

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD**

**LICENCIATURA  
QUÍMICA FARMACÉUTICA BIOLÓGICA**

Título de proyecto de servicio social:  
Actualidad y perspectivas en el uso de microorganismos para la purificación de agua residual  
(Revisión Bibliográfica)

**Alumna:** Fatima Corral Rosas

**Matricula:** 2163026106

**Vo. Bo. de los Asesores**



---

Dr. José Francisco Miranda Hernández  
No. Económico 39246  
Nombre y firma del asesor



---

Dra. Aída Hamdan Partida  
No. Económico 26343  
Nombre y firma del asesor

## Contenido

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>II.</b>	<b>OBJETIVO PRINCIPAL</b>	<b>2</b>
<b>III.</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>2</b>
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGÍA Y LUGAR DE REALIZACIÓN</b>	<b>3</b>
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>3</b>
<b>VI.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>3</b>
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>4</b>
<b>VIII.</b>	<b>PERSPECTIVAS</b>	<b>4</b>
<b>IX.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>5</b>
<b>X.</b>	<b>ANEXO 1. ARTÍCULO DE REVISION BIBLIOGRAFICA</b>	<b>7</b>

## **I. INTRODUCCIÓN**

La escasez de agua dulce y potable representa un gran problema a nivel mundial, menos del 3% de los recursos hídricos del mundo son agua dulce afectando principalmente a millones de personas que viven en zonas donde la vulnerabilidad hídrica es alta o extremadamente alta <sup>1</sup> esto debido a que no hay una buena gestión de este recurso, además de que día a día se contaminan cuerpos de agua, según el Banco Mundial 2020 <sup>2</sup> cerca del 80 % de las aguas residuales se vierten al medio ambiente sin haber recibido un tratamiento adecuado, estos residuos vertidos, como los efluentes domésticos (aguas negras y aguas grises), agua de establecimientos comerciales e instituciones (incluidos hospitales), efluentes industriales, aguas pluviales y otras escorrentías urbanas, así como también escorrentías agrícola, hortícola y acuícola <sup>3</sup> que contienen fertilizantes, pesticidas o químicos desembocan en las aguas dulces y acaban por contaminar también el agua salada. Este problema conlleva a que el agua que beben cientos de millones de personas se vea peligrosamente contaminada <sup>4</sup>.

El que se sigan contaminando los cuerpos de agua dulce, y que a su vez la demanda de este recurso ha ido en aumento en todo el mundo aproximadamente un 1% por año desde la década de 1980 <sup>5</sup>, y se espera que la demanda global de agua continúe aumentando a un ritmo similar hasta 2050 <sup>6</sup>, nos da un panorama de cómo irá en aumento la escasez de este recurso al aumentar drásticamente la demanda mientras que los recursos disminuyen, llegando a un punto donde será insostenible. Claro esto solo sería el inicio de otro gran problema, ya que al escasear de agua, no habría suficiente para lavarse las manos o incluso tener agua de calidad para beber, lo que desencadenaría en muchas personas enfermas.

Por esta razón, es necesario encontrar una manera de poder recuperar el agua contaminada. Hay una gran variedad de métodos para la descontaminación de aguas residuales (AR), sin embargo los métodos más comunes de tratamiento del agua dependen de que la energía (normalmente la electricidad) esté disponible 24 horas al día, lo que sucede raramente en la mayoría de los países en desarrollo <sup>7</sup>, dejándolos en una posición de desventaja.

Otra posibilidad para el tratamiento de aguas residuales es la utilización de microorganismos eficientes (EM), los cuales no generan subproductos contaminantes <sup>8</sup>, si no que pueden utilizar estos compuestos contaminantes presentes en las aguas como fuente de carbono y energía para su metabolismo y crecimiento. Es por esto que han sido reportados como una alternativa para solucionar los problemas de contaminación hídrica <sup>9</sup>.

## **II. OBJETIVO PRINCIPAL**

Revisión bibliográfica del uso de EM para el tratamiento y purificación de aguas residuales.

## **III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar problemática de escasez y contaminación del agua.
- Recopilar información de EM que ayuden en el tratamiento de aguas residuales mediante buscadores como Pubmed, Springer Link, SciELO, entre otros, así como también de recursos electrónicos disponibles en la BiDi-UAM-X.
- Identificar mecanismos que utilizan los EM para el tratamiento de aguas residuales

- Comparar ventajas y desventajas del uso de EM contra los métodos ya utilizados en el tratamiento de aguas residuales.

#### **IV. METODOLOGÍA Y LUGAR DE REALIZACIÓN**

Se desarrolló de forma remota, a partir de revisiones bibliográficas de recursos electrónicos disponibles en la Biblioteca digital de la Unidad Xochimilco (BiDi-UAM-X) así como también, de otros recursos obtenidos en la web. A partir de la información recopilada se realizó un artículo de revisión, en el cual se desglosa valiosa información acerca de la actualidad de las problemáticas del agua, específicamente de las aguas residuales, que son aguas con potencial para la recuperación de este recurso, además, también se desglosa mecanismos para llevarse a cabo, enfatizando en la utilización de microorganismos.

#### **V. RESULTADOS**

Hoy en día necesitamos alternativas para la obtención de agua, ya que nuestros recursos de agua se están agotando. En América Latina, el agua por persona ha disminuido un 22%, en el sur de Asia un 27% y en África Subsahariana hasta un 41% <sup>10</sup>. Una manera de recuperar agua y a su vez limpiar nuestro planeta es darle un reúso a las aguas residuales. Actualmente el planeta se ha saturado de basura y aguas contaminadas, las cuales ya no son totalmente filtradas por la tierra a la velocidad de antes debido a la saturación de esta. En el artículo “Riesgo de contaminación de aguas subterráneas ampliamente subestimado debido al rápido flujo hacia los acuíferos” de Andreas Hartmann y colaboradores, se cree que la contaminación a las aguas subterráneas es peor de lo que parece, ya que están siendo contaminadas con varios contaminantes que ya no están siendo filtrados, entre estos contaminantes se encuentran los pesticidas y fertilizantes provenientes de la agricultura, y también lixiviados de los residuos en la superficie (que tienen origen tanto de vertederos domésticos, como industriales) <sup>11</sup>, tan solo en México el 38.7% del agua utilizada en el país proviene de estas fuentes <sup>12</sup>; es por esto que se debe pensar en alternativas para solucionar el problema de la contaminación hídrica, una de ellas es la utilización de microorganismos que utilizan los compuestos contaminantes presentes en las aguas como fuente de carbono y energía para su metabolismo y crecimiento <sup>13</sup>, y al ser un proceso biológico, se espera que sean procesos más económicos y sencillos para la eliminación de contaminantes biodegradables, además de que los productos que se obtienen a partir de estos procesos, pueden ser aprovechados como el biogás que puede incluso generar recursos, haciendo el proceso más rentable <sup>14</sup>. Existen muchos procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales, desde digestión anaerobia hasta humedales artificiales, además de que igual se están empezando a estudiar y utilizar microorganismos eficientes para el tratamiento de las aguas, estos microorganismos eficientes constan de 5 grupos principales que son: bacterias ácido lácticas, bacterias fotosintéticas, levaduras, actinomicetes y hongos filamentosos con capacidad fermentativa, las cuales en conjunto coexisten y se complementan, teniendo mayores resultados positivos en grupo que de manera individual <sup>15</sup>. Se encontró que al utilizar estos microorganismos eficientes, se lograba reducir la DBO<sub>5</sub>, DQO, pH, SST, así como también coliformes, metales pesados y minerales.

#### **VI. DISCUSIÓN**

A partir de los resultados obtenidos, se entiende que la situación en la actualidad del agua, ya es un tema urgente a atender debido a la creciente demanda, escasez y contaminación de este recurso y una opción es sin duda el reutilizar el agua residual con procesos biológicos, ya que hay muchas opciones según el agua a tratar (industrial o doméstica) y el objetivo a obtener (mayor obtención de lodos o biogás). Los lodos pueden ser utilizados en los cultivos, enriqueciendo y mejorando los suelos, y el biogás (principalmente obtenido de los procesos anaerobios) se puede utilizar como recurso energético. Otra ventaja de estos procesos, es que suelen ser procesos sencillos y más económicos.

En el proyecto se desglosan varios procesos biológicos, tanto los convencionales que ya son utilizados en el tratamiento del agua residual (como por ejemplo, los lodos activados), así como la utilización de microorganismos eficientes que son originalmente utilizados en el campo para la mejora de los suelos (que consta de un conjunto de microorganismos que hacen simbiosis entre sí), sin embargo, se ha notado que estos también pueden funcionar para el tratamiento de las aguas residuales, utilizando los contaminantes como nutrientes y fuentes de carbono. Una desventaja de la utilización de microorganismos, es que no pueden ser utilizados en aguas con algún inhibidor de crecimiento de microorganismos (biocidas), por lo que sería importante desde un principio regular los desechos que se vierten en el agua para darle un tratamiento más adecuado.

## **VII. CONCLUSIÓN**

Hay muchas maneras de aprovechar mejor el recurso del agua, como una mejor gestión del agua, o regular los desechos y químicos que son vertidos en el agua (medicamentos, aceites, etc.) y el cómo tratar y recuperar el agua que es utilizada en hogares e industrias. Es un tema de urgencia mundial, debido a que la falta de agua potable, limpia y accesible está cada vez más limitada, y ya muchos países sufren estrés hídrico.

El tratamiento de las aguas residuales mediante procesos biológicos es una gran alternativa, debido a su sencillez y fácil aplicación, además de ser más económico; sin embargo, aún es un tema que se debe seguir estudiando, por ejemplo, conocer cuáles bacterias, hongos, etc., son las más eficientes para qué tipo de agua, para poder darle un tratamiento más específico a las aguas según sean sus necesidades, y así poder optimizar más el proceso. Además de tener una especial atención ante los contaminantes emergentes y analizar si estos procesos biológicos son capaces de eliminarlos.

## **VIII. PERSPECTIVAS**

Aún falta seguir estudiando acerca de los microorganismos para el tratamiento del agua, un tema interesante sería la utilización de enzimas de estos microorganismos las cuales actúen de manera específica con el contaminante, precipitando y eliminándolo, o bien, transformándolo en otros productos, haciéndolo un proceso más eficiente que consuma menos energía y por lo tanto, teniendo aún menores costos.

También otro panorama a explorar sería la evolución dirigida en el cual se busca mejorar o crear nuevas funciones enzimáticas de las proteínas de los microorganismos, incrementando la eficacia de las enzimas hacia los contaminantes de interés.

## IX. REFERENCIAS

1. UNICEF. Reimagining WASH. Water Security for All [Internet]. [Consultado 06 de septiembre de 2021], Disponible en: <https://www.unicef.org/reimagining-wash-water-security-for-all>
2. Banco Mundial. El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial [Internet]; 19 de marzo de 2020. [Consultado 06 de septiembre de 2021], Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>
3. Raschid-Sally L, Jayakody P. Drivers and Characteristics of Wastewater Agriculture in Developing Countries: Results from a Global Assessment. IWMI Informe de Investigación N° 127. [Internet]. Colombo, Sri Lanka: 2008 [Consultado 04 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.iwmi.cgiar.org/publications/iwmi-research-reports/iwmi-research-report-127/>
4. Vázquez E. Contaminación del agua: causas, consecuencias y soluciones. [Internet]. 2017 [Consultado 01 de septiembre de 2021], Disponible en: <https://agua.org.mx/contaminacion-del-agua-causas-consecuencias-soluciones/>
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture. Uso del agua. [Internet]. 2021. [Consultado 29 de agosto de 2021]. Disponible en: <http://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>
6. Burek P, Satoh Y, Fischer G, et al. Water Futures and Solution - Fast Track Initiative (Final Report). Laxenburg, Austria: IIASA; 2016. [Consultado 29 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13008/>
7. WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. NO DEJAR A NADIE ATRÁS. [Internet]. París: UNESCO; 2019. [Consultado 29 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>
8. López MV. Tratamiento biológico de aguas residuales en perspectiva de la biotecnología en México. México: Editorial CONACYT; 1981: 259-284.
9. Romero T, Vargas D. Uso de microorganismos eficientes para tratar aguas contaminadas. Ingeniería Hidráulica y Ambiental [Internet] 2017. [Consultado 01 de septiembre de 2021]; 38(3): 88-100. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382017000300008&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000300008&lng=es&tlng=es)
10. Louzada C. El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático [Internet]. Angola: UNICEF; 2020 [Consultado 19 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732#:~:text=Imprimir%20Correo%20electr%C3%B3nico,El%20agua%2C%20un%20recurso%20que%20se%20agota%20por%20el%20crecimiento,poblaci%C3%B3n%20y%20el%20cambio%20clim%C3%A1tico&text=En%20Am%C3%A9rica%20Latina%20la%20disponibilidad,ponen%20en%20riesgo%20su%20supervivencia>
11. Hartmann A, Jasechko S, Gleeson T, et al. Risk of groundwater contamination widely underestimated because of fast flow into aquifers. Proc. Natl. Acad. Sci. [Internet]. 2021 [Consultado 19 de noviembre de 2022]; 118(20): 1-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.2024492118>
12. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Aguas subterráneas [Internet]. México: Gobierno de México; 2019 [Consultado 19 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterranas#:~:text=El%20agua%20se%20encuentra%20siempre,en%20toda%20la%20corteza%20terrestre.&text=Con%20respecto%20al%20agua%20subterr%C3%A1nea,pa%C3%ADs%20proviene%20de%20estas%20fuentes>
13. Romero T de J, Vargas D. Uso de microorganismos eficientes para tratar aguas contaminadas. Riha. [Internet]. 2017 [Consultado 23 de noviembre de 2022]; 38(3): 88-100. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382017000300008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000300008)

14. Condorchem Envitech. Tratamiento biológico de aguas residuales [Internet]. 2022 [Consultado 19 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://condorchem.com/es/tratamiento-biologico-aguas-residuales/>
15. Morocho T, Leiva-Mora M. Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. Ctro. Agr. [Internet]. 2019 [Consultado 23 de noviembre de 2022]; 46(2): 93-103. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0253-57852019000200093](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093)



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Unidad Xochimilco

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD**  
**LICENCIATURA QUIMICA FARMACEUTICA**  
**BIOLOGICA**

“Actualidad y perspectivas en el uso de microorganismos para la  
purificación de agua residual (Revisión Bibliográfica)”

Alumna: Fatima Corral Rosas

Tutores:

