde a aquellos procesos convencionales que han sido modificados o adaptados, logrando así alcanzar objetivos de tratamiento adicionales. Engloba a aquellos sistemas de tratamiento en los que el único cambio en el sistema convencional es el orden en el que se realizan las cosas o la cantidad de compartimientos o zonas de tratamiento que contiene.
- 2. Innovador.** Incluye a las tecnologías establecidas e implementadas a gran escala en otros países y que no han sido utilizadas en Guatemala.
- 3. Investigación.** Son aquellas tecnologías que están en etapa de desarrollo o han sido evaluadas únicamente a escala de laboratorio o piloto.
- 4. Utilizado.** Tecnologías que se usan actualmente, o se han utilizado, para el tratamiento de agua residual ordinaria en el país.
- 5. No aplica.** Procesos o tecnologías en las que el agua residual para el cual es utilizado no es ordinaria.

Adicionalmente se realizó una clasificación general en base a su función principal. La lista de tecnologías o procesos se muestra a continuación.

Cuadro 9. Tecnologías y procesos utilizados para el tratamiento de agua residual.

<b>Nombre</b>	<b>Objetivo de tratamiento</b>	<b>Clasificación</b>
Ácido Peracético (PAA)	Desinfectante	Utilizado
Arrastre con aire	Eliminación de nutrientes	Innovador
Bardenpho (cinco y cuatro etapas)	Eliminación de fósforo y nitrógeno	Proceso adaptativo
Biorreactor de lecho móvil (MBBR)	Proceso de biopelícula	Utilizado
Biorreactor de membrana (MBR)	Procesos de membrana	Utilizado
Bioteología de suelo o filtro construido de tierra (SBT)	Tratamiento biológico Natural	Innovador
Cloro, Hipoclorito	Desinfectante	Utilizado
Contactador biológico rotativo (CBR)	Reactor anaerobio Proceso de biopelícula	Utilizado
Desinfección con bromo (BCDMH)	Desinfectante	Innovador
Desinfección ultravioleta (UV)	Desinfectante	Utilizado
Desnitrificación y acumulación de fosfato en proceso anóxico (DEPHANOX)	Bioaumentación	Proceso adaptativo
Digestores que producen biogás/ digestor anaerobio	Biodigestor	Utilizado
Electro-coagulación	Electroquímico	Utilizado

<b>Nombre</b>	<b>Objetivo de tratamiento</b>	<b>Clasificación</b>
Electro-deposición	Electroquímico	Utilizado
Electrodialisis	Electroquímico	Utilizado
Filtración por medios compresibles (CMF)	Filtración	Innovador
Filtración rápida por arena	Filtración	Utilizado
Filtro de retrolavado automático o puente móvil (ABF)	Eliminación de sólidos	Innovador
Filtro percolador	Reactor anaerobio Proceso de biopelícula	Utilizado
Flotación por aire disuelto (DAF)	Sedimentación Eliminación de fósforo	Utilizado
Filtro Salsnes	Filtración	Innovador
Humedales artificiales	Natural	Utilizado
Lodos activados de pozo profundo (VERTREAT)	Lodos activados	Utilizado
Lodo granular aerobio (AGS)	Asentamiento de sólidos Tratamiento biológico aerobio	Innovador
Membrana de rotación de vacío (VRM)	Proceso de membrana	Innovador
Oxidación anaeróbica de amonio (ANAMMOX)	Eliminación de nitrógeno	Innovador
Ozono	Desinfección	Utilizado

<b>Nombre</b>	<b>Objetivo de tratamiento</b>	<b>Clasificación</b>
Proceso Actiflo	Clarificación Eliminación de sólidos	Proceso adaptativo
Proceso biológico activado de múltiples etapas (MSABP)	Reactor biológico	Innovador
Proceso convencional de reciclaje autótrofo mejorado de eliminación de nitrógeno (MAUREEN)	Bioaumentación	Proceso adaptativo
Proceso de bioaumentación de regeneración/reaireación (BAR)	Bioaumentación	Proceso adaptativo
Proceso Densadeg	Clarificación Eliminación de sólidos	Proceso adaptativo
Proceso de eliminación biológico-químico de fósforo y nitrógeno (BCFS)	Eliminación de fósforo y nitrógeno	Proceso adaptativo
Proceso de Johannesburgo	Eliminación de fósforo y nitrógeno	Proceso adaptativo
Proceso de la Planta de Virginia (VIP)	Eliminación de fósforo y nitrógeno	Proceso adaptativo
Proceso In-Nitri	Bioaumentación	Proceso adaptativo
Proceso Kraus	Eliminación de BOD Nitrificación	Proceso adaptativo
Proceso mejorado de bioaumentación secuencial (BABE)	Bioaumentación	Proceso adaptativo
Proceso modificado de la Universidad de Ciudad del Cabo (MUCT)	Eliminación de fósforo y nitrógeno	Proceso adaptativo

<b>Nombre</b>	<b>Objetivo de tratamiento</b>	<b>Clasificación</b>
Proceso modificado Ludzack-Ettinger	Eliminación de nitrógeno	Proceso adaptativo
Proceso Phoredox	Eliminación de fósforo	Proceso adaptativo
Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)	Reactor anaerobio	Utilizado
Reactor anaerobio de flujo a pistón (PAR)	Reactor anaerobio	Investigación
Reactor anaerobio de lecho granular estático (SGBR)	Reactor anaerobio	Investigación
Reactor expandido de lecho granular expandido (EGSB)	Reactor anaerobio	Innovador
Reactor anaerobio de lecho migrante (AMBR)	Reactor anaerobio	No aplica
Reactor anaerobio híbrido (AHR)	Reactor anaerobio	No aplica
Reactor anaerobio con deflectores (ABR)	Reactor anaerobio	Utilizado
Reactor biológico discontinuo secuencial (SBR)	Eliminación de BOD Nitrificación	Utilizado
Reactor de biopelícula de membrana (MBfR)	Proceso de membrana	Innovador
Reactor de circulación interna (IC)	Reactor anaerobio	No aplica
Reactor de esponja colgante de flujo descendente (DHS)	Crecimiento adherido Reactor anaerobio	Innovador

<b>Nombre</b>	<b>Objetivo de tratamiento</b>	<b>Clasificación</b>
Tratamiento químico estático automatizado (ACT)	Tratamiento de lodos	No aplica

(Elaboración propia)

Se identificaron como “tecnologías no seleccionadas” a todas aquellas que corresponden a procesos adaptativos, tecnologías de investigación, tecnologías utilizadas o que tratan agua residual que no es municipal. Su nombre, clasificación, razón de descarte, usos y características generales se presentan en fichas técnicas (Ver Anexo A). Las tecnologías restantes, innovadoras, son objeto de investigación más detallada y se identifican como “tecnologías seleccionadas”.

## **B. Tecnologías seleccionadas**

Estas tecnologías se investigaron a mayor profundidad con el fin de establecer su capacidad de ser aplicadas en el país. Se realizaron fichas técnicas para cada una presentando su nombre, clasificación, usos, nivel de tratamiento, especificaciones de diseño, características, eficiencias de remoción, ventajas, desventajas, costos y capacidad del operador. Adicionalmente se comparó con una tecnología que realice un trabajo similar y que sea utilizado en Guatemala. Esto para poder evaluar más adelante si tiene una ventaja sobre las tecnologías existentes.

Las fichas técnicas se crearon debido a la importancia y necesidad de contar con información puntual de cada tecnología y así tener una base sobre la cual se puedan analizar las ventajas y desventajas de cada una. A continuación, se muestran las tecnologías seleccionadas clasificadas según su nivel de tratamiento.

Cuadro 10. Tecnologías seleccionadas según nivel de tratamiento.

<b>Tratamiento primario</b>
Filtración por medios compresibles (CMF)
Filtro Salsnes
<b>Tratamiento secundario</b>
Biotecnología de suelo o filtro construido de tierra (SBT)
Membrana de rotación de vacío (VRM)
Proceso biológico activado de múltiples etapas (MSABP)
Reactor de biopelícula de membrana (MBfR)
Reactor anaerobio de lecho granular expandido (EGSB)
Reactor de esponja colgante de flujo descendente (DHS)
<b>Tratamiento terciario</b>
Arrastre con aire
Filtro de retrolavado automático (ABF) o puente móvil

<b>Tratamiento terciario</b>
Lodo granular aerobio (AGS)
Oxidación anaeróbica de amonio (ANAMMOX)
<b>Desinfección</b>
Desinfección con bromo (BCDMH)

(Elaboración propia)

## 1. Fichas técnicas

### a. Tratamiento primario

Cuadro 11. Ficha técnica para la tecnología “Filtración por medios compresibles”

<b>Nombre</b>	Filtración por medios compresibles
<b>Name</b>	Compressible Media Filtration (CMF)
<b>Clasificación</b>	Filtración
<b>Objetivo</b>	Realizar un proceso de filtración multifuncional, pasivo y de alta tasa.
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de fósforo y la separación sólido-líquido. Se ha aplicado para el tratamiento de agua residual industrial y municipal. Su gradiente de porosidad permite que sea aplicado para producir un efluente de reúso, incrementar la capacidad de eliminación orgánica y/o reducir su consumo energético y tratar infiltraciones por agua de lluvia. (EPA, 2013)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Primario o Terciario
<b>Cómo funciona</b>	El agua residual ingresa al filtro por la parte superior y fluye de forma descendente. Los sólidos y turbidez son capturados por el medio. El agua filtrada sale a través de la parte inferior del filtro. (Suez, 2017)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<p><b>Tasas de carga hidráulica.</b> Las tasas máximas de carga hidráulica aceptadas por el sistema van de 30-45 gpm/ft<sup>2</sup>. (Parkson, 2022) Las concentraciones bajas corresponden a agua residual fuerte y afluente primario. Las más altas aplican a concentraciones de sólidos más diluidas como las que provienen de un filtro terciario o agua residual diluida por clima lluvioso. (EPA, 2013)</p> <p><b>Tamaño.</b> El tamaño del filtro de concreto para afluentes primarios, incluyendo los canales de afluente y efluente y las cámaras de operación y retrolavado sería menos de 210 ft<sup>2</sup> (19.51 m<sup>2</sup>) por MGD (43.81 L/s). Un tamaño menor sería utilizado para aplicaciones de afluente terciario. El tamaño del sistema de filtración arriba de los 10 MGD</p>

	<p>disminuye con flujos mayores. El sistema sin los canales laterales y cámaras se puede reducir aproximadamente 1/3 al utilizar tuberías para el afluente y efluente. La profundidad típica del filtro es de 14 pies (4.27 m). Los tanques de acero utilizados como filtros terciarios son de 10 (3.05 m) pies de altura. Los filtros que ya se tengan en la planta de tratamiento con profundidades de 6-7 pies pueden ser adaptados. (EPA, 2013)</p> <p><b>Configuración FiltraFast.</b> El filtro FiltraFast de Suez se puede encontrar en tres configuraciones distintas que se adaptan según la aplicación. El filtro de gravedad de concreto tiene varias opciones de tamaño según el diseño y una capacidad de hasta 22 mgd. El filtro de gravedad empacado puede ser de celda única o multi celda con un tamaño de hasta 120 ft<sup>2</sup> por celda y una capacidad de 11 mgd. El filtro de presión puede tener un tamaño de hasta 12 ft y una capacidad de 7 mgd. Dependiendo de los requerimientos del proyecto, las unidades pueden ser ensamblados completamente en el taller y transportados al sitio o levantado en el lugar. (Suez, 2017)</p> <p><b>Porosidad.</b> El filtro FiltraFast utiliza únicamente la carga hidráulica para crear la porosidad necesaria en el medio sin la necesidad de utilizar equipo mecánico adicional. (Suez, 2017)</p>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Medio.</b> El filtro utiliza como medio una cama de fibra sintética comprimida. Esta compresión lateral forma un gradiente de porosidad cónico que permite la estratificación y eliminación de partículas grandes y pequeñas. (EPA, 2013) La porosidad del medio se puede ajustar según las características del afluente. (Parkson, 2022) Este medio compresible es más liviano que la arena y tiene una vida entre 7-10 años. (Suez, 2017)</p> <p><b>Versátil.</b> Durante el clima seco una porción de la matriz del filtro actúa como filtro terciario y la porción restante como biofiltro. El filtro terciario puede eliminar los precipitados de fosfato creados por la adición de sales metálicas. El biofiltro puede ser utilizado para tratar el afluente primario eliminando sólidos particulados y BOD soluble. Durante el clima lluvioso las válvulas del filtro se abren o cierran para dirigir el flujo excesivo a través de un sistema de tratamiento filtrante de una o dos etapas. (EPA, 2013)</p> <p><b>Retrolavado.</b> Una celda del filtro trabajando en clima lluvioso o sólidos primarios utiliza el efluente circundante del filtro como suministro para retrolavado. Cuando trata agua residual con pocos sólidos (efluente primario o secundario), la celda del filtro entonces utilizará el agua del</p>

<p><b>Características</b></p>	<p>afluente como suministro. El retrolavado del filtro normalmente es regresado al afluente de la planta, mientras que el retrolavado del biofiltro se envía al procesamiento de sólidos. El crecimiento biológico en exceso se controla utilizando una solución de cloro diluida (3 mg/L) que se añade al retrolavado. En la mayoría de aplicaciones no requiere químicos. (EPA, 2013) La secuencia de retrolavado permite una recuperación máxima, extiende la vida del medio y limita el consumo energético. (Suez, 2017)</p> <p><b>Productividad.</b> Su productividad se puede optimizar al ajustar las propiedades del medio alterando el grado de compresión en respuesta a las condiciones variables del afluente (turbidez del afluente, sólidos suspendidos totales, distribución del tamaño de la partícula) y la calidad del efluente. (Caliskaner &amp; Tchobanoglous, 2006)</p> <p><b>Consumo energético.</b> Requiere de 10 a 60 KWH/MG tratado. (WWETCO, s.f.)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p>La remoción de fósforo puede llegar a 0.1 mg/L para aplicaciones municipales (Parkson, 2022)</p> <p>Calidad del efluente:</p> <p><b>TSS:</b> &lt; 5 mg/L</p> <p><b>Turbidez:</b> &lt; 2 NTU (Suez, 2017)</p> <p><b>DBO:</b> 38% (EPA, 2013)</p> <p><b>SST:</b> 85% para las tecnologías FlexFilter y Bio-FlexFilter (WWETCO, s.f.)</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p><b>Inversión.</b> El equipo que se debe considerar es un lecho filtrante y sus estructuras internas, sistemas de control, válvulas y compuertas. Los costos del equipo varían según la escala de la instalación. Los costos disminuyen con flujos mayores a 10 MGD. Los costos del equipo por galón se pueden generalizar como sigue según su aplicación:</p> <p>Filtración terciaria: &lt; \$0.06</p> <p>Efluente primario: &lt; \$0.07</p> <p>Afluente: &lt; \$0.09 (EPA, 2013)</p> <p><b>Operación y mantenimiento.</b> Se deben considerar los costos incurridos por el uso de energía eléctrica. Según aplicación la energía utilizada por MGD tratado y 20 mg/L de TSS en el afluente es:</p> <p>Filtración terciaria: 10 kW</p> <p>Efluente primario: 35 kW</p> <p>Afluente primario: 60 kW (EPA, 2013)</p>

Imagen

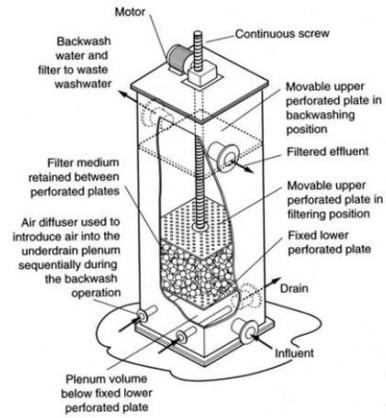


Figura 7 Diagrama esquemático de la operación de un filtro CMF. (Caliskaner & Tchobanoglous, 2006)

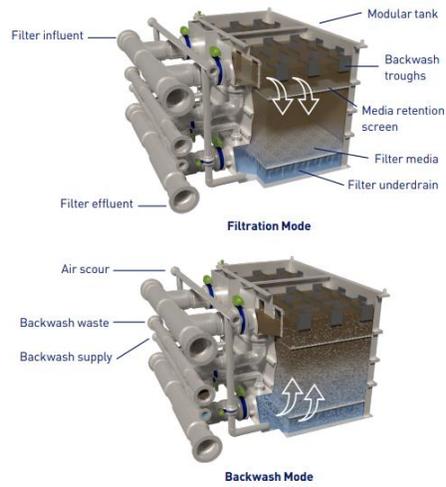


Figura 8 FiltraFast. Filtro de medio compresible. (Suez, 2017)

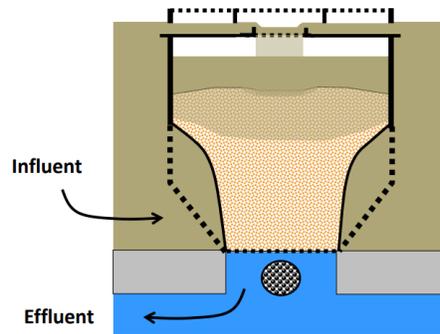


Figura 9 WWETCO Compressible media filtration. (WWETCO, s.f.)

**Comparación: Sistemas de floculación y filtros de arena**

**Eficiencia.** Los sistemas de floculación utilizados generalmente requieren de químicos y un tiempo de 15-30 minutos para alcanzar su productividad. El filtro WWETCO FlexFilter alcanza eficiencias de remoción de SST similares o mejores, en la mayoría de aplicaciones no requiere químicos y trabaja de manera inmediata. (EPA, 2013)

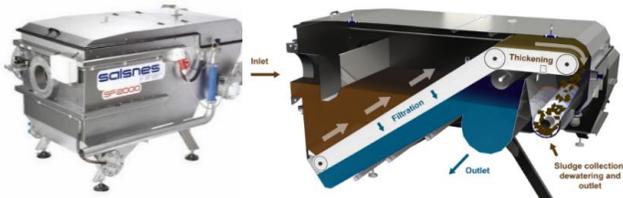
**Tamaño.** Los filtros CMF tienen tamaños mayores a los sedimentadores primarios, pero requiere únicamente la mitad de la profundidad. (EPA, 2013) El proceso del filtro CMF reduce de manera significativa su tamaño comparado a los filtros de arena. (Suez, 2017)

(Elaboración propia)

Cuadro 12. Ficha técnica para la tecnología “Filtro Salsnes”.

<b>Nombre</b>	Filtro Salsnes
<b>Name</b>	Salsnes filter
<b>Clasificación</b>	Filtración
<b>Objetivo</b>	Eliminar sólidos finos primarios y mejorar el tratamiento primario de los sistemas de tratamiento de agua residual.
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD. (EPA, 2013) Es ideal para el tratamiento de agua residual con agua de alcantarillas o pluvial, ya que puede eliminar sólidos en un amplio rango de flujos. (Trojan Technologies, 2023) Sus aplicaciones van desde el tratamiento de agua residual municipal, deshidratación de lodos, piscicultura, cruceros/barcos, mataderos, heces de cerdo, procesamiento de carne/pescado, procesamiento de alimentos/bebidas, industria textil, industria de pulpa y papel, etc. (Gåre, 2012)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Primario
<b>Cómo funciona</b>	<p><b>Sistema SF.</b> En los sistemas SF el agua residual ingresa al filtro y se distribuye sobre la malla filtrante para la separación de sólidos. La malla filtrante rota como una cinta transportadora, transportando lodos y permitiendo el proceso de espesamiento. Los lodos caen en un área colectora y pasan por una unidad de deshidratación (opcional) antes de salir del sistema. El agua filtrada sale por la parte inferior del filtro luego de pasar por la malla filtrante. Los sistemas SFKC funcionan de la misma forma, pero el agua residual ingresa al filtro con un ángulo reducido. (Filtec, 2017)</p> <p><b>Sistemas SFK.</b> El agua residual fluye a través de un canal hasta llegar a la malla filtrante en la que se separan los sólidos. La malla rota, transportando los lodos sobre el nivel de agua del canal hacia la etapa de espesamiento. El lodo espesado se deja caer en una zona colectora, puede pasar por una zona de</p>

	<p>deshidratación (opcional) antes de salir del sistema. Estos sistemas se pueden adaptar fácilmente a los canales de instalaciones existentes. (Filtec, 2017)</p>
<b>Especificaciones de diseño</b>	<p><b>Área requerida.</b> El filtro es ideal para expandir la capacidad primaria o secundaria en áreas en las que la tierra es cara o no se encuentra disponible. Como comparación, 8 filtros Salsnes SF6000 ocupan un área de 1600 ft<sup>2</sup> mientras que un clarificador ocupa 10,745 ft<sup>2</sup>. (Trojan Technologies, 2023)</p> <p><b>Temperatura.</b> La temperatura ambiente que tolera el filtro es de 0-40°C. Si se instala en el exterior, el filtro se debe proteger del calor producido por el sol. (Filtec, 2017)</p> <p><b>Afluente.</b> El afluente debe tener un pH entre 5-9 y una temperatura de 0-35°C. La malla filtrante se degrada prematuramente cuando se opera constantemente a temperaturas altas con un pH alto o bajo. (Filtec, 2017)</p>
<b>Características</b>	<p><b>Tamaño.</b> El filtro Salsnes requiere 1/10 de la tierra y 30-60% de la inversión de sistemas convencionales. Esta tecnología es ideal para aquellas áreas que tienen poco o nada de espacio para la instalación de equipo de tratamiento adicional. (Trojan Technologies, 2023)</p> <p><b>Medidas.</b> El largo/ancho/altura en mm del modelo SF1000, SF2000, SF4000, SF6000, SFK200, SFK400, SFK600, SFK200C, SFK400C y SFK600C son: 1550/1350/1500; 2250/1700/1400; 2500/2000/1600; 3050/2500/1900; 2408/1227/1500; 2930/1509/1600; 2950/2050/1800; 2408/1227/2098; 2930/1509/2656; 2950/2050/2500. (Trojan Technologies, 2023)</p> <p><b>Adaptativo.</b> Con el uso del sistema es posible adaptar el tanque sedimentador o clarificador a ser parte del tratamiento secundario mientras el filtro Salsnes se queda como único tratamiento primario. Esto puede incrementar la capacidad hasta un 50%. (Trojan Technologies, 2023)</p> <p><b>Instalación.</b> No es necesario excavar o usar concreto para su instalación. (Trojan Technologies, 2023)</p> <p><b>Variantes.</b> Se tienen dos tipos de sistemas, SF (independientes y cerrados) y SFK (abiertos para instalación en canales de concreto). (Filtec, 2022)</p> <p><b>Estable.</b> El filtro consiste en una tecnología estándar y patentada que puede ser escalada según los requisitos del cliente. Está diseñado para mantener un grado alto de tratamiento con volúmenes hidráulicos variables. Esto lo logra utilizando aire comprimido en la malla de tela que tiene como filtro. Como resultado se obtiene un buen tratamiento mientras que se</p>

<p><b>Características</b></p>	<p>eliminan las grasas y aceites del filtro sin la necesidad de utilizar grandes volúmenes de agua caliente. (Filtec, 2022)</p> <p><b>Flexible.</b> La tecnología es flexible respecto a los volúmenes de agua que trata y el grado de tratamiento que realiza. Las plantas completamente automatizadas requerirán 1 hora de servicio a la semana. (Filtec, 2022)</p> <p><b>Biogás.</b> Debido a la velocidad de filtración del proceso, el lodo fresco tomado de los filtros asegura que la producción de biogás y energía se maximice. El diseño del filtro permite controlar la cantidad de materia orgánica que es separada en la etapa primaria y cuanta se deja en el agua residual para un tratamiento secundario biológico. (Trojan Technologies, 2023)</p> <p><b>Capacidad incrementada.</b> El filtro puede incrementar la capacidad de los procesos que lo siguen como: fosas de oxidación, reactores secuenciados, filtros biológicos aireados, reactores de lecho móvil y biorreactores de membrana. Actúa como separador de sólidos antes del inicio de los procesos secundarios. (Trojan Technologies, 2023)</p> <p><b>Flujo hidráulico máximo.</b> El filtro SF1000 es capaz de trabajar con un flujo de hasta 54 m<sup>3</sup>/h (0.3 MGD). El SF2000, SF4000 y SF6000 trabaja con flujos de 54-576 m<sup>3</sup>/h (0.3-3.7 MGD). El SFK200, SFK400 y SFK600 tienen la capacidad de trabajar con flujos de hasta 576 m<sup>3</sup>/h (3.7 MGD). (Filtec, 2017)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p><b>SST:</b> &gt; 50% (Trojan Technologies, 2023)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 30-60% en una instalación municipal típica</li> <li>• Hasta 80% cuando se utiliza un polímero (Filtec, 2017)</li> </ul> <p><b>DBO:</b> &gt; 20% (Trojan Technologies, 2023)</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p>Sus costos de operación son menores que para un tratamiento primario convencional (clarificadores). (Filtec, 2017)</p> <p>Se debería considerar el costo incurrido en traer el equipo al país.</p>
<p><b>Imagen</b></p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Figura 10 Filtro Salsnes SF2000, SF4000, SF6000. (Suez, 2017)</p>

**Imagen**



Figura 11 Filtro Salsnes SFK.  
(Trojan Technologies, 2023)



Figura 12 Filtro Salsnes  
SF1000.  
(Filtec, 2022)



Figura 13 Filtro Salsnes SFKC.  
(Filtec, 2022)

**Comparación: sedimentadores y clarificadores convencionales**

**Tamaño.** El sistema de filtro Salsnes utiliza menos de 10% del espacio utilizado por sedimentadores y clarificadores convencionales. (Trojan Technologies, 2023)

**Costo.** Se estima que el costo de inversión del filtro Salsnes sea 30-60% menos que para clarificadores primarios. (EPA, 2013)

**Eficiencia.** El filtro Salsnes es capaz de eliminar 50% de TSS del agua residual y de espesar y deshidratar los lodos hasta llegar a un 6% de sólidos totales. Esto se puede comparar con el tratamiento primario convencional que generalmente produce lodos con 2% de sólidos totales. Tener lodos más secos implica que no se necesiten procesos de espesamiento adicionales antes de que se pueda procesar el lodo para ser utilizado en la producción de biogás. (Trojan Technologies, 2023)

<b>Comparación: sedimentadores y clarificadores convencionales</b>
<b>Sólidos removidos.</b> Los sólidos removidos utilizando el filtro Salsnes son 27% más secos que en un clarificador primario. (EPA, 2013)

(Elaboración propia)

## b. Tratamiento secundario

Cuadro 13. Ficha técnica para la tecnología “Biotecnología de suelo”.

<b>Nombre</b>	Biotecnología de suelo o filtro construido de tierra
<b>Name</b>	Soil Biotechnology (SBT) or Constructed Soil Filter (CSF)
<b>Clasificación</b>	Tratamiento biológico
<b>Objetivo</b>	Utilizar el suelo para realizar el tratamiento del agua residual en un sistema que combina procesos físicos como sedimentación, infiltración y procesos bioquímicos. (Jain, y otros, 2016)
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para eliminar sólidos suspendidos y material orgánico e inorgánico del agua residual. Puede ser utilizado cuando no se cuenta con un sistema de drenaje que proteja los recursos de agua subterránea y los ríos y lagos cercanos a la contaminación debida a los drenajes. Generalmente se diseña para la disposición de agua residual doméstica y las trata para reúso. Adicionalmente tiene la capacidad de eliminar arsénico y hierro, agua de procesamiento de hospitales, industrial y contaminación industrial. Se puede aplicar para el tratamiento de agua residual de farmacéuticas y de industrias fertilizadoras con agua residual rica en amoníaco. (Jain, y otros, 2016)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario
<b>Cómo funciona</b>	La tecnología se basa en el principio de funcionamiento de un filtro percolador. Combina sedimentación, infiltración y procesos bioquímicos con el fin de eliminar sólidos suspendidos y componentes orgánicos e inorgánicos del agua residual. (Jain, y otros, 2016) El agua residual se almacena en un tanque para luego ser bombeada hacia el biorreactor. La alimentación del agua residual puede ser continua o secuencial. Luego del tratamiento se recolecta en un tanque por el flujo de gravedad o utilizando una bomba. (Gupta, Aggarwal, Vishal, & Sahu, 2015)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<b>Componentes clave.</b> Entre sus componentes clave se encuentra: el medio que soporta los micro y macro organismos de la ecología de suelo para que realicen la respiración aeróbica; el cultivo que incluye lombrices geófagas encargadas de regular la población en el suelo; aditivos consistentes de una mezcla mineral natural que

<p><b>Especificaciones de diseño</b></p>	<p>regula el pH y plantas verdes que sirven como bioindicadores del estado del proceso. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Construcción.</b> El sistema está construido con concreto armado, mampostería y/o terraplenes de suelo. Contiene un tanque para el agua residual sin tratamiento, contención para el biorreactor, tanque para el agua residual tratada, tuberías y un sistema de bombeo. (Jain, y otros, 2016) El tanque puede estar bajo tierra o expuesto y puede ser construido de ladrillo, acero o concreto. (Gupta, Aggarwal, Vishal, &amp; Sahu, 2015)</p> <p><b>Tiempo de operación.</b> El tiempo total de operación del sistema es de 6-7 horas al día. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Variación estacional.</b> La reducción de las concentraciones de nutrientes se debe principalmente a la actividad biótica dependiente de la temperatura. La eficiencia del tratamiento disminuye con temperaturas bajas por la reducción en la actividad biótica. (Kanani &amp; Patel, 2017)</p> <p><b>Tiempo de retención hidráulico.</b> El rendimiento del reactor depende del tiempo de retención hidráulico (HRT). Si incrementa, la eficiencia también lo hace. La eficiencia de remoción es máxima con un HRT de 10 horas. (Kanani &amp; Patel, 2017)</p> <p><b>Vida útil del medio.</b> La vida útil del lecho de SBT es de 10 años, ya que con el tiempo los agentes naturales se multiplican o disminuyen su cantidad a niveles óptimos basado en las características químicas y biológicas del afluente. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Subproducto.</b> Produce aproximadamente 2 toneladas métricas al año de biofertilizante como subproducto. (Jain, y otros, 2016)</p>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Favorable al medio ambiente.</b> SBT es una tecnología amigable al medio ambiente que ofrece sistemas para procesar residuos orgánicos sólidos y realizar el tratamiento de agua residual utilizando bacteria, lombrices de tierra y aditivos minerales en una configuración similar a un jardín. (Jain, y otros, 2016) El sistema completo es completamente inoloro y no produce sonido indeseado durante su operación. (Gupta, Aggarwal, Vishal, &amp; Sahu, 2015)</p> <p><b>Configuración.</b> Consiste en diferentes tamaños de piedra, grava y suelo enriquecido junto con microflora y cultivo de lombrices de tierra. La química, biología y ecología del sistema facilita la respiración aeróbica y anaeróbica y reacciones como nitrificación, desnitrificación y acidogénesis dependiendo de los tipos de carga en el agua</p>

<p><b>Características</b></p>	<p>residual. La materia orgánica se elimina por adsorción y filtración y es convertida de manera biológica a CO2 con ayuda de la microflora del suelo. Puede trabajar de forma discontinua o continua. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Nivel de tratamiento.</b> Para el agua que ya haya sido tratada a nivel primario y secundario, SBT puede ser utilizado como tratamiento terciario. (Kadam, Oza, Nemade, Dutta, &amp; Shankar, 2008)</p> <p><b>Reúso.</b> El agua tratada con la tecnología SBT puede ser utilizada para jardinería, descarga de inodoros, en actividades de construcción y lavado de pisos industriales, lavado de autos, en torres de enfriamiento (calefacción, ventilación y aire acondicionado), recarga de agua subterránea, desfogue a cuerpos de agua. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Tamaño.</b> Se puede escalar a cualquier tamaño de operación. Es una buena opción para el tratamiento descentralizado del agua residual. (Jain, y otros, 2016) El área necesaria para instalar la tecnología SBT de 1 MLD es de 1500 m2 aproximadamente según la convención de que se necesita 1.5 m2 por cada 1 KLD. La profundidad requerida es de 2.5 m en el caso de la planta de tratamiento del afluente de agua de Najafgarh, India. (Gupta, Aggarwal, Vishal, &amp; Sahu, 2015)</p> <p><b>Agua salada.</b> Puede trabajar con agua salada (hasta 4000 ppm). (Shrivithal, y otros, 2021)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p><b>Arsénico:</b> 98.6%  <b>Fe:</b> 97.5%  <b>P:</b> 93%  (Jain, y otros, 2016)  <b>SDT:</b> 65-75%  <b>SST:</b> 64-74%  <b>DBO:</b> 75-90%  <b>DQO:</b> 75-92%  <b>NH3:</b> 55-65%  (Kanani &amp; Patel, 2017)  <b>Coliformes totales y fecales:</b> elimina 2.4-3.1 log  (Kadam, Oza, Nemade, Dutta, &amp; Shankar, 2008)</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p>Relativamente bajos debido a que no requiere aireación mecánica, tiene poca mecanización y consume poca energía.</p>

<p><b>Imagen</b></p>	 <p>Figura 14 Biotecnología de suelo. (Jain, y otros, 2016)</p>
<p><b>Comparación: Biofiltros (filtro percolador)</b></p> <p><b>Beneficios de producción.</b> Mediante las moléculas de residuos la biotecnología de suelo es capaz de sintetizar productos utilizables. Mientras que con los biofiltros se obtiene únicamente una separación de corrientes y producción de lodos. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Olor.</b> Los biofiltros tienden a generar olor debido al amoníaco y aerosoles producidos a partir de la aireación. El sistema SBT no genera aerosoles. Se puede controlar el olor mediante la adición de un aditivo y la oxidación de amoníaco de alta tasa. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Generación de lodos.</b> Los sistemas de biofiltros producen lodos como subproducto y requieren un manejo posterior como deshidratación. Con el sistema SBT el subproducto que se obtiene es fertilizador bio-mineral. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Costo.</b> Comparado con tecnologías como lodos activados, SBR, biorreactor de membrana y humedales artificiales, su costo es bajo. (Shrivithal, y otros, 2021)</p>	

(Elaboración propia)

Cuadro 14. Ficha técnica para la tecnología “Membrana de rotación de vacío”.