Dr. José Francisco Miranda Hernández No. Económico 39246

Dra. Aída Hamdan Partida No. Económico 26343



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
1.1. Actualidad de la problemática de escasez y contaminación del agua en el mundo.	12
1.2. Situación en México	13
1.3. Consecuencias de escasez de agua	15
1.3.1. Enfermedades debido a la escasez de agua	15
1.3.2. Mortalidad	15
1.3.3. Ecosistemas	15
1.3.4. Conflictos por escasez de agua	16
1.4. Causas de escasez de agua	17
1.4.1. Cambio climático	17
1.4.2. Uso descontrolado del agua	17
1.4.3. Aumento de demanda por aumento de población	18
1.4.4. Contaminación del agua	19
<b>2. AGUAS RESIDUALES Y SU IMPACTO</b>	<b>19</b>
2.1. Aguas residuales	19
2.1.1. Tipos de aguas residuales según su origen	19
2.1.2. Componentes de las aguas residuales	20
2.1.3. Clasificación de los componentes de las aguas residuales:	21
2.1.4. Clasificación de las aguas residuales según su tratamiento.	22
2.1.5. Aguas residuales tratadas en México	22
2.2. Impacto de las aguas crudas al ser humano y al medio ambiente.	24
2.3. Normas de calidad del agua	28
2.4. Aguas residuales como recurso	30
<b>3. TRATAMIENTO Y PURIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES</b>	<b>32</b>
3.1. Tipos de tratamientos	36
3.1.1. Tratamientos físicos	36
3.1.2. Tratamientos químicos	36
3.1.3. Tratamientos Biológicos	36
3.1.3.1. Lodos activados	37
3.1.3.2. Lagunas aireadas	40
3.1.3.3. Filtros verdes	40
3.1.3.4. Lechos bacterianos	41
3.1.3.5. Digestión anaerobia	41
3.1.3.6. Eliminación Biológica Incrementada de Fósforo	44
3.2. Etapas de tratamiento	50

3.2.1. Pretratamiento	50
3.2.2. Tratamiento primario	51
3.2.3. Tratamiento secundario	51
3.2.4. Tratamiento terciario o avanzado	52
3.2.5. Eliminación de contaminantes emergentes	53
<b>4. MICROORGANISMOS PARA EL TRATAMIENTO Y PURIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES</b>	<b>54</b>
4.1. Microorganismos eficientes	54
4.2. Tipos de Microorganismos Eficientes	55
4.2.1. Bacterias Ácido Lácticas	55
4.2.2. Bacterias Fototróficas	56
4.2.3. Levaduras	57
4.2.4. Actinomicetos	57
4.2.5. Hongos de Fermentación	58
4.3. Propiedades funcionales de los EM en el tratamiento de las aguas residuales	59
4.3.1. Ejemplos de EM en el tratamiento de aguas residuales	60
<b>5. PERSPECTIVAS DE FUTURO</b>	<b>62</b>
5.1. Enzimas para el tratamiento de aguas residuales	62
5.2. Evolución dirigida de microalgas para la eliminación de metales pesados.	63
<b>6. REFERENCIAS</b>	<b>64</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Riesgo global de escasez de agua según el porcentaje de suministro disponible que es extraído anualmente para su uso en la agricultura, industria y municipios	12
Figura 2. Países con mayor riesgo de escasez de agua según su porcentaje de suministro disponible que es extraído anualmente	13
Figura 3. Sequía del agua en México el 15 de marzo de 2021	14
Figura 4. Evolución y porcentaje de área del país afectada con una o varias categorías de sequía a nivel nacional	14
Figura 5. Porcentaje de agua desperdiciada de las primeras 15 de las 48 ciudades seleccionadas por la OCDE con más desperdicio en el 2012	18
Figura 6. Representación gráfica del aumento esperado de la población hacia el año 2050	19
Figura 7. Tipos de aguas residuales	20
Figura 8. Componentes de las aguas residuales	21
Figura 9. Tipos de aguas residuales. Aguas crudas y aguas residuales tratadas	22
Figura 10. Aguas residuales municipales generadas por entidad federativa, 2012	23
Figura 11. Aguas residuales municipales que reciben tratamiento, por entidad federativa, 2012	23
Figura 12. Zona muerta en el Golfo de México	27
Figura 13. Aguas residuales como recurso	31
Figura 14. Ejemplo de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)	32
Figura 15. EDAR en el mundo y la población servida	33
Figura 16. Porcentaje de población que es servida por las EDAR de los países de ejemplo	34
Figura 17. Proporciones de aguas residuales tratadas en el sistema fluvial global	35
Figura 18. Metabolismo de los organismos acumuladores de polifosfato bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas	45
Figura 19. Métodos de tratamientos químicos para las aguas residuales	47
Figura 20. Métodos de tratamiento físico de aguas residuales	48
Figura 21. Métodos de tratamientos biológicos para las aguas residuales	49
Figura 22. Tipos de métodos para el tratamiento de aguas residuales	50
Figura 23. Pre-tratamientos de las aguas residuales	51
Figura 24. Tratamiento primario y secundario de las aguas residuales	52
Figura 25. Tratamiento terciario de las aguas residuales	53
Figura 26. Principales Microorganismos Eficientes	55
Figura 27. Sinergia de los Microorganismos Eficientes	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Los microbios en las aguas residuales no tratadas adecuadamente se liberan al medio ambiente y provocan diversos problemas de salud	24
Tabla 2. Porcentaje de alcantarillado y porcentaje de tratamiento de aguas de alcantarilla del año 1990 y 2010	26
Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al público según la NOM-003-SEMARNAT-1997	28
Tabla 4. Cuadro comparativo entre DBO y DQO	29
Tabla 5. Datos sobre las EDAR en algunos países del mundo.	34
Tabla 6. Ríos que contienen más del 10% de agua residual tratada en su caudal, con su respectivo porcentaje y nivel de tratamiento	35
Tabla 7. Tabla comparativa de distintos sistemas de tratamiento de aguas residuales	38
Tabla 8. Bacterias aisladas en un reactor anaerobio	42
Tabla 9. Composición de producto Versaklin	60
Tabla 10. Comparación de resultados de la biorremediación con las cepas aplicadas	61
Tabla 11. Efecto de EM sobre las características físico químicas y microbiológicas del agua de riego	62

## ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

<b>SACMEX</b>	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
<b>SMN</b>	Servicio Meteorológico Nacional
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud
<b>UNEP</b>	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
<b>OECD</b>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
<b>pH</b>	Potencial hidrógeno
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>SST</b>	Sólidos suspendidos totales
<b>SS</b>	Sólidos suspendidos
<b>OD</b>	Oxígeno disuelto
<b>HydroWASTE</b>	Base de datos global de EDAR
<b>EDAR</b>	Plantas de tratamiento de aguas residuales
<b>UICN</b>	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
<b>PAOs</b>	Organismos acumuladores de fósforo
<b>EBIF</b>	Eliminación Biológica Incrementada de Fósforo
<b>EBPR</b>	Remoción del fósforo biológicamente mejorada
<b>OAF</b>	Organismos acumuladores de polifosfatos
<b>PHA</b>	Polihidroxialcanoatos
<b>PHV</b>	Polihidroxivalerato
<b>PHB</b>	Polihidroxibutirato
<b>VFAs</b>	Ácidos grasos volátiles
<b>OAFDN</b>	Organismos acumuladores de fósforo con capacidad desnitrificadora
<b>ORP</b>	Potencial de oxidación-reducción
<b>EM</b>	Microorganismos eficientes
<b>BAL</b>	Bacterias Ácido Lácticas
<b>HM</b>	Metales pesados

## RESUMEN

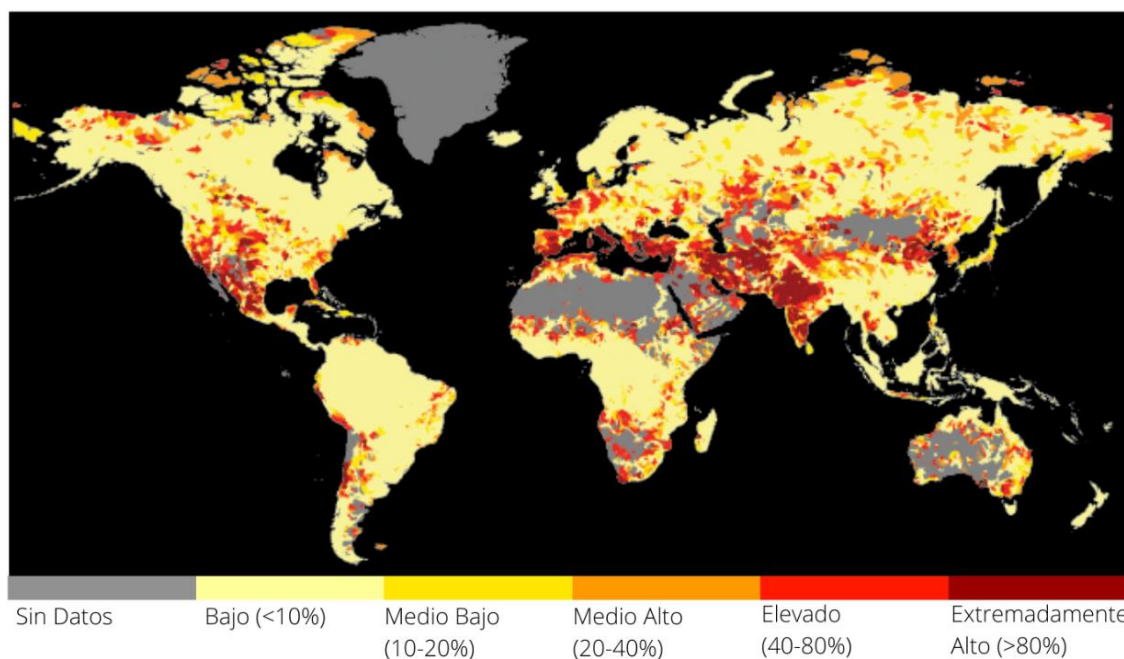
En este trabajo se da una perspectiva del presente y de lo que se espera del futuro en el tratamiento de las aguas residuales, resaltando que el uso de microorganismos en estos procesos puede ser muy beneficioso por su bajo costo, además de que puede incluso generar recursos a partir de los productos que generan estos microorganismos, lo cual puede convertirse en procesos rentables.

**Palabras clave:** Tratamiento, aguas residuales, microorganismos

## 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Actualidad de la problemática de escasez y contaminación del agua en el mundo.

A pesar de que la superficie del planeta en su mayoría es agua (75%), sólo 2.5% es agua dulce proveniente de lagos, ríos, atmósfera (<1%), aguas subterráneas (30%), glaciares y capas polares (70%) <sup>1</sup> dando un total de agua dulce disponible y apta para consumo humano de aproximadamente del 0.025% <sup>2</sup>. De igual forma, es importante considerar el efecto que tiene, en esta problemática, el aumento de la temperatura global, ya que este altera el comportamiento de los océanos y los ciclos del agua. Se estima que por cada grado de calentamiento global, aproximadamente un 7% de la población mundial estará expuesta a una disminución de al menos 20% de los recursos hídricos renovables <sup>3</sup>.



**Figura 1.** Riesgo global de escasez de agua según el porcentaje de suministro disponible que es extraído anualmente para su uso en la agricultura, industria y municipios <sup>5</sup>.

La escasez de agua es un fenómeno natural, pero también un fenómeno inducido por los seres humanos al ser desperdiciada, contaminada y manejada de manera insostenible, lo cual afecta al suministro o calidad del agua, de forma que la demanda no puede ser completamente satisfecha <sup>4</sup>. Más de 1.000 millones de personas viven actualmente en regiones con escasez de agua, siendo países ubicados en Oriente Medio y el Norte de África como Qatar, Israel, Líbano, etc., los más afectados (Figura 1 y 2) <sup>5</sup>. Sin embargo, se espera que para el 2025 estas cifras se eleven hasta incluso a los 3.500 millones de personas con escasez de agua debido a la gestión insostenible y al cambio climático <sup>6</sup>. Esta escasez se mide según el porcentaje de suministro de agua disponible que es extraído anualmente para su uso en la agricultura, la industria y los municipios. Cuando hay una brecha tan estrecha entre la oferta y la demanda del agua, deja a los países vulnerables a las sequías o la necesidad de mayor volumen de extracción de agua, razón por la cual vemos que cada vez más comunidades enfrentan sus propios “días cero” y otras crisis <sup>5</sup>.



**Figura 2.** Países con mayor riesgo de escasez de agua según su porcentaje de suministro disponible que es extraído anualmente <sup>5</sup>.

## 1.2. Situación en México

La situación de México (Figura 1 y 2) es de un riesgo elevado ubicándose en el lugar No. 24 de los países con más riesgo. Más de la mitad del territorio nacional se encuentra en una situación de muy alto estrés, mayormente en el noroeste. En contraste, en otras regiones hay agua en abundancia. Es el caso de Tabasco, ya que alrededor de la mitad de su territorio, es un humedal compuesto por suelos inundables en formación <sup>7</sup>. De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 83,9% del territorio nacional sufre sequías intensificadas desde el 15 de marzo de 2021 por la disminución en el porcentaje de lluvias (Figura 3 y 4). Además, varios estados del país han registrado temperaturas superiores a los 40°C, principalmente en las regiones normalmente húmedas de Campeche, Chiapas, Michoacán, Quintana Roo, Veracruz y Yucatán (Monitor de Sequía en México <sup>8</sup>).

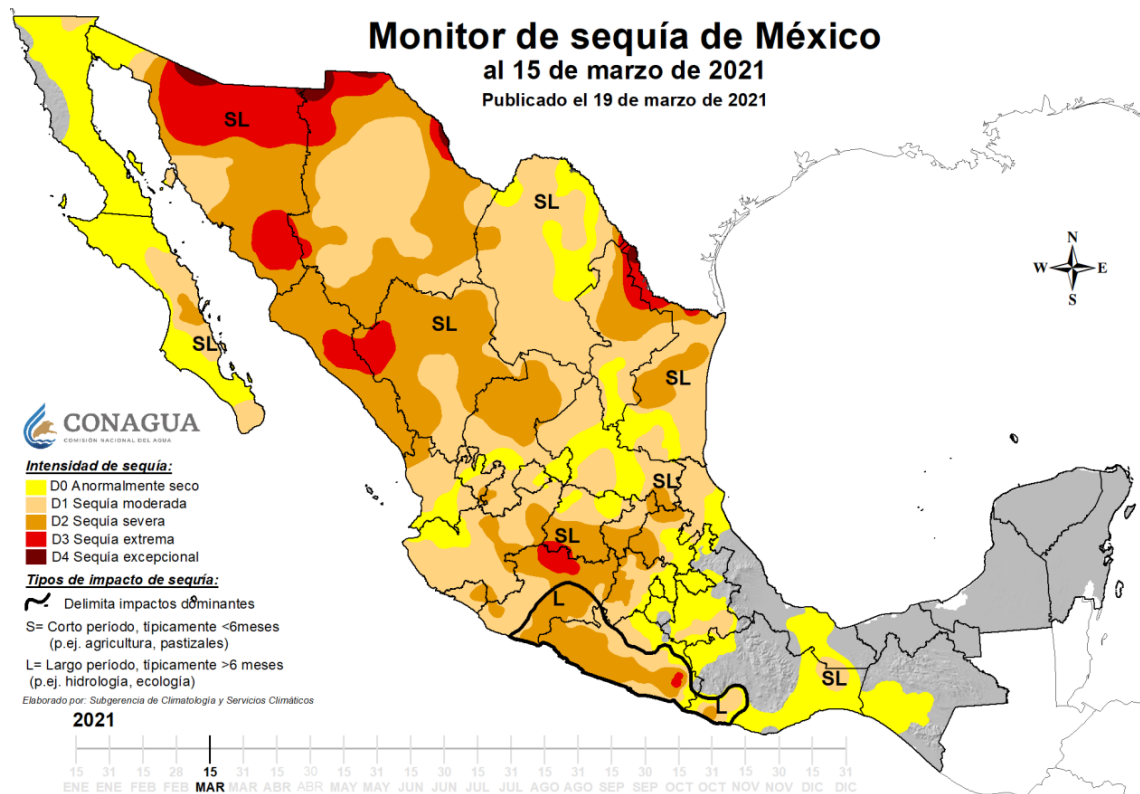


Figura 3. Sequía del agua en México el 15 de marzo de 2021<sup>8</sup>.

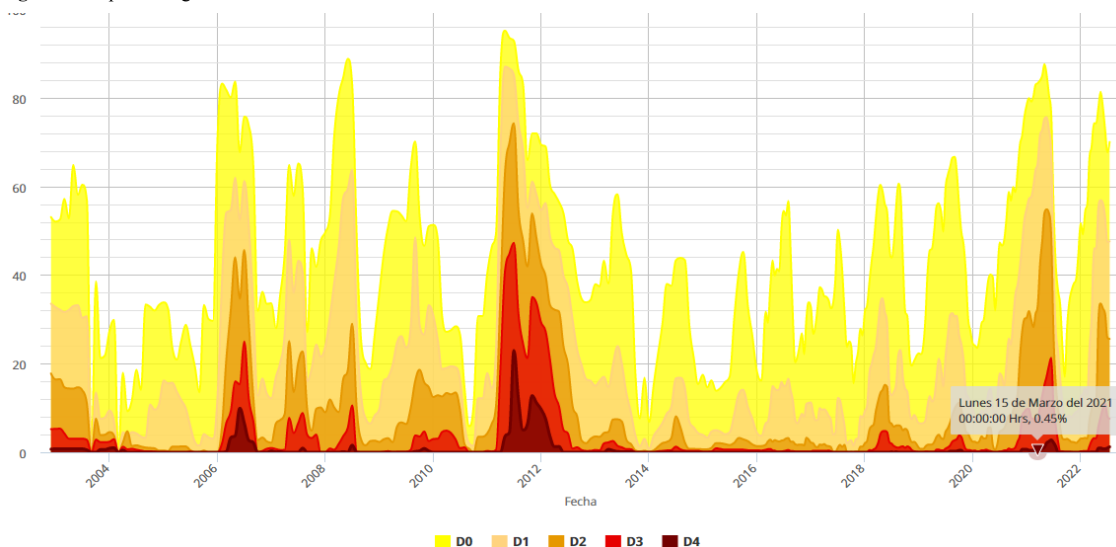


Figura 4. Evolución y porcentaje de área del país afectada con una o varias categorías de sequía a nivel nacional<sup>8</sup>.

Tan solo en la Ciudad de México, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) envía 32,100 litros de agua potable cada segundo, de los cuales el Sistema Cutzamala provee al Valle de México 32%; el otro 68% se obtiene de vías subterráneas y pozos. La recarga total de agua de los acuíferos de la cuenca del Valle de México es de cerca de 25m<sup>3</sup> por segundo; no obstante, lo que se extrae en realidad equivale a 55m<sup>3</sup> por segundo. Esto quiere decir que lo que se recarga es menos del 50% de lo que se usa, lo que genera un déficit de 800 millones de metros cúbicos de agua por año para la población. Y aunque 32 mil litros parecen mucho, en realidad no es suficiente para abastecer a más de 21 millones de habitantes que requieren agua diaria para sus necesidades básicas

de higiene y alimentación. La falta de lluvia es central pero no es el único factor que provoca la escasez de agua potable en los hogares del Valle de México. También afecta la mala calidad del agua, el acceso inequitativo, la mala gestión y el uso descontrolado de este recurso.

La mayor parte del agua que se usa en la CDMX se extrae de pozos, sin embargo, no toda la que se extrae es apta para consumo, ya que, en algunos casos, el agua del subsuelo ha presentado un incremento en su concentración de metales como arsénico, boro, hierro, manganeso y plomo, así como compuestos químicos, fármacos, antibióticos y otros contaminantes emergentes. Además en México no sólo hay poca agua sino que está distribuida bajo criterios desiguales. Mientras que en alcaldías como Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo, en las que predominan viviendas de nivel socioeconómico medio-alto, sólo el 0.1% de estas no disponen de agua entubada, en alcaldías como Milpa Alta, esta cantidad se eleva al 11%<sup>9</sup>.

### 1.3. Consecuencias de escasez de agua

Los problemas que trae consigo esta escasez de agua van desde problemas políticos, en el cual se crean conflictos relacionados con el agua, hasta la muerte de muchas personas a causa de enfermedades. A continuación se abordarán las principales consecuencias.

#### 1.3.1. Enfermedades debido a la escasez de agua

Estas enfermedades son originadas debido a la falta de higiene y/o consumo de aguas contaminadas, debido a la escasez de agua y/o falta de sistemas de potabilización adecuados, afectando principalmente a niñas, niños y adultos mayores.

Con base a los datos de la Organización Mundial de la Salud, se puede afirmar que el agua contaminada puede transmitir enfermedades como diarrea, cólera, hepatitis A, disentería, poliomielitis, fiebre tifoidea, entre otras<sup>10</sup>.

#### 1.3.2. Mortalidad

Según la OMS, 2020 las enfermedades diarreicas provocan anualmente 1,5 millones de muertes. De ellas, más de 840.000 (56% del total de muertes) tienen su causa en la falta de agua salubre junto a una higiene y un saneamiento insuficientes. Un 40% de muertes en menores son producidas por el consumo de agua en mal estado o por carencia de higiene en una situación de emergencia.

También, la falta de agua, puede producir deshidratación, al no tener agua para consumir, o bien, hambre, debido a que sin agua no se pueden llevar a cabo actividades como la agricultura, la ganadería y la industria y, por lo tanto, hay escasez de alimento<sup>11</sup>.

#### 1.3.3. Ecosistemas

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), en su informe Towards a Pollution-Free Planet<sup>12</sup>, alerta sobre los efectos del agua dulce en mal estado sobre el medio ambiente, ya que impacta sobre los



hábitats provocando la pérdida de la biodiversidad acuática y facilita la floración de algas nocivas o la eutrofización, generando cambios en los ecosistemas y sus servicios (incluida la mejora de la calidad del agua). Los cuerpos de agua dulce se ven muy afectados por la contaminación, particularmente por pesticidas y nutrientes provenientes de la agricultura (principalmente nitrógeno y fósforo), patógenos de aguas residuales no tratadas y metales pesados de la minería <sup>13</sup>. Los pesticidas pueden generar en el ser humano, problemas reproductivos, cáncer, trastornos del sistema neurológico, efectos sobre el sistema inmunológico y alteraciones del sistema endocrino <sup>14</sup>, mientras que en el ecosistema puede generar envenenamiento directo o cambios en los niveles de la población y distribución de especies. Los cambios en la población pueden ser el resultado de la toxicidad directa o los efectos subletales que se manifiestan tales como la reducción del tiempo de vida, tasas de desarrollo, fertilidad, fecundidad, proporción de sexos y comportamiento (por ejemplo, alimentación, forrajeo y reproducción) <sup>15</sup>. Mientras que los nutrientes ayudan a la proliferación de algas nocivas que deterioran la calidad del agua, los alimentos y los hábitats, y reduce el oxígeno que los peces y otras especies acuáticas necesitan para vivir <sup>16</sup>; y la ingestión de agua con contenido de metales y metaloides como el arsénico, cadmio, plomo y mercurio puede producir daños neuronales, problemas estomacales, parálisis parcial, ceguera y ciertos cánceres en piel, pulmón, hígado, riñón y próstata <sup>17</sup>. Otro factor importante es la presencia cada vez mayor de productos farmacéuticos y antimicrobianos nocivos, que genera desde problemas en organismos acuáticos, bioacumulándose y manifestándose en condiciones irreversibles para estas especies, hasta promover la generación de microorganismos resistentes <sup>18</sup>. Otro problema es la desaparición de especies vegetales y animales, pues tanto las plantas como los animales necesitan una gran cantidad de agua, y sin ella simplemente no pueden vivir <sup>13</sup>.

#### 1.3.4. Conflictos por escasez de agua

La creciente escasez mundial de agua puede desencadenar conflictos violentos, que a su vez pueden amplificar los flujos migratorios, esto debido a su distribución desigual de este recurso, por ejemplo, en Canadá se tiene mucha más agua dulce renovable por año (2.850 millones de m<sup>3</sup>) que Libia (mil millones de m<sup>3</sup>). Además de la distribución desigual, hay otros factores que están involucrados como el poder adquisitivo, el cual es un determinante importante del acceso a los recursos ya que los estados ricos pueden importar agua o desalinizar agua de mar, mientras que los países pobres tienen más dificultades para hacerlo. Además de que hay países o regiones que hacen uso de represas, planificación del uso de la tierra, explotación de aguas subterráneas y gestión de la demanda (lo que los hace más eficaces pero no necesariamente más sostenible). Otro punto que influye son las emergencias a gran escala, como guerras y terremotos, que pueden limitar (temporalmente) la disponibilidad de recursos naturales. La desigualdad entre países y regiones, a medida que se incremente la escasez de agua, podría aumentar la frecuencia de conflictos. Ejemplo de lo anterior, fue la guerra civil en Siria, en el cual se argumenta que la escasez de agua fue una de las razones de su inicio, y por lo tanto, también fue causante indirecto del desplazamiento masivo de refugiados hacia los países vecinos y Europa <sup>19</sup>. Otro ejemplo es en Irak, donde se hacen manifestaciones donde se exige a las autoridades acciones concretas ante la creciente crisis del agua en la ciudad <sup>20</sup>.

## 1.4. Causas de escasez de agua

### 1.4.1. Cambio climático

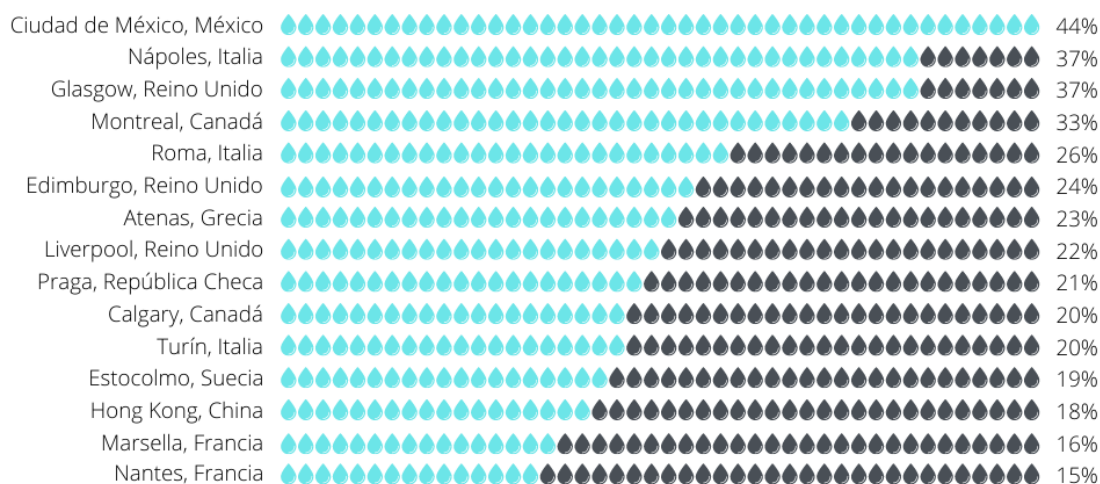
El aumento de la temperatura global altera el comportamiento de los océanos y los ciclos de agua. En el último decenio, más del 90% de los grandes desastres naturales se produjeron a causa de inundaciones, tormentas, olas de calor, sequías y otros fenómenos meteorológicos. Estos fenómenos meteorológicos arrastran suministros enteros de agua o los contaminan con cargas de sedimentos, nutrientes y contaminantes. Esto afecta los ecosistemas de agua dulce y en consecuencia su consumo humano. El calentamiento global también repercute en la disponibilidad del agua. Se estima que por cada grado de calentamiento global, aproximadamente un 7% de la población mundial estará expuesta a una disminución de al menos 20% de los recursos hídricos renovables <sup>21</sup>.

En México, una amplia región del centro y norte de México presentaba ya en 2005 condiciones de disponibilidad de agua muy baja, y en la cuenca del valle de México, extremadamente baja. Por el crecimiento poblacional, el desarrollo económico regional y la concentración en algunas zonas urbanas, se espera que para el año 2030 varias regiones hidrológicas de importancia y gran extensión tengan una disponibilidad extremadamente baja, entre ellas la cuenca del río Bravo <sup>9</sup>.

Las variaciones de temperatura, nivel del mar y deshielos observados y registrados en las últimas décadas en el hemisferio norte, y en particular en el trópico de cáncer, en el que se ubica México, confirman su alta vulnerabilidad ante el cambio climático. En general, en latitudes medianas y zonas subtropicales se prevén importantes disminuciones en la precipitación y por ende en el escurrimiento, lo que ocasionará escasez y presión sobre los recursos hídricos en tales regiones. Estas condiciones se están registrando ya en algunas de las principales cuencas hidrológicas de México y, de no adoptarse medidas de adaptación, estará en riesgo la suficiencia alimentaria del país. Por otra parte, se esperan lluvias más intensas y eventos extremos, que incrementarán la vulnerabilidad de algunas cuencas del sureste que ya registran problemas de inundaciones. Para lidiar con estos y otros efectos del cambio climático en el territorio mexicano, se requiere de mejores modelos basados en escenarios de cambio climático, y diseñar y priorizar acciones de adaptación en las regiones hidrológicas más vulnerables <sup>22</sup>.

### 1.4.2. Uso descontrolado del agua

El uso global de agua se ha multiplicado por seis en los últimos 100 años y sigue aumentando a un ritmo constante de un 1% cada año debido al crecimiento demográfico, al desarrollo económico y al cambio de los patrones de consumo <sup>23</sup>. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD por sus siglas en inglés) en su informe “Water Governance in Cities” (La Gobernanza del Agua en las Ciudades) del 2016, comunicó el desperdicio de agua a nivel mundial, para esto hizo una selección de 48 urbes del mundo basándose en criterios de seguridad del agua, abastecimiento, saneamiento, manejo y tratamiento de aguas residuales y drenajes (Figura 5).



**Figura 5.** Porcentaje de agua desperdiciada de las primeras 15 de las 48 ciudades seleccionadas por la OCDE con más desperdicio en el 2012 basándose en criterios de seguridad del agua, abastecimiento, saneamiento, manejo y tratamiento de aguas residuales y drenajes <sup>24</sup>.

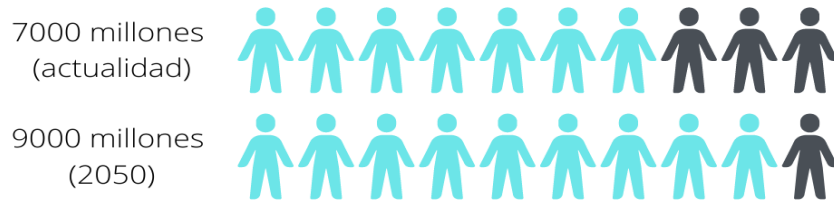
La principal causa por las que se desperdicia el agua en las ciudades suele ser una infraestructura deficiente, aunque muchos otros factores influyen en el escaso aprovechamiento del agua. Por ejemplo, en Ciudad de México, donde se desperdicia casi la mitad del agua gestionada, se combinan la baja calidad del agua, las frecuentes inundaciones, la falta de irrigación (sistemas de riego), un sistema de bombeo obsoleto (en algunos sectores tiene hasta 70 años de antigüedad y están fabricados con materiales catalogados como cancerígenos por la Organización Mundial de la Salud), fugas habituales y el mal aprovechamiento del agua de lluvia <sup>25</sup>. El promedio de agua que se pierde cada año por envejecimiento de tuberías es de 20%, pero en México, la capital pierde hasta 40% y otras ciudades hasta 60%. La ciudad con las mayores pérdidas de agua anuales es Tuxtla Gutiérrez, Chiapas que superó el 60%, le siguieron la capital de San Luis Potosí con 50%; Chihuahua y la Ciudad de México con 40%. Los niveles de pérdida de agua en ciudades mexicanas debido a sistemas obsoletos son los más altos entre los países de la OCDE <sup>24, 26</sup>.