<b>Nombre</b>	Membrana de rotación de vacío
<b>Name</b>	Vacuum Rotation Membrane (VRM)
<b>Clasificación</b>	Procesos de membrana
<b>Objetivo</b>	Eliminación y recuperación de nitrógeno amoniacal
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para eliminar C-BOD, eliminación de fósforo y separación sólido-líquido. Recomendado principalmente para aplicaciones industriales. (EPA, 2013) Puede ser utilizado para el tratamiento de agua residual municipal y en la industria textil. Es una solución rápida para el tratamiento de aguas residuales en centros recreativos. (Schuler, 2009)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario

<p><b>Cómo funciona</b></p> <p><b>Cómo funciona</b></p>	<p>El proceso consiste en membranas de ultrafiltración sumergidas en los lodos activados. El agua residual ingresa por la parte superior del tanque, es filtrada y sale por uno de los lados. Los lodos en exceso son eliminados por la parte inferior. (Díaz, y otros) Los segmentos de membrana se disponen alrededor de tubos que suministran aire instalados en el centro. Estos producen un flujo de aire a través del cual rotan las placas de la membrana. Las burbujas producidas remueven los lodos concentrados de la superficie de la membrana. (HUBER, 2012) Las membranas se encargan de separar el agua de los lodos activados, reteniendo la biomasa de manera confiable. (Morrow Water Technologies , 2023)</p>
<p><b>Especificaciones de diseño</b></p>	<p><b>Configuración.</b> El sistema utiliza hojas planas, segmentos de membrana de ultrafiltración, configuradas en discos que rotan en un eje horizontal. La membrana hidrofílica tiene un tamaño de poro de aproximadamente 38 nm. (EPA, 2013)</p> <p><b>Velocidad de rotación.</b> El impulso del filtro provoca que las placas trapecoidales de la membrana roten a una velocidad de 1 rpm a través de un flujo de aire a presión. Las burbujas de aire gruesas ascendentes remueven continuamente los lodos concentrados de la superficie de la membrana. (HUBER, 2023)</p> <p><b>Tamaño.</b> HUBER cuenta con dos configuraciones de VRM: VRM 20 y VRM 30 con diámetros de aproximadamente 2.3 m y 3.2 m y largos de 4 m y 6.5 m respectivamente. La superficie de membrana del VRM 20 es de hasta 900 m<sup>2</sup> por unidad mientras que para el VRM 30 es de 3840 m<sup>2</sup> por unidad. El caudal máximo aceptado es de 30 m<sup>3</sup>/h para VRM20 y 70 m<sup>3</sup>/h para VRM 30. (HUBER, 2012) Tiene capacidades de producción de hasta 300 m<sup>3</sup>/h. (HUBER, 2012)</p> <p><b>Consumo energético.</b> &lt; 0.15 kWh/m<sup>3</sup>. (HUBER, 2012)</p> <p><b>Fluctuaciones.</b> Trabaja bien con fluctuaciones en el flujo y temperatura. Se ha demostrado que es capaz de manejar flujos de 1,300-34,500 galones de agua residual al día. (Schuler, 2009)</p>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Operación.</b> Las membranas rotativas de láminas planas operan con intervalos de limpieza químicos extendidos secundario a las fuerzas de corte introducidos por el movimiento rotacional. La fuerza de corte junto con la alta intensidad del aire de limpieza elimina cualquier acumulación en las membranas. Esto ayuda a reducir el potencial de ensuciamiento de la membrana. (Schuler, 2009)</p>

<p><b>Características</b></p>	<p><b>Mantenimiento.</b> La limpieza química una o dos veces al año es suficiente para todas las aplicaciones de VRM en plantas de tratamiento. (Schuler, 2009)</p> <p><b>Material.</b> Las membranas están fabricadas por plástico PES. Todos los elementos estructurales están fabricados a partir de acero inoxidable de alta calidad. (HUBER, 2012)</p> <p><b>MBR-VRM.</b> Combinar el sistema MBR-VRM resulta en un efluente con calidad alta y adecuado para reúso. (Díaz, y otros)</p> <p><b>Pequeña escala.</b> El sistema VRM ofrece la posibilidad de trabajar en plantas de tratamiento pequeñas y descentralizadas y generar efluente de reúso. (Díaz, y otros)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p><b>DQO:</b> 97%</p> <p><b>Nitrógeno amoniacal (amoníaco):</b> 100% (Schuler, 2009)</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p>Se deben considerar los costos por importar la tecnología, el uso de energía eléctrica y mantenimiento. (Schuler, 2009)</p>
<p><b>Imagen</b></p>	<div data-bbox="802 978 1252 1331" data-label="Image"> </div> <p>Figura 15 Reactor VRM. (Schuler, 2009)</p>

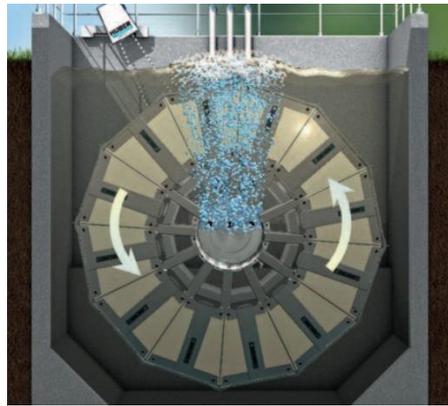


Figura 16 VRM ® HUBER.  
(HUBER, s.f.)

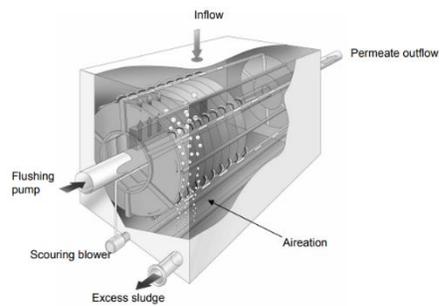


Figura 17 Principio de operación de  
VRM.  
(Díaz, y otros)

**Comparación: procesos MBR con membranas de ultrafiltración**

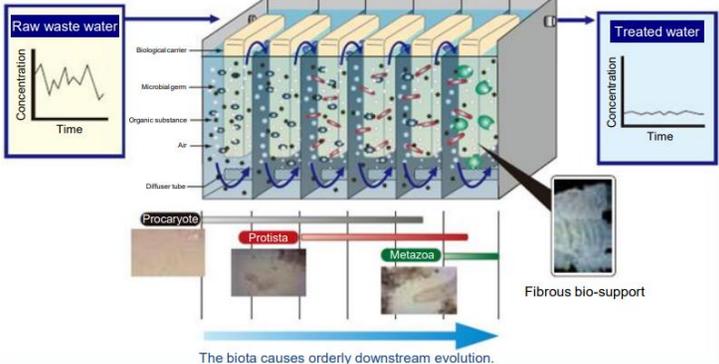
El sistema tiene ventajas similares a las alcanzadas con el proceso MBR. La característica única de VRM es que las membranas están configuradas en discos y no tubos o placas y que los discos se rotan para limpieza y la introducción de fuerzas de corte para controlar el ensuciamiento en la membrana. (EPA, 2013)

(Elaboración propia)

Cuadro 15. Ficha técnica para la tecnología “Proceso biológico activado de múltiples etapas”.

<b>Nombre</b>	Proceso biológico activado de múltiples etapas
<b>Name</b>	Multi-stage Activated Biological Process (MSABP)
<b>Clasificación</b>	Reactor biológico
<b>Objetivo</b>	Realizar el tratamiento biológico, oxidación de carbono, nitrificación y desnitrificación
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. Es un método de tratamiento de agua residual doméstica e industrial basado en la sucesión espacial de microorganismos por nivel trófico. (EPA, 2013) La tecnología también puede ser utilizada para el tratamiento de agua de alcantarillas, efluentes con químicos, antisépticos e insecticidas y para la reducción de lodos en exceso. (UN, 2013) Puede realizar desde el pretratamiento al tratamiento secundario y cumplir con objetivos de remoción de nutrientes. (Aquarius Technologies, 2022)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario
<b>Cómo funciona</b>	El agua residual ingresa por uno de los lados del tanque, atraviesa las etapas necesarias para su tratamiento, determinadas durante el proceso de diseño, y sale por el lado opuesto. El agua residual se purifica a través de una variedad de microorganismos conforme pasa a través de tanques con distintos ambientes. (Teijin, s.f.)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<p><b>Tiempo de retención hidráulico.</b> Basado en el flujo, el tiempo de retención hidráulico es de 16-24 horas. Es dependiente del nivel de tratamiento requerido. Un tiempo HRT más alto se utiliza para tratamientos de mayor eficiencia. (Lauer, 2015)</p> <p><b>Etapas típicas.</b> Consiste en 8-12 etapas. Conforme el proceso avanza el rendimiento del sistema aumenta. (Lauer, 2015)</p> <p><b>Componentes.</b> El sistema se compone de cribado fino, aeración difusa, medios de crecimiento fijo, sopladores de aireación e instrumentación. (Lauer, 2015)</p>
<b>Características</b>	<p><b>Sucesión de microorganismos.</b> La segregación espacial de los microorganismos proporciona condiciones en las que la bacteria se usa como fuente de alimento de manera secuencial por orden prioritario en la cadena alimenticia. Esta sucesión proporciona tratamiento mediante microorganismos aeróbicos y anaeróbicos que se mantienen en distintas etapas del reactor biológico. (EPA, 2013)</p> <p><b>Compartimientos.</b> Se tienen 8 compartimientos en el reactor. El agua residual ingresa por el primer compartimiento y viaja por los demás circulando debido al patrón de flujo creado por</p>

<p><b>Características</b></p>	<p>difusores de aire localizados en el fondo del tanque. El agua residual se encuentra en un patrón de bucle para que se reduzcan los cortos circuitos. La eliminación de materia orgánica y nitrificación sucede en los primeros 4 compartimientos. El quinto y sexto son anóxicos y en ellos ocurre la desnitrificación. El séptimo y octavo compartimiento operan en fase endógena y digieren los sólidos volátiles restantes. (EPA, 2013)</p> <p><b>Tipo de bacterias.</b> Dependiendo de la cantidad y arreglos de aireación, los dominios están dominados principalmente por bacteria aeróbica. Los dominios de bacteria anaeróbica también se pueden formar, permitiendo que ambos tipos de bacterias coexistan. Las especies biológicas dominantes cambian de bacteria a protista o metazoo conforme el flujo procede de un tanque al otro. Este proceso de cadena alimenticia permite que el exceso de lodos pase por auto digestión. (Teijin, s.f.)</p> <p><b>Efluente de alta calidad.</b> Debido a que sigue un esquema de hiper flujo y utiliza una tecnología de crecimiento adherido, es capaz de producir un efluente de alta calidad mediante un proceso simple y fácil de operar. (Lauer, 2015)</p> <p><b>Lodos.</b> El proceso tiene un mecanismo capaz de reducir la generación de lodos al imitar la cadena alimenticia. Esto permite que una variedad de microbios coexista en los tanques y se elimina la necesidad de tener instalaciones para tratar el lodo sobrante. (Teijin, s.f.)</p> <p><b>Concentración.</b> Tiene la capacidad de tratar agua residual de concentración alta sin la necesidad de diluirla. Esto resulta en ahorro en espacio y reducción de costos de operación. (Teijin, s.f.)</p> <p><b>Elimina sustancias persistentes.</b> Al tener una serie de tanques con diferentes etapas, la cantidad de oxígeno y microorganismos se mantiene a un nivel suficiente en cada etapa. La diversificación de la biota resulta en la aparición de microorganismos capaces de realizar el tratamiento de sustancias orgánicas persistentes. (Teijin, s.f.)</p> <p><b>Biomasa.</b> La biomasa fija de alta densidad tolera condiciones variables de carga orgánica e hidráulica. (Aquarius Technologies, 2022)</p> <p><b>Instalación.</b> En el caso de la tecnología MSABP Nebula ® de Aquarius Technologies, la instalación se puede realizar en tanques de concreto (vertido o prefabricado) acero o fibra de vidrio. Puede diseñarse como paquete, adaptarse a tanques existentes o en nuevas plantas de tratamiento. El número de etapas y la configuración más eficiente se crea dentro del tanque</p>
-------------------------------	--

	(nuevo o existente) mediante paredes deflectoras para crear condiciones de flujo de pistón. (Aquarius Technologies, 2022)
<b>Eficiencias de remoción</b>	<b>DBO:</b> 80% en el quinto y sexto compartimiento (EPA, 2013) <b>DBO5:</b> 95-99% <b>DQO:</b> 85-95% <b>TSS:</b> 95-97% <b>NH3:</b> 90-99% (Lauer, 2015)
<b>Costos</b>	<b>Inversión.</b> Dependen de los requisitos locales y aplicación específica. (EPA, 2013)
<b>Imagen</b>	 <p>The biota causes orderly downstream evolution.</p> <p><b>Figura 19 Tecnología MSABP.</b></p> <p>(Teijin, s.f.)</p>  <p><b>Figura 18 Aplicación del sistema MSABP.</b></p> <p>(Lauer, 2015)</p>
<b>Comparación: lodos activados</b>	
<b>Eficiencias.</b> El proceso de lodos activados tiene eficiencias de remoción menores comparadas a las obtenidas con MSABP. Estas son de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DBO5:</b> 90-97%</li> <li>• <b>DQO:</b> 83-93%</li> <li>• <b>SS:</b> 87-93%</li> </ul> (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005)	

(Elaboración propia)

Cuadro 16. Ficha técnica para la tecnología “Reactor de biopelícula de membrana”.

<b>Nombre</b>	Reactor de biopelícula de membrana
<b>Name</b>	Membrane Biofilm Reactor (MBfR)
<b>Clasificación</b>	Procesos de membrana
<b>Objetivo</b>	Utilizar fibras de membrana huecas para suministrar gas (oxígeno o hidrógeno) a una biopelícula formada en el exterior de la membrana para eliminación eficiente de contaminantes.
<b>Para qué se utiliza</b>	Su aplicación ha sido estudiada para el tratamiento de agua potable y residual. Cuando el gas utilizado es oxígeno (Biorreactor de membrana aireado, MABR), el reactor es capaz de realizar la nitrificación/desnitrificación, oxidación de demanda química y descomposición de fármacos. Si se utiliza hidrógeno (Biorreactor de membrana con biopelícula de fibra hueca HFMBfR) puede ser utilizado para tratar de forma segura contaminantes oxidados incluyendo nitrato, perclorato, bromato, selenato y solventes clorados como tricloroetano. De esta forma puede ser utilizado para tratar agua residual, subterránea o potable. (EPA, 2013)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario
<b>Cómo funciona</b>	Es una tecnología basada en membranas que suministran gas. Grupos de tubos de membrana se disponen dentro del reactor por donde fluiría el agua residual. Un sustrato gaseoso se transfiere a través de la membrana mientras una biopelícula, formada de manera natural en la superficie externa de la membrana, cataliza las reacciones deseadas. Pueden utilizar aire, oxígeno o hidrógeno. (Martin, Boltz, & Nerenberg, 2012)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<p><b>Tubos de membrana.</b> La tecnología involucra grupos de tubos de membrana de 50-330 <math>\mu\text{m}</math> de diámetro y de 1 metro de largo. (EPA, 2013)</p> <p><b>Suministro de gas.</b> La membrana se puede operar en dos modos, sellado en uno de los lados o con flujo continuo. El primer modo requiere más energía, esta opción es inviable para gases costosos o inflamables. Los sustratos gaseosos generalmente son económicos o se generan en el sitio de instalación. (Martin, Boltz, &amp; Nerenberg, 2012)</p> <p><b>Orientación de las membranas.</b> Cuando el flujo es paralelo a las membranas se forma una capa de difusión en la biopelícula o expuestas en la superficie de la membrana. Esto puede beneficiar el reactor al disminuir la pérdida de gas de la membrana. Sin embargo, lo que más se desea es minimizar la capa de difusión, disminuyendo así el flujo de sustratos del líquido hacia la biopelícula. Si se tiene flujo perpendicular a la membrana, la capa de difusión se elimina</p>

<p><b>Especificaciones de diseño</b></p>	<p>y hay una caída en la presión. (Martin, Boltz, &amp; Nerenberg, 2012)</p> <p><b>Empaque de membranas.</b> Densidades de empaque altas pueden provocar taponamiento. La densidad de empaque y la localización de las membranas se debe diseñar para evitar la formación de zonas muertas o flujos preferenciales. (Martin, Boltz, &amp; Nerenberg, 2012)</p>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Configuración.</b> El reactor utiliza un conjunto de membranas compuestas de fibra hueca selladas en un lado y sumergidas en el agua residual del otro lado. Las membranas son hidrofóbicas para que los poros se mantengan seco y usen la difusión de gas para prevenir la formación de burbujas. (EPA, 2013)</p> <p><b>Biomasa.</b> Tiene la capacidad de mantener concentraciones altas de biomasa en el tanque. Son capaces de tener microorganismos de crecimiento lento y producen menor cantidad de sólidos en comparación con el proceso de lodos activados. (Martin, Boltz, &amp; Nerenberg, 2012)</p> <p><b>Gradiente.</b> Se introduce un gas dentro de las fibras que se difunde a través de la biopelícula desarrollada en la parte externa de la membrana. Como el gas penetra la membrana en dirección opuesta a los compuestos del agua se tienen gradientes contrarios que mejoran la eficiencia del gas utilizado. (EPA, 2013)</p> <p><b>Poco taponamiento.</b> Debido a que solo el gas penetra las membranas, el potencial de que la membrana se tapone disminuye. (EPA, 2013)</p> <p><b>Aireación.</b> La aireación con pocas burbujas, aireación pasiva, permite tasas y eficiencias mayores de transferencia de oxígeno. Esto conlleva a costos reducidos de aireación. (He, Wagner, Carlson, Yang, &amp; Daigger, 2021)</p> <p><b>Capacidad.</b> Debido a la transferencia única de masa y la estratificación de microorganismos desarrollada promueve un inventario de biomasa y flujos de remoción en el MABR. Esto aumenta la capacidad de las instalaciones existentes. La estratificación de los microorganismos puede mitigar las emisiones de N<sub>2</sub>O. (He, Wagner, Carlson, Yang, &amp; Daigger, 2021)</p> <p><b>Basados en oxígeno.</b> Los MBfR que utilizan oxígeno o aire como gas son capaces de llevar a cabo la oxidación anaeróbica de amoníaco, conocido como proceso Anammox, en agua con un BOD bajo y alto contenido de amonio. (Martin, Boltz, &amp; Nerenberg, 2012)</p>

<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p>Para el sistema MABR:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>NT:</b> 69-84%</li> <li>• <b>PT:</b> &gt; 65%</li> <li>• <b>DQO:</b> 90%</li> <li>• <b>Xenobióticos:</b> en promedio 90%</li> </ul> <p>(He, Wagner, Carlson, Yang, &amp; Daigger, 2021)</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p>Los reactores que utilizan oxígeno tienen un costo que es aproximadamente el mismo que el de un sistema de lodos activados. Estos son más económicos que los que usan hidrógeno por el ahorro operacional que se tiene al requerir menor energía. (Martin, Boltz, &amp; Nerenberg, 2012)</p>
<p><b>Imagen</b></p>	<div data-bbox="792 640 1234 1060" data-label="Diagram"> </div> <p data-bbox="771 1060 1274 1123">Figura 20 Esquema de una membrana MABR. (Martin, Boltz, &amp; Nerenberg, 2012)</p> <div data-bbox="803 1186 1258 1522" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="803 1533 1242 1627">Figura 21 Disposición de los módulos. Tecnología. ARoNite (Reis, 2013)</p>
<p><b>Comparación: Biorreactores de membrana MBR</b></p> <p>La diferencia principal del reactor MBfR con el MBR es que es utilizado como suministro de gas y soporte de biopelícula y no funciona como un mecanismo filtrante. (EPA, 2013)</p>	

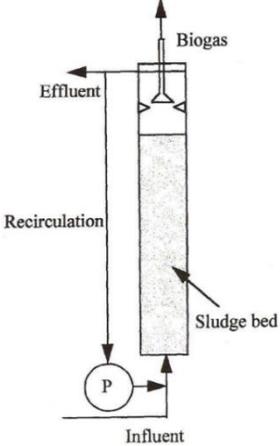
**Energía.** Los requisitos energéticos de las membranas MBfR son 15-55% de los costos incurridos en un proceso de lodos activados convencional. (Martin, Boltz, & Nerenberg, 2012)

(Elaboración propia)

Cuadro 17. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaerobio de lecho granular expandido”.

<b>Nombre</b>	Reactor anaerobio de lecho granular expandido
<b>Name</b>	Expanded granular sludge bed reactor (EGSB)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio
<b>Objetivo</b>	Incrementar el tiempo de contacto entre los lodos y el agua residual y contribuir a la reducción de zonas muertas en el reactor.
<b>Para qué se utiliza</b>	Recomendado para el tratamiento de agua residual con compuestos tóxicos. Puede aplicarse en otros sectores de la industria como cervecerías, destilerías, levadura, azúcar. También se han realizado pruebas piloto para evaluar la remoción de estrógeno del agua residual municipal utilizando estos reactores. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016) Es capaz de tratar agua residual doméstica debido a que utiliza una velocidad ascendente alta, lo que separa el lodo disperso de los gránulos maduros. (Lim, 2011)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario
<b>Cómo funciona</b>	El agua residual ingresa por la parte inferior del biorreactor y es bombeado hacia arriba pasando a través del lecho granular expandido. El agua tratada y biogás producido sale por la parte superior. (Lim, 2011)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<p><b>Tamaño.</b> El reactor tiene una razón altura/diámetro de 10/1 hasta 25/1, permitiendo que se apliquen velocidades ascendentes mayores, de 6-30 m/h para líquidos y 7 m/h para gases. Estas características hidráulicas resultan en la construcción de biorreactores altos y delgados que ocupan poco espacio. La altura de los biorreactores puede ser de 7-24 m. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Concentración.</b> Debido a que el reactor utiliza velocidades ascendentes altas, puede operar con concentraciones de hasta 40 kg COD/m<sup>3</sup>d, tiempos de retención hidráulicos de 0.2-2 días y tiempos de inicio de 30-60 días. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Agua residual.</b> La composición química de los distintos tipos de agua residual varía bastante por lo que, es importante conocer el tipo que se tratará en el reactor. Como regla general se recomienda un índice de</p>

<p><b>Especificaciones de diseño</b></p>	<p>biodegradabilidad (razón entre BOD5/COD) &gt; 0.3. Este valor asegura que más del 30% de la materia orgánica presente en el agua residual sea biodegradable. También es importante tomar en cuenta la razón entre las grasas y aceites (FOG/COD). Se recomienda que esta sea &lt;0.2. (Cruz-Salomón, y otros, 2018) La concentración de COD en el influente es menor a 1000-2000 mg/L. (Lim, 2011)</p> <p><b>pH.</b> El pH puede afectar la operación, progreso digestivo y productos del reactor. Un rango óptimo se encuentra entre 6.7-7.4. Cuando el valor del pH no se mantiene en un rango de 6-8 la actividad de la arquea metanogénica se reduce. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Temperatura.</b> Los reactores EGSB son operados con frecuencia en un rango de temperatura de 35-37 °C. Se han reportado casos en los que se opera debajo de los 35° C, hasta llegar a los 10° C y el reactor muestra buen rendimiento. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Lecho.</b> Opera utilizando un lecho fluidizado que permite incrementar la carga orgánica y los tiempos de retención, generando eficiencias de tratamiento mayores. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Tamaño.</b> La razón alto/ancho es 4-5. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Tipos de retención.</b> El reactor es clasificado como reactor de tercera generación. Tiene la capacidad de retener los microorganismos de dos maneras distintas. A través de auto inmovilización o en lodos granulares con buenas propiedades de asentamiento. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Lecho expandido.</b> El uso de lodos granulares anaerobios permite que se generen velocidades ascendentes altas para el líquido y el gas y esto junto con la acción de elevación del gas formado en el lecho lo expande. Como resultado se obtiene un tiempo de contacto excelente entre los lodos granulares anaerobios y el agua residual. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Zonas muertas.</b> Tiene una reducción en las zonas muertas en su interior debido a la acumulación de turbulencia en el biogás formado en el reactor. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Recirculación externa.</b> El reactor cuenta con recirculación externa, característica que le permite tener una mezcla interna eficiente y óptimo contacto entre el</p>

<p><b>Características</b></p>	<p>agua residual y los lodos granulares. También le da estabilidad y flexibilidad para tratar diversos tipos de agua residual. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Rendimiento.</b> El rendimiento del reactor es influenciado por factores como las características el agua residual, distribución del tamaño de partículas, aclimatación de los lodos granulares, configuración del biorreactor y parámetros operacionales como tiempo de retención hidráulico, tiempo de retención de lodos, velocidad ascendente, concentración de COD y factores ambientales como pH y temperatura. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p><b>DQO:</b> 67% (Lim, 2011)  <b>TSS:</b> 90% (Lim, 2011)  <b>Grasas:</b> 85% (Lim, 2011)  <b>Color:</b> 95%</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p><b>Operación.</b> Bajos debido a la simplicidad de su diseño y a la ausencia de equipo sofisticado. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p> <p><b>Construcción y mantenimiento.</b> En general es una tecnología de bajo costo, tanto en su construcción como en el mantenimiento. Los únicos costos adicionales que presenta son debidos a la necesidad de retirar lodos y el uso de una bomba de alimentación. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p>
<p><b>Imagen</b></p>	 <p>Figura 22 Diagrama del reactor EGSB. (Lim, 2011)</p>
<p><b>Comparación: UASB</b></p>	
<p><b>Tipo de agua residual.</b> A diferencia del UASB, con el reactor EGSB varios tipos de agua residual pueden ser tratados como: efluentes con compuestos biodegradables recalcitrantes o tóxicos, efluentes fríos (&lt;10 °C) o diluidos (COD &lt; 1g/L), efluentes de textilerías y efluentes con grasas y ácidos grasos de cadena larga. (Cruz-Salomón, y otros, 2018)</p>	

**Eficiencia.** La eficiencia de remoción del reactor UASB para DBO5, DQO, amoníaco, nitrógeno y fósforo totales se encuentra en un rango entre 55-80%, <35% para el fósforo total. (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005) Para el reactor EGSB la eficiencia más grande reportada es de 90%. La eficiencia de remoción del reactor UASB se ve afectada con concentraciones menores a 200 mg DQO/L. El reactor EGSB funciona de manera adecuada con concentraciones de hasta 154 mg/L de DQO sin efectos adversos. (Lim, 2011)

**Velocidad ascendente.** Debido a la tasa de reciclaje alto, la velocidad ascendente del reactor EGSB se mantiene arriba de 6 m/h. El rango general de un reactor UASB es de 0.5-1 m/h. (Lim, 2011)

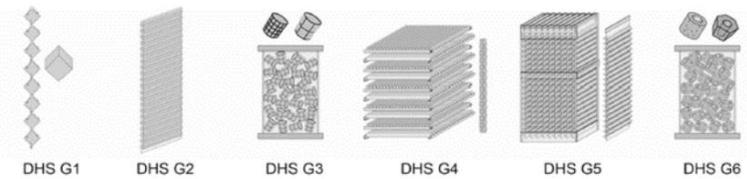
(Elaboración propia)

Cuadro 18. Ficha técnica para la tecnología “Reactor de esponja colgante de flujo descendente”.

<b>Nombre</b>	Reactor de esponja colgante de flujo descendente
<b>Name</b>	Downflow Hanging Sponge Reactor (DHS)
<b>Clasificación</b>	Reactor de crecimiento adherido Reactor aerobio
<b>Objetivo</b>	Eliminar la carga orgánica y compuestos tóxicos del agua residual mediante un sistema de esponjas colgantes.
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para el tratamiento de agua residual, para descomponer la carga orgánica, desnitrificación y nitrificación. Es más eficiente cuando se utiliza luego de un reactor UASB. (Cindya Putri, Farahdiba, & Ali, 2021)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario
<b>Cómo funciona</b>	El afluente ingresa por la parte superior del reactor y se filtra a través de las esponjas. Conforme el agua residual pasa, esta se satura, casi completamente, de oxígeno por lo que necesita aireación mecánica. Debido al flujo descendente y continuo, la concentración de oxígeno disuelto aumenta en la salida del reactor. (Chuptaya Cruz & Huamán Apaestegui, 2020)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<b>Tiempo de retención hidráulico.</b> Mientras más tiempo permanezca el agua residual en el reactor en contacto con los microorganismos, mayor será la eficiencia de remoción orgánica. (Cindya Putri, Farahdiba, & Ali, 2021) La tecnología opera con tiempos de retención hidráulico de hasta 3 horas y un tiempo de retención de lodos largo en comparación con otros sistemas aerobios. (Chuptaya Cruz & Huamán Apaestegui, 2020)  <b>Tasa de carga orgánica.</b> Un aumento en este valor y el de la tasa de carga hidráulica en el reactor impacta significativamente

	<p>la eliminación de COD. Con una carga de 1.2-3.4 kg COD/m<sup>3</sup>d la eficiencia de remoción del sistema disminuye de 89% a 55%. Cuando se aplican cargas orgánicas significativas el rendimiento del reactor, en especial la eliminación de nitrógeno disminuye. (Cindy Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)</p> <p><b>Tamaño de la esponja.</b> Las esponjas más pequeñas, como en el reactor 1, tienen mejores rendimientos de eliminación de COD. Esto es debido a que con una esponja pequeña la concentración de oxígeno disuelto en el reactor aumenta. Además, proporciona un área superficial mayor resultando en un mejor contacto entre los lodos y el agua residual. (Cindy Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)</p> <p><b>Ventilación.</b> La ventilación en el reactor DHS es importante porque es la única fuente de oxígeno que ingresa al reactor. (Cindy Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)</p> <p><b>Gradiente de oxígeno.</b> El gradiente de oxígeno formado debido al flujo descendente y continuo permite el crecimiento de microorganismos aerobios y anaerobios responsables de eliminación orgánica, en forma de biopelículas dentro y sobre la superficie de los poros de la esponja. Se tiene un medio aeróbico cerca de la superficie de la esponja y uno anaeróbico al interior. (Chuptaya Cruz &amp; Huamán Apaestegui, 2020)</p>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Diseño.</b> Se divide en seis generaciones, cada una con un patrón de arreglo del medio distinto (distribución y forma de la esponja). Generalmente tienen una altura de 2-4 m con varias salidas de aire para que este al ingresar al reactor se disuelva con los desechos. La mayoría de las investigaciones son en base a la tercera generación, tanto a escala real y piloto. En India se han registrado reactores DHS G3 de 5.5 m de diámetro y 5.31 m de alto. Así como un reactor de 16 m de diámetro y 2.7 m de alto. (Cindy Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)</p> <p><b>Medio.</b> Su concepto es similar al de un filtro percolador, pero utilizando una esponja de poliuretano para capturar la biomasa. Esta es capaz de prosperar tanto dentro como fuera del medio. Por la naturaleza de este, es capaz de crear un ambiente anaerobio en la superficie para la nitrificación y anaerobio dentro del medio para la desnitrificación. (Cindy Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)</p> <p><b>Microorganismos.</b> Se encuentran microorganismos aeróbicos y anaeróbicos en el lodo y diversas configuraciones de comunidades conforme la altura del reactor aumenta. En la parte superior la carga orgánica tiene un valor alto y los microorganismos valores dispares, esto debido a la dominancia de distintos microorganismos. En el medio y la parte inferior la comunidad de microorganismos tiene un valor de uniformidad</p>

<p><b>Características</b></p>	<p>alto, debido a un balance entre los grupos, resultando en una carga orgánica baja. En esta parte se tiene bacteria oxidante de amoníaco y nitrito. La organización de la comunidad microbiana en varía dependiendo de parámetros importantes del agua residual, incluyendo COD, concentraciones de sulfato y las circunstancias de operación del sistema de carga orgánica.</p> <p>Los grupos microbianos en las esponjas dependen de la calidad del agua y altura del reactor. (Cindya Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)</p> <p><b>Combinación UASB.</b> El reactor DHS puede ser utilizado como tratamiento posterior del UASB. El sistema combinado tiene un buen rendimiento en la remoción de compuestos orgánicos, nitrógeno y coliformes fecales. Como resultado se obtiene un efluente con una calidad que alcanza los estándares de descarga en la mayoría de los países en desarrollo. El sistema no requiere aireación externa reduciendo los costos asociados con la energía y el equipo necesario para realizar la aireación. (Nurmiyanto &amp; Ohashi, 2018) El sistema conjunto UASB-DHS puede reducir hasta 95% el consumo energético para el tratamiento de agua residual y cerca de 98% la descarga excesiva de lodo. (Chuptaya Cruz &amp; Huamán Apaestegui, 2020)</p> <p><b>Oxígeno.</b> Los perfiles de concentración de oxígeno en la esponja utilizada como medio disminuyen hacia el centro hasta llegar a un nivel indetectable. Esto indica que tanto el tratamiento aeróbico como anaeróbico se puede realizar en un solo reactor DHS, lo que resulta favorecedor para el proceso de desnitrificación. (Nurmiyanto &amp; Ohashi, 2018)</p> <p><b>Porosidad.</b> La alta porosidad de la esponja la hace un excelente lecho de crecimiento. Esto debido a que proporciona una superficie de contacto mayor y retiene porciones de lodos, maximizando el cultivo de la biomasa. (Chuptaya Cruz &amp; Huamán Apaestegui, 2020)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p><b>DQO:</b> 80% (Cindya Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)  <b>DBO:</b> 80% (Cindya Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)  Eficiencia de remoción de COD, amoníaco y fósforo para tiempos de retención de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>6 horas:</b> 89%</li> <li>• <b>4 horas:</b> 80%</li> <li>• <b>2 horas:</b> 56%</li> </ul> <p>(Cindya Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)  <b>Nitrógeno total:</b> 65% (Onodera, y otros, 2016)</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p>Los costos se verán influenciados por la disponibilidad de materiales. Su costo operativo es bajo debido a que, al ser un sistema eficiente, que no requiere aireación externa, resulta en un ahorro energético significativo. (Chuptaya Cruz &amp; Huamán Apaestegui, 2020)</p>

<p><b>Imagen</b></p>	 <p>Figura 23 Diseño de un reactor de esponjas colgantes. (Cindya Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)</p>
<p><b>Comparación: Filtro percolador y lodos activados</b></p>	
<p><b>Microorganismos.</b> En el filtro percolador los microorganismos se adhieren únicamente a la superficie del medio en donde forma un filtro biológico o capa. En el sistema DHS los microorganismos se mantienen tanto dentro como fuera de la esponja, resultando en periodos de residencia de lodos altos (&gt;100 días). Esto se traduce en su capacidad de alcanzar la nitrificación completa y producir una menor cantidad de lodos. (Cindya Putri, Farahdiba, &amp; Ali, 2021)</p> <p><b>Eficiencia de remoción.</b> Un filtro percolador de alta tasa tiene eficiencias de remoción de DBO entre 70-80%. Similar a la eficiencia del sistema DHS. (von Sperling &amp; de Lemos Chernicharo, 2005)</p> <p><b>Lodos.</b> Combinar el reactor UASB con el DHS resulta en una producción menor de exceso de lodos comparado a un sistema convencional de lodos activados. (Nurmiyanto &amp; Ohashi, 2018)</p> <p><b>Energía.</b> El reactor DHS únicamente requiere energía para la distribución de agua residual, para las bombas. Los requisitos energéticos del reactor DHS son aproximadamente 75% menores que para el sistema convencional de lodos activados. (Nurmiyanto &amp; Ohashi, 2018)</p>	

(Elaboración propia)

c. Tratamiento terciario

Cuadro 19. Ficha técnica para la tecnología “Arrastre con aire”.

<b>Nombre</b>	Arrastre con aire
<b>Name</b>	Air stripping
<b>Clasificación</b>	Eliminación de nutrientes
<b>Objetivo</b>	Reducir el contenido de amoníaco en el agua residual.
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para nitrificación-eliminación de amoníaco y la eliminación de contaminantes específicos. (EPA, 2013) Puede ser utilizado para la remoción de moléculas orgánicas hidrofóbicas, compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y para el tratamiento de agua subterránea. (EPA, 2000) Tienen la capacidad de tratar trihalometanos THM. (QED Environmental Systems, s.f)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Terciario
<b>Cómo funciona</b>	<p><b>Contracorriente.</b> El proceso consiste en un flujo de contracorriente de aire y agua (efluente a tratar) que permite que los COV y amoníaco se evaporen del agua y posteriormente sean recolectados. Este flujo pasa a través de una columna o torre empacada con diferentes materiales de relleno. Los más utilizados son plásticos con mayor superficie de contacto. La corriente de agua se bombea hacia la parte superior del tanque y la corriente de aire es bombeada desde la parte inferior. El material en la torre obliga que la corriente de agua gotee a través de varios canales y espacios de aire. En algunos casos requiere un tratamiento posterior para la remoción de nitrógeno disuelto. (EPA , 1992; Gobierno de Chile. CONAMA, s.f.)</p> <p><b>Transversal.</b> En este caso el aire entra lateralmente a través de toda la capa de relleno y fluye por el material de empaque a medida que el agua alcalina cae al fondo de la torre. (EPA, 2000)</p> <p><b>Bandejas.</b> El agua contaminada ingresa por la parte superior conforme burbujas de aire son forzadas por un soplador a través de las bandejas perforadas. Esto genera una zona de espuma turbulenta con un área superficial aire-líquido alta.</p>
<b>Especificaciones de diseño</b>	<p><b>pH.</b> Para extraer el amoníaco por arrastre con aire es necesario añadir cal viva o soda cáustica hasta que el agua residual alcance el pH deseado y sea posible convertir los iones de amonio a amoníaco gaseoso. (EPA, 2000)</p> <p><b>Temperatura.</b> Se recomienda una temperatura ambiente de 15 a 25°C. (Gobierno de Chile. CONAMA, s.f.)</p>

<p><b>Especificaciones de diseño</b></p>	<p><b>Vida útil.</b> 10 años. (Gobierno de Chile. CONAMA, s.f.)</p> <p><b>Concentración de amoníaco y amonio.</b> El afluente del sistema debe tener concentraciones de amoníaco entre 10-100 mg/L. Para concentraciones mayores puede resultar más económico el uso de técnicas alternas de extracción, como la extracción con vapor o métodos biológicos. (EPA, 2000) El método de extracción por arrastre con aire puede ser utilizado para el tratamiento de agua residual municipal con una concentración baja del ion amonio, de 26.98-98 mg/L. (Zanganeh, Jalilzadeh, Khafaie, &amp; Alipour, 2021)</p> <p><b>Requisitos del proceso.</b> Para llevar a cabo un proceso adecuado es necesario que exista el pretratamiento del agua residual para remover materia orgánica libre, una superficie de contacto grande entre el agua y el aire, suficiente tiempo de contacto y no debe existir presencia de surfactantes o algún otro factor que disminuya la concentración de hidrógeno. (Fischer, 2019)</p> <p><b>Criterios de diseño.</b> Se deben considerar al diseñar el sistema con torres de extracción de amoníaco por arrastre con aire. Las condiciones óptimas se colocan en paréntesis.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carga hidráulica de agua residual (0.1 a 0.2 l/min/m<sup>3</sup> o 1 a 2 gal/min/pie<sup>2</sup>).</li> <li>• Tasa de flujo del aire de arrastre (32 a 54 l/min/m<sup>3</sup> o 300 a 500 pie<sup>3</sup>/min/gal).</li> <li>• Profundidad del relleno (6.1 a 7.6 metros o 20 a 25 pies).</li> <li>• pH del agua residual (10.8 a 11.5).</li> <li>• Reducción de la presión de aire (0.015 a 0.019 pulgadas de agua por pie).</li> <li>• Tipo de soplador de aire.</li> <li>• Requerimientos del sitio y del terreno.</li> <li>• Material de empaque (plástico o madera).</li> <li>• Espacio del empaque (aproximadamente 5 cm o 2 pulgadas en dirección horizontal y vertical). (EPA, 2000)</li> </ul>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Tipos de métodos de extracción.</b> Los métodos comunes para la extracción por arrastre con aire incluyen torres, bandejas apiladas (stacking tray) y bandejas deslizantes (sliding tray). Estos varían en su funcionamiento, tamaño, monitoreo y limpieza. En el caso de las bandejas apiladas es necesario retirar seguros y cada bandeja para realizar su limpieza. Las bandejas deslizantes tienen una puerta removible, sin sellos externos y que no requiere retirar cada bandeja o desconectar la tubería para limpieza. (Fischer, 2019)</p>

<p><b>Características</b></p>	<p><b>Dimensiones bandeja deslizante.</b> Tomando como referencia la variante patentada de bandeja deslizante EZR Tray ®, se identifican las dimensiones mínimas y máximas en largo x ancho x alto.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mínimas: 75 x 59 x 84 cm</li> <li>• Máximas: 149 x 124 x 120 cm</li> </ul> <p>(QED Environmental Systems, s.f.)</p> <p><b>Dimensiones bandeja apilada.</b> Tomando como referencia la variante patentada de bandeja deslizante, EZ Stacker ®, se identifican las dimensiones mínimas y máximas en largo x ancho x alto.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mínimas: 82 x 31.5 x 88 in</li> <li>• Máximas: 92 x 40 x 108 in</li> </ul> <p>(QED Environmental Systems, s.f.)</p> <p><b>Variantes de torres de extracción.</b> Se tienen dos variantes de torres de extracción: flujo transversal y flujo a contracorriente. En la primera el aire ingresa a través de la capa de relleno y fluye por el material de empaque mientras que el agua alcalina cae. En la segunda el aire ingresa a través de orificios en el fondo y el agua residual se bombea hacia la parte superior. (EPA, 2000)</p> <p><b>Extracción de amoníaco.</b> Depende de la temperatura del aire y de la razón aire/agua. (EPA, 2000)</p> <p><b>Operación y mantenimiento.</b> Se debe desarrollar una programación rutinaria de operación y mantenimiento. Esto incluye evaluar y calibrar equipos, ajuste apropiado del pH, clarificación del afluente antes de ingresar al sistema, mantenimiento de las tasas apropiadas de flujo de aire y agua, entre otros. (EPA, 2000)</p> <p><b>Operación conjunta.</b> Esta tecnología puede ser utilizada con carbón activado granular (GAC) para prolongar su vida útil disminuyendo la cantidad de VOC en el agua residual. (Fischer, 2019)</p> <p><b>Estudios piloto.</b> Se recomienda realizar estudios piloto para comprobar que las incrustaciones se pueden eliminar hidráulicamente. (EPA, 2000)</p> <p><b>Nitrógeno.</b> La tecnología no es capaz de remover nitrato o nitrógeno orgánico. (EPA, 2000)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p><b>Amoníaco</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A 20° C: 90-95%</li> <li>• A 10° C: 75%</li> </ul> <p>(EPA, 2000)</p>

<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p><b>THM:</b> 90% (QED Environmental Systems, sf)  <b>VOC:</b> 98% (EPA , 1992)</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p><b>Instalación.</b> Dependen del fabricante del equipo, la ubicación de la planta y su capacidad, la concentración de amoníaco en el agua residual, el caudal deseado, los tipos de sopladores y la temperatura del agua. (EPA, 2000)</p> <p><b>Operación y mantenimiento.</b> Incluye costos por energía eléctrica, materiales, compuestos químicos y costos laborales. (EPA, 2000)</p>
<p><b>Imagen</b></p>	<div data-bbox="818 642 1255 1230" data-label="Diagram"> </div> <p data-bbox="812 1247 1211 1335">Figura 24. Variantes de torres de extracción por arrastre con aire. (EPA, 2000)</p> <div data-bbox="818 1377 1297 1688" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="818 1703 1284 1761">Figura 25. Bandejas apiladas y deslizantes. (Fischer, 2019)</p>
<p><b>Comparación: ósmosis inversa</b></p>	
<p><b>Costo.</b> Comparado con la ósmosis inversa y otras tecnologías para la eliminación de VOC, como carbón granular activado, procesos avanzados de oxidación y ultrafiltración,</p>	

la extracción por arrastre con aire tiene un costo de operación y de inversión medio. Para las demás tecnologías es alto, debido al uso de energía y en algunos casos químicos. En el caso de la extracción por arrastre, el costo de operación principal es por la energía utilizada en el ventilador. (Fischer, 2019)

**Eficiencia, complejidad y estabilidad.** El proceso de ósmosis inversa no siempre es capaz de tener eficiencias de remoción de VOC altas. Por otro lado, la complejidad del sistema es intermedia, mientras que para la extracción por arrastre es baja. La estabilidad del sistema, en el caso de la extracción por aire, es alta y para la ósmosis inversa es intermedia. (EPA, 2000)

(Elaboración propia)

Cuadro 20. Ficha técnica para la tecnología “Desinfección con bromo”.

<b>Nombre</b>	Bromo Cloro Dimetil Hidantoína o Desinfección con bromo
<b>Name</b>	Bromo Chloro Dimethylhydantoin BCDMH or Bromine Disinfection
<b>Clasificación</b>	Desinfectante alternativo
<b>Objetivo</b>	Reducir la concentración de patógenos en el agua.
<b>Para qué se utiliza</b>	Ha sido utilizado como desinfectante de piscinas y bañeras y para el tratamiento de agua residual. Puede ser utilizado como bactericida, fungicida y alguicida para el tratamiento de agua de refrigeración. En torres de enfriamiento de recirculación, sistemas de agua de intercambio de calor, sistemas industriales de lavado de agua, pasteurizadores para cervecería y conservas y condensado de aire acondicionado. Es más útil para sistemas de enfriamiento de agua de tamaño mediano o pequeño en los que el uso de aditivos químicos puede ser difícil. (EnviroTech, 2016)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Terciario
<b>Cómo funciona</b>	El polvo o tableta de BCDMH puede ser suministrado al sistema de una sola vez, de forma intermitente o de forma continua. Son más fácilmente introducidos al agua utilizando un equipo alimentador de bromo. Este debe tener el tamaño adecuado para las dimensiones del sistema de tratamiento. El alimentador facilita la liberación controlada del bromo mientras se controla el flujo de agua que pasa. (EnviroTech, 2016)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<b>Incompatibilidad.</b> Es incompatible con pinturas, petróleo, grasas (en especial minerales lubricantes), serrín y otros materiales orgánicos combustibles, oxidantes orgánicos e inorgánicos, bases fuertes y humedad. (EnviroTech, 2016)

<p><b>Especificaciones de diseño</b></p>	<p><b>Dosificación.</b> La dosificación de BCDMH depende de varios factores como las características del sistema tratando, si existe contaminación por amoníaco, la compatibilidad con otros aditivos químicos y el grado de limpieza deseado. Se recomienda una dosis inicial para alcanzar 1 ppm de bromo residual en sistemas notablemente sucios. La dosis se repite hasta que se tenga 1 ppm de bromo residual por al menos 4 horas. (EnviroTech, 2016)</p> <p><b>Halógeno residual.</b> Es necesario mantener un residuo de halógeno libre para la efectividad de tratamiento. El nivel requerido y duración varía dependiendo del sistema. (EnviroTech, 2016)</p>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Modo de desinfección.</b> El modo de desinfección de BCDMH consiste en la combinación de bromo y cloro, ya que al reaccionar con agua libera ácido hipobromoso y ácido hipocloroso. (Johannes de Wet, 2018)</p> <p><b>Solubilidad.</b> Es un compuesto casi completamente insoluble, con una solubilidad de 15% a 20 °C. Esto le permite tener una reacción con agua lenta y controlada. (Johannes de Wet, 2018)</p> <p><b>Presentaciones.</b> Este producto químico se encuentra disponible como tabletas o polvo. (Johannes de Wet, 2018)</p> <p><b>Químicas.</b> BCDMH tiene eficiencia biocida en contra de un amplio espectro de patógenos y es efectiva en gran variedad de condiciones presentes en el agua. Su contenido de bromo lo hace eficiente en agua ácida o básica y se mantiene su función biocida aún en presencia de amoníaco. Este compuesto no tiene características corrosivas fuertes si se utiliza en la concentración de tratamiento recomendada. Es un compuesto orgánico estable y eficiente en agua ácida o básica. (Johannes de Wet, 2018)</p> <p><b>Físicas.</b> Es fácil trabajar con las tabletas y el polvo de BCDMH y si no se expone a humedad tiene una vida útil larga. Por su baja solubilidad su reacción con agua es lenta y controlada provocando un aumento en la eficiencia del tratamiento y mejor control. (Johannes de Wet, 2018)</p> <p><b>Inflamabilidad.</b> No es inflamable. A temperaturas de 160° C los biocidas de BCDMH empieza a liberar gases tóxicos. (EnviroTech, 2016)</p> <p><b>Almacenamiento.</b> Debe ser almacenado en áreas secas y bien ventiladas entre 20° C a 30° C. (EnviroTech, 2016)</p>

<p><b>Características</b></p>	<p><b>Amoníaco.</b> Tiene la capacidad de mantener su función biocida en presencia de amoníaco. (EnviroTech, 2016)</p> <p><b>Patógenos.</b> Tiene actividad microbiana de amplio espectro y es efectivo a concentraciones bajas. (EnviroTech, 2016)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p>En la literatura utilizada no se encontró información referente a su eficiencia de remoción.</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p><b>Operación.</b> Los costos estimados para sistemas de desinfección con BCDMH y concentraciones pico de 12 mg/L son: para un flujo de 3.6 MGD el costo total anual sería de \$7,952 y para un flujo de 26.1 MGD \$20,814. Esto es tomando en cuenta el equipo necesario y los químicos para la operación. Los costos se calcularon asumiendo una esperanza de vida media de 20 años y una tasa de interés de 7%. (Fedler, Francis, Parekh, &amp; Blanchet, 2012)</p> <p><b>Inversión.</b> El equipo es similar al necesario en sistemas con hipoclorito. (EPA, 2013)</p>
<p><b>Imagen</b></p>	<div data-bbox="878 909 1182 1087" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="878 1098 1154 1192">           Figura 26. Tabletas de BCDMH.            (Canaxy water, 2017)         </p>
<p><b>Comparación: cloro</b></p>	
<p><b>Tiempo de desinfección.</b> La desinfección con bromo puede reducir bacteria en menor tiempo que el hipoclorito de sodio. Los coliformes fecales experimentan una reducción 4-log luego de 3 minutos utilizando BCDMH y luego de 5 minutos con hipoclorito de sodio. (Fedler, Francis, Parekh, &amp; Blanchet, 2012)</p> <p><b>Eficiencia.</b> Al comparar BCDMH con la eficiencia del cloro a un pH de 8.5, BCDMH resulta ser un biocida más fuerte en contra de <i>E. aerogenes</i>, <i>E. coli</i>, <i>P. aeruginosa</i> y <i>polybacteria</i>. Adicionalmente, se utilizan menos químicos en un sistema de BCDMH y el pH varía menos. “EnviroTech” indica en la ficha técnica de las tabletas de BCDMH que el compuesto es más eficiente que el cloro sobre un rango de pH mayor (6-10) y en la presencia de contaminación por amoníaco. (EnviroTech, 2016) La literatura no especifica para qué tipo de patógenos.</p> <p><b>Costos.</b> El menor tiempo de contacto requerido para la desinfección con BCDMH puede resultar en un ahorro en los costos por la compra de productos químicos. (Fedler, Francis, Parekh, &amp; Blanchet, 2012) Sin embargo, la necesidad de equipo complementario y la actualización del existente lo hace más costoso que el cloro. (Johannes de Wet, 2018)</p>	

**Vida útil.** BCDMH tiene una vida útil mayor comparada al hipoclorito de sodio. Sin embargo, se incurrirán en costos adicionales por la necesidad de equipo complementario como un sistema de inyección y una unidad de mezcla. (Fedler, Francis, Parekh, & Blanchet, 2012)

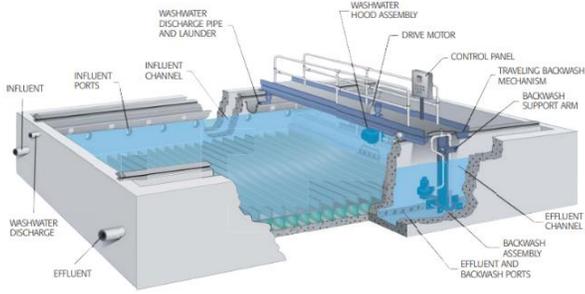
**Almacenamiento.** Su manejo y almacenamiento es más seguro que el gas cloro o líquido. (EnviroTech, 2016)

(Elaboración propia)

Cuadro 21. Ficha técnica para la tecnología “Filtro de retrolavado automático”.

<b>Nombre</b>	Filtro de retrolavado automático o puente móvil
<b>Name</b>	Automatic Backwash Filter (ABW) or Traveling Bridge
<b>Clasificación</b>	Eliminación de sólidos
<b>Objetivo</b>	Realizar el retrolavado de las células del filtro dejando una porción de estas en operación.
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para el tratamiento terciario de agua residual municipal, el tratamiento de agua potable o industrial y reúso de agua. (Infilco Degremont , 2002) Con la configuración adecuada puede ser utilizado para la remoción de alga. (Evoqua Water Technologies , 2017) El filtro está diseñado para filtrar el agua y realizar el retrolavado de las celdas de manera simultánea. (AQUA-AEROBIC SYSTEMS INC., 2023) Tiene la capacidad de eliminar fósforo y realizar la separación sólida-líquida. (EPA, 2013)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Terciario
<b>Cómo funciona</b>	<p>El filtro ABW es un filtro de gravedad continuo y de tasa rápida que utiliza un medio granular. Su operación es manejada a través de un panel de control, con una interfase amigable al usuario, colocado en el puente móvil.</p> <p>El afluente ingresa al tanque a través de múltiples puertos de entrada y fluye a través del medio granular y la placa porosa. El agua filtrada pasa por el puerto de retrolavado y hacia el canal de efluente.</p> <p>El retrolavado es realizado por una cubierta colocada debajo del puente móvil. Durante el retrolavado, la cubierta y el puente móvil se mueven lentamente por el lecho filtrante, aislando y realizando el retrolavado consecutivo de cada celda individual. Las celdas que no están debajo de la cubierta siguen trabajando.</p> <p>Una bomba de retrolavado extrae agua filtrada de la cámara de efluentes y realiza el retrolavado de cada celda bombeando agua de regreso a través del puerto de efluentes. Otra bomba recoge el agua de lavado que se ha acumulado y la descarga al canal de agua de lavado. (AQUA-AEROBIC SYSTEMS INC., 2023)</p>

<p><b>Especificaciones de diseño</b></p>	<p><b>Medidas.</b> La profundidad de la arena es baja, típicamente de 30 cm y de 40-60 cm cuando se aplica en agua potable. El ancho del filtro es aproximadamente de 16 pies. El largo que se utilizará se encuentra determinado por la cantidad de área superficial requerida según la aplicación. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p> <p><b>Tamaño.</b> Los anchos disponibles son 1.8, 2.7, 3.8 y 4.9 m para el filtro patentado AquaABF® de concreto. También pueden ser tanques de acero prefabricados. Estos se encuentran disponibles en dimensiones de 1.2 m x 2.4 m a 2.7 m x 12.2 m. (AQUA-AEROBIC SYSTEMS INC., 2023)</p> <p><b>Lecho.</b> El lecho del filtro tiene celdas divididas horizontalmente cada 8 o 12 pulgadas. (AQUA-AEROBIC SYSTEMS INC., 2023)</p>
<p><b>Características</b></p>	<p><b>Adaptable.</b> El filtro puede ser colocado en plantas preexistentes sin la necesidad de bombeo. (Piemont, y otros, s.f.)</p> <p><b>Poca pérdida energética.</b> Debido a que el diseño del filtro depende de una penetración de flóculos poco profunda, bajo condiciones normales, resulta en poca pérdida energética por la resistencia al flujo. Para mantener esta condición, el filtro se lava automáticamente y en intervalos relativamente frecuentes. (Piemont, y otros, s.f.)</p> <p><b>Compartimientos.</b> El filtro se divide en dos compartimientos con el fin de que un mecanismo automático lave cada uno de manera sucesiva mientras el resto se mantiene funcionando. (Piemont, y otros, s.f.)</p> <p><b>Tasa de filtración.</b> La tasa de filtración se encuentra en el rango de 5-7.5 m/h. Un lavado se activa cuando la resistencia al flujo excede 5-15 cm de columnas de agua. (Piemont, y otros, s.f.)</p> <p><b>Intervalos de operación.</b> El ciclo de limpieza es corto y se repite en intervalos regulares, generalmente 30 segundos cada 2-6 horas. Esto mantiene el medio del filtro en una condición básicamente limpia. (Piemont, y otros, s.f.)</p> <p><b>Configuraciones.</b> El filtro de puente móvil patentado Gravisand® puede ser instalada en acero como un paquete construido en fábrica para cunetas de concreto. Este también es útil para la actualización de plantas previamente construidas. (Evoqua Water Technologies , 2017)</p> <p><b>Retrolavado.</b> Un puente móvil y campana de retrolavado se mueven a lo largo del filtro. La limpieza controlada del</p>

<p><b>Características</b></p>	<p>medio se realiza en siete etapas y se enfoca en una celda a la vez para optimizar la remoción de sólidos. El retrolavado regular de duración corta reduce la tasa orgánica y conlleva a costos de operación menores. (Infilco Degremont , 2002)</p> <p><b>Mantenimiento.</b> Su ensamblaje montado es fácil de inspeccionar y en muchas ocasiones se puede mantener en línea para el mantenimiento. (Infilco Degremont , 2002)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p>La literatura utilizada no muestra información acerca de la eficiencia de remoción de la tecnología.</p>
<p><b>Costos</b></p>	<p><b>Instalación.</b> Los costos de instalación son bajos considerando que requiere de poca excavación. (Infilco Degremont , 2002)</p>
<p><b>Imagen</b></p>	 <p>El diagrama muestra un filtro de retrolavado automático (ABW) con una estructura rectangular. Se ven los canales de entrada de agua (influent) y los puertos de salida de agua residual (effluent). El sistema incluye un mecanismo de lavado automático con un motor de accionamiento, un panel de control y un sistema de soporte para el brazo de lavado. Se muestran también los canales de agua de lavado (washwater) y los puertos de salida de agua de lavado (washwater discharge).</p> <p>Figura 27. Filtro de retrolavado automático. (Infilco Degremont, 2002)</p>
<p><b>Comparación: filtro de arena</b></p>	
<p><b>Tasa de agua de retrolavado.</b> En comparación con un filtro de arena convencional, la tasa de agua de retrolavado generada por un filtro ABW es menor debido a que su lecho de arena es poco profundo y el área de retrolavado es más pequeña. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p> <p><b>Constante.</b> El filtro ABW produce una cantidad de agua de retrolavado bastante constante cuando se encuentra en operación. En los filtros convencionales, el retrolavado a veces debe ser almacenado para que los sólidos sean alimentados lentamente al inicio del proceso para evitar la generación de cargas que interfieran con el tratamiento del agua residual, así como taponamientos. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p>	

(Elaboración propia)

Cuadro 22. Ficha técnica para la tecnología “Lodo granular aerobio”.

<b>Nombre</b>	Lodo granular aerobio
<b>Name</b>	Aerobic granular sludge (AGS)
<b>Clasificación</b>	Asentamiento de sólidos Tratamiento biológico aerobio
<b>Objetivo</b>	Obtener una separación sólido-líquido más eficiente mediante la generación de gránulos densos de lodo.
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, eliminación de fósforo, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. (EPA, 2013) Puede ser aplicado en nuevas plantas de tratamiento de agua residual industrial y municipal o para realizar la mejora de las existentes. (Royal HaskoningDHV, 2023)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Terciario
<b>Cómo funciona</b>	El lodo granular aerobio se aplica principalmente utilizando una configuración de un reactor por lotes de secuenciación. La biomasa crece dentro del reactor de manera natural. El ciclo de tratamiento inicia cuando el reactor se empieza a llenar con el agua residual por la parte inferior. Simultáneamente el agua tratada, obtenida de ciclos anteriores, se desplaza a la parte superior del reactor. Luego se tiene una etapa de aireación que resulta en la remoción biológica simultánea de componentes orgánicos, nitrógeno y fósforo. Finalmente se tiene asentamiento para separar la biomasa del efluente purificado. (Royal HaskoningDHV, 2023)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<b>Tiempo corto de asentamiento.</b> Permite la granulación bajo condiciones aeróbicas. Esto le da una ventaja selectiva a los gránulos que se asientan bien, ya que la biomasa con asentamiento deficiente se lava. (EPA, 2013)  <b>Configuración SBR.</b> La alimentación por lotes proporcionada por la configuración de reactor SBR induce una concentración alta de sustrato al inicio del ciclo de tratamiento. Debido a que se tiene un gradiente de concentración alto, el sustrato puede difundirse en el gránulo previniendo la inanición de las bacterias en este. Un gradiente difuso provocaría inanición en el centro del gránulo, debilitándolo y resultando en su desintegración. La configuración SBR del reactor también permite el desarrollo adecuado del tiempo de asentamiento y decantación necesario para los microorganismos que generarán los gránulos bajo condiciones aerobias. (EPA, 2013) Mediante esta configuración es posible desarrollar los lodos granulares aerobios a partir la inoculación de lodos activos. (Duarte Castro, 2022)

<b>Características</b>	<p><b>Concentración alta de biomasa.</b> Puede operar con concentraciones más altas de biomasa debido a un alto tiempo de retención y actividad biológica. (EPA, 2013)</p> <p><b>Fases.</b> Tiene cuatro fases bien definidas: llenado, mezcla/aireación, asentamiento y decantación. Similar a las fases en un reactor SBR. (EPA, 2013)</p> <p><b>Tamaño del gránulo.</b> Aumenta hasta que la formación de gránulos estables se ve limitada por la difusión del sustrato. Los gránulos menos estables se lavan debido a su asentamiento deficiente. De este modo se alcanza un equilibrio dinámico entre la concentración del sustrato y el diámetro promedio del gránulo. (EPA, 2013)</p> <p><b>Procesos simultáneos.</b> La nitrificación ocurre en la capa externa del gránulo, mientras que la desnitrificación en su núcleo anóxico. (EPA, 2013) Dentro de los gránulos coexisten zonas anóxicas y anaeróbicas que permiten que estos procesos sucedan simultáneamente. (Royal HaskoningDHV, 2023)</p> <p><b>Reúso.</b> El efluente producido puede ser reutilizado. El efluente puede contener algunos sólidos suspendidos, pero se pueden eliminar con facilidad cuando sea necesario. (Royal HaskoningDHV, 2023)</p>
<b>Eficiencias de remoción</b>	<p><b>Nitrógeno:</b> 80% (EPA, 2013)  <b>DQO:</b> 77% (Duarte Castro, 2022)</p>
<b>Costos</b>	<p><b>Inversión.</b> Es significativo y depende de las especificaciones del proyecto y características del sitio. (Royal HaskoningDHV, 2023)</p> <p><b>Operación.</b> Bajos debido al uso de menor equipo, energía y la necesidad de poco mantenimiento. No requiere la adición de químicos para la remoción de fósforo. (Royal HaskoningDHV, 2023)</p>
<b>Imagen</b>	-
<b>Comparación: Lodos activados</b>	
<p><b>Espacio utilizado.</b> Debido a que los lodos granulares aerobios operan a concentraciones de biomasa más altas y no requieren de un clarificador separado, el espacio necesario para su aplicación es <math>\frac{1}{4}</math> del necesario para instalaciones convencionales de lodos activados (EPA, 2013) y 50% del necesario para un reactor SBR convencional (Royal HaskoningDHV, 2023).</p> <p><b>Compactación natural.</b> A diferencia de los procesos convencionales, la bacteria necesaria para el tratamiento se agrupa naturalmente en gránulos compactos con características de asentamiento superiores. (Royal HaskoningDHV, 2023)</p>	

**Consumo energético.** Comparado a los sistemas convencionales de lodos activados, el uso de lodos granulares tiene un consumo energético inferior debido a que requiere menos equipo mecánico. Al aplicar la tecnología Nereda, nombre dado a la primera aplicación de la tecnología de lodo granular aerobio en Países Bajos, se ha demostrado que esta no requiere bombas para el reciclado de lodos, mezcladores en tanques anaeróbicos o tanques selectores o propulsión en reactores de lodos activados. El ahorro energético es de 20-30%. Esta cifra puede aumentar debido a que se tiene una eficiencia de aireación superior a lo normal. (Royal HaskoningDHV, 2023)

**Olor.** El control de olor es similar al necesario en procesos convencionales de lodos activados. De ser necesario, y si es requerido, se podría equipar la planta de tratamiento con medidas para el control de olor como la cobertura adecuada y tratamiento del aire emitido. Esto suele no ser necesario debido a que las emisiones producidas por el tratamiento biológico son pocas. (Royal HaskoningDHV, 2023)

**Costos.** El uso de la tecnología Nereda resulta en costos de construcción menores comparados a los necesarios para una tecnología convencional. Esto debido a que ocupa menos espacio, el volumen de los tanques es menor y requiere de menos equipo. El costo de operación es menor comparado a los sistemas convencionales debido a que consume menor energía, requiere menor equipo y mantenimiento, no requiere de químicos para la remoción de fósforo y se tiene un superávit de producción de lodos que puede ser vendido. (Royal HaskoningDHV, 2023)

(Elaboración propia)

Cuadro 23. Ficha Técnica para la tecnología “Oxidación anaeróbica de amonio”.