#### 1.4.3. Aumento de demanda por aumento de población

Los recursos de agua dulce disponibles por persona han disminuido en más de un 20% a nivel mundial en las últimas dos décadas debido al crecimiento de la población y el desarrollo económico, exacerbados por el cambio climático. En América Latina, el agua por persona ha disminuido un 22%, en el sur de Asia un 27% y en África Subsahariana hasta un 41%, y de no tomar medidas la tendencia continuará <sup>27</sup>.

El estudio de los sistemas de abastecimiento hídrico a través de la medición de la oferta y la demanda de agua son habituales, pero a largo plazo la respuesta a la sostenibilidad de dichos sistemas es exógena a los mismos. Los problemas de abastecimiento hídrico futuros están estrechamente vinculados al crecimiento de la población <sup>28</sup>. El índice de extracción de aguas subterráneas ha aumentado un 1% anual desde los años 80. La población mundial aumentará en un 33% entre 2011 y 2050 (Figura 6), pasando de 7.000 a 9.000 millones de personas y la demanda de alimentos aumentará en un 70% en el mismo periodo <sup>29</sup>.

## Aumento de población mundial



**Figura 6.** Representación gráfica del aumento esperado de la población hacia el año 2050 <sup>29</sup>.

### 1.4.4. Contaminación del agua

La contaminación del agua es la contaminación de las fuentes de agua por sustancias que inutilizan el agua para beber, cocinar, limpiar, nadar y otras actividades. Los contaminantes incluyen productos químicos, basura, bacterias y parásitos. Todas las formas de contaminación eventualmente llegan al agua. La contaminación del aire se deposita en lagos y océanos. La contaminación del suelo puede filtrarse a una corriente subterránea, luego a un río y finalmente al océano. Por lo tanto, los desechos vertidos en un lote baldío pueden eventualmente contaminar un suministro de agua <sup>30</sup>.

## 2. AGUAS RESIDUALES Y SU IMPACTO

### 2.1. Aguas residuales

Las aguas residuales (también conocidas como aguas negras o cloacales), son aguas contaminadas con impurezas como materia orgánica y otras sustancias químicas que alteran su calidad original de manera negativa por influencia antropogénica. Estas provienen de vertidos de diferentes orígenes como de actividades comerciales, agrícolas, pecuarias, domésticas e industriales <sup>31</sup>.

#### 2.1.1. Tipos de aguas residuales según su origen

- Aguas residuales urbanas: Son aguas residuales domésticas o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial.
- Aguas residuales domésticas: Las procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano (heces y orín) y las actividades domésticas como la limpieza, la cocina, etc.

- Origen agrícola/ganadero: Son el resultado del riego y de otras labores como las actividades de limpieza ganadera, que pueden aportar al agua grandes cantidades de estiércol y orines, es decir, mucha materia orgánica, nutrientes y microorganismos.
- Origen industrial: Proceden de restos de agua utilizada como medio de transporte de sustancias y calor, en lavado y enjuague, en las transformaciones químicas, como disolvente y subproducto de procesos físicos de filtración o destilación, etc.
- Origen pluvial: Al llover, el agua arrastra toda la suciedad que encuentra a su paso, y que puede darse en cualquiera de los tres casos anteriores. En las ciudades esta agua arrastra aceites, materia orgánica y diferentes contaminantes de la atmósfera, en el campo arrastran pesticidas, abonos, etc., y en zonas industriales arrastra las sustancias que se han caído sobre el terreno.
- Origen fluvial (navegación): En rutas de navegación, los vertidos de petróleo, accidentales o no, provocan importantes daños ecológicos.



**Figura 7.** Tipos de aguas residuales. Las aguas residuales se pueden dividir en 3 grupos principales: Aguas residuales urbanas, domésticas e industriales.

### 2.1.2. Componentes de las aguas residuales

- Sedimentos y materiales suspendidos: Partículas desprendidas del suelo y arrastradas a las aguas. Junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas, son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua.
- Microorganismos patógenos: son los diferentes tipos de microorganismos (bacterias, virus, protozoos y otros organismos microscópicos) que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc. Llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas.
- Desechos orgánicos: son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. Incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno.
- Sustancias químicas inorgánicas: ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo.

- Nutrientes vegetales inorgánicos: Nitratos y fosfatos en cantidad excesiva. Inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas.
- Compuestos inorgánicos: Moléculas inorgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc.
- Sustancias radiactivas: Isótopos radiactivos solubles que se acumulan a lo largo de las cadenas tróficas.
- Contaminación térmica: El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses. Esto disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos <sup>32</sup>.

### 2.1.3. Clasificación de los componentes de las aguas residuales:

- Físicos: El color, el olor, los sólidos y la temperatura.
- Químicos:
  - Orgánicos: carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, contaminantes prioritarios, agentes tensoactivos, compuestos orgánicos volátiles, etc.
  - Inorgánicos: alcalinidad, cloruros, metales pesados, nitrógeno, PH, fósforo, contaminantes prioritarios y azufre.
  - Gases: sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno.
- Biológicos: Animales, plantas y microorganismos.



**Figura 8.** Componentes de las aguas residuales. Físicos, químicos y biológicos.

#### 2.1.4. Clasificación de las aguas residuales según su tratamiento.

Las aguas residuales urbanas generalmente se conducen por sistemas de alcantarillado y son tratadas en plantas de tratamiento de aguas residuales para su depuración antes de su vertido, aunque no siempre es así en todos los países.

- Aguas crudas: Son las aguas residuales sin tratamiento.
- Aguas residuales tratadas: Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reuso en servicios al público<sup>33</sup>.



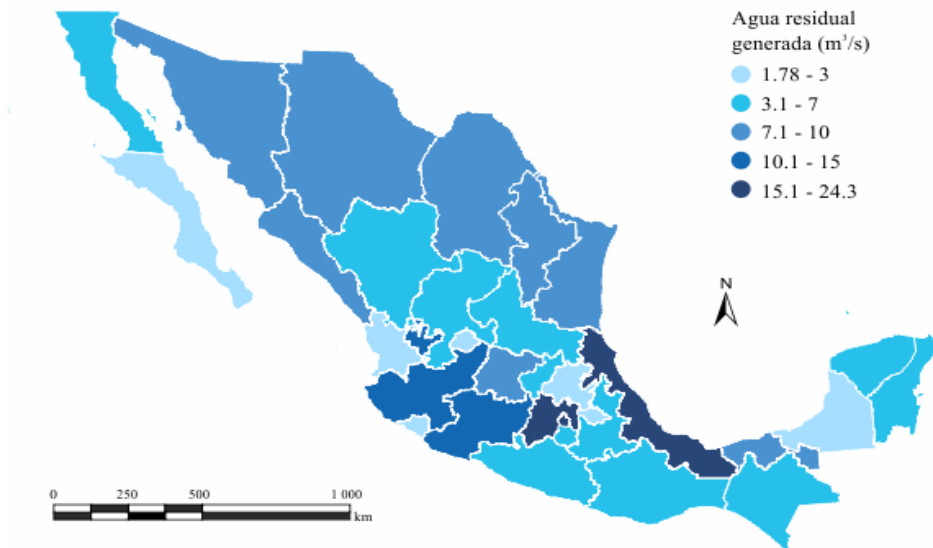
**Figura 9.** Tipos de aguas residuales. Aguas crudas y aguas residuales tratadas.

El tratamiento de aguas residuales es un elemento básico para remover y reducir las cargas contaminantes de las aguas. Sobre todo las que provienen de las actividades industriales. El tratamiento de aguas residuales juega un papel fundamental en el manejo del vital líquido, realizar el tratamiento y reúso de agua, puede aportar además de la reducción y ahorro en el consumo, el beneficios a los ecosistemas reduciendo la emisión de sustancias nocivas; además, el agua residual puede ser una fuente de nutrientes y de otros materiales recuperables, incluso de energía<sup>34</sup>.

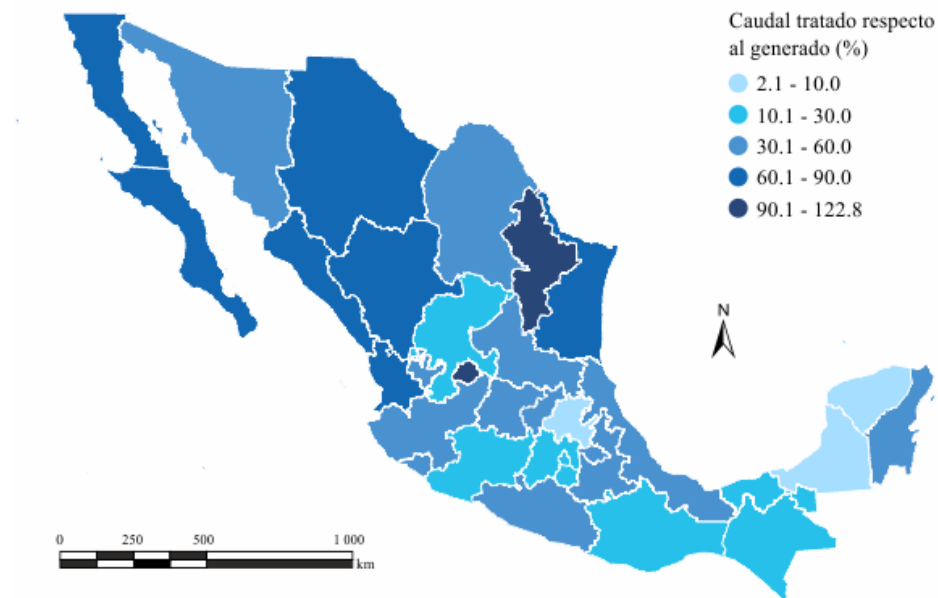
#### 2.1.5. Aguas residuales tratadas en México

La descarga de aguas residuales de origen urbano proviene de viviendas, edificios públicos y de la escorrentía urbana que se recoge en el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales, materia orgánica, entre muchos otros. En México en 2012, los centros urbanos descargaron aproximadamente 7.3 km<sup>3</sup> (equivalente a 229.73 m<sup>3</sup>/s) de aguas residuales. A nivel de entidad federativa, las que en 2012 generaron las mayores descargas de aguas municipales fueron el estado de México (24.22 m<sup>3</sup>/s), Distrito Federal (21.96 m<sup>3</sup>/s) y Veracruz (16.08 m<sup>3</sup>/s), que en conjunto contabilizaron 27.1% del volumen nacional generado (Figura 10).

En 2012, el agua residual municipal recibió tratamiento principalmente a través de los procesos de lagunas de estabilización y lodos activados (el 55.4% y 14% del total de las plantas, respectivamente), que son de tipo secundario y que tratan cerca del 70% del caudal tratado (Figura 11). El proceso de tratamiento dual (de tipo terciario) sólo está presente en Aguascalientes, Chiapas, Jalisco, estado de México, Querétaro, Quintana Roo y San Luis Potosí (todos estos estados, a excepción de Quintana Roo que tiene 7 plantas, cuentan con sólo una planta en su territorio). En conjunto apenas tratan el 5% de las aguas residuales nacionales tratadas.



**Figura 10.** Aguas residuales municipales generadas por entidad federativa, 2012. El caudal generado fue estimado en función de la población, suministro de agua, aportación y cobertura.



**Figura 11.** Aguas residuales municipales que reciben tratamiento, por entidad federativa, 2012. El caudal generado fue estimado en función de la población, suministro de agua, aportación y cobertura <sup>35</sup>.



## 2.2. Impacto de las aguas crudas al ser humano y al medio ambiente.

Las aguas residuales pueden generar malos olores y sabores, consecuencia de la diversidad de sustancias que portan, y sobre todo, de los productos de la descomposición de éstas, especialmente en aquellos procesos (sobre todo anaerobios) en los que se descompone materia orgánica, con desprendimiento de gases. A esto hay que añadir las causas naturales de olores y sabores: la proliferación de microorganismos, los procesos de descomposición, la presencia de vegetación acuática, mohos, hongos, etc., y la reducción de sulfatos a sulfuros, en condiciones anóxicas <sup>36</sup>.

Muchos contaminantes del agua ingresan a nuestros cuerpos cuando usamos agua para beber y preparar alimentos. Los contaminantes entran en el tracto digestivo. Desde allí, pueden llegar a otros órganos del cuerpo y causar diversas enfermedades. Los productos químicos entran en contacto con la piel al lavar la ropa o al nadar en agua contaminada y pueden provocar irritaciones en la piel. Los productos químicos peligrosos en los sistemas de agua también pueden afectar a los animales y las plantas que viven allí. A veces, estos organismos sobreviven con los químicos en sus sistemas, solo para ser comidos por humanos que luego pueden enfermarse levemente o desarrollar síntomas tóxicos más fuertes. Los propios animales y plantas pueden morir o no reproducirse adecuadamente <sup>30</sup>.

Los contaminantes del agua pueden causar enfermedades o actuar como venenos. Las bacterias y los parásitos en las aguas residuales mal tratadas pueden entrar en los suministros de agua potable y causar problemas digestivos <sup>30</sup> como la fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería, cólera y diarrea. También puede provocar enfermedades causadas por virus como la poliomielitis, hepatitis infecciosa, entre otras (Tabla 1), y problemas parasitarios como dracunculosis, esquistosomiasis, amebiasis, criptosporidiosis (Crypto) y giardiasis <sup>37, 38</sup>.

Tabla 1. Los microbios en las aguas residuales no tratadas adecuadamente se liberan al medio ambiente y provocan diversos problemas de salud <sup>39</sup> .		
Grupos de microbios	Agente infeccioso	Tipo de enfermedad
<b>Bacteria</b>	<i>Vibrio cholerae</i> <i>legionella pneumophila</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Salmonella</i> <i>Yersinia enterocolitica &amp; Shigella</i> <i>Campylobacter</i>	Cólera Legionelosis (neumonía aguda) Disentería (heces acuosas acompañadas de sangre) Enfermedad pulmonar e infección de la piel Diarrea y fiebre tifoidea Diarrea Diarrea
<b>Virus</b>	Astroviruses Reoviruses Hepatitis A y E Enteroviruses - Polio Rotavirus	Diarrea Enfermedades respiratorias y entéricas Hepatitis infecciosa Parálisis, fiebre, sarpullido, diarrea y enfermedad respiratoria Enfermedades respiratorias y entéricas

Los productos químicos, pesticidas y herbicidas peligrosos de industrias, granjas, hogares y campos de golf pueden causar toxicidad aguda y muerte inmediata, o toxicidad crónica que puede provocar problemas neurológicos o cáncer <sup>30</sup>. La acción tóxica, tiene repercusión sobre la flora y fauna natural de las masas hídricas receptoras y sobre los consumidores que utilicen esas aguas, o que se vean afectados por la acumulación de estas sustancias tóxicas en la cadena alimentaria. Por ejemplo, en numerosas ocasiones las aguas residuales se utilizan, sin un tratamiento previo, para el riego de cosechas de verduras y hortalizas, con el enorme riesgo que esto supone, ya que el hombre puede consumirlas crudas, pasando a él directamente la contaminación por tóxicos o microorganismos.