<b>Nombre</b>	Oxidación anaeróbica de amonio
<b>Name</b>	Anaerobic ammonium oxidation ANAMMOX
<b>Clasificación</b>	Eliminación de nitrógeno
<b>Objetivo</b>	Eliminar amonio del efluente mediante la combinación de amoníaco y nitrito en gas nitrógeno para evitar pasar por un proceso de dos etapas (nitrificación aeróbica y desnitrificación anaeróbica). (Stauffer & Spuhler, 2020)
<b>Para qué se utiliza</b>	Es utilizado para la eliminación de amonio en efluentes con concentraciones variables. Puede ser utilizado para el tratamiento de agua residual municipal y derivada de lixiviados de vertederos o desechos de animales. (Stauffer & Spuhler, 2020)
<b>Nivel de tratamiento</b>	Terciario
<b>Cómo funciona</b>	El proceso Anammox ocurre dentro de un tanque, el cual cuenta con un sistema de aireación, biomasa y un separador. El afluente se bombea hacia el interior del tanque por la parte inferior del mismo. El agua residual es aireada por burbujas pequeñas para asegurar una mezcla rápida entre el agua residual y la biomasa. El proceso Anammox es ejecutado por dos tipos de bacteria que coexisten dentro del mismo

<b>Cómo funciona</b>	gránulo. El efluente pasa por un equipo encargado de separar la biomasa del agua tratada. El efluente sale del reactor por la parte superior. (Paques, s.f.)
<b>Especificaciones de diseño</b>	<p><b>Nitrito.</b> A pesar de que el nitrito es uno de los sustratos principales para la reacción, las concentraciones mayores a 100 mg/L inhiben el crecimiento de la bacteria. (Weralupitiya, y otros, 2021)</p> <p><b>Amoníaco.</b> Es el sustrato primario de la reacción. A pesar de que el proceso se utiliza para tratar agua residual que contiene amonio de alta resistencia, las bacterias Anammox se inhiben cuando las concentraciones son <math>&gt; 1 \text{ gN/L}^{-1}</math>. De igual forma, concentraciones <math>&gt; 20\text{-}25 \text{ mgN/L}</math> de amoníaco libre afectan el desempeño de la bacteria. Generalmente se tiene amoníaco libre cuando las concentraciones de pH son mayores a 8.7. (Weralupitiya, y otros, 2021)</p> <p><b>Temperatura.</b> Este es uno de los parámetros que más impacta la actividad de las bacterias y la eficiencia en la eliminación de nitrógeno. Cambios en temperatura pueden activar factores de inhibidores con efectos negativos en la comunidad microbiana. Las bacterias Anammox ocurren naturalmente en temperaturas de 4-8 °C. Los rangos tolerables de temperatura para estas bacterias se encuentran entre 20-45 °C. La mayor tasa de crecimiento de Anammox se encuentra en rangos entre 30-40 °C. (Weralupitiya, y otros, 2021)</p> <p><b>pH.</b> El pH puede tener efectos inhibidores en las bacterias Anammox, en especial secundario a la formación de químicos tóxicos. El rango óptimo para el crecimiento y la actividad Anammox es entre 6.5-9 unidades estándar. (Weralupitiya, y otros, 2021)</p> <p><b>Oxígeno disuelto.</b> La actividad Anammox se ha inhibido con concentraciones de oxígeno disuelto muy bajas (2% de saturación de aire). El crecimiento bacteriano de Anammox y su actividad metabólica se vio beneficiada en condiciones estrictamente anóxicas. (Weralupitiya, y otros, 2021)</p> <p><b>Gránulos.</b> El gránulo está compuesto por dos tipos de bacteria: de nitrificación y Anammox. (Paques, s.f.)</p>
<b>Características</b>	<b>Reduce costos.</b> La reacción es llevada a cabo por la bacteria Anammox ( <i>Candidatus Brocadia anammoxidans</i> ), la cual pertenece al grupo planctomycete. Esta es capaz de transformar el amonio y dióxido de nitrógeno en gas nitrógeno y agua. Debido a esto se tiene un ahorro energético, ya que se utiliza menos energía para la aireación y no requiere de fuentes de carbón adicionales como metanol o lodos recirculados. (Stauffer & Spuhler, 2020)

<p><b>Características</b></p>	<p><b>Configuraciones.</b> Distintas configuraciones se han aplicado para el tratamiento de agua residual de acuerdo con sus características o requisitos del tratamiento. Una de ellas se conoce como el “proceso de nitrificación-Anammox de dos reactores” o SHARON-Anammox y ha sido utilizado únicamente en efluentes con concentraciones altas de amonio. El “proceso de nitrificación-Anammox de un reactor” o CANON se encuentra limitado a escala piloto o de laboratorio. Por último, el “proceso de desnitrificación-Anammox de un reactor” o DEAMOX es aplicado para el tratamiento de agua residual con una concentración alta de nitrógeno y niveles de carbón orgánico elevados. (Stauffer &amp; Spuhler, 2020)</p> <p><b>Inhibición.</b> El proceso se inhibe por un rango diverso de compuestos exógenos como antibióticos, metales pesados tóxicos, fenoles y alcohol. (Weralupitiya, y otros, 2021)</p> <p><b>Operación.</b> Debido a la necesidad de cumplir con varios parámetros (pH, temperatura, concentraciones de nitrito) esta tecnología requiere un monitoreo frecuente. (Stauffer &amp; Spuhler, 2020)</p>
<p><b>Eficiencias de remoción</b></p>	<p><b>Nitrógeno total:</b> &gt; 80% (Weralupitiya, y otros, 2021)  <b>Amoníaco:</b> &gt; 80% (Weralupitiya, y otros, 2021), puede llegar a alcanzar una eficiencia de remoción de 95% (EPA, 2013)</p> <p>En un reactor ESGB sus eficiencias son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Nitrógeno total:</b> 54.3%</li> <li>• <b>Amonio:</b> 21.7%</li> <li>• <b>Nitrito:</b> 99.9%</li> <li>• <b>DQO:</b> 84%; con un afluente con concentraciones de 500 mg/L</li> </ul>
<p><b>Costos</b></p>	<p><b>Operación.</b> Los costos de operación disminuyen debido a que el proceso requiere de una cantidad menor de oxígeno, comparado con los procesos convencionales de nitrificación/desnitrificación. Debido a que las bacterias responsables de llevar a cabo el proceso son autotróficas, no requieren fuentes adicionales de carbón resultando en un ahorro de dosificación de químicos. (Stauffer &amp; Spuhler, 2020)</p>
<p><b>Imagen</b></p>	

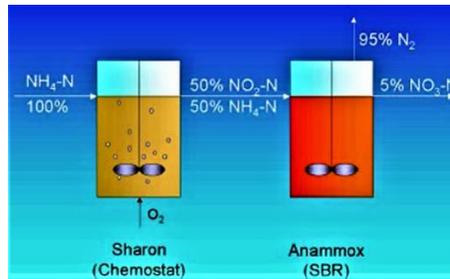


Figura 28. Principio del proceso SHARON-Anammox. (Stauffer & Spuhler, 2020)

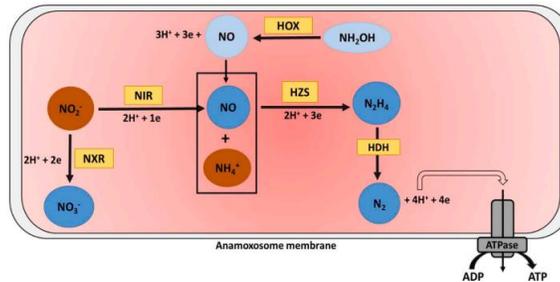


Figura 30. Representación esquemática del catabolismo Anammox. (Weralupitiya, y otros, 2021)

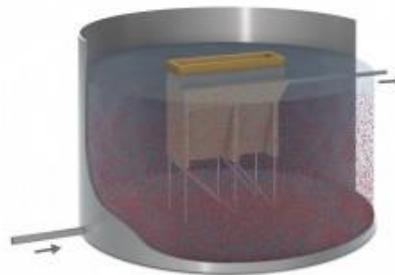


Figura 29. Tanque Anammox. (Paques, s.f.)

**Comparación: nitrificación/desnitrificación convencional en sistemas de lodos activados**

**Eficiente.** ANAMMOX elimina la necesidad de una fuente de carbón orgánico para la nitrificación, reduce la demanda energética para aireación y tiene una producción menor de lodos y menores emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (Stauffer & Spuhler, 2020) Comparado con los procesos convencionales, el proceso Anammox puede ahorrar hasta 63% de la demanda de oxígeno, y reducir casi en su totalidad la demanda de carbón (100%) y de biomasa (80%). Los procesos convencionales reducen 25% la demanda de oxígeno y 40% la demanda de carbón y producción de biomasa. (EPA, 2013)

**Costo.** Anammox tiene costos menores debido a que no utiliza una fuente de carbón externa y sus requisitos de aireación son menores. (Stauffer & Spuhler, 2020)

(Elaboración propia)

### C. FODA de las tecnologías

El crecimiento poblacional acelerado junto a la industrialización, han provocado la disminución de terrenos disponibles y dificultado el saneamiento básico. El impacto ambiental se ha vuelto cada vez más grave, siendo la contaminación acuática por aguas residuales domésticas uno de los principales problemas. Afectando así de forma directa las especies acuáticas e indirecta la salud de la población. (Chuptaya Cruz & Huamán Apaestegui, 2020) El agua residual urbana está generando un incremento en eventos de eutrofización con consecuencias directas como la muerte masiva de organismos acuáticos, la reducción de la biodiversidad, marea roja, etc. El número de zonas anóxicas o sub-tóxicas en aguas costeras ha crecido exponencialmente desde 1960, con más de 400 zonas hipóxicas reportadas a nivel mundial. (Herrera Melián, 2020)

Las limitaciones principales en el funcionamiento sostenible de las PTAR en países en vías de desarrollo son la escasez de presupuesto y terreno disponible, personal técnico no capacitado y suministros inestables de energía eléctrica. (Chuptaya Cruz & Huamán Apaestegui, 2020) Algunos de los criterios que se deben considerar para la selección de tecnologías son: enfocarse en tecnologías de bajo costo, simples de construir, operar y mantener con una eficiencia a largo plazo y confiables; asegurarse que sean aplicadas a gran escala; buscar promover un nivel alto de auto suficiencia y ser aceptados adecuadamente en la comunidad. La selección final de una tecnología debe hacerse considerando las características del sitio y del afluente, así como el medio ambiente en el que se desarrollará. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016)

Tomando esto en consideración se identificó la necesidad de establecer criterios de selección de tecnologías para el tratamiento de agua residual como: costo, eficiencia de remoción, uso de energía, capacidad del operador, y tamaño requerido. Sin embargo, debido a que la literatura utilizada para cada tecnología contaba, en su mayoría, con información cualitativa no fue posible realizar una matriz de decisión basada en valores y características cuantitativas. Adicionalmente, no todas las tecnologías contaban con la misma calidad de información. En la mayoría de los casos era por ser tecnologías muy recientes o tener pocas aplicaciones a gran escala. Por consiguiente, el análisis de la capacidad de aplicar las tecnologías en el país fue realizado mediante un FODA. Estos muestran de manera resumida la información presentada en las fichas técnicas de las tecnologías seleccionadas.

El FODA de cada tecnología se presenta a continuación.

## 1. Tratamiento primario

Cuadro 24. FODA Filtración por medios compresibles.

<b>Filtración por medios compresibles (CMF)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	Primario o terciario
<p><b>Fortalezas</b></p> <p>Capacidad incrementada de eliminación orgánica (P en el efluente de 0.1 mg/L, BOD 38%).</p> <p>Configuraciones de diseño adaptadas según su aplicación.</p> <p>Cuando es de concreto puede ser levantado en el lugar.</p> <p>El medio tiene una vida útil de 7-10 años.</p> <p>Trabaja en clima seco y lluvioso.</p>	<p><b>Debilidades</b></p> <p>Requiere el uso de equipo adicional y equipo mecánico.</p> <p>A pesar de que la operación de la tecnología es simple, el operador debe comprender el funcionamiento de la tecnología y por consiguiente capacitarse.</p> <p>Requiere la adición de cloro.</p> <p>Es una tecnología patentada.</p>
<p><b>Oportunidades</b></p> <p>Se pueden adaptar a filtros preexistentes en la planta de tratamiento.</p> <p>Puede ser aplicado para producir un efluente de reúso.</p>	<p><b>Amenazas</b></p> <p>No contar con energía eléctrica en el área en la que se espera aplicar la tecnología.</p> <p>Tener un presupuesto limitado que no permita adquirir la tecnología.</p> <p>No tener la información necesaria para realizar el mantenimiento adecuado.</p> <p>Si el equipo llega a fallar y la pieza dañada o el medio no se consiguen a tiempo, se tendría un período en el que la tecnología no trabajaría.</p> <p>Que el medio no se adapte a las condiciones del tanque levantado en la zona de interés.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 25. FODA Filtro Salsnes.

<b>Filtro Salsnes</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	Primario
<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>
<p>Requiere 1/10 del espacio necesario para un clarificador primario.</p> <p>Escalable según requisitos.</p> <p>Trabaja con volúmenes hidráulicos variables.</p> <p>Los sistemas SFK se combinan con facilidad con las tecnologías existentes.</p> <p>Ocupa menos espacio que un clarificador primario.</p> <p>Capaz de eliminar grasas y aceite.</p>	<p>Es necesario realizar servicio a la máquina 1 hora por semana.</p> <p>Tecnología patentada.</p> <p>Requiere equipo mecánico.</p> <p>Requiere el uso de polímeros para una remoción de TSS alta.</p> <p>Requiere protección adicional si se instala en el exterior.</p> <p>Sensible al pH y temperatura del afluente.</p>
<b>Oportunidades</b>	<b>Amenazas</b>
<p>Puede ser utilizado para la industria textil.</p> <p>Se puede utilizar para el tratamiento de agua residual con agua de alcantarillas o pluvial.</p> <p>Ideal para áreas en las que la tierra es cara o no se encuentra disponible.</p> <p>Se combina con facilidad con las tecnologías existentes.</p> <p>El biogás producido podría ser aprovechado.</p>	<p>No contar con el presupuesto necesario para la instalación de la tecnología, para realizar el mantenimiento o adquirir los polímeros.</p> <p>No tener acceso a energía eléctrica.</p> <p>Que el afluente no cumpla con los rangos de pH y temperatura necesarios.</p> <p>Si el equipo se daña y no se tiene el repuesto o presupuesto para cambiarlo, dejaría de trabajar.</p>

(Elaboración propia)

## 2. Tratamiento secundario

Cuadro 26. FODA Biotecnología de suelo o filtro construido de tierra.

<b>Biotecnología de suelo o filtro construido de tierra (SBT)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario
<p><b>Fortalezas</b></p> <p>Los costos de operación son bajos porque no requiere aireación mecánica y tiene poca mecanización.</p> <p>No genera aerosoles o sonido.</p> <p>Se construye con concreto armado, mampostería y/o terraplenes de suelo.</p> <p>Capaz de eliminar coliformes fecales y totales.</p> <p>No tiene problemas por inundaciones o en época lluviosa.</p>	<p><b>Debilidades</b></p> <p>Requiere gran extensión de tierra.</p> <p>La actividad biótica depende de la temperatura.</p> <p>Requiere el uso de aditivos para regular el pH.</p> <p>Su rendimiento varía por las estaciones.</p>
<p><b>Oportunidades</b></p> <p>Puede ser utilizado cuando no se cuenta con un sistema de drenaje.</p> <p>Produce biofertilizante como subproducto que puede ser provechado.</p> <p>El agua tratada puede ser utilizada para recargar el agua subterránea.</p> <p>Reúso de agua residual doméstica.</p> <p>Puede trabajar con agua salada (hasta 4000 ppm).</p>	<p><b>Amenazas</b></p> <p>No contar con el espacio necesario para aplicar la tecnología.</p> <p>No tener la temperatura adecuada.</p> <p>No contar con presupuesto para comprar el terreno requerido o los aditivos necesarios.</p> <p>No tener acceso a energía eléctrica para el bombeo de agua residual.</p> <p>Que los micro y macro organismos necesarios para el tratamiento no se adapten a las condiciones.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 27. FODA Membrana de rotación de vacío.

<b>Membrana de rotación de vacío (VRM)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Secundario</b>
<p><b>Fortalezas</b></p> <p>Requiere poco pretratamiento.</p> <p>Reduce costos al utilizar poca energía.</p> <p>Operación simple.</p>	<p><b>Debilidades</b></p> <p>Requiere de un espacio amplio para su instalación.</p> <p>Tecnología patentada.</p> <p>Requiere limpieza química.</p>
<p><b>Oportunidades</b></p> <p>Puede ser utilizado para la industria textil.</p> <p>El sistema combinado MBR-VRM puede generar efluente para reúso.</p> <p>Puede trabajar en plantas de tratamiento pequeñas.</p>	<p><b>Amenazas</b></p> <p>No contar con acceso a energía eléctrica en el sitio en el que se desea instalar.</p> <p>No tener el presupuesto necesario para importar la tecnología e implementarla.</p> <p>No tener el espacio necesario para su instalación.</p> <p>Que alguna de las membranas o el equipo encargado de la rotación deje de funcionar.</p> <p>No contar con los repuestos o conocimiento necesario en el país.</p> <p>Puede generarse espuma y la pérdida de biomasa.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 28. FODA Proceso biológico activado de múltiples etapas.

<b>Proceso biológico activado de múltiples etapas (MSABP)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario
<p style="text-align: center;"><b>Fortalezas</b></p> <p>Es capaz de tratar distintos contaminantes.</p> <p>Generación reducida de lodos y por consiguiente un costo por su disposición menor.</p> <p>Proceso simple y fácil de operar.</p> <p>Reduce cortos circuitos.</p> <p>Puede tratar agua residual de concentración alta sin diluirla.</p> <p>No requiere tratamiento posterior de lodos.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Debilidades</b></p> <p>Su capacidad varía con facilidad cuando la población bacteriana fluctúa.</p> <p>Tecnología patentada.</p> <p>Requiere de 8-12 etapas.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Oportunidades</b></p> <p>Puede ser utilizada para el tratamiento de agua de alcantarillas.</p> <p>Se puede adaptar a tanques de plantas existentes.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Amenazas</b></p> <p>No contar con el espacio necesario o el presupuesto requerido para su aplicación.</p> <p>Si alguno de los difusores de aire deja de funcionar el agua residual ya no cambiaría de compartimiento.</p> <p>Mal funcionamiento de la cadena alimenticia generada en cada compartimiento o de una de las etapas.</p> <p>En el tanque que se quiere adaptar a MSABP no caben todas las etapas necesarias.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 29. FODA Reactor de biopelícula de membrana.

<b>Reactor de biopelícula de membrana (MBfR)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Secundario</b>
<p><b>Fortalezas</b></p> <p>El reactor MABR es compacto.</p> <p>Los sustratos gaseosos se generan en el sitio.</p> <p>Elimina un amplio rango de contaminantes como N (84%) y P (&gt; 65 %)</p>	<p><b>Debilidades</b></p> <p>El manejo de la biopelícula puede ser complicado.</p> <p>Diseñar los reactores con configuraciones escalables es un desafío.</p> <p>Puede haber taponamiento en la membrana.</p> <p>Requiere el reemplazo de la membrana en instalaciones existentes.</p>
<p><b>Oportunidades</b></p> <p>Puede ser utilizado para el tratamiento de agua subterránea.</p> <p>Pueden ser utilizados para llevar a cabo el proceso Anammox.</p>	<p><b>Amenazas</b></p> <p>No contar con el presupuesto necesario o acceso a energía eléctrica para implementar la tecnología.</p> <p>Que el gas no sea suministrado de la manera adecuada.</p> <p>Tener la necesidad de invertir en el gas, aumentando su costo de operación.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 30. FODA Reactor anaerobio de lecho granular expandido.

<b>Reactor anaerobio de lecho granular expandido (EGSB)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Secundario</b>
<p><b>Fortalezas</b></p> <p>Es un biorreactor alto y delgado, por lo que ocupa poco espacio a lo ancho.</p> <p>Diseño simple</p> <p>Puede tratar grandes volúmenes de agua residual en poco tiempo.</p> <p>Requiere pocos nutrientes y químicos.</p>	<p><b>Debilidades</b></p> <p>Requiere de un espacio amplio a lo alto.</p> <p>Sensible al índice de biodegradabilidad y a la razón entre las grasas y aceites.</p> <p>El rendimiento se afecta por: pH, el tamaño de partículas y temperatura.</p> <p>Requiere considerar la disposición de lodos.</p>
<p><b>Oportunidades</b></p> <p>Puede ser utilizado para el tratamiento de agua residual con compuestos tóxicos.</p> <p>Tiene potencial para la generación de energía renovable.</p> <p>Puede ser utilizado para efluentes de la industria textil y con grasa.</p>	<p><b>Amenazas</b></p> <p>El afluente puede no alcanzar los valores óptimos para un buen rendimiento del reactor.</p> <p>No contar con presupuesto para invertir en retirar los lodos o adquirir una bomba de alimentación.</p> <p>No tener energía eléctrica en el área en la que se implementaría la tecnología.</p> <p>Los lodos granulares pueden no aclimatarse a las condiciones del reactor.</p> <p>La bomba de alimentación podría no trabajar de manera adecuada.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 31. FODA Reactor de esponja colgante de flujo descendente.

<b>Reactor de esponja colgante de flujo descendente (DHS)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	Secundario
<p><b>Fortalezas</b></p> <p>No requiere aireación externa, por lo que ahorra energía.</p> <p>Descompone cargas orgánicas bajas.</p> <p>Fácil de construir y expandir.</p> <p>La esponja es durable.</p> <p>Produce pocos lodos en exceso.</p> <p>Bajo costo de operación y mantenimiento.</p> <p>Puede resistir cagas de choque.</p>	<p><b>Debilidades</b></p> <p>No tiene muchas aplicaciones a gran escala.</p> <p>Requiere de un espacio amplio.</p> <p>El agua residual se satura de oxígeno conforme pasa por las esponjas.</p> <p>La eliminación de DQO es sensible al aumento de la tasa de carga orgánica e hidráulica.</p>
<p><b>Oportunidades</b></p> <p>Puede ser utilizado como post tratamiento luego de un reactor UASB.</p>	<p><b>Amenazas</b></p> <p>No contar con la disponibilidad de los materiales necesarios para la implementación del reactor.</p> <p>No tener acceso a energía eléctrica en el área en la que se desea utilizar la tecnología.</p> <p>No contar con el espacio necesario para introducirlo a una planta de tratamiento previamente construida.</p> <p>Que la aireación mecánica no funcione de manera adecuada</p>

(Elaboración propia)

### 3. Tratamiento terciario

Cuadro 32. FODA Arrastre con aire.

<b>Arrastre con aire</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Terciario</b>
<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>
<p>No es afectado por compuestos tóxicos.</p> <p>Comparado con la ósmosis inversa, la complejidad de la unidad de tratamiento es baja y su estabilidad es alta.</p> <p>Poca probabilidad de tener contacto con el agua contaminada.</p> <p>Operación sencilla</p> <p>Tolera fluctuaciones en el agua residual siempre que el pH y temperatura sean estables.</p>	<p>Problemas de operación y mantenimiento por la adición de cal viva.</p> <p>Mal funcionamiento sin valores adecuados de pH, temperatura del aire, razón aire/agua y concentración de amoníaco, amonio e hidrógeno.</p> <p>Operación y mantenimiento rutinario.</p> <p>Requiere re-bompear el agua.</p> <p>Puede provocar contaminación atmosférica por la reacción del amoníaco y dióxido de azufre.</p> <p>La torre de extracción requiere un relleno profundo.</p> <p>Es ruidoso</p>
<b>Oportunidades</b>	<b>Amenazas</b>
<p>Puede ser utilizado para el tratamiento de agua subterránea.</p>	<p>Que el afluente no alcance los valores óptimos necesarios.</p> <p>Que las bombas no funcionen de manera adecuada.</p> <p>Mal funcionamiento del recolector de gas y compuestos extraídos.</p> <p>Presencia de surfactantes en el afluente.</p> <p>No contar con el presupuesto necesario para la operación y mantenimiento de la unidad de tratamiento.</p> <p>No tener acceso a energía eléctrica en la zona en la que se desea aplicar.</p> <p>Mala calibración del equipo.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 33. FODA Desinfección con bromo.

<b>Desinfección con bromo (BCDMH)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Terciario</b>
<p style="text-align: center;"><b>Fortalezas</b></p> <p>Biocida contra un amplio espectro de patógenos.</p> <p>Efectivo a concentraciones bajas.</p> <p>Vida útil larga si no se expone a humedad.</p> <p>No requiere equipo sofisticado ni mucho espacio.</p> <p>Para ser efectivo requiere un tiempo de contacto con agua menor comparado al cloro.</p> <p>Vida útil mayor comparada al cloro.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Debilidades</b></p> <p>Altamente reactivo.</p> <p>Genera subproductos que pueden ser dañinos.</p> <p>La legionela es más propensa a ser activada por BCDMH.</p> <p>Requiere actualizar el equipo existente.</p> <p>Si no se tiene un alimentador, se debe llevar un control de la dosis.</p> <p>Se debe controlar la presencia de componentes con los que puede ser incompatible y aditivos químicos.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Oportunidades</b></p> <p>Puede ser utilizado como desinfectante, bactericida, fungicida y alguicida.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Amenazas</b></p> <p>Que el afluente Contaminación del afluente con pinturas, petróleo, grasa, materiales orgánicos combustibles, oxidantes orgánicos e inorgánicos o bases fuertes.</p> <p>Que la tecnología se encuentre en una zona húmeda.</p> <p>Si no se alcanza la temperatura necesaria el compuesto es insoluble.</p> <p>No contar con el presupuesto necesario para actualizar el equipo existente.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 34. FODA Filtro de retrolavado automático.

<b>Filtro de retrolavado automático (ABW) o puente móvil</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Terciario</b>
<p><b>Fortalezas</b></p> <p>Lavado automático del filtro.</p> <p>Su ensamblaje montado es fácil de inspeccionar.</p> <p>El proceso no se interrumpe durante el retrolavado.</p> <p>Requiere excavación reducida.</p> <p>Tiene regeneración del lecho.</p>	<p><b>Debilidades</b></p> <p>Su aplicación requiere de un espacio amplio.</p> <p>Es una tecnología patentada.</p> <p>Toda la tecnología depende de equipos mecánicos.</p>
<p><b>Oportunidades</b></p> <p>Puede ser colocado en plantas preexistentes sin la necesidad de bombeo.</p> <p>Puede ser utilizado para el tratamiento de agua potable y reúso.</p> <p>Puede remover algas.</p>	<p><b>Amenazas</b></p> <p>No contar con el espacio necesario para realizar la instalación de la tecnología.</p> <p>No tener acceso a energía eléctrica o un sistema de tuberías apropiado.</p> <p>Mal funcionamiento del panel de control.</p> <p>No tener el presupuesto necesario para adquirir la tecnología o realizar su mantenimiento.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 35. FODA Lodo granular aerobio.

<b>Lodo granular aerobio (AGS)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Terciario</b>
<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>
<p>Tolera toxicidad.</p> <p>Requiere menos equipo mecánico comparado a sistemas convencionales de lodos activados.</p> <p>Instalaciones compactas y fáciles de operar.</p> <p>Requiere poco mantenimiento.</p>	<p>Es necesario tener una configuración SBR para la formación de los lodos granulares aerobios.</p> <p>Depende de que exista una difusión adecuada del sustrato.</p> <p>La inversión que se debe realizar es significativa.</p>
<b>Oportunidades</b>	<b>Amenazas</b>
<p>Puede adaptarse a plantas existentes.</p> <p>El efluente producido puede ser reutilizado.</p>	<p>No contar con el presupuesto para implementar la tecnología.</p> <p>No contar con los medios para aplicar una configuración SBR para obtener los lodos.</p> <p>No tener acceso a energía eléctrica.</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 36. FODA Oxidación anaeróbica de amonio.

<b>Oxidación anaeróbica de amonio (ANAMMOX)</b>	
<b>Nivel de tratamiento</b>	<b>Terciario</b>
<p style="text-align: center;"><b>Fortalezas</b></p> <p>Utiliza poca energía para la aireación.</p> <p>No requiere de fuentes de carbón adicionales.</p> <p>Reduce la producción en exceso de lodos.</p> <p>Tiene eficiencias de remoción &gt; 80% para el nitrógeno total.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Debilidades</b></p> <p>Se debe controlar la concentración de nitrito y amoníaco para que no inhiba el proceso.</p> <p>Es sensible a cambios de temperatura y pH.</p> <p>Concentraciones bajas de oxígeno inhiben la actividad.</p> <p>Tiene un tiempo de arranque largo.</p> <p>Requiere operación y mantenimiento calificado.</p> <p>El diseño, operación y mantenimiento del proceso a gran escala es complejo.</p> <p>Requiere monitoreo de condiciones frecuente.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Oportunidades</b></p> <p>No requiere trabajar en un reactor específico, puede adaptarse.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Amenazas</b></p> <p>No tener el presupuesto para contratar a una persona calificada para el manejo de la tecnología.</p> <p>No tener la capacidad de asegurar que todos los parámetros de los que depende se cumplan en los rangos necesarios.</p> <p>No tener acceso a energía eléctrica.</p>

(Elaboración propia)

## VIII. RESULTADOS

Es necesario realizar una mejora masiva en los sistemas de tratamiento de agua residual del país para hacer frente a la crisis creciente de saneamiento. A nivel mundial la inversión en la sostenibilidad de plantas de tratamiento es preocupante, ya que aplicar tecnologías sin considerar sus aspectos de sostenibilidad principales puede provocar que fallen durante la fase de operación. Debido a esto es importante asegurarse que las inversiones tendrán un impacto a largo plazo analizando sus características durante la fase de planeación, construcción y operación. (Markus, Brunner, Das, & Singh, 2022)

La Tabla no. 9 recopila las 53 tecnologías y procesos para el tratamiento de agua residual identificados durante la fase de investigación, así como su clasificación correspondiente. De estas, 19 fueron descartadas debido a que ya eran utilizadas en el país y 15 por ser procesos adaptativos. Estos incluían procesos como: Bardenpho, BABE, BAR, BCFS, MUCT, entre otros. De las tecnologías restantes 2 fueron descartadas porque eran tecnologías de investigación y 4 no eran utilizadas para el tratamiento de agua residual ordinaria.

En la Tabla no. 10 se presentan las 13 tecnologías seleccionadas según su nivel de tratamiento. Se evidencia que la innovación podría estar centrada en tratamientos secundarios o terciarios. Aquellos en los que se busca eliminar elementos solubles y particulados, así como nutrientes, patógenos y metales. Con base en las fichas técnicas de las tecnologías seleccionadas (tablas 11 a 23) se denota que el área requerida por las que realizan el tratamiento secundario es mayor comparada al área del tratamiento primario y terciario.

Debido a que las tecnologías son innovadoras, la mayoría contaba con pocas aplicaciones a gran escala. Dificultando la cantidad y calidad de información recopilada y resultando en una descripción más cualitativa que cuantitativa. Mediante un FODA para cada tecnología fue posible dilucidar aquellas tecnologías que implicaban más desafíos y debilidades que ventajas al momento de analizar su aplicación en el país.

Como se evidencia en las tablas 24 a 36, la mayoría de las amenazas de las tecnologías se relacionaban con no contar con acceso a energía eléctrica, el presupuesto necesario o el espacio adecuado para su instalación. En países en vías de desarrollo como el nuestro, la generación de nuevas plantas de tratamiento y la implementación de tecnologías innovadoras se ve limitada por factores económicos, la ausencia de terrenos disponibles, un conocimiento deficiente del tratamiento, una gestión inadecuada del recurso hídrico, infraestructuras de tratamiento en mal estado y con poco mantenimiento, un marco legal deficiente, entre otros. Adicionalmente, la mayoría de las plantas de tratamiento del gobierno fallan en mantener la calidad del agua o se cierran por tener requisitos energéticos altos, mano de obra calificada, áreas grandes para su instalación, procesos adicionales para el manejo de lodos, y contar con alrededores poco higiénicos y mal olor. (Gupta, Aggarwal, Vishal, & Sahu, 2015) Todos estos factores se deben considerar al momento de realizar la selección final de la tecnología y evaluar la viabilidad de su aplicación.

Seleccionar la zona en la que se realizará la planta de tratamiento es una parte fundamental para el desarrollo del proyecto. La disponibilidad de la tierra es limitada conforme más cerca

se encuentre de la ciudad debido a un aumento en el costo del terreno y una posible oposición por parte de las personas en cercanías del proyecto. (Libhaber & Orozco-Jaramillo, 2019) Cada unidad de tratamiento ocupa un área distinta según sus características y especificaciones de diseño. Siempre que sea posible se recomienda seleccionar tecnologías con áreas menores en aquellas zonas en las que el terreno es limitado. Utilizando como base las fichas técnicas y FODA de cada tecnología se realiza un análisis y breve comparación de las tecnologías, según su nivel de tratamiento, como se muestra a continuación.

## **A. Tratamiento primario**

### **1. Comparación entre las tecnologías seleccionadas para el tratamiento primario**

El área que ocupa la filtración por medios compresibles (CMF) cuando es utilizada para realizar el tratamiento primario del afluente, sin tomar en cuenta los canales laterales de afluente y efluente y las cámaras de operación y retrolavado, es menor al área requerida por el Filtro Salsnes. Sin embargo, este opera en un rango de caudales que abarca el aceptado por CMF. Es decir, tiene la capacidad de trabajar con caudales máximos mayores.

Ambas tecnologías trabajan adecuadamente en clima seco y lluvioso y pueden ensamblarse antes de ser instalados en la planta de tratamiento, pero solo la tecnología CMF puede ser levantada en el lugar. Si bien el filtro Salsnes se combina fácilmente con las tecnologías existentes, este requiere servicio 1 hora a la semana, lo que podría incrementar sus costos de operación y mantenimiento. Una de las ventajas de la filtración por medios compresibles sobre el filtro Salsnes es que produce un efluente con una concentración de fósforo reducido y agua para reúso.

### **2. Breve comparación de las tecnologías seleccionadas con tecnologías utilizada en el país para el tratamiento primario**

La filtración por medios compresibles podría reemplazar los sistemas de floculación convencionales, como los sedimentadores primarios, y filtros de arena. A diferencia de los sistemas de floculación, la filtración por medios compresibles, en la mayoría de los casos, no requiere el uso de químicos adicionales y alcanza su productividad de manera inmediata.

La literatura utilizada indica que los filtros CMF tienen tamaños mayores comparados a los requeridos por los sedimentadores primarios, pero requieren únicamente la mitad de su profundidad. Esto podría reducir el costo de construcción, ya que la excavación que se debe realizar es menor. Comparado con los filtros de arena, y acorde a la literatura, el proceso mediante el cual funciona el filtro CMF permite reducir significativamente su tamaño.

El filtro Salsnes podría reemplazar sedimentadores y clarificadores convencionales, ya que utiliza menos espacio del requerido por estos y su costo de inversión es menor al necesario para los clarificadores primarios. Adicionalmente, es capaz de espesar y deshidratar los lodos más que el tratamiento primario convencional. Los sólidos que remueve son más secos comparados a los sólidos de un clarificador primario.

En cuando a la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno, la laguna anaerobia primaria tiene las eficiencias mayores. Seguido de la filtración por medios compresibles y el Tanque Imhoff. Los sedimentadores primarios y el filtro Salsnes tienen eficiencias de remoción similares.

## **B. Tratamiento secundario**

### **1. Comparación entre las tecnologías seleccionadas para el tratamiento secundario**

Las tecnologías seleccionadas para el tratamiento secundario que ocupan un área mayor, ordenadas de forma descendente, corresponden a: la membrana de rotación de vacío, biotecnología de suelo, reactor de esponja colgante de flujo descendente y reactor anaerobio de lecho granular expandido. Se podría considerar que el proceso biológico activado de múltiples etapas requiere un espacio amplio de tierra para su aplicación, ya que consiste en 8-12 etapas y diversos compartimientos. Sin embargo, esta tecnología tiene la capacidad de ser instalada en tanques existentes y adaptar el número de etapas y la configuración dentro del tanque con el uso de paredes deflectoras.

La literatura utilizada para la investigación del reactor de biopelícula de membrana no cuenta con especificaciones acerca del área aproximada que ocupa. Al igual que para el proceso biológico activado de múltiples etapas, se buscaron casos de estudio que aplicarían las tecnologías para obtener datos de su tamaño, pero no fue posible encontrar dicha información.

La membrana de rotación de vacío y el proceso biológico activado de múltiples etapas tienen una eficiencia de remoción de DQO mayor respecto a las demás. Lo mismo ocurre al comparar su capacidad de eliminar  $\text{NH}_3$  del afluente. En este caso la biotecnología de suelo ocupa el tercer lugar.

La biotecnología de suelo y el proceso biológico activado de múltiples etapas tienen las eficiencias de remoción de DBO mayores y ocupan el tercer y primer lugar, respectivamente, según su eficiencia de remoción de TSS del afluente. Únicamente el reactor de biopelícula de membrana y el reactor de esponja colgante de flujo descendente eliminan nitrógeno total. Mientras que solo la biotecnología de suelo y el reactor de biopelícula de membrana eliminan fósforo. Adicionalmente, la biotecnología de suelo es capaz de remover arsénico, hierro, TDS y coliformes totales y fecales; el reactor de biopelícula de membrana de remover xenobióticos; y el reactor anaerobio de lecho granular expandido de eliminar grasas y color.

El rendimiento de la biotecnología de suelo, proceso biológico activado de múltiples etapas y reactor anaerobio de lecho granular expandido se ve influenciado por factores como las características del agua residual y parámetros operacionales. De las tecnologías descritas anteriormente únicamente la biotecnología de suelo es considerada como “favorable al medio ambiente” debido a que únicamente utiliza una bomba para la distribución del agua residual, no es ruidoso y no produce olores. Otras ventajas son que su construcción se hace con concreto armado, mampostería y/o terraplenes, evitando incurrir en costos por importar

una tecnología patentada; tiene la capacidad de trabajar con agua salada; puede ser utilizada cuando no se cuente con un sistema de drenaje; produce agua para reúso y no tiene problemas por inundaciones o en época lluviosa.

## **2. Breve comparación de las tecnologías seleccionadas con tecnologías utilizadas en el país para el tratamiento secundario**

La biotecnología de suelo podría reemplazar el uso del filtro percolador. Esta tecnología es capaz de sintetizar productos utilizables como fertilizantes bio-minerales, mientras que el subproducto de los biofiltros son lodos. Es común que al utilizar biofiltros se genere mal olor debido al amoníaco y los aerosoles producidos a partir de la aireación. La biotecnología de suelo no genera aerosoles y si llegan a generarlo, este se puede controlar con aditivos. La literatura indica que la biotecnología de suelo, comparada con tecnologías como lodos activados, SBR, biorreactor de membrana y humedales artificiales, tiene un costo menor. Esta tecnología tiene una eficiencia de remoción de DQO y amoníaco mayor a las tecnologías presentadas en la Tabla no. 7.

La membrana de rotación de vacío se diferencia principalmente de los biorreactores de membrana (MBR) por su configuración. Esta facilita su limpieza y permite la introducción de fuerzas que controlan el ensuciamiento; podría ser utilizada para reemplazar el uso de MBR. Su eficiencia de remoción para DQO y amoníaco es mayor a la obtenida por las tecnologías presentadas en la Tabla no. 7.

El proceso biológico activado de múltiples etapas podría ser utilizado para reemplazar la tecnología de lodos activados convencional. Debido a que esta tecnología tiene la capacidad de adaptarse a tanques preexistentes, el espacio que ocuparía respecto al espacio necesario para los lodos activados podría ser similar o incluso el mismo. La tecnología MSABP tiene eficiencias de remoción para DQO, SS y amoníaco mayores a las presentadas en la Tabla no. 7.

Al igual que la membrana de rotación de vacío, el reactor de biopelícula de membrana (MBfR) podría ser utilizado para reemplazar a los biorreactores de membrana (MBR). La diferencia principal entre ambos es que el reactor de biopelícula de membrana es utilizado como suministro de gas y soporte de biopelícula y no funciona como un mecanismo filtrante. Comparado con un proceso de lodos activados, los costos por el uso de energía son menores a los incurridos en un proceso de lodos activados convencional. Al comparar su eficiencia de remoción de DQO con las tecnologías presentadas en la Tabla no. 7 se evidencia que estas son similares.

El reactor anaerobio de lecho granular expandido (EGSB) se diseñó con el propósito de cubrir las deficiencias presentadas por el reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA). La tecnología EGSB tiene la capacidad de tratar diversos tipos de agua residual que no puede ser posible al utilizar un RAFA y cuenta con eficiencias de remoción de DQO similares y no supera las presentadas en la Tabla no. 7.

Una de las ventajas que tiene sobre la tecnología RAFA es que tiene la capacidad de eliminar grasas y color. Además, la eficiencia de remoción del reactor RAFA se ve influenciada por concentraciones bajas de DQO/L. El EGSB tiene la capacidad de funcionar con concentraciones menores a las toleradas por RAFA y sin sufrir efectos adversos.

El reactor de esponja colgante de flujo descendente (DHS) podría sustituir tecnologías como el filtro percolador y lodos activados. En un filtro percolador los microorganismos se encuentran adheridos únicamente a la capa o biopelícula formada sobre el medio. En la tecnología DHS los microorganismos se mantienen tanto dentro como fuera de la esponja, resultando en periodos de residencia de lodos altos. Esto permite que alcance la nitrificación completa y produzca una menor cantidad de lodos.

El filtro percolador y DHS tienen eficiencias de remoción de DBO similares, pero la eficiencia de remoción de DQO para DHS es menor. Comparado con el proceso convencional de lodos activados, la tecnología DHS tiene un requisito energético menor. Es importante mencionar que la tecnología DHS se puede combinar con el reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) resultando en una producción menor de lodos comparado a un sistema convencional de lodos activados.

### **C. Tratamiento terciario y desinfección**

#### **1. Comparación entre las tecnologías seleccionadas para el tratamiento terciario y desinfección**

Tecnologías como ANAMMOX, lodos granulares aerobios y desinfección con bromo no cuentan con especificaciones relacionadas al tamaño que ocuparían dentro de la planta de tratamiento. En base a las especificaciones de tamaño de la tecnología de arrastre con aire, en sus tres variantes, y el filtro de retrolavado automático (ABW) se realizó una comparación del área requerida por cada una. Se evidenció que el área utilizada por la tecnología de arrastre con aire, en su configuración de bandeja apilada y deslizante, ocupa menos espacio que el filtro ABW.

No fue posible encontrar eficiencias de remoción para la desinfección por bromo y el filtro ABW. Tanto el arrastre con aire como ANAMMOX tienen la capacidad de remover amoníaco del afluente; el rendimiento de ambos varía con la temperatura. Adicionalmente, ANAMMOX elimina nitrógeno, el arrastre con aire TMH y VOC y la tecnología AGS nitrógeno y DQO. La literatura empleada indica que ABW tiene la capacidad de remover algas del afluente; su eficiencia no se indica. Únicamente BCDMH elimina coliformes totales. Su rendimiento, al igual que el del arrastre con aire y ANAMMOX, se ve influenciado por cambios en el pH.

ABW, AGS y ANAMMOX pueden trabajar con distintos tipos de agua residual. Sólo el arrastre con aire trata agua subterránea y ABW agua potable y para reúso. De estas, únicamente ABW, AGS y BCDMH indican poder adaptarse a las plantas existentes.

BCDMH es utilizado para un amplio espectro de patógenos (la literatura no indica cuáles) aun en presencia de amoníaco y en agua ácida o básica. Sin embargo, la desinfección con bromo genera subproductos que pueden ser dañinos para la salud humana, es un compuesto altamente reactivo y puede llegar a activar la legionela.

## **2. Breve comparación de las tecnologías seleccionadas para el tratamiento terciario con una tecnología utilizada en el país**

Comparada con la ósmosis inversa, carbón granular activado, procesos avanzados de oxidación y ultrafiltración, la extracción por arrastre con aire tiene un costo de operación y de inversión medio. Esta tecnología únicamente elimina contaminantes específicos y requiere de un tratamiento posterior para eliminar nitrógeno disuelto, por lo que no se recomienda para sustituir alguna de las tecnologías presentadas en la Tabla no.7 a pesar de contar con eficiencias de remoción d amoníaco mayores. La extracción por arrastre con aire, cuando es utilizada para eliminar VOC del agua, podría sustituir el proceso de ósmosis inversa. Esto debido a que su sistema tiene una complejidad menor y estabilidad mayor.

Por sus características, el filtro de retrolavado automático podría ser utilizado para reemplazar los filtros de arena convencionales, ya que genera una tasa de agua de retrolavado menor y constante cuando se encuentra en operación. Adicionalmente, no es necesario detener el proceso para realizar el mantenimiento del sistema y no requiere que un operador lo vigile constantemente. Sin embargo, invertir en una tecnología automatizada como esta para realizar trabajos de tratamiento primario podría no ser rentable. La literatura utilizada no brinda suficiente información para comparar su eficiencia de remoción con las tecnologías presentadas en la Tabla no. 7.

Investigaciones recientes han demostrado que los lodos granulares aerobios podrían ser utilizados para sustituir el proceso de lodos activados. Los lodos granulares aerobios pueden operar a concentraciones de biomasa más altas y no requieren de un clarificador separado. Adicionalmente, la literatura indica que ocupan menos espacio que el necesario para una instalación de lodos activados convencional y para un reactor SBR.

Comparado al sistema de lodos activados, el uso de lodos granulares tiene un consumo energético inferior. La tecnología Nereda, nombre dado a la primera aplicación de la tecnología de lodo granular aerobio en Países Bajos, ha demostrado que no requiere bombas para el reciclado de lodos, mezcladores en tanques anaeróbicos o tanques selectores o propulsión en reactores de lodos activados. Resultando en un mayor ahorro energético.

El control de olor es similar al necesario en procesos convencionales de lodos activados. De ser necesario, se podría equipar la planta de tratamiento con medidas para controlar el olor como la cobertura adecuada y tratamiento del aire emitido. Esto suele no ser necesario debido a que las emisiones producidas por el tratamiento biológico son pocas.

Las fuentes bibliográficas utilizadas indican que el uso de la tecnología Nereda resulta en costos de construcción menores. Además, su costo de operación es menor debido a que consume menor energía, requiere menos equipo y mantenimiento, no requiere de químicos

para la remoción de fósforo y se tiene un superávit de producción de lodos que puede ser vendido. La tecnología Nereda podría ser utilizada para sustituir los reactores MBR debido a que ocupan menos espacio, tiene la capacidad de eliminar bacteria y virus del efluente sin la necesidad de aplicar membranas de micro o ultrafiltración y el efluente que produce puede ser reutilizado para riego.

Anammox podría reemplazar los procesos de nitrificación/desnitrificación convencional en sistemas de lodos activados. Esta tecnología elimina la necesidad de una fuente de carbón orgánico externa para la nitrificación, reduce la demanda energética para aireación y tiene una producción menor de lodos y de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esto se traduce en una reducción de costo de operación. Sin embargo, debido a la sensibilidad del sistema es necesario que este sea monitoreado con frecuencia.

### **3. Breve comparación de la tecnología seleccionada de desinfección con una tecnología utilizada en el país**

La desinfección con bromo puede emplearse en vez del cloro. Este compuesto tiene la capacidad de reducir la cantidad de bacteria presente en el agua residual en menor tiempo que el hipoclorito de sodio. A diferencia del cloro, BCDMH a un pH de 8.5 resulta ser un biocida más fuerte en contra de las bacterias, indicadas en su ficha técnica. La literatura establece que es más eficiente que el cloro sobre un rango de pH mayor.

La tecnología BCDMH requiere comprar con menor frecuencia el producto químico, ya que tiene un tiempo de contacto menor con el agua para ser eficaz. Esto podría representar un ahorro en su uso. Sin embargo, la necesidad de equipo complementario y la actualización del existente lo hace más costoso que el cloro. El manejo y almacenamiento de BCDMH es más seguro que el gas cloro o líquido y tiene una vida útil mayor a este. La literatura utilizada no muestra su eficiencia al remover patógenos del agua residual, por lo que no puede compararse con las tecnologías presentadas en la Tabla no. 8.

#### **D. Capacidad de aplicación**

Antes de seleccionar una tecnología es recomendable analizar detalladamente características como las concentraciones y caudal del agua residual por tratar, el ambiente que rodea a la tecnología, el tipo de terreno y zona en la que se realizará el proyecto y los costos de inversión reales, así como costos de mantenimiento y operación. La exactitud de la estimación de costos varía de forma dependiente al nivel de detalle proporcionado. Si esta estimación se basa en curvas de costo de instalaciones similares o tecnologías con poca consideración de las condiciones locales, podría tener un nivel de exactitud de apenas 50%. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)

Se consideró como debilidad la necesidad de añadir polímeros, aditivos o cloro a las tecnologías para que estas tuvieran un funcionamiento adecuado, ya que implicaría costos

adicionales en su uso. De igual forma, se identificó como desventaja la necesidad de un mantenimiento seguido y el uso de tecnologías patentadas debido a que ambas situaciones incrementarían el costo de implementar la tecnología en el país. Las tecnologías patentadas implican realizar una inversión inicial significativa para traerlas y condicionan el mantenimiento a ser realizado únicamente por los fabricantes de la tecnología a menos que se cuente con la información necesaria, conocimiento y experiencia adecuada por parte de los operadores en el país.

Se prefieren aquellas tecnologías que ocupen la menor cantidad de espacio, requieran poco mantenimiento, tengan una vida útil larga y utilicen la menor cantidad de equipo mecánico o en su defecto aprovechen la energía de manera eficiente. Resultan favorables las tecnologías con eficiencias de remoción de fósforo y nitrógeno altas debido a que son estos los nutrientes implicados en el proceso de eutrofización. El cual ha llegado a afectar cuerpos de agua del país como el lago de Amatitlán.

Se recomienda trabajar con tecnologías que puedan ser levantadas en la zona de interés y utilicen materiales que ya se encuentren en el país, ya que reduce los costos de instalación y facilita su construcción. Es importante que la tecnología seleccionada tenga la capacidad de trabajar en clima seco y lluvioso y tolere las fluctuaciones en el caudal y su concentración secundario a infiltraciones por agua de lluvia o conexiones de drenaje ilícitas. Esto, debido a que no se puede asegurar que en el país la estructura de los drenajes y alcantarillado público reciba el tratamiento adecuado para prevenir un mal funcionamiento o que existe el control necesario para evitar dichas conexiones. Finalmente, considerando el estado actual de los cuerpos de agua del país, el porcentaje de estos que se encuentra contaminado y la escasez del recurso hídrico, es necesario prestar atención a las tecnologías con la capacidad de ofrecer un efluente final apto para reúso y recarga hídrica.

Se observaron más debilidades para las tecnologías del tratamiento terciario, específicamente para tecnologías como arrastre con aire, desinfección con bromo y Anammox. Esto debido al cuidado que conlleva su uso y a la posible contaminación atmosférica que genera, como lo es para BCDMH.

En base a las fichas técnicas, FODA y posterior comparación de las tecnologías y considerando los problemas principales, descritos con anterioridad, para desarrollar plantas de tratamiento en países en vías de desarrollo como el nuestro se recomienda, según criterio propio, una o más tecnologías para cada nivel de tratamiento.

Para el tratamiento primario se selecciona la tecnología CMF. Esto debido a que ocupa menos espacio y tiene eficiencias de remoción mayores, tanto para BOD y TSS. Adicionalmente, los filtros pueden ser fabricados de concreto, por lo que únicamente sería necesario importar el medio filtrante o invertir por su desarrollo en el país. Por otro lado, para aplicar el filtro Salsnes tendría que importarse la estructura completa aumentando los costos de inversión. Además, esta tecnología requiere de mantenimiento frecuente complicando su capacidad de aplicación, ya que el país no cuenta con experiencia en dicha tecnología, su operación y mantenimiento. Para realizarlo se necesitaría a una persona capacitada y que conozca el funcionamiento de la maquinaria.

La tecnología EGSB es la que ocupa el área menor para el tratamiento secundario. Sin embargo, el proceso biológico activado de múltiples etapas tiene la capacidad de adaptarse a los tanques existentes en la planta de tratamiento. Además, tiene la mayor eficiencia de remoción de TSS y a pesar de no ser la tecnología más eficiente eliminando DQO, NH<sub>3</sub> y DBO, ocupa el segundo lugar. También es importante considerar la tecnología SBT como solución al tratamiento en áreas en las que no se cuenta con un sistema de alcantarillado adecuado. Su desventaja principal es la amplitud del espacio requerido para su instalación, pero tiene la capacidad de eliminar arsénico y coliformes fecales, puede construirse con mampostería y generar agua para reúso. Adicionalmente, SBT permite realizar la síntesis de productos utilizables como fertilizador bio-mineral.

Finalmente, para el tratamiento terciario se recomienda la tecnología de arrastre con aire y BCDMH. El arrastre con aire tiene tres configuraciones distintas y la capacidad de eliminar TMH, VOC y amoníaco del efluente. Por otro lado, BCDMH podría reemplazar el uso de cloro para desinfección debido a la mayor rapidez con la que es capaz de eliminar coliformes fecales.

## **IX. CONCLUSIONES**

Con este trabajo de investigación se demuestra la necesidad de profundizar en el conocimiento de las tecnologías y procesos innovadores para el tratamiento de agua residual. En base a los objetivos planteados para el presente trabajo de graduación se concluye lo siguiente:

- 1) Se identificaron, e integraron en un catálogo, 53 tecnologías y procesos para el tratamiento de agua residual, de las cuales para 34 no se encontró registro en el país.
- 2) A partir de una clasificación preliminar de las tecnologías, fue posible identificar 13 tecnologías innovadoras. Estas se investigaron a mayor profundidad con el fin de establecer su capacidad de ser aplicadas en el país.
- 3) Considerando las características y calidad de la información obtenida se concluyó que el criterio de análisis adecuado para determinar la adaptación de las tecnologías al país consistía en la realización de un FODA para cada una de las 13 tecnologías innovadoras. Estos mostraban de manera resumida la información presentada en las fichas técnicas de las tecnologías seleccionadas. Considerando las limitaciones principales en el funcionamiento sostenible de las plantas de tratamiento de agua residual en países en vías de desarrollo.
- 4) Con base en la literatura utilizada y datos obtenidos se evidenció que las tecnologías para el tratamiento secundario tienen áreas mayores comparadas al tratamiento primario y terciario.
- 5) La selección de una tecnología según su capacidad de aplicación en Guatemala, considerando las condiciones actuales del país, se vio afectada debido a que la información con la que se contaba era limitada. Esto afectó de igual manera el análisis realizando en relación con el riesgo o beneficio de utilizarla y su capacidad de reemplazar las tecnologías empleadas actualmente para el tratamiento de agua residual en el país.
- 6) Las fichas técnicas presentan información suficiente para comprender el funcionamiento de la tecnología y conocer sus componentes principales. Sin embargo, no puede ser utilizada como única fuente de información para la implementación de la tecnología en el país.

## **X. RECOMENDACIONES**

- 1) Se recomienda utilizar el presente trabajo de graduación como una herramienta de apoyo para mejorar y actualizar plantas residuales existentes en nuestro país.
- 2) Se recomienda a las autoridades pertinentes y centros de investigación, como universidades, a que realicen un monitoreo anual de la degradación ambiental con el fin de determinar su estado para el año 2030, año en el que se vencerán los nuevos plazos establecidos para el Acuerdo 236-2006, y así tomar medidas preventivas.
- 3) Se recomienda a los centros educativos ampliar la información proporcionada a los estudiantes relacionada con el estado de los recursos naturales del país y las deficiencias en su gestión con el fin de fomentar la conciencia y motivación de generar un cambio.
- 4) Se invita a la investigación de tecnologías para captación de agua de lluvia, reúso y tratamiento de aguas residuales.
- 5) Se recomienda a las autoridades pertinentes desarrollar manuales de operación y mantenimiento para las tecnologías utilizadas en las plantas de tratamiento con el fin de contar con un mejor manejo y asegurar que cumplan con las medidas necesarias.
- 6) Se recomienda a los estudiantes y casas de estudio profundizar la investigación en torno a los procesos adaptativos identificados en la presente tesis y de analizar su posible implementación en plantas preexistentes del país.
- 7) Se incentiva a los estudiantes a utilizar el presente trabajo de graduación como base para profundizar la investigación y análisis de las tecnologías presentadas para el tratamiento de agua residual.
- 8) Se recomienda para continuación de la investigación presentada, consultar e investigar más acerca de las tecnologías para el tratamiento de agua residual utilizadas en países en vías de desarrollo. Buscando soluciones a la problemática del país y principales complicaciones durante la puesta en marcha del sistema de tratamiento.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, R., Perozo, J., Martínez, C., & Moran, H. (2016). Tratamiento de aguas residuales fenólicas de refinería por métodos electroquímicos. Venezuela. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/904/90453464002.pdf>
- Acuerdo Gubernativo 236-2006. (2006). *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*.
- Acuerdo Gubernativo 285-2022. (2022). *Reforma al Acuerdo Gubernativo 236-2006*.
- Acuerdo Gubernativo Número 19-2021. (2021).
- Acuerdo Ministerial 37-2021. (2021).
- Angenent, L., & Sung, S. (mayo de 2001). *Development of anaerobic migrating blanket reactor (AMBR), a novel anaerobic treatment system*. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11329676/>
- AQUA-AEROBIC SYSTEMS INC. (2023). *AquaABF. Automatic Backwash Filter*. Obtenido de <https://aqua-aerobic.com/filtration/traveling-bridge-sand-filtration/>
- Aquarius Technologies. (2022). *Nebula MultiStage Biofilm System*. Wisconsin.
- Arriaza, V., Stanley Cáceres, M., Dueñas, A., Gil Larroj, J., & Salazar Ortiz, C. (2003). *Guía para el Manejo de Excretas y Aguas Residuales Municipales*.
- Banco Mundial. (1 de marzo de 2021). *Agua: Panorama general*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>
- Banco Mundial. (4 de noviembre de 2021). *Water Supply and Sanitation: Water is at the Heart of Development*. Obtenido de <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/155901614168147480/water-supply-and-sanitation-water-is-at-the-heart-of-development>
- Barat, R., & van Loosdrecht, M. (2006). *Potential phosphorus recovery in a WWTP with the BCFS process: Interactions with the biological process* *Science Direct*. Obtenido de Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135406004672>
- Basterrechea, M., & Guerra Noriega, A. (2019). *Recursos Hídricos*. Guatemala: Editorial Universitaria UVG.
- BioPetroClean. (2020). *Automated Chemostat Treatment*. Obtenido de <https://www.biopetroclean.co.in/act/#:~:text=The%20proprietary%20technology%2C%20Automated%20Chemostat,the%20customer's%20pre%2Dtreated%20water.>

- Bolocchi, R., Behera, C. R., Sherratt, A., DeGroot, C., Gernaey, K., Sin, G., & Santoro, D. (2020). *Dynamic model validation and advanced polymer control for rotating belt filtration as primary treatment of domestic wastewaters*. Obtenido de [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/205500900/1\\_s2.0\\_S000925092030042\\_7\\_main.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/205500900/1_s2.0_S000925092030042_7_main.pdf)
- Caliskaner, O., & Tchobanoglous, G. (2006). *Optimization of Compressible Medium Filter for Secondary Effluent Filtration*. Obtenido de <https://studylib.net/doc/18459864/compressible-media-filter-for-secondary-effluent-filtration>
- Calvache, W., Chavez, M., Duran, C., Guña, E., Imba, A., & Nazate, W. (2002). *Tratamiento de aguas: tratamiento primario y parámetros hidráulicos*. Obtenido de <https://books.google.com.gt/books?id=Y44LHaIpkqWC&pg=PA18&dq=reactor+anaerobio+de+flujo+ascendente&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiHwPvlg8f6AhVvmIQIHbitBoIQ6AF6BAGIEAI#v=onepage&q=reactor%20anaerobio%20de%20flujo%20ascendente&f=false>
- Canaxy water. (2017). *Bromine (BCDMH)*. Obtenido de Canaxy Water : <https://canaxy.com/bcdmh-bromine/>
- Capodaglio, A., Hlavínek, P., & Raboni, M. (2016). *Advances in wastewater nitrogen removal by biological processes: state of the art review* .
- Castillo, F. (2011). Aspectos climáticos de la temperatura del aire. Obtenido de [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/52756/mod\\_resource/content/1/04%20-%20Temperatura%20del%20aire.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/52756/mod_resource/content/1/04%20-%20Temperatura%20del%20aire.pdf)
- Chuptaya Cruz, G. M., & Huamán Apaestegui, N. A. (2020). *Tratamiento de aguas residuales domésticas en un sistema Down-Flow Hanging Sponge (DHS) de tercera generación*. Universidad Peruana Unión, Centro de Investigación y Recursos en Geociencia .
- Cindya Putri, K. F., Farahdiba, A. U., & Ali, M. (2021). *A systematic review: Down-flow Hanging Sponge Application for Wastewater Treatment Technology* . Indonesia.
- CONAGUA. (2016). *Lineamientos técnicos: sistema de tratamiento de aguas residuales a nivel vivienda en zona rural* .
- COPROSERVICIOS, S.A. (s.f.). *Hipoclorito de calcio, hipoclorito de sodio*. Obtenido de COPROSERVICIOS, S.A.: <https://coprosersa.com/hipoclorito-sodio/>
- Corado, H. I. (mayo de 2019). Diseño de un biorreactor de membrana para la regeneración de las aguas residuales en un establecimiento hotelero. Guatemala. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3130\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3130_C.pdf)