Los efectos tóxicos pueden ser:

- Letales: causan muerte por envenenamiento directo.
- Subletales: por debajo de los niveles que causan la muerte, pero que pueden afectar al crecimiento, reproducción o actividad de los organismos.
- Agudos: causan un efecto (normalmente la muerte) en un corto período de tiempo.
- Crónicos: causan un efecto letal o subletal durante un período de tiempo prolongado.
- Acumulativos: se incrementa el efecto con dosis sucesivas <sup>36</sup>

El agua al ser un excelente solvente puede contener en disolución un gran número de sustancias carcinógenas, como el arsénico, clasificado por la Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer como un posible carcinógeno para el ser humano y que podría estar asociado con el cáncer de piel, hígado, pulmón o vejiga <sup>40</sup>. Además de arsénico, las aguas también pueden contener cromo, el plomo, los sulfuros, los cromatos de zinc y el calcio, procedentes de procesos químicos de la industria; estos compuestos están considerados entre los carcinógenos humanos más potentes <sup>41</sup>.

Nutrientes como el nitrógeno (N) y el fósforo (P) generan importantes impactos sobre los cuerpos de agua ya que pueden incidir en la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, la eutrofización y la incorporación de niveles tóxicos que pueden afectar a las comunidades biológicas y a la salud humana, inclusive en muy bajas concentraciones. Ciertas formas de nitrógeno en el agua establecen riesgos para el hombre por su ingesta o por contacto directo con compuestos como toxinas, liberadas por floraciones de cianobacterias en ambientes eutrofizados. Los compuestos nitrogenados (CN) pueden alcanzar en el agua niveles tóxicos que alteren la capacidad de los animales para sobrevivir, crecer y reproducirse. La suma de amonio ionizado y no ionizado, el nitrito y el nitrato se denomina nitrógeno inorgánico y su presencia, especialmente del amonio y del nitrito, tiene reconocidos efectos tóxicos sobre especies acuáticas, siendo la forma no ionizada  $\text{NH}_3$  la más tóxica para los organismos acuáticos. En cuanto al ser humano, se ha comprobado que en bebés menores de cuatro meses que consuman agua rica en nitratos pueden llegar a contraer la enfermedad denominada metahemoglobinemia, manifestando los síntomas típicos de cianosis, taquicardia, convulsiones, asfixia, y por último término la muerte. Además se pueden presentar efectos adversos sobre la salud humana por causas indirectas, por ejemplo la proliferación de algas tóxicas que pueden ocasionar desde trastornos fisiológicos e intoxicación hasta la muerte de la persona afectada por contacto de tipo recreacional <sup>42</sup>.

Más de 1000 millones de toneladas de aguas residuales son vertidas anualmente al agua subterránea, a ríos, lagos y océanos del mundo, contaminándolos con metales pesados, disolventes, aceites, grasas, detergentes, ácidos, sustancias radioactivas, fertilizantes, pesticidas y otros productos químicos. Esta contaminación química del medio ambiente se ha convertido en uno de los problemas globales más urgentes de la humanidad. Esta contaminación se manifiesta con mayor intensidad en los países industrializados y con una explotación intensiva de la agricultura. China, por ejemplo, ha tenido que admitir que más del 80% de sus ríos están tan contaminados, que ya no son aptos para agua potable ni para lavar. En Estados Unidos, dos de cada cinco ríos, incluyendo casi todos los más grandes, están tan contaminados, que las autoridades sanitarias han tenido que advertir a los habitantes que no se bañen ni pesquen en ellos<sup>37</sup>. En la India 70% de la población rural de la India no tiene EDAR, eliminación de desechos, y buen saneamiento<sup>39</sup>. En la región de América Latina y el Caribe solo se trata entre el 30 % y el 40 % del agua residual recolectada, lo que tiene un impacto negativo tanto en la salud humana como en el medio ambiente<sup>43</sup>. Con la ausencia de tratamiento, las aguas crudas son por lo general vertidas en aguas superficiales, creando un riesgo para la salud humana, la ecología y los animales<sup>44</sup>.

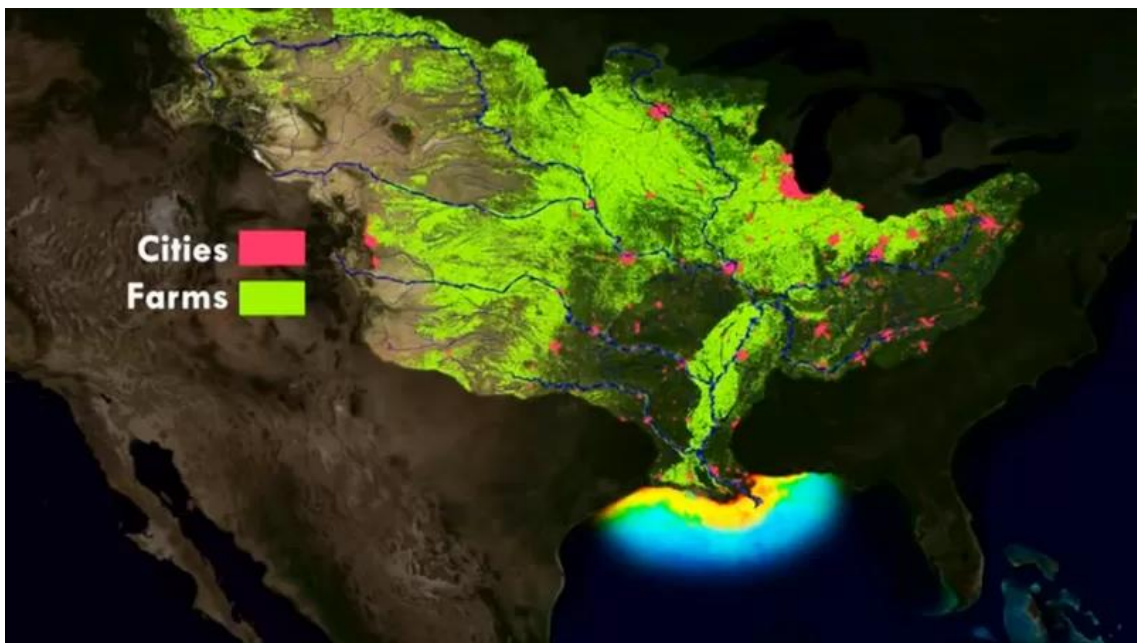
**Tabla 2. Porcentaje de alcantarillado y porcentaje de tratamiento de aguas de alcantarilla del año 1990 y 2010<sup>45</sup>**

País	2010		1990	
	Porcentaje de conexión reportado	Porcentaje de tratamiento reportado	Porcentaje de conexión reportado	Porcentaje de tratamiento reportado
<b>Antigua y Barbuda</b>	0.7	100	0.6	100
<b>Bélgica</b>	87.9	79.3	77.9	33
<b>Botsuana</b>	2.6	0	12.1	0
<b>Camboya</b>	12.1	0	2.1	0
<b>España</b>	97.3	96.6	97.2	64.9
<b>Etiopía</b>	0.9	0	0.2	0
<b>Islandia</b>	93.5	64.8	90.8	2.3
<b>México</b>	77.3	53.9	Sin datos	Sin datos
<b>Pakistan</b>	25.6	1.2	13.5	1.2
<b>Reino Unido</b>	96.6	98.5	96.6	92

Raquel Baum, Juana Luh, y Jamie Bartram en su artículo “Saneamiento: una estimación global de las conexiones de alcantarillado sin tratamiento y el impacto resultante en el progreso de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (MDG, por sus siglas en inglés)” hacen una clasificación de las conexiones al alcantarillado, teniendo como referencia el “saneamiento mejorado” que es cuando las aguas residuales fueron tratadas antes de su descarga al medio ambiente. En el artículo se clasifican en 3 grupos los países. El grupo 1 abarca los países que tienen datos disponibles tanto para la conexión de alcantarillado como para el tratamiento del agua. El grupo 2 engloba a los países que tienen datos disponibles de la conexión a alcantarillado pero solo se puede predecir el tratamiento de

aguas residuales, ya que no hay datos específicos de ello. Y el grupo 3 son los países que no tienen datos de conexión y/o no se puede predecir la prevalencia del tratamiento de las aguas de alcantarillado. En este artículo se puede apreciar el camino que aún falta por recorrer para tener mejores condiciones de saneamiento a nivel mundial, ya que a pesar de que haya países que tienen excelentes condiciones de saneamiento, son realmente la minoría, en la Tabla 2, se abordaron unos pocos países del grupo 1 como ejemplo, haciendo comparación de cuánto ha avanzado el saneamiento entre el lapso de tiempo de 1990 a 2010. Se puede apreciar que países desarrollados como Bélgica, España y Reino Unido, tienen mejores condiciones de saneamiento que países en desarrollo como Antigua y Barbuda, Botsuana y Etiopía. En el caso de Botsuana, incluso se puede apreciar que en vez de mejorar sus condiciones de saneamiento, ha sido todo lo contrario, pasando de 12.1% de conexión de alcantarillado a sólo 2.6%, y en ambos casos sin hacer tratamiento alguno a estas aguas antes de su vertido <sup>45</sup>.

Estas aguas residuales, antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, para evitar que su disposición cause los problemas antes mencionados. El grado de tratamiento requerido en cada caso para las aguas residuales deberá responder a las condiciones que acusen los receptores en los cuales se haya producido su vertimiento. Las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser diseñadas, construidas y operadas con el objetivo de convertir el líquido cloacal proveniente del uso de las aguas de abastecimiento, en un efluente final aceptable, y para disponer adecuadamente de los sólidos ofensivos que necesariamente son separados durante el proceso. Esto obliga a satisfacer ciertas normas o reglas capaces de garantizar la preservación de las aguas tratadas al límite de que su uso posterior no sea descartado.



**Figura 12.** Zona muerta en el Golfo de México. La causa principal de la formación de la zona muerta son los nutrientes (por fertilizantes) utilizados en las actividades agrícolas (verde) que son arrastrados río abajo por el río Misisipi y estimulan el crecimiento masivo de algas y plancton que después se descomponen, lo cual consume el oxígeno vital para que exista vida marina en el área <sup>47</sup>.

Las fuentes de agua (ríos, acuíferos, lagos, mar), han sido incapaces por sí mismas para absorber y neutralizar esta carga contaminante, y por ello estas masas de agua han perdido sus condiciones naturales de apariencia física y su capacidad para sustentar una vida acuática adecuada, que responda al equilibrio ecológico que de ellas se espera para preservar los cuerpos de agua <sup>37</sup>. En ocasiones, no son directamente los residuos los que provocan la desaparición de los organismos del agua, sino que para la descomposición de las sustancias contaminantes son necesarias grandes cantidades de oxígeno, llegando a agotarse y creando condiciones anóxicas (zonas muertas) que impiden la vida acuática <sup>36</sup>. Las zonas muertas ocurren en todo el mundo; uno de los más grandes se forma anualmente en el Golfo de México (Figura 12), comenzando en el delta del río Mississippi, este ha llegado incluso a medir 22,730 km cuadrados <sup>46</sup>.

### 2.3. Normas de calidad del agua

Aunque el agua pura rara vez se encuentra en la naturaleza (debido a la fuerte tendencia del agua a disolver otras sustancias), la caracterización de la calidad del agua (es decir, limpia o contaminada) está en función del uso previsto del agua. Por ejemplo, el agua que es lo suficientemente limpia para nadar y pescar puede no ser lo suficientemente limpia para beber y cocinar. Los estándares de calidad del agua (límites en la cantidad de impurezas permitidas en el agua destinada a un uso particular) brindan un marco legal para la prevención de la contaminación del agua de todo tipo <sup>48</sup>.

<b>Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al público según la NOM-003-SEMARNAT-1997 <sup>49</sup></b>					
<b>Tipo de reúso</b>	<b>Promedio mensual</b>				
	<b>Coliformes fecales NMP/100 ml</b>	<b>Huevos de helminto (h/l)</b>	<b>Grasas y aceites mg/l</b>	<b>DBO<sub>5</sub> mg/l</b>	<b>SST mg/l</b>
Servicio al público con contacto directo	240	≤1	15	20	20
Servicio al público con contacto indirecto u ocasional	1000	≤5	15	30	30

NMP/100 ml: Número más probable en 100 mililitros de agua; h/l: Número de huevos por litro; mg/l: miligramo por litro.

Particularmente se recomienda la medición de las características físicas (Olor, Sólidos totales en suspensión, Color (aspecto), Temperatura), químicas (pH, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Aceites y grasas) y biológicas (Coliformes) <sup>48</sup>. En México, los parámetros principales a medir para el agua de reúso son coliformes fecales, huevos de helmintos, grasas y aceites, DBO<sub>5</sub> y SST (Tabla 3).

La DBO<sub>5</sub> y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua proveniente principalmente de las descargas de aguas residuales, de origen municipal y no municipal.

La DBO<sub>5</sub> se utiliza para evaluar el potencial de desperdicios de aguas tratadas y no tratadas para absorber el oxígeno del cuerpo receptor de agua. El DBO<sub>5</sub> mide la cantidad de oxígeno que usan las bacterias cuando consumen materia orgánica de una muestra de agua de desperdicio por un periodo de 5 días a una temperatura de 20° C bajo condiciones aeróbicas <sup>50</sup>. Por otro lado, la DQO representa una medida de toda la materia orgánica e inorgánica presente en disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada, por la acción de agentes oxidantes, bajo condiciones ácidas y se mide como miligramos de “oxígeno” equivalentes a la fracción orgánica disuelta y/o suspendida por litro de disolución (agua residual) <sup>51</sup>. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos (Tabla 4).

El Oxígeno disuelto (OD) es un parámetro fisicoquímico que es el fundamento del cálculo de la DQO y de la valoración de las condiciones de aerobividad de un agua. En general, todo proceso aerobio requiere una concentración de OD mayor a 0,5 mg/l <sup>50</sup>.

**Tabla 4. Cuadro comparativo entre DBO y DQO <sup>52, 53</sup>**

	<b>DBO5 (6 DBO)</b>	<b>DQO</b>
Definición	Cantidad de oxígeno consumido por microorganismos durante la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas.	Cantidad de oxígeno total para la oxidación total de la materia orgánica.
Descomposición	Proceso de oxidación biológica.	Proceso de oxidación química.
Metodología	Se incuba una muestra por 5 días a 20°C y se mide el oxígeno no disuelto al inicio y al final.	Se incuba la muestra con un oxidante fuerte combinado con ácido sulfúrico en ebullición.
Tiempo necesario	5 Días	Variable, mínimo 2 horas.
Capacidad de oxidación	Capaz de oxidar naturalmente detritus y desechos orgánicos del agua.	Capaz de degradar residuos industriales.
Unidades de medición	mg/L	mg/L

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana; hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación severa <sup>54</sup>.