- Crini, G., & Lichtfouse, E. (31 de julio de 2018). *Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Cruz-Salomón, A., Ríos-Valdovinos, E., Pola-Albores, F., Lagunas-Rivera, S., Meza-Gordillo, R., Ruiz-Valdiviezo, V., & Cruz-Salomón, K. (2018). *Expanded granular sludge bed bioreactor in wastewater treatment*. Guanajuato.
- de Lemos, C. A. (2007). *Anaerobic Reactors*. Federal University of Minas Gerais, Department of Sanitary and Environmental Engineering. Brasil: IWA Publishing.
- Debik, E., & Coskun, T. (junio de 2009). *Use of the Static Granular Bed Reactor (SGBR) with anaerobic sludge to treat poultry slaughterhouse wastewater and kinetic modeling*. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19208468/>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*.
- Department of Natural Resources and Parks. (junio de 2002). *Water reuse technology demonstration project*. Obtenido de [https://your.kingcounty.gov/dnrp/library/wastewater/resourcerecovery/techassess/equipsting/WaterReuseDemo/Primary\\_BallastFloc\\_Densadeg\\_0602.pdf](https://your.kingcounty.gov/dnrp/library/wastewater/resourcerecovery/techassess/equipsting/WaterReuseDemo/Primary_BallastFloc_Densadeg_0602.pdf)
- Díaz, A. L. (2021). Obtenido de Sistema de tratamiento de aguas negras para el área recreativa en la playa pública del lago de Amatitlán : <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3960>
- Díaz, F., Krinner, W., García, R., Hackner, T., Schulze, K., Christ, O., . . . Santana, C. (s.f.). *VRM Membran Technology for Decentralised Wastewater Treatment and Reuse: Experiences with Pilot Plant on the Canary Islands*.
- Disquinsa S.A. (2023). PERACID. Guatemala. Obtenido de <https://disquinsa.com/producto/peracid-oz-5-gal-acido-peracetico/>
- Duarte Castro, V. A. (2022). *Desarrollo de un lodo granular aerobio para el tratamiento de aguas en un reactor discontinuo secuencial (SBR)*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Bogotá, Colombia.
- ECODENA. (2023). *Trampas de grasas aireadas DAF*. Obtenido de <https://ecodena.com.gt/trampa-de-grasas/sistema-d-a-f/>
- ECODENA. (2022). *Reactor biológico secuencial SBR*. Obtenido de <https://ecodena.com.gt/sistema-de-lodos-activados/reactores-biologicos-secuenciales-sbr/>
- ECODENA. (2023). *Trampas de Grasas*. Obtenido de ECODENA Guatemala : <https://ecodena.com.gt/trampa-de-grasas/>

- ECODENA. (s.f.). *Nota informativa sobre tratamientos UV para aguas residuales* .
- ECODENA. (s.f.). *Plantas de tratamiento de lodos activados*. Obtenido de ECODENA Guatemala: <https://ecodena.com.gt/sistema-de-lodos-activados/>
- ECOTEC. (2023). Carbón activado. Obtenido de <https://ecotec.com.gt/producto/carbon-activado/>
- ECOTEC. (2023). *Electro-coagulación*. Obtenido de <https://ecotec.com.gt/producto/electro-coagulacion/>
- ECOTEC. (2023). Ozono-Tec. Guatemala. Obtenido de <https://ecotec.com.gt/producto/ozono-tec/>
- ECOTEC. (2023). *Reactores UASB* . Obtenido de [https://ecotec.com.gt/producto/reactores-uasb/?gclid=CjwKCAiA\\_6yfBhBNEiwAkmXy5-OK7FwDhkmcUv0BPdOIIoTpN5qI8Mr7luDb86EiUQI8-4tahe5jBBoCqG8QAvD\\_BwE](https://ecotec.com.gt/producto/reactores-uasb/?gclid=CjwKCAiA_6yfBhBNEiwAkmXy5-OK7FwDhkmcUv0BPdOIIoTpN5qI8Mr7luDb86EiUQI8-4tahe5jBBoCqG8QAvD_BwE)
- ECOTECH. (2023). *Biodigestores*. Obtenido de <https://ecotec.unam.mx/ecoteca/biodigestores-2>
- ENVIROPRO. (2023). Actiflo high-rate clarifier. Obtenido de <https://www.enviropro.co.uk/entry/34037/Veolia-Water-Technologies-UK/Actiflo-highrate-clarifier/>
- EnviroTech. (2016). *BCDMH Tabs. Water treatment biocide*. California.
- EPA . (1992). *EPA Facts About Air Stripping*.
- EPA . (2020). *Water treatment manual: Filtration*. Irlanda .
- EPA. (1998). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Filtros intermitentes de arena. . Obtenido de <https://docplayer.es/13965610-Folleto-informativo-de-tecnologia-de-aguas-residuales-filtros-intermitentes-de-arena.html>
- EPA. (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Extracción de amoníaco por arrastre con aire*. . Office of Water, Washington, Estados Unidos .
- EPA. (Marzo de 2013). *Emerging Technologies for Wastewater Treatment and In-Plant Wet Weather Management*. Washington, D. C., Estados Unidos.
- EPA. (2021). *Community Guide to Air Stripping* .
- Espigares García, M., & Pérez López, J. A. (s.f.). *Aguas residuales. Composición*.
- Evoqua Water Technologies . (2017). *Gravisand filtration systems and Davco Filtration System Technology* .
- Evoqua Water Technologies . (2023). *Evoqua Water Technologies* . Obtenido de <https://www.evoqua.com/en/evoqua/products--services/anaerobic-wastewater-treatment/anaerobic-systems/adi-hybrid-reactor-hybrid/>

- Fahad, A., Mohamed, R., Radhi, B., & Al-Sahari, M. (julio de 2019). *Wastewater and its Treatment Techniques: An Ample Review* . India.
- Fedler, C. B., Francis, R., Parekh, D., & Blanchet, S. (2012). *Review of Potential Onsite Wastewater Disinfection Technologies*. Texas.
- Fernández Roca, D. I. (2008). *La prevención y control de la contaminación del recurso hídrico en Guatemala, necesidad de una reglamentación efectiva* . Guatemala.
- Filtec. (2017). *Salsnes Filter. Municipal Installations* .
- Filtec. (2022). *Salsnes Filter System* . Obtenido de <https://www.filtecwater.com/nz/product/salsnes-filter-system/>
- Fischer, D. (12 de septiembre de 2019). *New Air Stripper Technology Improves Cleaning Access and Reduces Fouling*. Obtenido de <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2019/09/12/new-air-stripper-technology-improves-cleaning-access-and-reduces-fouling/>
- Fundación para la Conservación de Agua de la Región Metropolitana de Guatemala. (2022). *Informe del estado del agua de la Región Metropolitana de Guatemala 2022: el agua nos une*. Guatemala.
- Gåre, A. (junio de 2012). *Assessment of theoretical and practical aspects of the Salsnes filtration unit*. Obtenido de [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmloi/bitstream/handle/11250/242321/566989\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmloi/bitstream/handle/11250/242321/566989_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gobierno de Chile. CONAMA. (s.f.). *Tecnologías d extracción por arrastre con aire. Air Stripping*.
- Gobierno de la ciudad de México. (2014). *Agua residual*. Obtenido de <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Agua%20residual>
- Gobierno del Estado de Guerrero . (2015). *Regularización de la planta de tratamiento de aguas residuales San Agustín del Municipio de Acapulco, Guerrero* . Guerrero.
- Grupo Spin. (2018). *Ficha técnica. BCDMH* . Ciudad de México .
- Guo, Z., Sun, Y., Pan, S.-Y., & Chiang, P.-C. (2019). *Integration of Green Energy and Advanced Energy-Efficient Technologies for Municipal Wastewater Treatment Plants*.
- Gupta, R., Aggarwal, S., Vishal, V., & Sahu, V. (2015). *Soil biotechnology to treat Najafgarh drain water before disposal into river Yamuna*. Delhi.
- He, H., Wagner, B., Carlson, A., Yang, C., & Daigger, G. (2021). *Recent progress using membrane aerated biofilm reactors for wastewater tereatment*.

- Hemeroteca PL. (12 de junio de 2015). *Lagos contaminados* . Obtenido de <https://www.prensalibre.com/hemeroteca/lagos-contaminados/#:~:text=El%20m%C3%A1s%20contaminado%20despu%C3%A9s%20de%20este%20para%C3%ADso%20tropical.>
- Herrera Melián, J. A. (2020). *Sustainable Wastewater Treatment Systems (2018-2019)*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria , Departamento de Química.
- HUBER. (2012). *HUBER Vacuum Rotation Membrane VRM Bioreactor* .
- HUBER. (2023). *Energy-Efficient Membrane Bio-Reactors*. Obtenido de <https://www.huber.de/solutions/energy-efficiency/wastewater-collection-and-treatment/membrane-bio-reactors.html>
- HUBER. (s.f.). *HUBER Membrane Filtration VRM* .
- Infilco Degremont . (2002). *ABW Automatic Backwash Filter* .
- INFOM. (2020). *Guía Técnica para Implementar Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Guatemala* . Obtenido de <http://www.infom.gob.gt/nuestros-servicios/plantas-de-tratamiento/>
- Iriarte Colmenares, J. F. (2015). *Estudio técnico preliminar de caracterización de efluentes, descargas, aguas para reúso y lodos*. Guatemala.
- Jain, B., Rathod, P., Patel, S., Bhavsar, D., Joshi, P., & Desai, H. (2016). *Advanced wastewater treatment technologies* . India.
- Jiménez, E., L., M., & H., M. (septiembre de 2005). Estudio de factibilidad de un reactor anaerobio de flujo a pistón a escala de laboratorio, en el tratamiento de las aguas residuales domésticas del municipio de Tunja a una temperatura promedio de 14 °C.
- Johannes de Wet, L. (2018). *Development and feasibility of an electrochemical-oxidation process for water disinfection*.
- Juárez, R., Olmos, A., & Monroy, O. (s.f.). *Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante el uso de reactores anaerobios de lecho expandido granular*. Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Biotecnología .
- Julajuj, Á. (31 de enero de 2013). *Planta de tratamiento de agua está sin uso*. Obtenido de <https://www.prensalibre.com/ciudades/solola/planta-tratamiento-agua-uso-0-857314303/>
- Julajuj, Á. (15 de diciembre de 2014). *Planta de tratamiento de agua funciona mal* . Obtenido de Prensa Libre : <https://www.prensalibre.com/ciudades/solola/planta-tratamiento-agua-funciona-mal-olor-ruido-plagas-0-1266473431/>
- Kadam, A., Oza, G., Nemade, P., Dutta, S., & Shankar, H. (2008). *Municipal wastewater treatment using novel constructed soil filter system* .

- Kanani, H., & Patel, B. (2017). *Domestic wastewater treatment by soil biotechnology*.
- Kang, S., Olmstead, K., Takacs, K., & Collins, J. (septiembre de 2008). *Municipal nutrient removal technologies*.
- Lauer, D. (enero de 2015). *Multi-Stage Activated Biological Process (MSABP)*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/jackakin/11-1011-msabppresentation>
- León, J. (13 de junio de 2016). *Contaminación del Lago de Amatitlán sale a relucir luego de la lluvia*. Obtenido de Prensa Libre : [https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/lago-de-amatitlan-acumula-toneladas-de-basura-y-animales-muertos/?utm\\_source=modulosPL&utm\\_medium=linkinterno&utm\\_campaign=ux](https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/lago-de-amatitlan-acumula-toneladas-de-basura-y-animales-muertos/?utm_source=modulosPL&utm_medium=linkinterno&utm_campaign=ux)
- Libhaber, M., & Orozco-Jaramillo, Á. (2019). *Sustainable treatment and reuse of municipal wastewater*. London: IWA Publishing .
- Lim, S. (2011). *Comparisons Between the UASB and the EGSB Reactor*.
- Longo, M. J. (2 de noviembre de 2018). *Sin terreno para planta de tratamiento*. Obtenido de Prensa Libre: <https://www.prensalibre.com/ciudades/quetzaltenango/sin-terreno-para-planta-de-tratamiento/>
- López, U. M. (febrero de 2005). Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua. Obtenido de <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20electrodi%C3%A1lisis%20en%20agua..pdf>
- López, U. M. (febrero de 2005). Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua. Obtenido de <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20electrodi%C3%A1lisis%20en%20agua..pdf>
- Lozano, E. (5 de noviembre de 2021). *El consumo de agua en la Ciudad de Guatemala es preocupante*. Obtenido de <https://soy.usac.edu.gt/?p=16007>
- Maldonado Valle, C. (18 de mayo de 2022). *El tiempo corre y dos tercios del país no tienen plantas de tratamiento*. Obtenido de <https://www.ojoconmipisto.com/el-tiempo-corre-y-dos-tercios-del-pais-no-tienen-plantas-de-tratamiento/>
- Markus, S., Brunner, N., Das, S., & Singh, A. (2022). *Sustainability Assessment for Wastewater Treatment Systems in Developing Countries*.
- MARN. (30 de noviembre de 2021). *MARN expone sobre el saneamiento de los recursos hídricos durante el V Congreso SOS Agua*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales : <https://www.marn.gob.gt/marn-expone-sobre-el-saneamiento-de-los-recursos-hidricos-durante-el-v-congreso-sos-agua/>

- MARN. (2022). *Base Legal del MARN* . Obtenido de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales : <https://www.marn.gob.gt/sobre-el-marn/base-legal-del-marn/>
- MARN. (22 de marzo de 2022). *Día Mundial del Agua: La educación y el tratamiento de aguas residuales son clave* . Obtenido de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales : <https://www.marn.gob.gt/dia-mundial-del-agua-la-educacion-y-el-tratamiento-de-aguas-residuales-son-clave/>
- MARN. (2022). *Dirección de Monitoreo y Vigilancia del Agua* . Obtenido de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales : <https://www.marn.gob.gt/viceministro-del-agua/direccion-de-monitoreo-y-vigilancia-del-agua/>
- MARN. (4 de junio de 2022). *Múltiples iniciativas del MARN permiten avanzar en el saneamiento del río Motagua*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales : <https://www.marn.gob.gt/multiples-iniciativas-del-marn-permiten-avanzar-en-el-saneamiento-del-rio-motagua/>
- Martin, K., Boltz, J., & Nerenberg, R. (2012). *The Membrane Biofilm Reactor (MBfR) for Wastewater Treatment: Applications, Design Considerations and Technology Outlook*.
- Martínez, A. B. (abril de 2014). *Identificación de los parámetros de mayor representatividad en la descarga de aguas residuales del sector industrial de lácteos según el AG 236-2006 y propuesta de unidades de tratamiento para su reducción* . Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1427\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1427_Q.pdf)
- Mazariegos Rivas, Á. (2 de noviembre de 2019). *Jimmy Morales: "Hemos incrementado la cantidad de plantas de tratamiento de aguas residuales... de 50 a más de 300 en los últimos tres años"*. Obtenido de Ocote : <https://www.agenciaocote.com/blog/2019/11/02/falso-j-morales-hemos-incrementado-la-cantidad-de-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-50-a-mas-de-300-en-los-ultimos-tres-anos/>
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales . (10 de diciembre de 2022). *Ministro Gerson Barrios hace visita técnica a moderna planta de tratamiento de aguas residuales en Santa Cruz La Laguna* . Obtenido de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales : <https://www.marn.gob.gt/ministro-gerson-barrios-hace-visita-tecnica-a-moderna-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-santa-cruz-la-laguna/>
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales . (24 de noviembre de 2022). *Municipalidades tienen nuevos plazos para cumplir con el tratamiento de las aguas residuales* . Obtenido de <https://www.marn.gob.gt/municipalidades-tienen-nuevos-plazos-para-cumplir-con-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales/>
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (1 de octubre de 2020). *MARN verifica contaminación en el Lago de Atitlán*. Obtenido de <https://www.marn.gob.gt/marn-verifica-contaminacion-en-el-lago-de-atitlan/>

- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (19 de febrero de 2021). *MARN da seguimiento a caso de contaminación en el Lago de Atitlán* . Obtenido de <https://www.marn.gob.gt/marn-da-seguimiento-a-caso-de-contaminacion-en-el-lago-de-atitlan/>
- Montes , A. G., & Herrera, A. R. (mayo de 2017). *Diseño, construcción y evaluación de un reactor anaeróbico para el tratamiento de las aguas mieles de un beneficio húmedo de café*. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0552\\_MT.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0552_MT.pdf)
- Morales Rodas, S. (22 de abril de 2021). *Día de la Tierra: Tratamiento de aguas residuales, una tarea pendiente y que urge abordar* . Obtenido de <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/dia-de-la-tierra-tratamiento-de-aguas-residuales-una-tarea-pendiente-y-que-urge-abordar/>
- Morales Rodas, S. (17 de julio de 2021). *Viceministro del Agua: Las municipalidades tienen que invertir en infraestructura y tratamiento de aguas residuales* . Obtenido de Prensa Libre : <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/viceministerio-del-agua-las-municipalidades-tienen-que-invertir-en-infraestructura-y-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- Morrow Water Technologies . (2023). *Unique, rotating membrane filtration for MBR applications*. Obtenido de <https://morrowwater.com/huber-membrane-filtration-vm/>
- Naciones Unidas. (2002). *Cuestiones sustantivas que se plantean en la aplicación del pacto internacional de derechos económicos, sociales y culturales*. Naciones Unidas, Comité de derechos económicos, sociales y culturales, Ginebra.
- Naciones Unidas. (2002). *El derecho humano al agua potable y al saneamiento*.
- Naciones Unidas. (25 de septiembre de 2015). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Naciones Unidas. (2018). *Agua*. Obtenido de <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- Naciones Unidas. (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water* . Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Nájera, A. (30 de septiembre de 2022). Situación del Agua en Guatemala. Guatemala, Guatemala. Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?v=3iE4\\_9cbZ3Q](https://www.youtube.com/watch?v=3iE4_9cbZ3Q)
- Nava, D. U. (2013). *Electrodeposición y caracterización de recubrimientos de Ni-P*. Obtenido de <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/291/1/Electrodeposici%C3%B3n%20y%20caracterizaci%C3%B3n%20de%20Ni-P.pdf>
- Ngo, H. H., Guo, W., Surampalli, R., & Zhang, T. (2016). *Green Technologies for Sustainable Water Management*.

- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales .
- Nunez, C. (6 de junio de 2022). *La contaminación del agua constituye una crisis mundial creciente. Esto es lo que hay que saber* . Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/contaminacion-del-agua>
- Nurmiyanto, A., & Ohashi, A. (2018). *Downflow Hanging Sponge (DHS) Reactor for Wastewater Treatment - A Short Review* .
- Oakley, S. (2011). Tratamiento de aguas residuales domésticas en Centroamérica. Un manual de experiencias, diseño, operación y sostenibilidad .
- Onodera, T., Okubo, T., Uemura, S., Yamaguchi, T., Ohashi, A., & Harada, H. (2016). *Long-term performance evaluation of down-flow hanging sponge reactor regarding nitrification in full-scale experiment in India*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852416000080>
- Paiz, G. (s.f.). *La escasez de agua en Guatemala. Entrevista a Gerardo Paiz, ecologista del Colectivo Madre Selva*. Obtenido de <https://pbi-guatemala.org/es/multimedia/art%C3%ADculos/la-escasez-de-agua-en-guatemala-entrevista-gerardo-pa%C3%ADz-ecologista-del>
- Paques. (s.f.). *Anammox*. Obtenido de <https://es.paques.nl/productos/featured/anammox>
- Parkson. (2022). *Compressible media filter*. Obtenido de <https://www.parkson.com/products/schreiber-fuzzy-filter>
- Patzán, J. M. (10 de septiembre de 2016). *Ríos son usados como basureros*. Obtenido de Prensa Libre: <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/lluvias-arrastran-mas-desechos/>
- Penn State Harrisburg Environmental Training Center . (octubre de 2014). Module 17: The Activated Sludge Process Part II .
- Pennsylvania Department of Environmental Protection. (2014). Module 8: Overview of Advanced Wastewater Treatment Processes . En *Wastewater Treatment Plant Operator Certification Training* (pág. 125). Pennsylvania.
- Pérez Marroquín , C. (7 de agosto de 2017). *El 95% del agua se desperdicia en Guatemala debido a la contaminación ambiental* . Obtenido de [https://www.prensalibre.com/ciudades/el-95-del-agua-se-desperdicia-en-guatemala-debido-a-contaminacion-ambiental/?utm\\_source=modulosPL&utm\\_medium=linkinterno&utm\\_campaign=ux](https://www.prensalibre.com/ciudades/el-95-del-agua-se-desperdicia-en-guatemala-debido-a-contaminacion-ambiental/?utm_source=modulosPL&utm_medium=linkinterno&utm_campaign=ux)
- Pérez Marroquín, C. (28 de octubre de 2018). *¿Se podrá rescatar el Lago de Amatitlán con lagunas y humedales?* Obtenido de Prensa Libre : <https://www.prensalibre.com/ciudades/se-podra->

- rescatar-el-lago-de-amatitlan-con-lagunas-y-humedales-amsa-contaminacion/?utm\_source=modulosPL&utm\_medium=linkinterno&utm\_campaign=ux
- Pérez Zuriaga , A. M., López Maldonado , G., & Camacho Torregrosa , J. (s.f.). Capacidad y Niveles de Servicio .
- Piemont, A., Coatalem, A., Hinaut, B., Quintela, C., Cazaban, C., Delporte, C., . . . Perrin, D. (s.f.). *ABW filters*. Obtenido de <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/filters/special-filters/abw-filters>
- Piló, A. (febrero de 2013). Diseño de la investigación de las condiciones actuales de operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales del área metropolitana de Guatemala: El caso de la planta de ciudad Peronia. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1307\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1307_Q.pdf)
- Productos químicos. (s.f.). *Hipoclorito de Sodio 10%*. Obtenido de Productos químicos: <https://productosquimicos.com.gt/producto/hipoclorito-de-sodio-10-cloro/>
- Q., O. (5 de junio de 2016). *La contaminación asfixia los ríos del país* . Obtenido de Prensa Libre : [https://www.prensalibre.com/ciudades/peten/rios-agonizan/?utm\\_source=modulosPL&utm\\_medium=linkinterno&utm\\_campaign=ux](https://www.prensalibre.com/ciudades/peten/rios-agonizan/?utm_source=modulosPL&utm_medium=linkinterno&utm_campaign=ux)
- QED Environmental Systems. (s.f.). *EZ Stacker. Stackable Tray Air Strippers*. California.
- QED Environmental Systems. (s.f.). *EZ Tray. Treating Drinking Water for Disinfection By-products*. California.
- Rathoure, A. K., Bagrecha, D., & Bhardwaj, P. (2019). Advances in wastewater treatment technologies . *Octa Journal of Environmental Research* , 13.
- Recinos, C. (2022). Diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- Redacción AFP . (22 de enero de 2018). *La mortandad de peces en el río Lempa enciende alarmas en Centroamérica* . Obtenido de Prensa Libre : <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/culpan-a-beneficios-de-cafe-guatemalteco-por-mortandad-de-peces-en-rio-lempa/>
- Reis, P. (04 de marzo de 2013). *Breaking through limits of technology: Nitrate removal using membrane biofilm reactor*. Obtenido de [https://www.tpomag.com/online\\_exclusives/2013/03/breaking\\_through\\_limits\\_of\\_technology\\_nitrate\\_removal\\_using\\_membrane\\_bi\\_wso](https://www.tpomag.com/online_exclusives/2013/03/breaking_through_limits_of_technology_nitrate_removal_using_membrane_bi_wso)
- Reyes, E. (2021). Calidad del Agua. Guatemala.
- Rodríguez, J. (3 de enero de 2020). *11 de los 25 ríos más contaminantes de Centroamérica están en Guatemala*. Obtenido de Viatori: <https://revistaviatori.com/notas/11-de-25-rios-contaminantes->



- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (2018). *Tanque Imhoff*. Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/tanque-imhoff>
- Tilley, E., Ulrich, L., Reymond, L. P., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (2020). *Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox*. Obtenido de Reactor anaerobio con deflectores : [https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/reactor-anaerobio-con-deflectores#:~:text=Un%20reactor%20anaerobio%20con%20deflectores,mejor%20tratamiento%20\(TILLEY%20et%20al](https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/reactor-anaerobio-con-deflectores#:~:text=Un%20reactor%20anaerobio%20con%20deflectores,mejor%20tratamiento%20(TILLEY%20et%20al).
- Tran, N.-H., & BUI, M.-H. (julio de 2019). Applying internal circulation anaerobic reactor for wastewater treatment: a case study in Saigon paper mill wastewater treatment plant.
- Trojan Technologies. (2023). *Salsnes Filter*. Obtenido de <https://www.salsnes-filter.com/applications/municipal/>
- UN. (junio de 2013). *MSABP Multi-Stage Activated Biological Process Wastewater Treatment System* . Obtenido de <https://www.ctc-n.org/products/msabp-multi-stage-activated-biological-process-wastewater-treatment-system>
- von Sperling, M., & de Lemos Chernicharo, C. A. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions* . IWA Publishing .
- Weralupitiya, C., Wanigatunge, R., Joseph, S., Athapattu, B., Lee, T.-H., Biswas, J., . . . Vithanage, M. (2021). *Anammox bacteria in treating ammonium rich wastewater: Recent perspective and appraisal* . Sri Lanka .
- WSP . (2006). *Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades*.
- WWAP. (2017). *Aguas residuales - El recurso desaprovechado*. Obtenido de Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de recursos hídricos.
- WWETCO. (s.f.). *Innovative Filter Technology. FlexFilter and Bio-FlexFilter*.
- Zanganeh, A., Jalilzadeh, R., Khafaie, M. A., & Alipour, S. S. (2021). *Ammonia Removal from Municipal Wastewater by Air Stripping: An Experimental Study*.

## XII. ANEXOS

### Anexo A. Fichas técnicas tecnologías no seleccionadas

Cuadro 37. Ficha técnica para la tecnología “Ácido Peracético”.

<b>Nombre</b>	Ácido Peracético (APA)
<b>Name</b>	Peracetic acid (PAA)
<b>Clasificación</b>	Desinfectante alternativo
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado en Guatemala como desinfectante para sistemas de limpieza en sitio y de superficies que se encuentren en contacto con alimentos. También es empleado en la industria de alimentos y bebidas, así como lavanderías industriales. Es de amplio espectro, por lo que puede ser utilizado para el control de microorganismos patógenos, depósitos de agua de lavado y para evitar la propagación de malos olores. (Disquinsa S.A., 2023) Es utilizado exitosamente en combinación con la desinfección UV. La dosis utilizada para realizar la desinfección del efluente depende del organismo objetivo, la calidad del agua y el nivel de inactivación requerido. Una dosis de 1-2 mg/L es típica. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Es un oxidante más fuerte que el hipoclorito o dióxido de cloro, pero menos que el ozono. Es un líquido transparente, incoloro disponible en concentraciones de 12-15 %. El ácido peracético no forma subproductos nocivos luego de reaccionar con el agua residual. La dosis y tiempo de contacto no es más que el requerido para la desinfección con cloro por lo que, los tanques de contacto existentes deberían ser adecuados para su conversión. (EPA, 2013)
<b>Imagen</b>	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 31.</i> Presentación del Ácido Peracético disponible en Guatemala. (Disquinsa S.A., 2023)</p>

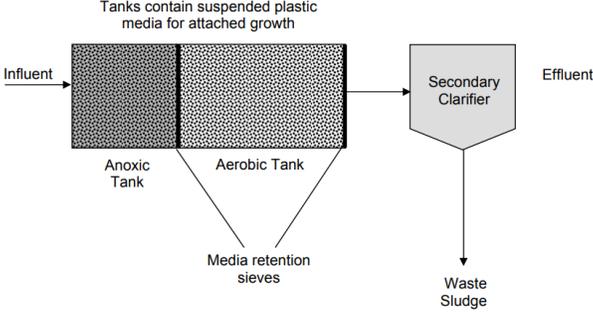
(Elaboración propia)

Cuadro 38. Ficha técnica para la tecnología “Bardenpho (Cinco y cuatro etapas)”.

<b>Nombre</b>	Bardenpho (Cinco y cuatro etapas)
<b>Name</b>	Bardenpho (Five stage and four stage)
<b>Clasificación</b>	Eliminación de nitrógeno (Four stage) Eliminación de fósforo y nitrógeno (Five stage)
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	El proceso Bardenpho es utilizado para eliminar C-BOD, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. Adicionalmente el proceso Bardenpho de cinco etapas es capaz de eliminar fósforo. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Es un proceso que involucra una zona anóxica, seguida de una aeróbica (con reciclado interno hacia la primera zona anóxica, una segunda zona anóxica y una zona aeróbica final pequeña. Es necesario contar con bombeo, tuberías y electricidad adicional para el reciclado interno. El proceso Bardenpho de 5 etapas es similar al de 4, con la excepción que se agrega una zona anaeróbica delante del sistema. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008) Una modificación de este proceso se conoce como Westbank. La diferencia es que para este proceso se elimina la segunda zona anóxica y la zona de reaireación. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)
<b>Imagen</b>	<p><i>Figura 32.</i> Representación esquemática del proceso Bardenpho de 4 etapas. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p> <p><i>Figura 33.</i> Representación esquemática del proceso Bardenpho de 5 etapas. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p>

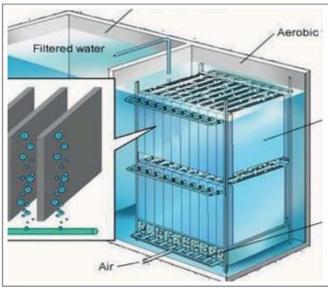
(Elaboración propia)

Cuadro 39. Ficha técnica para la tecnología “Biorreactor de lecho móvil”.

<b>Nombre</b>	Biorreactor de lecho móvil
<b>Name</b>	Moving bed bioreactor (MBBR)
<b>Clasificación</b>	Proceso de biopelícula
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. (EPA, 2013) La tecnología es más efectiva para el tratamiento de efluente industrial y agua residual municipal. (Jain, y otros, 2016)
<b>Características generales</b>	Desarrollado en base al proceso convencional de lodos activados y biofiltros. Es un reactor de mezcla completa y continua en el que el movimiento del lecho puede ser por aireación en un reactor aeróbico o un mezclador mecánico en un reactor anaeróbico o anóxico. (Jain, y otros, 2016) Una de las ventajas del sistema es que puede readecuarse en un sistema de lodos activados existente, ya que generalmente es utilizado para mejorar plantas existentes, en especial cuando el espacio es limitado. Es un proceso de biopelícula de alta tasa altamente eficientes para eliminar cargas orgánicas y nitrógeno. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 34.</i> Esquema de un biorreactor de lecho móvil. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 40. Ficha técnica para la tecnología “Biorreactor de membrana”.

<b>Nombre</b>	Biorreactor de membrana
<b>Name</b>	Membrane Bio Reactor (MBR)
<b>Clasificación</b>	Procesos de membrana
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Es utilizado para la eliminación de C-BOD, eliminación de fósforo, nitrificación-eliminación de amoníaco, separación sólido-líquido. (EPA, 2013) En Guatemala también se ha utilizado para la regeneración de las aguas residuales en un establecimiento hotelero. (Corado, 2019)
<b>Características generales</b>	El proceso es una combinación del tratamiento de lodos activados con un proceso de filtración a través de una membrana con poros entre 10 nm y 0.4 micras. Su configuración puede ser sumergida (IMBR por sus siglas en inglés) y de corriente lateral (SMBR por sus siglas en inglés). La primera es la más utilizada en el tratamiento de agua residual municipal debido a la reducción en los costos de operación. (Jain, y otros, 2016) Consiste en zonas anóxicas y aeróbicas seguidas de una membrana que filtra los sólidos del licor de mezcla, tomando el lugar de los clarificadores secundarios. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 35. Biorreactor de membrana.</i> (Fahad, Mohamed, Radhi, &amp; Al-Sahari, 2019)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 41. Ficha Técnica para la tecnología “Carbón activado granular o en polvo”.