El pH es una medida que indica la acidez del agua. El rango varía de 0 a 14, siendo 7 el rango promedio (rango neutral). El pH determina la cantidad relativa de iones de hidrógeno e hidróxido en el agua. Si el agua contiene más iones de hidrógeno tiene una mayor acidez, mientras que el agua que contiene más iones de hidróxido indica un rango básico. La mayoría de las plantas y animales acuáticos prefieren vivir en un intervalo de pH entre 6 y 8.

Los animales y plantas se han adaptado a un pH específico, y si el pH del agua se sale de estos límites podrían morir, dejar de reproducirse o emigrar. El pH se puede ver afectado por la sedimentación atmosférica (o lluvia ácida) provenientes de industrias y transporte, los vertidos de aguas residuales, los drenajes de las minas y el tipo de rocas que forman el lecho de la masa de agua estudiada <sup>55</sup>.

Cabe mencionar que esto no impide llevar a cabo evaluaciones de calidad del agua de manera específica, que incluyen diversos parámetros como pueden ser presencia de metales pesados o compuestos orgánicos, ya que en este caso se relacionan de manera directa con los criterios o estándares y/o normatividad nacional e internacional <sup>54</sup>.

#### 2.4. Aguas residuales como recurso

El tratamiento de las aguas residuales tiene un doble valor, pues además de los beneficios medioambientales y para la salud, puede ofrecer beneficios económicos al reutilizarse en distintos sectores. Sus productos derivados, como los nutrientes y el biogás, pueden aplicarse a la agricultura y utilizarse para la generación de energía como se muestra en la Figura 13. Asimismo, los ingresos adicionales que se obtengan de este proceso pueden ayudar a cubrir costos operativos y de mantenimiento de los servicios públicos de aguas <sup>56</sup>.

El agua recuperada también ofrece oportunidades para un suministro de agua sostenible y fiable para las industrias y los municipios, especialmente con un número cada vez mayor de ciudades que dependen de fuentes de agua más distantes y/o alternativas para satisfacer la creciente demanda. El uso previsto de las aguas residuales tratadas y parcialmente tratadas para los servicios de los ecosistemas puede aumentar la eficiencia del recurso y aportar beneficios a los ecosistemas mediante la reducción de las extracciones de agua dulce, el reciclaje y reutilización de nutrientes, permitiendo que las pesquerías y otros ecosistemas acuáticos prosperen al minimizar la contaminación del agua y recargando los acuíferos empobrecidos.

Las aguas residuales tienen un amplio potencial como fuente de recursos, tales como energía y nutrientes, pero sigue estando poco explotado. Puede recuperarse energía en forma de biogás, que puede ser utilizado para la calefacción/refrigeración y generación de electricidad. Existen tecnologías para la recuperación de energía *in situ* mediante procesos de tratamiento de lodos/biosólidos integrados en plantas de tratamiento de aguas residuales que hacen posible que pasen de ser los principales consumidores de energía a una condición de neutralidad energética, o incluso a ser productores netos de energía. La recuperación de energía también puede ayudar a las instalaciones a reducir los costes de funcionamiento y la huella de carbono, permitiendo aumentar los flujos de ingresos a través de los créditos de carbono y los programas de comercio de carbono. También hay oportunidades para las energías combinadas y la recuperación de nutrientes. La recuperación de energía externa prevé la incineración de lodos en plantas centralizadas mediante procesos de tratamiento térmico.

La recuperación de fósforo de las plantas de tratamiento *in situ*, como fosas sépticas y letrinas, puede ser técnica y económicamente viable si se transforman los residuos sépticos en fertilizantes orgánicos u orgánico-minerales. Además, los lodos fecales presentan un riesgo de contaminación química relativamente menor que el de los biosólidos de alcantarillado. Es probable que la recogida y el uso de orina se convierta en un componente cada

vez más importante de la gestión ecológica de las aguas residuales, ya que contiene el 88% del nitrógeno y el 66% del fósforo que se encuentra en los residuos humanos, componentes esenciales para el crecimiento de las plantas. Dado que se prevé que los recursos extraíbles de fósforo van a escasear o agotarse en las próximas décadas, la recuperación del mismo de las aguas residuales supone una alternativa realista y viable <sup>57</sup>.



**Figura 13.** Aguas residuales como recurso. Se reutiliza el agua, y además se obtienen recursos como el biogás, los biosólidos y el fósforo, los cuales pueden generar flujos de ingresos adicionales para el operador, permitiendo así cubrir la totalidad o parte de los costos operativos, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema <sup>43</sup>.

Un ejemplo de esta gestión de aguas residuales en la región de América Latina y el Caribe es la central eléctrica de San Luis Potosí (México) que al utilizar aguas residuales tratadas en lugar de aguas subterráneas redujo los costos de agua en un 33 %, lo que implicó para la empresa proveedora del servicio de electricidad un ahorro de USD 18 millones en el término de seis años. En el caso de la empresa proveedora del servicio de agua, los ingresos adicionales provenientes de la venta de aguas residuales tratadas ayudaron a cubrir los costos operativos y de mantenimiento.

Otro ejemplo es la planta de tratamiento de aguas residuales en Cusco (Perú), ahorra USD 230 000 por año en cargos por transporte y relleno de biosólidos (materiales orgánicos ricos en nutrientes que se obtienen del tratamiento de las aguas residuales en esa planta) gracias a un acuerdo con un productor local de compost. El compost que se produce con los biosólidos de la planta se utiliza luego como parte del proyecto de gestión de aguas que tiene por objetivo preservar el lago Piuray.

Tras una inversión de USD 2,7 millones para instalar la infraestructura necesaria en la planta de tratamiento de aguas residuales La Farfana en Santiago de Chile, el operador de la planta pudo vender el biogás producido, con una ganancia neta anual de USD 1 millón para el negocio. Y en Brasil, el uso de biosólidos provenientes de la



empresa de servicios de saneamiento CAESB para la producción de maíz ha generado rendimientos en los cultivos por encima de la media, con una eficiencia un 21 % mayor que la de los fertilizantes minerales.

Se recomienda que las intervenciones para la gestión de aguas residuales se incluyan en la planificación de cuencas, y que eso vaya acompañado por políticas, instituciones y regulaciones que promuevan este cambio de paradigma. Las plantas de tratamiento de aguas residuales deben, gradualmente, reutilizarse como plantas de recuperación de recursos, y al mismo tiempo analizar y apoyar modelos financieros y de negocios innovadores y sostenibles, que aprovechen los posibles flujos de ingresos que pueden obtenerse de la recuperación de recursos a partir de las aguas residuales <sup>43</sup>.

### 3. TRATAMIENTO Y PURIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Un Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) o Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) es el conjunto de instalaciones que tiene por objeto la reducción de la contaminación de las aguas residuales hasta límites aceptables para el cauce receptor <sup>58</sup>. El EDAR recoge las aguas de una población o de un sector industrial, y elimina las sustancias contaminantes de esta para, posteriormente, ser devuelta al ciclo del agua, bien mediante desagüe al mar o bien mediante su reutilización directa. Entre las distintas sustancias que se han de eliminar, se encuentran residuos, aceites, arenas y distintos sólidos sedimentables, compuestos con nitratos, amoníaco y fosfatos, entre otros (Figura 14 y Figura 22). Sin embargo, las EDAR convencionales no se diseñan para la eliminación de contaminantes de carácter emergente <sup>59</sup>.



Figura 14. Ejemplo de una Estación Depuradora de Aguas Residuales <sup>58</sup>.

En la base de datos HydroWASTE se registran los datos de 58,502 EDAR que suministran agua de consumo humano a 2,297,591,661 de la población alrededor del mundo (Figura 15). Existen en el mundo 22,855 EDAR con tratamiento avanzado (terciario), 34,766 EDAR que brindan tratamiento secundario y un total de 881 de EDAR que brindan únicamente tratamiento primario. En la India con una población de 1.254.020.000 existen 206 EDAR brindando tratamiento primario, 608 EDAR de tratamiento secundarios y únicamente hay 2 EDAR de tratamiento avanzado, los cuales entre los 816 EDAR suministran agua a únicamente 132,135,004 de personas. En China con una población de 1.396.530.000, tienen 2,486 EDAR en total, que sirven a 480,851,700 de su población, de las cuales, 2 son de tratamiento únicamente primario y el resto (2,484) son de tratamiento secundario. En Estados Unidos de América con una población de 329.824.950, hay un total de 14,819 EDAR, que suministran agua a 258,075,181 de su población, de las cuales 5,559 son EDAR avanzados, 9,213 son de tratamiento secundario y 47 son de tratamiento primario. En México, con una población de 125.929.000, se tiene registrado 2,540 EDAR que administra agua a 57,695,258 personas, de las cuales 2,518 EDAR reciben tratamiento secundario y 22 únicamente reciben tratamiento primario. Entre las 2,540 plantas en México, se suministran agua de consumo humano a un total de 57,695,258 de personas (Tabla 5 y Figura 16)<sup>60, 61, 62</sup>.

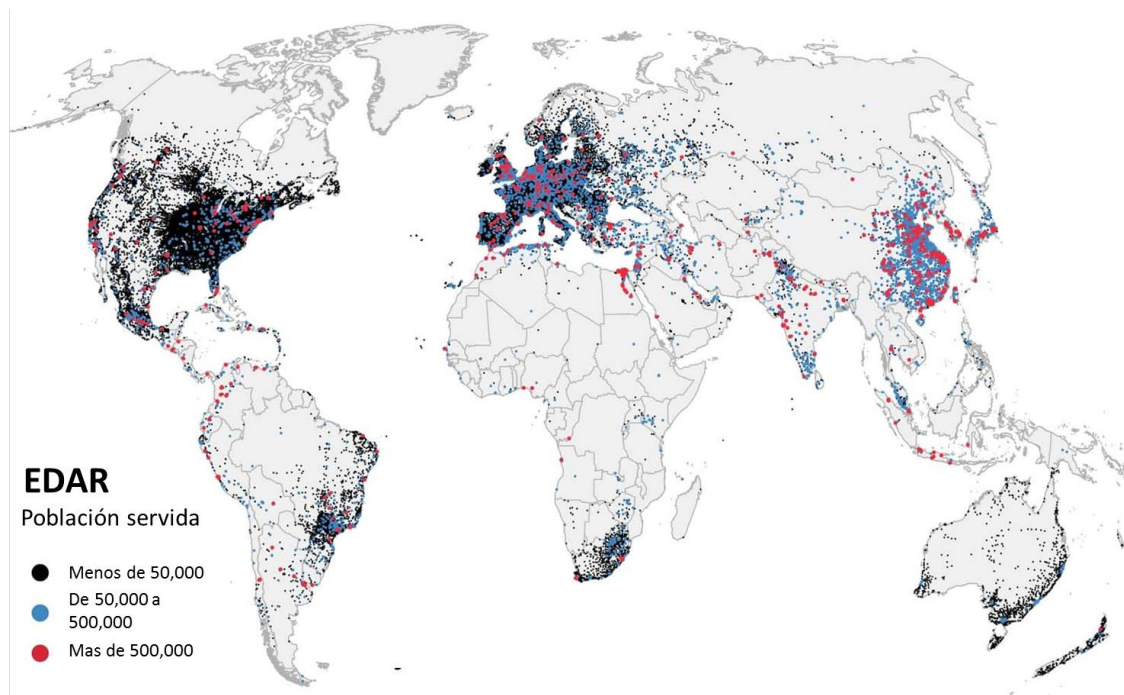
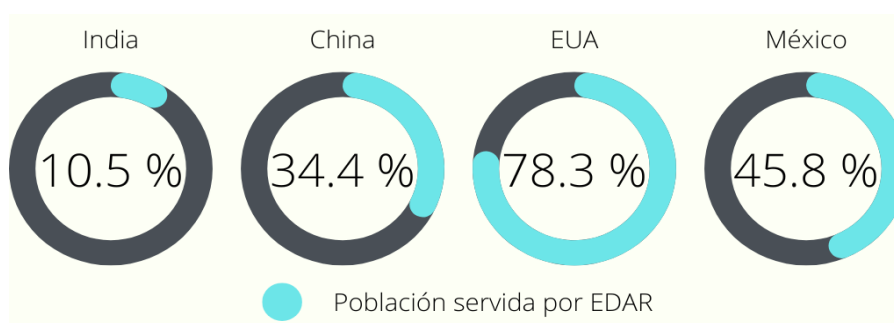


Figura 15. EDAR en el mundo y la población servida <sup>60</sup>.

**Tabla 5. Datos sobre las EDAR en algunos países del mundo** <sup>60, 61, 62, 63</sup>

País	Población	EDAR Total	EDAR avanzado	EDAR secundario	EDAR primario	Población servida
<b>India</b>	1,254,020,000	816	2	608	206	132,135,004
<b>China</b>	1,396,530,000	2,486	0	2,484	2	480,851,700
<b>EUA</b>	329,824,950	14,819	5,559	9,213	47	258,075,181
<b>México</b>	125,929,000	2,540	0	2,518	22	57,695,258
<b>Mundo</b>	7,752,840,547	58,502	22,855	34,766	881	2,297,591,661



**Figura 16.** Porcentaje de población que es servida por las EDAR de los países de ejemplo <sup>60, 61, 62</sup>

En el artículo “Distribución y características de las plantas de tratamiento de aguas residuales dentro de la red fluvial mundial” se muestra que más de 1,2 millones de kilómetros de ríos se encuentran aguas abajo de las EDAR y, por lo tanto, contienen una cierta cantidad de efluentes de la EDAR (Tabla 6 y Figura 17). De estos, unos 96.000 km (8%) se encuentran aguas abajo de EDAR que ofrecen únicamente tratamiento primario. Más del 10% de los ríos afectados en China, México, India y Sudáfrica superan la proporción de aguas residuales del 10 % en su caudal. Se estima que el 17% de los ríos que contienen en su caudal más del 10% de aguas residuales provenientes de un EDAR fluyen a través de áreas protegidas, definidas como categorías I-VI de la UICN. Además, se estima que 874 millones de personas viven cerca de estos ríos con proporciones de aguas residuales tratadas superiores al 10%, y se asume que pueden depender de los servicios del río, como el suministro de agua o la recarga de aguas subterráneas. Dado que estas personas utilizan potencialmente las aguas de los ríos para diversos fines (p. ej., beber, limpiar, pescar, recrearse), corren un riesgo elevado de verse afectados por problemas de calidad del agua, incluso durante las inundaciones <sup>64</sup>.