<b>Nombre</b>	Carbón activado granular o en polvo
<b>Name</b>	Granular activated carbon (GAC) and Powdered activated carbon (PAC)
<b>Clasificación</b>	Filtración
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para reducir el carbono orgánico total y precursores de subproductos de desinfección y eliminación de micro contaminantes. (EPA , 2020)
<b>Características generales</b>	El carbón activado actúa mediante el proceso de adsorción en el que las moléculas de soluto se adhieren a una superficie sólida. Debido a que es un buen adsorbente es capaz de eliminar materia orgánica del agua residual. Es una de las tecnologías más efectivas y económicas disponibles para el tratamiento de agua potable. Los lechos en los que se utiliza GAC proporcionan una capacidad mayor de adsorción y mejor capacidad de filtración. Por otro lado, PAC generalmente no se clasifica como una tecnología de filtración y se implementa únicamente para el tratamiento de compuestos solubles. (EPA , 2020)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 36. Saco de presentación del carbón activado en ECOTEC. (ECOTEC, 2023)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 42. Ficha técnica para la tecnología “Cloro, Hipoclorito”.

<b>Nombre</b>	Cloro, Hipoclorito
<b>Name</b>	Chlorine, Hypochlorite
<b>Clasificación</b>	Desinfectante
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	<p>El cloro es un químico utilizado comúnmente en las plantas de tratamiento de agua residual para la desinfección del efluente. Es un oxidante fuerte y bueno eliminando distintos tipos de olores debido a que reacciona con el sulfuro de hidrógeno y amoníaco. (Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2014)</p> <p>En Guatemala se utiliza como blanqueador, desinfectante, desodorización, decoloración, blanqueo de diferentes materiales y en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. También puede ser empleado para la desinfección de agua para consumo humano, desinfección y limpieza de tanques para almacenamiento de agua y en los procesos de fabricación de óxidos, hierro y manganeso. (COPROSERVICIOS, S.A., s.f.)</p>
<b>Características generales</b>	<p>Es un desinfectante que destruye la bacteria que ocasiona el olor e inhibe el crecimiento de lodo en las alcantarillas y en el equipo de la planta de tratamiento. Debido a que el cloro es tan reactivo, la mayor parte de la dosis aplicada reaccionará con otros compuestos presentes que no contribuyen a los problemas de olor; por lo que, pueden llegar a ser necesarias dosis altas de cloro para lidiar de manera efectiva con los problemas de olor. (Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2014)</p> <p>La desinfección con cloro se puede realizar utilizando sus distintas formas, como el gas cloro, hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio. La forma de cloro a ser utilizada se determina por factores como aplicación, seguridad, estabilidad, habilidad desodorizante, disponibilidad, corrosividad y la habilidad de responder inmediatamente a los cambios en las concentraciones. (Fedler, Francis, Parekh, &amp; Blanchet, 2012)</p>
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 37. Presentación líquida de hipoclorito de calcio y sodio para venta. (COPROSERVICIOS, S.A., s.f.)</i></p>



(Elaboración propia)

Cuadro 43. Ficha técnica para la tecnología “Contactor biológico rotativo”.

<b>Nombre</b>	Contactor biológico rotativo (CBR)
<b>Name</b>	Rotating biological contactor (RBC)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio Proceso de biopelícula
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD y nitrificación-eliminación de amoníaco. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Es un método de tratamiento biológico para el componente orgánico del agua residual. Los sistemas más difundidos son los biocilindros y biodiscos. En este sistema los microorganismos se adhieren al medio de soporte inerte y forman una película biológica. El medio de soporte se encuentra parcial o totalmente sumergida y rota lentamente alrededor de un eje horizontal en un tanque a través del cual fluye el agua residual. (de Lemos , 2007)
<b>Imagen</b>	<p>Figura 39. Diagrama de una unidad CBR. (Fahad, Mohamed, Radhi, &amp; Al-Sahari, 2019)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 44. Ficha técnica para la tecnología “Desinfección Ultravioleta (UV)”.

<b>Nombre</b>	Desinfección Ultravioleta (UV)
<b>Name</b>	Ultraviolet (UV) Disinfection
<b>Clasificación</b>	Desinfectante alternativo
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Inicialmente eran utilizados sólo para el tratamiento de aguas de consumo; sin embargo, tiene una creciente aplicación en la desinfección de aguas residuales y su reúso para riego. Los sistemas bien dimensionados han demostrado tener la capacidad de actuar como bactericida y viricida, con un impacto ambiental casi nulo. (ECODENA)
<b>Características generales</b>	El dimensionamiento del sistema UV se basa en la eliminación bacteriana requerida. Tiene dos posibles configuraciones: en tuberías y en canal abierto. En la primera, el agua a tratar fluye a través de un cilindro de acero inoxidable con lámparas UV instaladas en su interior. Estas se encuentran aisladas del agua mediante el uso de tubos de cuarzo. En la segunda configuración, las lámparas y tubos de cuarzo se instalan al interior de un canal de hormigón sumergido en el efluente. También se cuentan con distintos tipos de lámparas UV: de media presión, vapor de mercurio, de baja presión y de amalgama de mercurio. (ECODENA)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 40.</i> Lámparas UV utilizadas para desinfección. (ECODENA)</p> <p><i>Figura 41.</i> Modelo LBX200 para instalación en canal de hormigón. (ECODENA)</p>

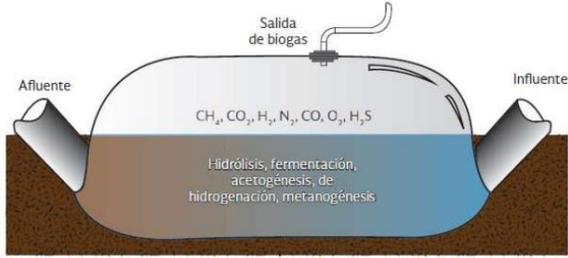
(Elaboración propia)

Cuadro 45. Ficha técnica para la tecnología “Desnitrificación y acumulación de fosfato en proceso anóxico”.

<b>Nombre</b>	Desnitrificación y acumulación de fosfato en proceso anóxico
<b>Name</b>	De-nitrification and phosphate accumulation in anoxic (DEPHANOX) process
<b>Clasificación</b>	Bioaumento
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	<p>El proceso consiste en una combinación de crecimiento suspendido y sistemas de lecho fijo en etapas separadas. Se basa en la acción simultánea de la desnitrificación y la acumulación de fosfato en la zona anóxica. Los sólidos se remueven en el tanque de sedimentación primaria. Estos se combinan con el agua residual nitrificada con el fin de proporcionar la fuente de carbón necesaria para la desnitrificación. La etapa de nitrificación consiste en un reactor de biopelícula.</p> <p>El proceso se puede modificar utilizando un reactor de biomasa suspendido para la nitrificación seguido de un clarificador para que la biomasa nitrificante se mantenga alejada de la biomasa encargada de acumular fosfato y realizar la desnitrificación. (EPA, 2013)</p>
<b>Imagen</b>	<p><i>Figura 42. Diagrama de flujo del proceso DEPHANOX (EPA, 2013)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 46. Ficha técnica para la tecnología “Digestores que producen biogás/ digestor anaerobio”.

<b>Nombre</b>	Digestores que producen biogás/ digestor anaerobio
<b>Name</b>	Biogas digesters
<b>Clasificación</b>	Biodigestor
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	<p>La biodigestión anaerobia se utiliza para transformar la materia prima en un biofertilizante o para producir biogás. Este puede ser utilizado posteriormente para cocción, calefacción y electrificación. Esta tecnología puede ser utilizada como una alternativa para el tratamiento de residuos pecuarios. (ECOTECT, 2023)</p> <p>En Asunción Mita, Jutiapa, se tienen tres biodigestores en funcionamiento en los que la materia orgánica, proveniente de desechos orgánicos, se fermenta por medio de bacterias y microorganismos anaeróbicos y posteriormente se transforma a biogás (metano) y bioabono. (Secretaría General del Sistema de la Integración Centroamericana , 2013)</p>
<b>Características generales</b>	<p>Un biodigestor es un contenedor sellado herméticamente al que entra estiércol, desperdicios de comida, rastrojos de siembra y materia orgánica, en general. Puede ser de pequeña o gran escala. El que se utilice dependerá de la cantidad de habitantes en el área. (ECOTECT, 2023)</p> <p>Los biodigestores anaerobios se constituyen por un tubo de entrada de materia orgánica, una cámara de fermentación o cuerpo del digestor, cámara de depósito de gas, cámara de salida de materia estabilizada o fermentada y un conducto para gas y gasómetro. Se pueden construir a partir de distintos materiales como ladrillo, mampostería, hormigón, concreto armado o plásticos. Se pueden instalar de manera superficial, semienterrados o subterráneos. Su flujo de operación puede ser estacionario, semicontinuo o continuo. (CONAGUA, 2016)</p>
<b>Imagen</b>	 <p>El diagrama muestra un biodigestor enterrado en el suelo. A la izquierda hay un tubo etiquetado como 'Afluente' que introduce materia orgánica. En el interior del tanque, se listan los gases <math>CH_4</math>, <math>CO_2</math>, <math>H_2</math>, <math>N_2</math>, <math>CO</math>, <math>O_2</math>, <math>H_2S</math>. Debajo de los gases se describen los procesos: Hidrólisis, fermentación, acetogénesis, hidrogenación, metanogénesis. A la derecha hay un tubo etiquetado como 'Influente' que extrae el sustrato digerido. En la parte superior del tanque, hay un tubo etiquetado como 'Salida de biogas' que recoge el gas producido.</p>
	<p><i>Figura 43.</i> Esquema general de un biodigestor (CONAGUA, 2016)</p>

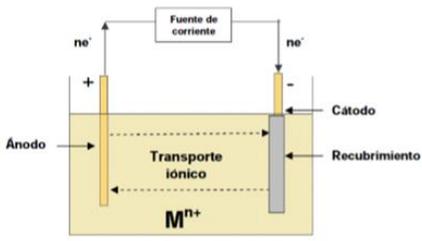
(Elaboración propia)

Cuadro 47. Ficha técnica para la tecnología “Electro-coagulación”.

<b>Nombre</b>	Electro-coagulación
<b>Name</b>	Electro-coagulation
<b>Clasificación</b>	Tecnología electroquímica
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Ha sido utilizada para el tratamiento de agua residual y la eliminación de sólidos suspendidos, microorganismos, algas, hierro, y silicatos. Se puede aplicar para el tratamiento de agua residual de textilerías, municipal, agua residual con petróleo y aceites, entre otros. (Rathoure, Bagrecha, & Bhardwaj, 2019) En Guatemala esta tecnología también se ha utilizado para el tratamiento de aguas residuales del proceso de armado e impresión de cajas de cartón corrugado. (ECOTEC, 2023)
<b>Características generales</b>	La electro-coagulación involucra la generación de coagulantes in situ al disolver eléctricamente iones Al o Fe de electrodos. Involucra tres etapas sucesivas: la formación de coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo por sacrificar; la desestabilización de los contaminantes, suspensión de partículas y ruptura de emulsiones y la agregación de fases desestabilizadas para formar flóculos. Este proceso se puede ver afectado por factores como el material del electrodo, pH, densidad, electrolitos, la distancia entre electrodos y el arreglo de estos. (Rathoure, Bagrecha, & Bhardwaj, 2019)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 44.</i> Planta de electro-coagulación para el tratamiento de aguas residuales del proceso armado e impresión de cajas de cartón corrugado. (ECOTEC, 2023)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 48. Ficha técnica para la tecnología “Electro-deposición”.

<b>Nombre</b>	Electro-deposición
<b>Name</b>	Electro-deposition
<b>Clasificación</b>	Tecnología electroquímica
<b>Razón de descarte</b>	Recuperación de metales Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Es utilizado para la recuperación electrolítica de metales como Ni, Co, Cr, Ag, Au, Fe, Cu, Zn y V. Estos metales son ampliamente utilizados como catalizadores base en aplicaciones como: refinación de petróleo, baterías, procesos químicos, control de emisiones de aire, entre otros. (Rathoure, Bagrecha, & Bhardwaj, 2019) En Guatemala se ha utilizado para la recuperación de cromo decorativo. (Sterkel, 1988)
<b>Características generales</b>	Una unidad de electro-deposición convencional consiste en un tanque, un rectificador y una bomba. La bomba llena el tanque con la solución (agua residual) mientras el rectificador alimenta de corriente eléctrica los ánodos y cátodos dentro del tanque para generar una diferencia en el potencial eléctrico. La recuperación electrolítica de metales involucra dos pasos: recolección de metales pesados y decapado de los metales recolectados. Los metales se remueven del agua en el compartimiento catódico de la célula electroquímica, mientras que el agua se oxida en el ánodo de la célula. El desarrollo del proceso se ve afectado por la eficiencia actual y el rendimiento espacio-tiempo del reactor. (Rathoure, Bagrecha, & Bhardwaj, 2019)
<b>Imagen</b>	 <p>Figura 45. Esquema del proceso de electro-deposición. (Nava, 2013)</p>

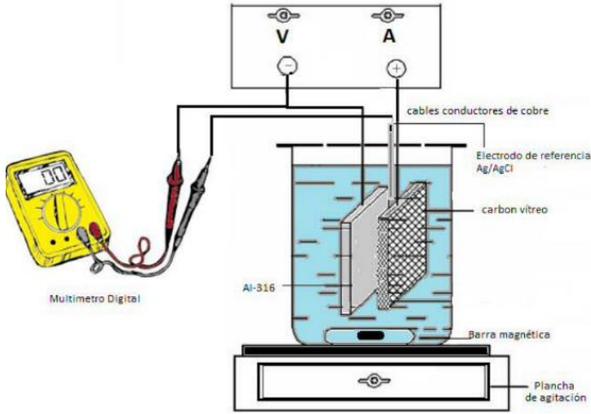
(Elaboración propia)

Cuadro 49. Ficha técnica para la tecnología “Electrodiálisis”.

<b>Nombre</b>	Electrodiálisis
<b>Name</b>	Electrodialysis
<b>Clasificación</b>	Tecnología electroquímica
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	La electrodiálisis puede ser utilizada para realizar la separación de sólidos y líquidos, así como para eliminar contaminantes específicos. (EPA, 2013) Es parte del tratamiento terciario debido a su capacidad de eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos y nutrientes. (Martínez, 2014) Su uso está relacionado al reciclaje del agua residual tratada y de los contaminantes que se separan del efluente. (Piló, 2013)
<b>Características generales</b>	La electrodiálisis es un proceso en el que los iones se mueven a través de membranas de intercambio catiónico y aniónico. Estas membranas atrapan los iones negativos y positivos en compartimientos alternantes, lo que resulta en corrientes de iones diluidos y concentrados. La tecnología se identifica como BMED, (bipolar membrane electrodialysis) cuando se utiliza una membrana bipolar para separar solventes. Esta técnica se ha utilizado en más aplicaciones que la electrodiálisis convencional como en la síntesis química o bioquímica, procesamiento de alimentos y control de contaminación. (Rathoure, Bagrecha, & Bhardwaj, 2019)
<b>Imagen</b>	<p>MC: Membrana Catiónica. MA: Membrana Aniónica.</p> <p><i>Figura 46. Representación gráfica de la electrodiálisis.</i> (López, Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua, 2005)</p>

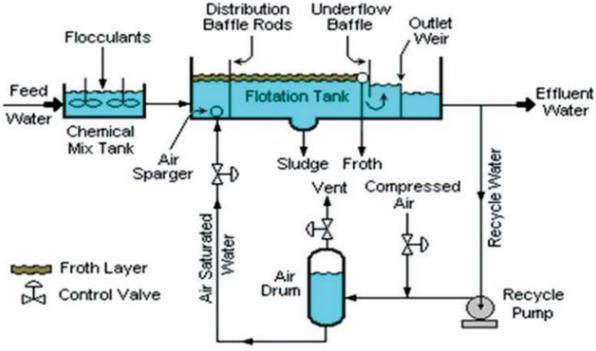
(Elaboración propia)

Cuadro 50. Ficha técnica para la tecnología “Electro-oxidación”.

<b>Nombre</b>	Electro-oxidación
<b>Name</b>	Electro-oxidation
<b>Clasificación</b>	Tecnología electroquímica
<b>Razón de descarte</b>	Agua residual de destilerías
<b>Para qué se utiliza</b>	Se ha utilizado para la eliminación de compuestos orgánicos del agua residual producida por, y en las destilerías, industrias agroquímicas, fábricas de pulpa y papel, industrias de textiles, campos de petróleo, hospitales, industrias farmacéuticas. (Rathoure, Bagrecha, & Bhardwaj, 2019)
<b>Características generales</b>	La electro-oxidación del contaminante se puede realizar de manera indirecta IEO (Indirect electrochemical oxidation) o directa DEO (Direct electrochemical oxidation). De forma directa la electro-oxidación ocurre directamente en el ánodo de óxido y el agua se oxida parcialmente para generar oxígeno activo. En la forma indirecta se producen oxidantes fuertes y son los encargados de llevar a cabo la oxidación del contaminante en la mayor parte de la solución. (Rathoure, Bagrecha, & Bhardwaj, 2019)
<b>Imagen</b>	 <p>Figura 47. Ejemplo de la configuración del proceso de electro-oxidación. (Abreu, Perozo, Martínez, &amp; Moran, 2016)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 51. Ficha técnica para la tecnología “Flotación por aire disuelto”.

<b>Nombre</b>	Flotación por aire disuelto
<b>Name</b>	Dissolved air flotation (DAF)
<b>Clasificación</b>	Sedimentación Eliminación de fósforo
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Es utilizado para la separación sólido-líquido (Sólidos disueltos y sedimentables totales). También puede ser utilizado para la eliminación de fósforo. (EPA, 2013) Es un proceso fisicoquímico efectivo para la remoción de sólidos suspendidos del efluente y de aguas negras. Es capaz de remover materia orgánica particulada por lo que, reduce el BOD y COD del efluente. (Libhaber & Orozco-Jaramillo, 2019) También es efectiva reduciendo aceites y grasas. En el país el sistema es utilizado en trampas de grasa, para proyectos en los que es necesario separar aceites, grasas y materiales suspendidos que no poseen suficiente flotabilidad. (ECODENA , 2023)
<b>Características generales</b>	Los contaminantes se eliminan mediante el uso de una solución disuelta de aire en agua producida por la inyección de aire a presión en la corriente reciclada del efluente DAF clarificado. Esta corriente reciclada se mezcla con el influente en una cámara de contacto en la que el aire disuelto sale como burbujas pequeñas que se unen a los sólidos suspendidos provocando que estos floten. El proceso DAF no se recomienda para el uso de pueblos y ciudades muy pequeñas, ya que su operación requiere cierto nivel técnico. (Libhaber & Orozco-Jaramillo, 2019)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 48.</i> Diagrama de flujo de una unidad de flotación de aire disuelto. (Libhaber &amp; Orozco-Jaramillo, 2019)</p>

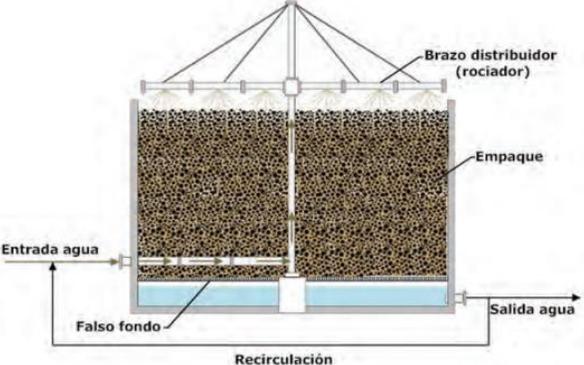
(Elaboración propia)

Cuadro 52. Ficha técnica para la tecnología “Filtración rápida por arena”.

<b>Nombre</b>	Filtración rápida por arena
<b>Name</b>	Rapid sand filtration
<b>Clasificación</b>	Filtración
<b>Razón de descarte</b>	Utilizada
<b>Para qué se utiliza</b>	Es un proceso fisicoquímico utilizado para la eliminación de turbidez y sólidos suspendidos del agua y agua residual. Es uno de los procesos más antiguos para el tratamiento de agua potable y es frecuentemente utilizado para la filtración de efluentes de agua residual en plantas de tratamiento (Libhaber & Orozco-Jaramillo, 2019)
<b>Características generales</b>	<p>Es un proceso de limpieza para el efluente proveniente de unidades de tratamiento anteriores. No puede ser utilizado como el primer tratamiento del agua residual municipal. Los sólidos son retenidos en el medio filtrante debido a su tamaño y el líquido pasa a través de este y sale de libre de sólidos. Con el tiempo el filtro se tapona y requiere de un retro lavado para liberar los sólidos retenidos. Realizando una floculación del efluente previo a su llegada al filtro de arena mejora el proceso. (Libhaber &amp; Orozco-Jaramillo, 2019)</p> <p>Se pueden utilizar filtros intermitentes de arena como unidad de tratamiento alternativa para comunidades de escasos recursos. En este caso la superficie del lecho recibe el efluente de manera intermitente y percola hasta el fondo del filtro a través de la arena. (EPA, 1998)</p> <p>Si para el proceso de tratamiento el agua fluye a través de la cama de arena a una velocidad baja, generalmente <math>&lt; 0.3</math> m/h, el proceso utilizado corresponde a la filtración lenta por arena (SSF por sus siglas en inglés). Generalmente no se agregan coagulantes antes de la filtración. Esta tecnología requiere mucho espacio, por lo que ha disminuido su popularidad. (EPA , 2020)</p>
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 49.</i> Unidad de filtro de arena en una planta de lodos activados en Guandong, China. (Libhaber &amp; Orozco-Jaramillo, 2019)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 53. Ficha técnica para la tecnología “Filtro percolador”.

<b>Nombre</b>	Filtro percolador
<b>Name</b>	Trickling filter
<b>Clasificación</b>	Proceso de biopelícula Reactor anaerobio
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Es utilizado para la eliminación de C-BOD y nitrificación-eliminación de amoníaco. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	<p>El filtro percolador requiere de sedimentación primaria y secundaria, un digestor anaerobio para estabilizar los lodos que produce y un lecho de secado para los lodos que se desechan del digestor. Esta tecnología requiere de un operador bien capacitado debido a la necesidad de manejar semanalmente los lodos en los sedimentadores, el digestor y el lecho de secado. (Oakley, 2011)</p> <p>Se puede operar con distintas cargas orgánicas y superficiales en función de la presencia o ausencia de recirculación. Una de las características importantes de esta tecnología es que la aireación se efectúa por convección natural; el aire fluye a través del medio empacado por la diferencia de temperatura existente entre el ambiente interno y externo del reactor. (Noyola, Morgan-Sagastume, &amp; Güereca, 2013)</p>
<b>Imagen</b>	 <p>El diagrama muestra un tanque rectangular con un lecho de empaque (representado por una textura granulada) que ocupa la mayor parte del espacio. En la parte superior, un brazo distribuidor (rociador) con múltiples boquillas se extiende horizontalmente. Una línea de agua entra por la parte inferior izquierda, etiquetada como 'Entrada agua', y se dirige hacia el lecho. En la parte inferior derecha, una línea de agua sale, etiquetada como 'Salida agua'. En la base del tanque, hay un 'Falso fondo' que permite la recirculación del agua, como se indica con una flecha y el texto 'Recirculación' en la parte inferior del diagrama.</p> <p><i>Figura 50. Esquema de un filtro percolador.</i> (Noyola, Morgan-Sagastume, &amp; Güereca, 2013)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 54. Ficha técnica para la tecnología “Humedales artificiales”.

<b>Nombre</b>	Humedales artificiales
<b>Name</b>	Constructed wetlands
<b>Clasificación</b>	Naturales
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Los humedales artificiales son efectivos para la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos. Generalmente son utilizados para el tratamiento de escorrentías de áreas urbanas, carreteras, aeropuertos, agricultura y drenajes de minas de carbón, minas de minerales metálicos o pastizales. Puede ser utilizado para el tratamiento de agua residual municipal. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016)
<b>Características generales</b>	Su uso ha incrementado, en especial para aplicaciones a pequeña escala como casas individuales o pequeños pueblos. Su biofiltro consiste de un filtro aeróbico biológico de grava o roca volcánica sembrado con plantas de pantano, a través de las cuales se realiza el tratamiento preliminar del agua residual. La película de bacterias aeróbicas, formada en el lecho del filtro, consume materia orgánica disuelta en el agua residual. Para evitar el taponamiento del lecho del filtro es necesario remover los sólidos suspendidos del agua residual antes que llegue al humedal artificial. El flujo del agua residual puede ser superficial o subsuperficial. (Libhaber & Orozco-Jaramillo, 2019)
<b>Imagen</b>	<p><i>Figura 51.</i> Elementos típicos de un humedal artificial con flujo superficial. (Ngo, Guo, Surampalli, &amp; Zhang, 2016)</p> <p><i>Figura 52.</i> Elementos típicos de un humedal artificial con flujo subsuperficial. (Ngo, Guo, Surampalli, &amp; Zhang, 2016)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 55. Ficha técnica para la tecnología “Lodos activados de pozo profundo”.

<b>Nombre</b>	Lodos activados de pozo profundo
<b>Name</b>	Deep-shaft activated sludge/VERTREAT
<b>Clasificación</b>	Lodos activados
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD. Su objetivo es incrementar la transferencia de oxígeno en el proceso de lodos activados para disminuir los requisitos energéticos y de esta forma ahorrando capital y costos de operación. Las variaciones de esta tecnología se han aplicado a nivel mundial por más de 3 décadas, pero aún no se ha adoptado en su totalidad. El proceso se puede utilizar con concentraciones orgánicas altas y un suministro de aireación menor debido a la transferencia de oxígeno mejorada del proceso. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Este proceso es una modificación del proceso utilizado comúnmente para lodos activados. Consiste esencialmente en utilizar un tanque vertical o eje en el área de aireación que se utiliza en el sistema convencional. Este cambio en la configuración resulta en un incremento del contenido de oxígeno disuelto en el licor de mezcla, aumentando de esta forma la actividad biológica en el reactor. (EPA, 2013) El sistema tiene un rendimiento superior en comparación con las plantas de tratamiento de oxidación total utilizadas generalmente. Es más compacto que los sistemas convencionales y sus rendimientos son mejores incluso con fluctuaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas. Si se utiliza un sedimentador secundario adecuado el sistema puede no requerir de una bomba para recirculación de lodos, ya que esto se haría de forma natural. (ECODENA, s.f.)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 53. Configuración vertical de lodos activados (ECODENA, s.f.)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 56. Ficha técnica para la tecnología “Ozono”.

<b>Nombre</b>	Ozono
<b>Name</b>	Ozone
<b>Clasificación</b>	Desinfección
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado como desinfectante o para eliminar contaminantes específicos. (EPA, 2013) En Guatemala es utilizado con mayor frecuencia para la desinfección de aire, agua y ambiente, (ECOTEC, 2023)
<b>Características generales</b>	El ozono es un agente oxidante poderoso con un potencial de reducción alto, capaz de reaccionar con diversos sustratos orgánicos. La oxidación de la materia orgánica puede ocurrir por rutas directas o indirectas. De forma directa las moléculas de ozono reaccionan directamente con otras moléculas orgánicas o inorgánicas mediante adición electrofílica. Mientras que de la forma indirecta el ozono puede reaccionar mediante caminos radicales iniciados por la descomposición de ozono. La eficiencia de ozono en degradar compuestos mejora cuando se combina con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , radiación UV o ultrasonido. (Rathoure, Bagrecha, & Bhardwaj, 2019)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 54.</i> Ejemplo de un generador de ozono, Ozono-Tec (ECOTEC, 2023)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 57. Ficha técnica para la tecnología “Proceso Actiflo”.

<b>Nombre</b>	Proceso Actiflo
<b>Name</b>	Actiflo process
<b>Clasificación</b>	Clarificación Eliminación de sólidos
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de fósforo y la separación sólida-líquida. Su objetivo principal es el tratamiento del efluente primario y terciario. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Es un proceso de clarificación fisicoquímico que involucra la formación de sólidos suspendidos en partículas balastadas y su posterior sedimentación. El proceso inicia con la adición de un coagulante para desestabilizar los sólidos suspendidos. La corriente ingresa al tanque de coagulación para mezclarse y permitir que el coagulante trabaje. Luego fluye hacia el tanque de inyección en donde se añade arena para la formación de flóculos. Su principal diferencia con el tratamiento convencional de coagulación, floculación y sedimentación es el uso de microarena como balasto para la formación de flóculos de alta densidad. (EPA, 2013) El pH se ajusta para optimizar la remoción de fósforo en base de las características del agua residual en el sitio específico y el tipo de polímero que será utilizado. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)
<b>Imagen</b>	<p><b>Coagulation stage:</b> a coagulant such as an iron or aluminium salt is added to the raw water.</p> <p><b>Injection tank:</b> the flocs produced during the coagulation stage are ballasted by the dense microsand, which is continuously re-injected into the process.</p> <p><b>Maturation tank:</b> fitted with a mixer designed to produce the optimum velocity gradients, it allows flocs to swell and mature.</p> <p><b>Counter current lamella clarification:</b> it allows a fast settling of the microsand ballasted sludge.</p> <p><b>Recirculation:</b> the sludge is pumped to the hydrocyclone to be separated from the microsand. The clean microsand is returned into the injection tank to minimize loss; the sludge is continuously removed for further processing.</p> <p><b>To sludge treatment</b></p> <p><b>Hydrocyclone</b></p> <p><b>Coagulant Acid or lime</b></p> <p><b>Polymer</b></p> <p><b>Raw water</b></p> <p><b>Clarified water</b></p>

Figura 55. Proceso Actiflo.  
(ENVIROPRO, 2023)

(Elaboración propia)

Cuadro 58. Ficha técnica para la tecnología “Proceso convencional de reciclaje autótrofo mejorado de eliminación de nitrógeno”.

<b>Nombre</b>	Proceso convencional de reciclaje autótrofo mejorado de eliminación de nitrógeno
<b>Name</b>	Mainstream autotrophic recycle enhanced N-removal (MAUREEN) process
<b>Clasificación</b>	Bioaumento
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Es utilizado para la eliminación de C-BOD y nitrificación-eliminación de amoníaco. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	<p>El proceso incluye un biorreactor de corriente secundaria para permitir la nitrificación y desnitrificación de la corriente principal. Su configuración es similar a la del proceso AT3, pero cuenta adicionalmente con reciclaje de la biomasa en el reactor. Su configuración incluye el bioaumento preferencial de bacterias oxidantes de amoníaco a través del reactor de corriente lateral y la oxidación de amoníaco en la corriente reciclada a nitrito en el reactor de enriquecimiento. Esto resulta en un consumo químico y energético reducido. El sobrenadante del proceso de corriente secundaria puede ser utilizada para el control de olor y corrosión. La clave para el funcionamiento adecuado del proceso recae en la configuración física y la selección adecuada de las condiciones de operación del reactor. (EPA, 2013)</p>
<b>Imagen</b>	<p><i>Figura 56. Diagrama de flujo del proceso MAUREEN. (EPA, 2013)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 59. Ficha técnica para la tecnología “Proceso de bioaumentación de regeneración/reaireación”.

<b>Nombre</b>	Proceso de bioaumentación de regeneración/reaireación
<b>Name</b>	Bio-augmentation regeneration/reaeration process (BAR)
<b>Clasificación</b>	Bioaumentación
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno.
<b>Características generales</b>	<p>El proceso consiste en reciclar el agua cargada de amoníaco filtrada de la deshidratación de los lodos digeridos aeróbicamente hacia un tanque de reaireación. Los lodos activados sedimentados que se regresan al tanque de aireación se conocen como lodos de retorno. La temperatura y concentración de amoníaco alta en el tanque promueve la nitrificación y desarrolla el cultivo de nitrificadores. El licor de mezcla de la zona de reaireación fluye al tanque de aireación alimentándolo con nitrificadores. Este proceso no puede ser tan controlado como el In-Nitri debido a que carece de un clarificadora u otro medio para concentrar la biomasa. (EPA, 2013)</p> <p>El proceso AT3 (Aeration Tank 3) por sus siglas en inglés, es similar al BAR, pero difiere en que envía una fracción menor de lodos de retorno al tanque de reaireación y cuenta con una zona anóxica posterior. Su objetivo es detener el proceso de nitrificación en la etapa de nitración mediante el control de oxígeno disuelto y pH con el fin de reducir el consumo de carbón y oxígeno para una desnitrificación completa.</p> <p>Los procesos conocidos como R-DN (Regeneration-DeNitrification process) y CaRRB (Centrate and RAS Reaeration Basin process) son idénticos al proceso BAR. (EPA, 2013)</p>
<b>Imagen</b>	<p>Figura 57. Representación esquemática del proceso BAR. (EPA, 2013)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 60. Ficha Técnica para la tecnología “Proceso de eliminación biológico-químico de fósforo y nitrógeno”.