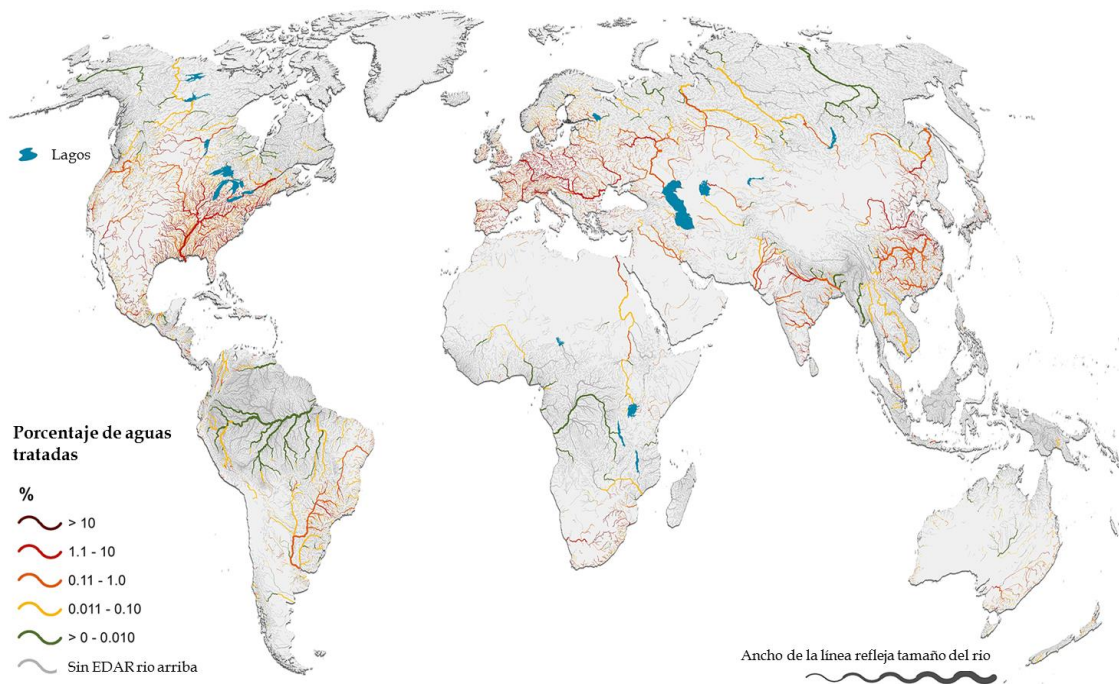


Figura 17. Proporciones de aguas residuales tratadas en el sistema fluvial global <sup>64</sup>.

**Tabla 6. Ríos que contienen más del 10% de agua residual tratada en su caudal, con su respectivo porcentaje y nivel de tratamiento <sup>64</sup>.**

Continentes	Río	Longitud de río (km)	Porcentaje del total de descarga de agua residual tratada en los ríos por nivel de tratamiento		
			Primario	Secundario	Terciario
<b>Asia</b>	Ganges	1,785	7.6	92.4	0
	Hai	6,346	0	100	0
	Yangtsé	2,456	0	100	0
	Huang He (Amarillo)	2,257	0	100	0
	<b>Total</b>	<b>28,664</b>	<b>2.2</b>	<b>84</b>	<b>13.8</b>
<b>América del Norte</b>	Colorado	2,466	0	21.7	78.3
	Mississippi	5,499	0	38.4	61.6
	Río Grande	2,641	0	83.4	16.6
	<b>Total</b>	<b>19,650</b>	<b>0.5</b>	<b>39</b>	<b>60.5</b>
<b>África</b>	Limpopo	2,583	0	100	0
	Orange	2,904	0	100	0
	<b>Total</b>	<b>8,089</b>	<b>0.6</b>	<b>99.4</b>	<b>0</b>
<b>Europa</b>	Danubio	769	1	26.2	72.8
	Rin	1,881	0	5.2	94.8
	<b>Total</b>	<b>13,191</b>	<b>0.2</b>	<b>34.8</b>	<b>65</b>
<b>Oceanía</b>	Murray	348	0	14.8	85.2
	<b>Total</b>	<b>1,051</b>	<b>0.2</b>	<b>69.6</b>	<b>30.2</b>
<b>Sudamérica y América Central</b>	Paraná	320	2.9	88.3	8.9
	<b>Total</b>	<b>1,593</b>	<b>1.9</b>	<b>75.5</b>	<b>22.6</b>
<b>Mundo</b>	<b>Total</b>	<b>72,237</b>	<b>1</b>	<b>57</b>	<b>42</b>

### 3.1. Tipos de tratamientos

#### 3.1.1. Tratamientos físicos

Son aquellos métodos en los que se aplica una separación física, generalmente de sólidos en suspensión que acompañan al agua residual, así como los aceites y las grasas. Además, simultáneamente se elimina parte de la materia orgánica <sup>65</sup>. Estos métodos suelen depender de las propiedades físicas de los contaminantes, como la viscosidad, tamaño de partículas, flotabilidad, etc. Entre ellos se encuentran el tamizado, el desarenado, flotación, filtración de sólidos, adsorción y las operaciones con membranas (Figura 20).

#### 3.1.2. Tratamientos químicos

Son aquellos métodos que dependen de las propiedades químicas del contaminante o reactivo incorporado al agua. El tratamiento químico en plantas de tratamiento de aguas residuales incluye la neutralización, la desinfección, la precipitación de fosfatos <sup>66</sup>, precipitación de metales pesados y otros metales ferrosos (Figura 19) <sup>67</sup>

#### 3.1.3. Tratamientos Biológicos

En estos métodos se utilizan procesos biológicos, de manera que se pretende eliminar los contaminantes coloidales. Son microorganismos que actúan sobre la materia en suspensión transformándola en sólidos sedimentables (Figura 21). Pueden ser procesos:

- Aerobios: La descomposición de la materia orgánica por vía aerobia se divide en tres fases principales: la hidrólisis de las moléculas orgánicas complejas en sus respectivos monómeros, la descomposición de estos monómeros en intermediarios comunes y la final en la que se realiza el ciclo de Krebs y la cadena respiratoria, en donde el aceptor final de electrones es el oxígeno molecular, para formar agua como producto final, junto con el bióxido de carbono y el amoníaco <sup>48</sup>. Se obtienen rendimientos energéticos elevados y una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias en condiciones aerobias <sup>68</sup>.
- Anaerobios: Los compuestos orgánicos generados internamente por descomposición de la materia orgánica, el dióxido de carbono, los nitritos y nitratos o los sulfatos se usan como aceptores finales de electrones en una serie de reacciones complejas en serie <sup>48</sup>. Se forman subproductos (biogás, que es CO<sub>2</sub> y metano).
- Sistemas anóxicos: El aceptor final de electrones suelen ser los nitratos, los sulfatos, el hidrógeno, etc. Cuando el aceptor final de electrones es el nitrato, como resultado del proceso metabólico, el nitrógeno de la molécula de nitrato es transformado en nitrógeno gas. Así pues, este metabolismo permite la eliminación biológica del nitrógeno del agua residual (desnitrificación) <sup>68</sup>.

El tratamiento de aguas residuales por vía aerobia es sin duda la más comúnmente aplicada. Ejemplos de procesos aerobios y son:

- Tipo extensivo (lagunas)
- Procesos de biomasa en suspensión (lodos activados en sus diversas modalidades)
- Procesos de biopelícula (filtros percoladores y biodiscos).

#### 3.1.3.1. Lodos activados

Los microorganismos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) son esenciales para la purificación del agua. Sin embargo, la diversidad de microorganismos y los factores que la controlan son poco conocidos. Usando un muestreo global, se analizaron las secuencias del gen del ARN ribosomal 16S de ~1200 muestras de lodo activado tomadas de 269 EDAR en 23 países en 6 continentes y se reveló que las comunidades bacterianas globales de lodos activados contienen ~1 mil millones de filotipos bacterianos con una distribución de diversidad lognormal de Poisson. A pesar de esta alta diversidad, el lodo activado tiene una pequeña comunidad bacteriana central global ( $n = 28$  unidades taxonómicas operativas) que está fuertemente vinculada al rendimiento del lodo activado <sup>69</sup>.

Los lodos activados son uno de los sistemas más usados para el tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales, en el cual se utiliza una mezcla de microorganismos los cuales oxidan la materia orgánica compleja presente en las aguas residuales hasta  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  y biomasa. Debe mantenerse un ambiente aerobio por medio de aireación mecánica o por difusores. La biomasa microbiana se agrega en forma de flóculos, los cuales sedimentan en el clarificador secundario.

En el proceso de los lodos activados, las aguas residuales previamente cribadas y sedimentadas se mezclan con cantidades variables (20 a 100%) de la purga del clarificador secundario. La mezcla entra en el tanque de aireación, donde se mezclan los organismos y las aguas residuales con gran cantidad de aire. Bajo estas condiciones, los organismos oxidan una parte del desecho con producción de células microbianas nuevas utilizando la energía obtenida de la oxidación. Luego la mezcla entra en el sedimentador secundario, donde los microorganismos floculan y se asientan y son removidos de la corriente del efluente. Entonces, los microorganismos sedimentados, o el lodo activado, se recircula hacia el inicio del tanque de aireación para mezclarlos de nuevo con el agua residual. En este proceso se producen de continuo lodos activados nuevos, de cuyo exceso es necesario deshacerse cada día (lodos activados en exceso o lodos secundarios) junto con los lodos provenientes de la sedimentación primaria. El efluente proveniente de una planta de lodos activados adecuadamente diseñada y operada es de alta calidad; en general con concentraciones de  $\text{DBO}_5$  y SST iguales o menores a 30 mg/l.

Composición de los flóculos de lodos activados:

La biofloculación es una agregación de partículas finamente suspendidas en el medio líquido de origen, la cual conduce a la formación de estructuras cuyas dimensiones y peso específico permiten su separación del medio líquido por decantación.

El floculo tiene un aspecto aglomerado y gelatinoso con dimensiones que van desde < 150mm hasta > de 500 mm. Está constituido por sustancias principalmente orgánicas al estado coloidal y de numerosas poblaciones de microorganismos como parte de su biomasa activa que oscila entre 10 y 40% del peso seco total. Esta biomasa está representada generalmente por un 95 % de bacterias y 5 % de Protozoos y Metazoos.

Las bacterias presentes en los floculos o lodos activados remueven la materia orgánica disuelta principalmente en su contenido de carbono, nitrógeno y fósforo. En el primer caso, la eficiencia del sistema se evalúa en términos de remoción de DBO. En el caso del nitrógeno mediante reacciones de oxidación y reducción se libera finalmente como nitrógeno gaseoso en un subsistema anóxico. Esta misma combinación de mecanismos aeróbicos-anaeróbicos es utilizada por las bacterias del fósforo las cuales lo asimilan eliminándolo del medio líquido <sup>70</sup>. Como se puede apreciar en la Tabla 7, los lodos activados es uno de los métodos más eficaces para la eliminación de DBO, nitrógeno y fósforo, con un porcentaje de eliminación de 85-93%, 30-40% y 30-45% respectivamente, sin embargo, puede ser un método poco eficiente, ya que necesita energía, produce de 1.1-1.5 m<sup>3</sup> por habitante al año y los costes de construcción pueden ser un poco elevados <sup>71</sup>.

**Tabla 7. Tabla comparativa de distintos sistemas de tratamiento de aguas residuales <sup>71</sup>**

SISTEMAS DE TRATAMIENTO	EFICACIA DE ELIMINACION (%)				REQUERIMIENTOS		Costes de Construc (\$ US/hab)	Tiempo de retención hidráulico (días)	Cantidad Lodos (m <sup>3</sup> /hab.año)
	DBO	N	P	Coliflor	Terreno (m <sup>2</sup> /hab)	Potencia (W/hab)			
Tratamiento Preliminar	0-5	0	0	0	<0.001	0	2-8	-	-
Tratamiento Primario	35-40	10-25	10-20	30-40	0.03-0.05	0	20-30	0.1-0.5	0.6-1.3
Estanque Facultativo	75-85	30-50	20-60	60-99	2.0-5.0	0	10-30	15-30	-
Estanque anaerobio-Estanque facultativo	75-90	30-50	20-60	60-99.9	1.5-3.5	0	10-25	12-24	-
Laguna aireada facultativa	75-90	30-50	20-60	60-96	0.25-0.5	1.0-1.7	10-25	3-9	-
Estanque de mezcla completa de aireación-sedimentación	75-90	30-50	20-60	60-99	0.2-0.5	1.0-1.7	10-25	4-9	-
Lodos activados convencional	85-93	30-40 (a)	30-45 (a)	60-90	0.2-0.3	1.5-2.8	60-120	0.4-0.6	1.1-1.5
Aireación prolongada (flujo continuo)	93-98	15-30 (a)	10-20 (a)	65-90	0.25-0.35	2.5-4.0	40-80	0.8-1.2	0.7-1.2
Sequencing batch reactor	85-95	30-40 (a)	30-45 (a)	60-90	0.2-0.3	1.5-4.0	50-80	0.4-1.2	0.7-1.5
Trickling filter de baja velocidad	85-93	30-40 (a)	30-45 (a)	60-90	0.5-0.7	0.2-0.6	50-90	NA	0.4-0.6
Trickling filter de alta velocidad	80-90	30-40 (a)	30-45 (a)	60-90	0.3-0.45	0.5-1.0	40-70	NA	1.1-1.5
UASB	60-80	10-25	10-20	60-90	0.05-0.10	0	20-40	0.3-0.5	0.07-0.1
Tanque séptico-Filtro anaerobio	70-90	10-25	10-20	60-90	0.2-0.4	0	30-80	1.0-2.0	0.07-0.1

En el experimento realizado por Bejarano y Escobar, se evaluó la eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de agua residual ubicada al norte de la ciudad de Bogotá. Al realizar la comparación de las concentraciones iniciales y finales de los parámetros fisicoquímicos DQO, DBO, y SST y partiendo de la implementación de microorganismos aerobios previamente identificados en el sistema de tratamiento de lodos activados; se encontró que el uso de estos microorganismos permitió la remoción de un 79.8 % de carga orgánica en el reactor, contribuyendo a un buen funcionamiento de la EDAR y a su vez dando cumplimiento a la normatividad ambiental legal vigente. Se pudo identificar que las bacterias realizan el proceso de remoción y que los hongos que trabajan en conjunto son del género Fusarium, Penicillium y Aspergillus <sup>50</sup>

➤ Bacterias

Son los constituyentes más abundantes del floculo, existen más de 300 especies reportadas que han sido aisladas del licor mezclado. Las bacterias son las responsables de la oxidación de la materia orgánica y de la transformación de los nutrientes, producen polisacáridos y materiales poliméricos que ayudan en la floculación de la biomasa microbiana.

Los principales géneros son:

- *Zooglea*
- *Pseudomonas*
- *Flavobacterium*
- *Alcaligenes*
- *Bacillus*
- *Achromobacter*
- *Corynebacterium*
- *Comomonas*
- *Brevibacterium*
- *Acineto bacter*
- Organismos Filamentosos (*Sphaerotilus*, *Beggiatoa*)
- Bacterias autotróficas nitrificantes (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*)
- Bacterias sulfurosas fototróficas (*Rhodospirillaceae*)

Las cuentas totales en placa realizadas al licor mezclado están en el orden de 108 UFC/mg de lodo.

➤ Rotíferos

Son organismos multicelulares que remueven las bacterias suspendidas no floculadas y contribuir con sus desechos a la formación del floculo. Su tamaño fluctúa entre las 100 y 500 micras. Los rotíferos presentes en lodos activados pertenecen a dos órdenes principales:

- Bdeloidea (*Philodina* y *Habrotocha*)
- Monogononta (*Lecane* y *Notomata*)

Desventajas de los lodos activados:

- No remueve significativamente a los patógenos.
- Problemas operacionales como:
  - Abultamiento: Cuando el lodo del tanque de aireación no sedimenta, ya sea por crecimiento de organismos filamentosos (fundamentalmente *Sphaerotilus*) que no sedimentan, o crecimiento de microorganismos que incorporan grandes volúmenes de agua en su estructura celular, haciendo que su densidad se aproxime a la del agua, evitando así que sedimenten.
  - Espumamiento: Desarrollo de espuma biológica en la superficie, en su mayoría, por el crecimiento excesivo de organismos *Nocardia*.
- Gran volumen de lodos que debe ser manejado <sup>72</sup>
- Progresivo deterioro de la calidad del líquido de descarga.