<b>Nombre</b>	Proceso de eliminación biológico-químico de fósforo y nitrógeno
<b>Name</b>	Biological-chemical phosphorus and nitrogen removal (BCFS) process
<b>Clasificación</b>	Eliminación de fósforo y nitrógeno
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	<p>Utilizado para eliminación de C-BOD, eliminación de fósforo, nitrificación-eliminación de amoníaco, desnitrificación-eliminación de nitrógeno. Su objetivo es aumentar la eliminación de nutrientes (fósforo y nitrógeno). El proceso se desarrolló para alcanzar concentraciones bajas de nutrientes en el efluente a partir de un influente con tasas de BOD/nitrógeno y BOD/fósforo bajas. (EPA, 2013)</p> <p>El proceso también puede llegar a ser utilizado para la recuperación de fósforo. Aproximadamente 60% de la carga del influente se puede recuperar con una adaptación simple del proceso. (Barat &amp; van Loosdrecht, 2006)</p>
<b>Características generales</b>	<p>Su diseño se basa en el de la Universidad de Cape Town (UCT). En el proceso el lodo de retorno se introduce al inicio de la zona anóxica para evitar la presencia de nitrato en la zona anaeróbica. El licor de mezcla se recircula del final de la zona anóxica a la anaeróbica. En la zona anóxica se elimina la mayor parte del nitrato y el fósforo es absorbido por las bacterias acumuladoras de dicho nutriente presente en los lodos activados. Debido a que distintos microorganismos se ven involucrados para a eliminación de fósforo y nitrógeno, los tiempos de retención de cada proceso es distinto. En este proceso se prefieren los tiempos de retención largos que favorecen la eliminación de nitrógeno. (EPA, 2013)</p>
<b>Imagen</b>	<p>El diagrama muestra el flujo del proceso BCFS. El influente entra por la izquierda en un reactor que se divide en cinco zonas: Anaerobic, Anoxic, Anoxic, Anoxic/Anaerobic y Oxic. Hay un flujo de 'Internal Recycle' que va desde el final de la zona Anoxic/Anaerobic de vuelta al inicio de la zona Anaerobic. El lodo de retorno ('Returned Activated Sludge') entra en la zona Anaerobic. El efluente del reactor va a un clarificador ('Clarifier'). Desde el clarificador, el efluente ('Effluent') sale por la derecha y el lodo ('Waste Sludge') sale por la parte inferior.</p> <p><i>Figura 58. Diagrama de flujo del proceso BCFS (EPA, 2013)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 61. Ficha técnica para la tecnología “Proceso de Johannesburgo”.

<b>Nombre</b>	Proceso de Johannesburgo
<b>Name</b>	Johannesburg process
<b>Clasificación</b>	Eliminación de fósforo y nitrógeno
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, eliminación de fósforo, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Es una variación del proceso Phoredox. Consiste en tanques anaeróbicos, anóxicos y aeróbicos en serie. Un reciclador interno es el encargado de regresar el nitrato del final de la zona aeróbica al inicio de la zona anóxica. Debido a estas corrientes de reciclado requiere tuberías y bombeo extensos. Si en el sistema se encuentran suficientes ácidos grasos volátiles, no requerirá fuentes de carbón adicionales.
<b>Imagen</b>	<p>El diagrama ilustra el proceso de Johannesburgo. El agua de entrada (Influent) entra en un tanque anaeróbico, luego en un tanque anóxico y finalmente en un tanque aeróbico. Desde el tanque aeróbico, el agua fluye hacia un clarificador secundario. Desde el clarificador, el agua se divide: una parte sale como efluente (Effluent) y otra parte es reciclada como RAS (Return Activated Sludge) a un tanque anóxico adicional que se alimenta al inicio del tanque anaeróbico. Además, se muestra un ciclo de reciclo de nitrato (Nitrified Recycle) que devuelve nitrato desde el final del tanque aeróbico al inicio del tanque anóxico.</p> <p><i>Figura 59. Esquema del proceso Johannesburgo. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 62. Ficha técnica para la tecnología “Proceso de la Planta de Virginia”.

<b>Nombre</b>	Proceso de la Planta de Virginia
<b>Name</b>	Virginia initiative plant (VIP)
<b>Clasificación</b>	Eliminación de fósforo y nitrógeno
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para eliminación de C-BOD, eliminación de fósforo, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Consiste en zonas anaeróbicas, anóxicas y aeróbicas. Es similar al proceso UCT modificado (por sus siglas en inglés) y el proceso Phoredox. El proceso se diseña como de alta tasa y utiliza un tiempo de retención de sólidos (SRT) corto para maximizar la remoción de fósforo. Este proceso requiere de mayor equipo para la operación y de un sistema adicional de reciclaje. Entre sus ventajas está que produce buen lodo de sedimentación y debido a la reducción de la carga de nitrato en la zona anaeróbica, la capacidad de eliminación de fósforo aumenta. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)
<b>Imagen</b>	<p><i>Figura 60.</i> Representación esquemática del proceso VIP (Ngo, Guo, Surampalli, &amp; Zhang, 2016)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 63. Ficha técnica para la tecnología “Proceso Densadeg”.

<b>Nombre</b>	Proceso Densadeg
<b>Name</b>	Densadeg process
<b>Clasificación</b>	Clarificación Eliminación de sólidos
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Su objetivo principal es el tratamiento del efluente primario y terciario. Es utilizado para la eliminación de fósforo y la separación sólido-líquido. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	<p>Es un proceso de clarificación físico y químico de contacto de sólidos de alta tasa. Consiste en un reactor, una zona de pre-entramiento y engrosamiento y una de clarificación. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p> <p>El proceso inicia con la adición de un coagulante para desestabilizar los sólidos suspendidos. Es similar al proceso convencional de coagulación, floculación y sedimentación. En ambos se utiliza un coagulante para la desestabilización y un polímero para ayudar a la floculación del material suspendido. El principal avance técnico del proceso Densadeg es el uso de lodos recirculados como fuente para la formación de flóculos de densidad alta que facilitan la remoción por sedimentación. (EPA, 2013)</p>
<b>Imagen</b>	<p>El diagrama ilustra el flujo del proceso Densadeg en un reactor dividido en varias zonas. El agua de entrada (Influent) entra por la izquierda y pasa por una zona de mezcla rápida (Rapid Mixing Zone) donde se añaden coagulantes (Coagulant). Luego, el agua pasa a una zona de reacción (Reaction Zone) donde se añaden polímeros (Polymer). Después, el agua pasa por una zona de transición (Transition Zone) y finalmente a una zona de clarificación y espesamiento (Clarifier/Thickener Zone). En esta zona, los sólidos se sedimentan y se reciclan (Solid Recycle) de vuelta a la zona de reacción. El agua tratada (Effluent) sale por la derecha. También se muestra un proceso de degreaseo (Degreasing) en la parte superior y un sistema de desarenado (Degritting) en la parte inferior.</p> <p><i>Figura 61. Diagrama de flujo proceso Densadeg (Department of Natural Resources and Parks, 2002)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 64. Ficha técnica para la tecnología “Proceso In-Nitri”.

<b>Nombre</b>	Proceso In-Nitri
<b>Name</b>	Inexpensive Nitrification or In-Nitri process
<b>Clasificación</b>	Bioaumentación
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para eliminación de C-BOD, nitrificación-eliminación de amoníaco, desnitrificación-eliminación de nitrógeno. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	El proceso consiste en tratar el agua residual cargada de amoníaco en un proceso de lodos activados (tanque de aireación y clarificador) separado antes de ser introducido a la planta de tratamiento. Esto reduce la carga amoníaco-nitrógeno en el flujo reciclado; este flujo proporciona una fuente de bacteria nitrificante al reactor principal. El tamaño del reactor de corriente lateral puede ser pequeño y operado a una alta temperatura comparado con el reactor principal. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)
<b>Imagen</b>	<p>El diagrama ilustra el flujo del proceso In-Nitri. Comienza con 'Raw Wastewater' que entra en un 'Primary Sedimentation Tank'. Desde allí, el agua fluye hacia un 'Aeration Tank' y luego a un 'Secondary Sedimentation Tank', donde se produce el 'Treated Effluent'. El 'Primary Sedimentation Tank' genera 'Primary Sludge Thickening', que se envía a un 'Digester'. El 'Secondary Sedimentation Tank' genera 'WAS Thickening', que también se envía al 'Digester'. El 'Digester' produce 'Supernatant' que se recicla al 'Aeration Tank' y 'Sludge for Disposal'. El 'Sludge Dewatering' produce un 'Dewatering Return Stream' que se recicla al 'Aeration Tank' y 'Nitrified Dewatering Liquid' que se envía a un 'Side-Stream Nitrification' reactor. Este reactor recibe 'Alkalinity' y su salida se recicla al 'Aeration Tank'. El 'Side-Stream Nitrification' también recibe 'Thickened Primary Sludge' y 'Excess Nitrification Sludge'.</p>
	<p><i>Figura 62. Diagrama de flujo del proceso In-Nitri.</i> (EPA, 2013)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 65. Ficha técnica para la tecnología “Proceso Kraus”.

<b>Nombre</b>	Proceso Kraus
<b>Name</b>	Kraus process
<b>Clasificación</b>	Eliminación de BOD Nitrificación
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD y nitrificación-eliminación de amoníaco. (EPA, 2013) Utilizado para el tratamiento de agua residual deficiente de nitrógeno. También es utilizado cuando los lodos activados tienen mala sedimentación. El proceso se aplica mejor a las instalaciones de tratamiento que reciben agua residual alta en carbohidratos. (Penn State Harrisburg Environmental Training Center , 2014)
<b>Características generales</b>	El proceso utiliza un tanque de reaireación con algunas modificaciones al proceso convencional de estabilización por contacto. Entre los cambios se tiene que no todo el lodo de retorno es re-airado, el sobrenadante del digestor y los lodos también se añaden al tanque de aireación y el tiempo de retención en el tanque de aireación es de 24 horas. Para modificar el proceso convencional de lodos activados al proceso Kraus se deben realizar las siguientes modificaciones: añadir un tanque de reaireación; se realiza la reaireación y reciclado del sobrenadante del digestor y los sólidos; una porción del lodo de retorno es re-airada. (Penn State Harrisburg Environmental Training Center , 2014)
<b>Imagen</b>	<p style="text-align: center;"><i>Figura 63.</i> Esquema del proceso Kraus. (Penn State Harrisburg Environmental Training Center, 2014)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 66. Ficha técnica para la tecnología “Proceso mejorado de bioaumentación secuencial”.

<b>Nombre</b>	Proceso mejorado de bioaumentación secuencial
<b>Name</b>	Bio-augmentation batch enhanced process (BABE)
<b>Clasificación</b>	Bioaumentación
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, nitrificación-eliminación de amoníaco y la desnitrificación-eliminación de nitrógeno.
<b>Características generales</b>	<p>El proceso está compuesto por un reactor por lotes de secuenciación (SBR por sus siglas en inglés) que se alimenta por el agua proveniente del proceso de deshidratación de lodos. El reactor por lotes se opera de manera aeróbica y anóxica por lo que nitrifica y desnitrifica la corriente de flujo lateral. La alcalinidad que se pierde durante el proceso de nitrificación se recupera parcialmente durante la desnitrificación; por lo que, el flujo de corriente lateral no necesitará neutralización antes de reintroducirse a la corriente principal. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p> <p>Este proceso es similar al proceso BAR (Bio-augmentation Regeneration/Reaeration process), pero al estar configurado como un reactor SBR cuenta con la capacidad de controlar la concentración de la biomasa. (EPA, 2013)</p>
<b>Imagen</b>	<p style="text-align: right; font-size: small;">741043_SWW1-12.ai</p> <p style="text-align: center;"><i>Figura 64.</i> Diagrama de flujo del proceso BABE (EPA, 2013)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 67. Ficha técnica para la tecnología “Proceso modificado de la Universidad de Ciudad del Cabo”.

<b>Nombre</b>	Proceso modificado de la Universidad de Ciudad del Cabo
<b>Name</b>	Modified University of Capetown (MUCT) process
<b>Clasificación</b>	Eliminación de nitrógeno y fósforo
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, eliminación de fósforo, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. Su objetivo principal es la eliminación mejorada de fósforo y nitrógeno del agua residual. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	El proceso permite la eliminación eficiente de nitrógeno al enviar los lodos activados de retorno (RAS) a la zona anóxica. El reactor anaeróbico se posiciona antes de los dos reactores anóxicos. (EPA, 2013) Tiene una zona anaeróbica seguida de dos anóxicas y una aeróbica antes de los clarificadores secundarios. Las dos zonas anóxicas en serie se diseñan para operar de tal forma que ningún nitrato regrese a la zona anaeróbica. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)
<b>Imagen</b>	<p><i>Figura 65. Proceso modificado de la Universidad de Ciudad del Cabo (Jain, y otros, 2016)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 68. Ficha técnica para la tecnología “Proceso modificado Ludzack-Ettinger”.

<b>Nombre</b>	Proceso modificado Ludzack-Ettinger
<b>Name</b>	Modified Ludzack-Ettinger process
<b>Clasificación</b>	Eliminación de nitrógeno
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD y nitrificación-eliminación de amoníaco. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	<p>Consiste en una cuenca anóxica colocada antes de una zona aeróbica.</p> <p>En el proceso un reciclador interno lleva el nitrato generado durante el proceso de nitrificación en la zona aeróbica junto con el licor de mezcla a la zona anóxica para desnitrificación. La cantidad de desnitrificación está asociada con el flujo de reciclado del licor de mezcla. Debido a que únicamente el nitrato reciclado tiene la oportunidad de ser desnitrificado, el proceso no puede alcanzar concentraciones muy bajas de nitrógeno.</p> <p>La desnitrificación se encuentra limitada por factores como la disponibilidad de la fuente de carbón, la cinética del proceso y el tamaño de las zonas aeróbicas y anóxicas. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p>
<b>Imagen</b>	<p style="text-align: center;"><i>Figura 66. Proceso modificado Ludzack-Ettinger.</i> (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 69. Ficha técnica para la tecnología “Proceso Phoredox”.

<b>Nombre</b>	Proceso Phoredox
<b>Name</b>	Phoredox process (Anaerobic/Oxic)
<b>Clasificación</b>	Eliminación de fósforo
<b>Razón de descarte</b>	Proceso
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD y fósforo. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Consiste en colocar una zona anaeróbica antes de una aeróbica. Los lodos de retorno (RAS por sus siglas en inglés) ingresan en la cabeza de la zona anaeróbica junto con el influente. En la zona anaeróbica, los organismos acumuladores de fosfato (PAOs phosphate accumulating organisms) liberan fósforo, el cual será recogido en la zona aeróbica. El proceso es de tamaño medio y relativamente fácil de readecuar en sistemas existentes al instalar paredes deflectoras y mezcladores para producir una zona anaeróbica. (Kang, Olmstead, Takacs, & Collins, 2008)
<b>Imagen</b>	<p style="text-align: center;"><i>Figura 67.</i> Esquema del proceso Phoredox. (Kang, Olmstead, Takacs, &amp; Collins, 2008)</p>

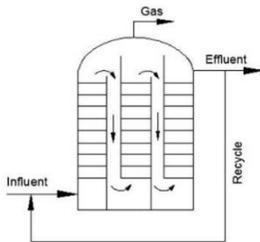
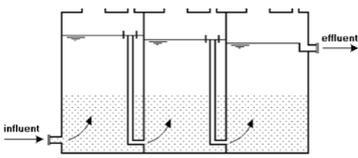
(Elaboración propia)

Cuadro 70. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaeróbico de flujo a pistón”.

<b>Nombre</b>	Reactor anaeróbico de flujo a pistón
<b>Name</b>	Piston Anaerobic Reactor (PAR)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio
<b>Razón de descarte</b>	Escala laboratorio
<b>Para qué se utiliza</b>	Se utiliza para la remoción de materia orgánica y sólidos totales. (Jiménez, L., & H., 2005)
<b>Características generales</b>	Las cámaras del reactor están formadas por pantallas en las que el agua residual tiene un flujo vertical; el flujo horizontal entre las cámaras es mínimo. El reactor proporciona un área de contacto mayor en la interfase gas-liquido. Esto debido a que no se tiene una estructura que separe dichas fases y que permita una mayor transferencia de gases. En estos reactores la biomasa puede crecer adherida a un medio de soporte o en forma suspendida. (Jiménez, L., & H., 2005)
<b>Imagen</b>	<p>El diagrama muestra el montaje del equipo. A la izquierda hay un 'Tanque de Mezcla' con un 'Agitador' que se extiende desde la parte superior. Una línea de conexión lleva el líquido desde el tanque a un 'Bombeo Peristáltico'. Desde el bombeo, el flujo se divide en dos líneas que ingresan a 'Reactor 1' y 'Reactor 2'. Los reactores están representados como bloques rectangulares con una estructura interna de pantallas. Una línea de salida común recoge el efluente de ambos reactores y lo dirige a la derecha, etiquetado como 'Efluente'.</p> <p><i>Figura 68. Montaje del equipo</i> (Jiménez, L., &amp; H., 2005)</p>

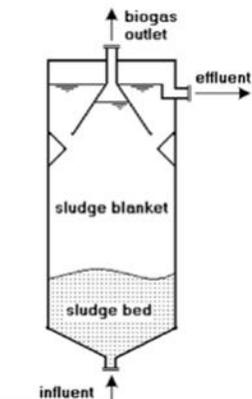
(Elaboración propia)

Cuadro 71. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaerobio con deflectores”.

<b>Nombre</b>	Reactor anaerobio con deflectores
<b>Name</b>	Anaerobic Baffled Reactor (ABR)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	<p>Es una tecnología de tratamiento in-situ que puede ser utilizada como tratamiento semicentralizado para el agua residual de una comunidad o vecindario pequeño. A diferencia de otro tipo de reactores anaerobios, estos tienen la ventaja de eliminar corrientes en cortocircuito; sin embargo, es más común el uso de reactores anaerobios de flujo ascendente RAFA. (Tilley, Ulrich, Raymond, Schertenleib, &amp; Zurbrügg, 2020)</p> <p>Esta tecnología fue propuesta como sistema de tratamiento para las aguas residuales del área recreativa en la playa pública del lago de Amatlán. (Díaz, 2021) También se evaluó su funcionamiento para modificar el potencial de hidrógeno del aguamiel. (Montes &amp; Herrera, 2017)</p>
<b>Características generales</b>	<p>El reactor asimila una fosa séptica con múltiples cámaras en serie. Cuenta con deflectores verticales que obligan al líquido a tener un movimiento ascendente y descendente secuencial para garantizar un contacto mayor entre el agua residual y la biomasa al fondo de la unidad. (de Lemos , 2007) Debido a que forma agregados altamente sedimentables, es necesario eliminarlo cada 2-3 años. Este sistema se adapta con facilidad y puede ser utilizado a nivel domiciliario o para el tratamiento de agua residual industrial. (Ngo, Guo, Surampalli, &amp; Zhang, 2016)</p>
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 69.</i> Representación esquemática de un reactor ABR. (Ngo, Guo, Surampalli, &amp; Zhang, 2016)</p>  <p><i>Figura 70.</i> Representación esquemática de un reactor ABR (de Lemos, 2007)</p>

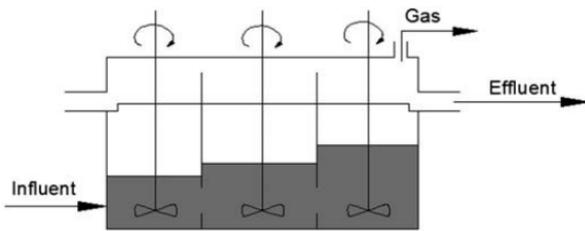
(Elaboración propia)

Cuadro 72. Ficha técnica para la tecnología “Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)”.

<b>Nombre</b>	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)
<b>Name</b>	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD. Son utilizados para efluentes de procesos orgánicos con alta carga y de alta concentración de contaminantes (DBO, DQO, SS, A&G). (ECOTEC, 2023) Es ampliamente utilizado para efluentes de industrias, procesadoras de alimentos, tenerías y urbanas. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016)
<b>Características generales</b>	Es un reactor biológico de alta tasa basado en la tecnología de lodos granulares anaerobios. El sistema consiste en un separador sólido-gas que retiene el desecho anaeróbico en su interior, un sistema de distribución del influente y un sistema colector del efluente. No requiere el reciclaje del efluente para fluidizar los lodos debido a que tiene suficiente contacto entre el agua residual y el lodo aun con cargas orgánicas bajas. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016) Uno de los principios fundamentales del sistema es su habilidad de desarrollar biomasa de alta actividad (flóculos o gránulos de 1-5 mm). El propósito principal del equipo es la separación de gases contenidos en la mezcla de líquido para que se forme una zona que favorezca la sedimentación en la parte superior del reactor. El diseño del reactor es simple y no requiere la instalación de equipo sofisticado o medio de empaque para que se adhiera la biomasa o su retención. (de Lemos , 2007)
<b>Imagen</b>	 <p>Figura 71. Representación esquemática del reactor UASB (de Lemos, 2007)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 73. Ficha Técnica para la tecnología “Reactor anaerobio de lecho migrante”.

<b>Nombre</b>	Reactor anaerobio de lecho migrante
<b>Name</b>	Anaerobic Migrating Blanket Reactor (AMBR)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio
<b>Razón de descarte</b>	Agua residual industrial Información deficiente
<b>Para qué se utiliza</b>	Es recomendado para el tratamiento de agua residual industrial, el tratamiento biológico de agua residual de comunidades medianas a pequeñas y destilerías y agua residual con baja carga orgánica. (Angenent & Sung, 2001)
<b>Características generales</b>	Es diseñado con alimentación continua y un reactor compartimentalizado. No requiere la separación gas-sólido ni de sistemas de distribución y alimentación. El reactor no necesita reciclar el efluente, pero requiere mezclado intermitente para mantener un contacto suficiente entre la biomasa y el sustrato. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016) Un elemento clave en la formación granular de biomasa es la migración de esta a través del reactor. (Angenent & Sung, 2001)
<b>Imagen</b>	 <p><i>Figura 72. Representación esquemática de un reactor anaerobio de lecho migrante.</i> (Ngo, Guo, Surampalli, &amp; Zhang, 2016)</p>

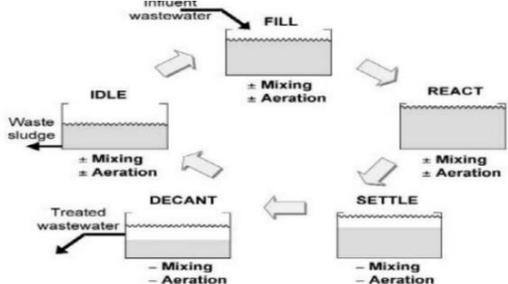
(Elaboración propia)

Cuadro 74. Ficha técnica para la tecnología “Reactor anaerobio híbrido”.

<b>Nombre</b>	Reactor anaerobio híbrido
<b>Name</b>	Anaerobic Hybrid Reactors (AHR)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio
<b>Razón de descarte</b>	Agua residual química e industrial
<b>Para qué se utiliza</b>	Su uso es recomendado para el tratamiento de agua residual en la que es difícil obtener la formación de lodo granular como: lácteos, destilerías, farmacéuticas, petroquímicas, textilerías, tenería e industrias químicas. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016) Para obtener un efluente de mayor calidad se puede instalar un reactor de dos etapas. Este sistema consiste en dos reactores del mismo tamaño que operan en serie y se alternan periódicamente. Esto es útil al tratar agua residual con concentraciones altas de material orgánico soluble y una baja concentración de sólidos. (Evoqua Water Technologies , 2023)
<b>Características generales</b>	Su diseño consta principalmente en la combinación de un reactor anaerobio de flujo ascendente y un biofiltro, lo que resulta en un reactor híbrido de lodos y película fija. La parte inferior del reactor es la encargada de la formación del lodo granular y se asegura que haya un buen contacto entre la biomasa y el sustrato. Por otro lado, los medios de empaque en la parte superior proporcionan una superficie adecuada para la adhesión de biomasa. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016)
<b>Imagen</b>	<p><i>Figura 73. Representación esquemática de un reactor anaeróbico híbrido.</i> (Ngo, Guo, Surampalli, &amp; Zhang, 2016)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 75. Ficha técnica para la tecnología “Reactor biológico discontinuo secuencial; Reactor discontinuo secuencial”.

<b>Nombre</b>	Reactor biológico discontinuo secuencial; Reactor discontinuo secuencial
<b>Name</b>	Sequencing batch reactor (SBR)
<b>Clasificación</b>	Eliminación de BOD y nitrificación
<b>Razón de descarte</b>	Utilizado
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para la eliminación de C-BOD, nitrificación-eliminación de amoníaco y desnitrificación-eliminación de nitrógeno. (EPA, 2013)
<b>Características generales</b>	Es una unidad especial de tratamiento que realiza la aireación y clarificación en un solo tanque. Durante el ciclo, el agua residual entra al tanque y luego es aireado para la oxidación biológica. Luego de un periodo de aireación se permite que los sólidos sedimenten y posteriormente se decanta el efluente clarificado. El ciclo se completa cuando el sistema desarrolla las condiciones anaeróbicas para facilitar la remoción potencial de nitrógeno. (Ngo, Guo, Surampalli, & Zhang, 2016)
<b>Imagen</b>	 <p data-bbox="760 1188 1198 1247"><i>Figura 74. Reactor biológico secuencial. (ECODENA, 2022)</i></p>  <p data-bbox="683 1570 1263 1629"><i>Figura 75. Fases principales del ciclo de operación. (Jain, y otros, 2016)</i></p>

(Elaboración propia)

Cuadro 76. Ficha técnica para la tecnología “Reactor de circulación interna”.

<b>Nombre</b>	Reactor de circulación interna
<b>Name</b>	Internal circulation reactor (IC)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio
<b>Razón de descarte</b>	Agua residual industrial
<b>Para qué se utiliza</b>	Tiene la capacidad de tratar agua residual industrial con una demanda química de oxígeno alta. Puede utilizarse en cervecerías, almidón de patata, pulpa y papel. (Tran & BUI, 2019)
<b>Características generales</b>	El reactor fue diseñado para superar los problemas operacionales en el proceso convencional de UASB. Consiste en dos reactores UASB interconectados, uno sobre el otro. Debido a que su alta turbulencia y características de mezcla adecuadas, es mejor para reducir el taponamiento y manejar agua residual orgánica de alta fuerza. Para permitir la aplicación de cargas altas es necesario tener una separación más eficiente de gas, sólidos y líquido. (de Lemos , 2007)
<b>Imagen</b>	<p><i>Figura 76. Esquema de un reactor de circulación interna.</i> (Tran &amp; BUI, 2019)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 77. Ficha técnica para la tecnología “Reactor de lecho granular estático”.

<b>Nombre</b>	Reactor de lecho granular estático
<b>Name</b>	Static Granular Bed Reactor (SGBR)
<b>Clasificación</b>	Reactor anaerobio
<b>Razón de descarte</b>	Escala piloto
<b>Para qué se utiliza</b>	Se ha utilizado para tratar agua residual similar a la tratada en reactores UASB y ESGB. (Lim, 2011) También ha sido utilizado para el tratamiento de agua residual de mataderos avícolas. (Debik & Coskun, 2009)
<b>Características generales</b>	<p><b>Configuración.</b> El reactor SGBR es un reactor de flujo descendente con una configuración simple. No requiere sistemas de mezcla adicionales o energía como bombas de recirculación, dispositivos para la separación gas/líquido/sólido, sistemas de drenaje complejos, sistemas de distribución o sistemas de retrolavado. El sistema consta únicamente de una bomba de alimentación y línea de derivación para quitar los gránulos atrapados. (Lim, 2011)</p> <p><b>Costos de Operación.</b> En los costos de operación es necesario considerar el incurrido debido a la necesidad periódica de retrolavado en el sistema. (Lim, 2011)</p>
<b>Imagen</b>	<p>El diagrama ilustra un reactor de lecho granular estático (SGBR) en un tanque vertical. El influente entra por la parte superior. En la parte superior del tanque, se muestra el nivel de agua y la salida de bio gas. El lecho principal está compuesto por gránulos anaerobios activos. Debajo de los gránulos hay un drenaje de grava. A la izquierda del tanque, se conectan un medidor de gas y un scrubber de H<sub>2</sub>S para tratar el bio gas producido.</p> <p><i>Figura 77. Diagrama de un reactor SGBR.</i> (Lim, 2011)</p>

(Elaboración propia)

Cuadro 78. Ficha técnica para la tecnología “Tratamiento quimiostático automatizado”.

<b>Nombre</b>	Tratamiento quimiostático automatizado
<b>Name</b>	Automated Chemostat Treatment (ACT)
<b>Clasificación</b>	Tratamiento de lodos
<b>Razón de descarte</b>	Agua residual de refinerías
<b>Para qué se utiliza</b>	Utilizado para reducir hidrocarburos, carbón orgánico total (TOC), la demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos del efluente. Debido a su versatilidad puede ser utilizado en refinerías, granjas de almacenaje de aceite, sitios de perforación, puertos marítimos, reservas contaminadas o tanques de almacenamiento. (Jain, y otros, 2016)
<b>Características generales</b>	<p><b>Adaptable.</b> La tecnología se puede aplicar en infraestructura existente y cuenta con una gran flexibilidad de modulación del proceso. Esta tecnología selecciona de manera específica la bacteria necesaria para el agua residual por tratar. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Control.</b> Debido a que se trata de un proceso completamente automatizado, cuenta con una variedad de sensores que proporcionan información a la unidad de control sobre parámetros como hidrocarburos totales de petróleo (TPH), nitrógeno, oxígeno disuelto, TOC y temperatura. El controlador asegura que se mantenga un balance óptimo en el proceso entre la tasa de flujo, crecimiento bacteriano, aditivos y degradación de compuestos orgánicos. (Jain, y otros, 2016)</p> <p><b>Antagonismo bacteriano.</b> Esta tecnología se basa en el antagonismo bacteriano bajo las condiciones en el sitio de interés. Esto resulta en un enriquecimiento de las bacterias mejor adaptadas y un agotamiento de aquellas que no se ajustan al tipo de agua y condiciones ambientales. (BioPetroClean, 2020)</p> <p><b>Eficiente.</b> Luego de evaluar el agua residual por tratar y determinar la que más se adapta al sistema, la concentración de la bacteria se distribuye en todo el reactor. De esta manera las bacterias actúan como unidades de tratamiento únicas, asegurando que el proceso sea eficiente. (BioPetroClean, 2020)</p>

**Imagen**



*Figura 78.* Tratamiento quimiostático automatizado.  
(BioPetroClean, 2020)

(Elaboración propia)

### XIII. GLOSARIO

**Afluente.** Son las aguas residuales que entran a la planta de tratamiento.

**Aguas residuales.** Son las aguas de abastecimiento de una población después de haber sido modificadas por diversos usos.

**Alcantarillado pluvial.** El conjunto de tuberías, canalizaciones y obras accesorias para recolectar y conducir las aguas de lluvia.

**Alcantarillado público.** El conjunto de tuberías y obras accesorias utilizadas por la municipalidad, para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo ordinario o de tipo especial, o combinación de ambas que deben ser previamente tratadas antes de descargarlas a un cuerpo receptor.

**Bacterias.** Microorganismos vivos que se encuentran en las aguas residuales. Son las que hacen el trabajo de descomposición o degradación de las aguas residuales.

**Bacterias aerobias.** Son las bacterias que necesitan usar el oxígeno disuelto en el agua para poder trabajar.

**Bacterias anaerobias.** Son las bacterias que no necesitan usar el oxígeno disuelto en el agua para poder actuar o sobrevivir; estas utilizan el oxígeno de los sólidos orgánicos y de algunos inorgánicos.

**Contaminante.** Es toda materia o sustancia, sus combinaciones o compuestos, que al incorporarse o actuar con la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento ambiental, altera o modifica su composición y/o afecta la salud humana.

**Caudal.** El volumen de agua por unidad de tiempo.

**Coliformes fecales.** El parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas, provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales de sangre caliente.

**Cuerpo receptor.** Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.

**Efluente.** Son las aguas residuales que salen de la planta de tratamiento

**Sólidos.** Materia orgánica o inorgánica no disuelta. Son parte de las aguas residuales, proceden del agua de abastecimiento del uso industrial y doméstico.

**Sólidos sedimentables.** Es la parte de los sólidos que se depositarán en el fondo de un depósito de forma de cono (llamado tanque Imhoff).