- Pérdida de flóculos en el sedimentador y dificultades en el manejo del sistema a partir de los inconvenientes relacionados con la imposibilidad de regular de forma constante el fango de recirculación

70

### 3.1.3.2. Lagunas aireadas

Las lagunas aireadas son balsas con profundidades de 1 a 5 m en las que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación bien sean superficiales, turbinas o difusores. La diferencia fundamental entre lagunas aireadas y el sistema de lodos activados es que en este se lleva a cabo una recirculación del lodo como forma de controlar la cantidad de lodo biológico en el reactor de aireación. Las lagunas aireadas son sistemas sin reciclado de lodos. La concentración de sólidos en las lagunas es función de las características del agua residual y del tiempo de residencia. Dicha concentración está comprendida entre 80 y 200 mg/l, esto es, mucho menor que la que se utiliza en las unidades de lodos activados convencionales (2000 a 3000 mg/l) <sup>73, 74</sup>.

Ventajas:

- Vida útil de 15 a 20 años.
- Alta eficacia.
- Menos producción de lodos.
- Mayor reducción de gérmenes patógenos que en una estación clásica.
- Buena integración en el medio ambiente.
- Posibilidad de volver a usar las aguas tratadas.

Desventajas:

- Grandes superficies de terreno para los tanques.
- Depuración lenta.
- Sensibilidad a la temperatura, eficacia baja en invierno.
- Riesgo de malos olores y presencia de insectos <sup>75</sup>

### 3.1.3.3. Filtros verdes

Un filtro verde consiste en una superficie de terreno donde se instaura una plantación forestal, a la que se aplican, de forma sistemática y programada, aguas residuales. La depuración de estas se logra por la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. Una parte de estas aguas se evapora y el resto es absorbido por las raíces de los árboles o filtrado a través del suelo. La depuración se realiza mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas por medio de una triple acción: física (filtración), química (intercambio iónico, precipitación y fenómenos de óxido-reducción) y biológica (degradación de la materia orgánica).

Se presenta eliminación de sólidos de suspensión, orgánicos e inorgánicos, por el proceso de filtración a través del suelo, y en menor medida, por filtración a través de formas vegetales vivas y de los propios desechos vegetales. También sucede un proceso de eliminación de materia orgánica mediante la actividad bacteriana anaeróbica que se halla en el suelo formando una ligera capa que envuelve las partículas teniendo un proceso de oxidación bioquímica que mineraliza la materia orgánica. Los sistemas de tratamiento deben diseñarse de forma que la

demanda de oxígeno para la depuración de la materia orgánica sea menor a la velocidad de transferencia de oxígeno al suelo.

Debido a la descomposición de la materia orgánica realizada por las bacterias anaeróbicas se da una eliminación de nutrientes dando origen a que el nitrógeno pase de formas de amoniacales a nitritos y nitratos. El fósforo se oxida y da con las bases, fosfatos que por una parte se inmovilizan y son retenidos por la vegetación y por otra parte percola. Este fósforo en presencia de cal queda inmovilizado. El procedimiento de eliminación de organismos patógenos como bacterias, virus, protozoos, helmintos debe pasar por una serie de etapas de sedimentación, retención, depredación, radiación, desecación y adsorción <sup>76</sup>.

#### 3.1.3.4. Lechos bacterianos

Los lechos bacterianos, también llamados filtros percoladores, consisten en hacer caer el agua bruta a través de un material de gran superficie específica, que sirve de soporte de los microorganismos depuradores que forman una película más o menos gruesa. Dependiendo del material empleado como relleno pueden distinguirse dos tipos:

1. Lechos de relleno tradicional: Se utiliza piedra de río, puzolana, coque metalúrgico, piedras silíceas trituradas, etc.

2. Lechos de relleno plástico: Cuando la superficie específica es muy alta se llaman lechos de alto rendimiento. Cualquiera que sea el tipo de relleno, todos los lechos funcionan según el mismo principio. La aireación se efectúa por tiro natural, a veces por ventilación forzada. Esta aireación tiene por objeto aportar oxígeno para mantener la microflora en medio aerobio.

Ventajas:

- Buena ventilación natural.
- Recirculación necesaria para obtener un funcionamiento óptimo.
- Menos consumo de energía.
- Bajo nivel de ruidos por la escasa potencia instalada.

Desventajas:

- Coste de instalación elevado.
- Generación de lodos en el proceso, que deben ser estabilizados antes del vertido <sup>75</sup>

#### 3.1.3.5. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases conocida como "biogás" (compuesto principalmente por metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %), con pequeñas proporciones de otros componentes como nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno) y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida a este tratamiento es cualquier biomasa residual que posea un alto contenido en humedad, como restos de comida, restos de hojas y hierbas al limpiar un jardín o un huerto, residuos ganaderos, lodos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas y aguas residuales domésticas e industriales.

El biogás puede sustituir con ventaja al gas de ciudad, utilizándose en aplicaciones tan diversas como: fuente de calor (cocina, alumbrado), combustión en calderas de vapor para calefacción y combustible de motores acoplados a generadores eléctricos. Por otro lado, la masa restante biodegrada por las bacterias puede utilizarse como abono para la fertilización de suelos.

El proceso de degradación anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en serie-paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas. Se consideran tres etapas para residuos sólidos o lodos (hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis) y dos para residuos líquidos (acidogénesis y metanogénesis); el enfoque más novedoso lo constituye el de las cuatro etapas o niveles tróficos hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

- Hidrólisis o liquefacción. En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.
- Acidogénesis. En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente.
- Acetogénesis. Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO<sub>2</sub>.
- Metanogénesis. En esta etapa metabólica el CH<sub>4</sub> es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol.

<b>Tabla 8. Bacterias aisladas en un reactor anaerobio <sup>71</sup></b>		
<b>Fase no metanogénica</b>		
<b>Anaerobios facultativos</b>	<i>Lactobacillus</i> <i>Spirillum</i> <i>Klebsiella</i> <i>Actinomyces</i> <i>Vibrio</i> <i>Corynebacterium</i>	<i>Bacillus</i> <i>Micrococcus</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Alcaligenes</i> <i>Sarcina</i> <i>Aerobacter</i>
<b>Anaerobios estrictos</b>	<i>Bacteroides</i> <i>Clostridium</i> <i>Bifidobacterium</i> <i>Sphaerophorus</i>	<i>Fusobacterium</i> <i>Veillonella</i> <i>Peptococcus</i> <i>Deulfovibrio</i>
<b>Fase Metanogénica</b>		
<b>Anaeróbicos extremos</b>	<i>Methanobacterium</i> <i>Methanococcus</i> <i>Methanospirillum</i>	<i>Methanobrevibacter</i> <i>Methanomicrobium</i>

No en todas las etapas de la digestión ocurre disminución de la DBO, es en la metanogénesis donde ocurren las mayores disminuciones de la DBO. En cada una de estas etapas intervienen un número significativo de grupos de especies particulares (Tabla 8). En general, se puede considerar que las bacterias metanogénicas constituyen el grupo biológico que determina el mayor o menor éxito del proceso dada su baja velocidad de crecimiento y los estrictos requerimientos de bajo potencial redox (-300 mV) y de pH, así como su alta sensibilidad a la inhibición por presencia de oxígeno molecular. Cuando en el medio anaerobio (dentro del reactor o digestor) existe una cantidad apreciable de sulfatos se desarrollan con intensidad las bacterias formadoras de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), comúnmente llamadas sulfobacterias, como es el caso del *Desulfovibrio desulfuricans*. Éstas juegan un papel importantísimo en el proceso ya que si la concentración de sulfuros solubles en el digestor excede los 160 mg/l, las bacterias metanógenas se inhiben. De igual forma, aunque el proceso no llegue a inhibirse una concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás por encima de 0,2 % limita el uso de éste y además de que provoca graves problemas de corrosión en las tuberías de conducción del biogás y en los recipientes destinados al almacenamiento de éste.

Factores principales que influyen en el proceso:

- Composición del agua residual.
- Temperatura: No ocurrencia de variaciones bruscas de temperatura. Se encuentra un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35 °C.
- Acidez: determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6, que se logra a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes.
- Contenido en sólidos: se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10 % de sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.
- Nutrientes: para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
- Existencia de cantidades de N y P en el residuo, compatibles con la cantidad de carbono.
- Tóxicos: No existencia, en el residuo a ser digerido, de cantidades elevadas de compuestos que pueden transformarse en tóxicos durante el proceso como N (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NH<sub>3</sub>), S (S<sub>2</sub><sup>-</sup>). Aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas, además de metales pesados, metales alcalinos y alcalinotérreos.

Ventajas de la digestión anaerobia:

El tratamiento anaerobio de las aguas residuales de producciones alimenticias, de las bebidas y de las industrias farmacéuticas tiene muchas ventajas comparadas a otros métodos de tratamiento:

- El consumo de energía es muy bajo con el tratamiento anaerobio (no tiene que ser provisto oxígeno y no es necesario un mezclado intenso).
- La mayoría del material orgánico en el agua residual se convierte en biogás, que puede ser combustionado con el fin de obtener energía o vapor. La energía se puede utilizar en la planta de producción de biogás o se puede proveer a la red de la energía.

- La producción de lodo en el tratamiento anaerobio es muy baja (ya estabilizados y espesados), porque la mayoría del material orgánico se convierte en biogás, no en lodo. Además, el lodo anaerobio se estabiliza y se puede desecar fácilmente por gravedad. Se puede utilizar para la arrancada de nuevos reactores anaerobios, o se puede utilizar como bioabono en la tierra. Los gastos de transportación del lodo son por consiguiente mínimos.
- La remoción de materia orgánica se encuentra entre el 60 y 80 % según el tipo de agua residual.
- Existe la posibilidad de trabajar a tiempos de retención hidráulicos muy bajos, o lo que es igual, se necesitan menores volúmenes de instalación, abaratando las inversiones.
- Los costos de inversión son bajos, porque se aplican altas cargas orgánicas al reactor y los tiempos de retención son cortos.

#### Desventajas de la digestión anaerobia

- El proceso anaerobio no permite conseguir la calidad de efluente que se puede alcanzar en una planta de lodos activados y otros sistemas aerobios, pero sí permite eliminar gran parte de los sólidos suspendidos (SS) y de la DQO y/o DBO<sub>5</sub>, incluso en una sola etapa, que sustituirá al decantador primario, al digestor de lodos activados (aerobio) y al digestor anaerobio de estabilización de lodos.
- Requerimiento de un lodo granular para arranques rápidos. Arranque lento (seis meses) en caso de no contar con lodos inoculados.
- En ocasiones, hay presencia de malos olores, para lo cual se requiere de un sistema simple de control <sup>71</sup>

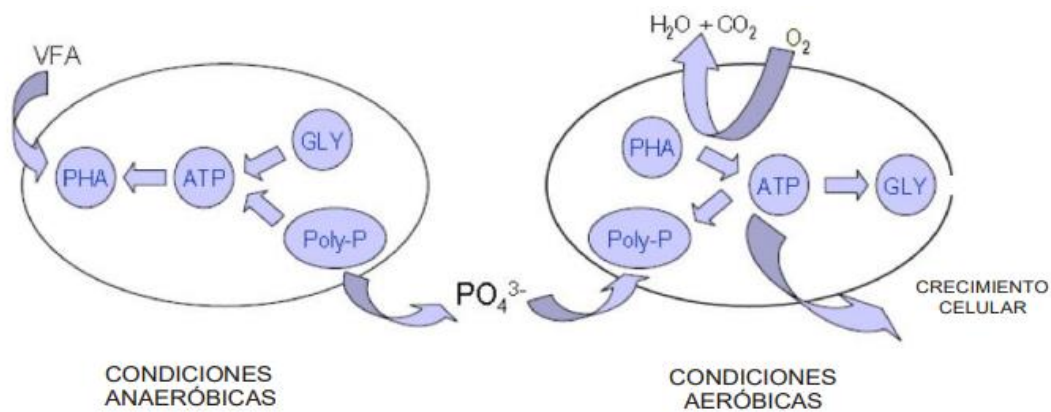
#### 3.1.3.6. Eliminación Biológica Incrementada de Fósforo (EBIF).

La Eliminación Biológica Incrementada de Fósforo (EBIF) o Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR, por sus siglas en inglés) <sup>77</sup> es un método que permite eliminar fósforo del agua residual, especialmente urbana, usando un grupo de organismos acumuladores de polifosfatos (OAF). Estas bacterias toman más fósforo del que es comúnmente necesario para el crecimiento y lo acumulan en el interior de las células. Mediante la purga del fango biológico en exceso, se puede eliminar el fósforo del sistema <sup>78</sup>.

Los organismos responsables para esta tarea son los organismos acumuladores de fósforo (PAO<sub>s</sub>). Para incorporar el fósforo dentro del tejido celular es necesario aplicar dos condiciones diferentes, aeróbicas y anaeróbicas de tal manera de promover que la biomasa crezca y consuma el fósforo. La EBPR (remoción del fósforo biológicamente mejorada) tienen tres principales características: Captación y almacenamiento de materia orgánica anaeróbica, liberación de fosfato anaeróbico y captación de fosfato aeróbico que está mucho más en exceso de los requerimientos del crecimiento celular, al mismo tiempo, hay tres compuestos de almacenamiento que juegan un rol muy importante en el metabolismo del proceso EBPR. Los polifosfatos, glucógeno y polihidroxialcanoatos(PHA). El PHA puede ser encontrado también como polihidroxibutirato(PHB) o polihidroxivalerato(PHV). Bajo condiciones anaeróbicas, los PAO<sub>s</sub> pueden acumular ácidos grasos volátiles (VFAs) los cuales van a ser principalmente acetatos producidos por la fermentación de la DQO. Luego los VFAs son almacenados dentro de la célula como PHAs, básicamente en la forma de PHB. La energía para este proceso (en la forma de Adenosin Trifosfato, ATP) es obtenida de la degradación del polifosfato almacenado así como de

la glucólisis de la utilización del glucógeno que da ese poder reductor ( $\text{NADH}_2$ ). La degradación de polifosfato da como resultado la liberación del ortofosfato en el medio líquido (Figura 18).

Mientras bajo condiciones aeróbicas o anóxicas, los PHA son metabolizados aportando energía en forma de ( $\text{NADH}_2$ ) y además funcionan como fuente de carbono, para producir más células y volver a aportar el suministro de glucógeno. La energía  $\text{NADH}_2$  es convertida en ATP. La energía de ATP es utilizada por los PAOs para su crecimiento, absorben o utilizan el exceso de ortofosfato soluble a fin de recuperar y de incrementar el suministro de polifosfato en la célula y para formar glucógeno.



**Figura 18.** Metabolismo de los organismos acumuladores de polifosfato bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas <sup>77</sup>.

La principal diferencia entre la utilización del fosfato en condiciones aeróbicas y anóxicas es que la formación de ATP bajo condiciones anóxicas, se utiliza nitrato. El resto del metabolismo de los PAOs bajo condiciones aeróbicas y anóxicas permanecen idénticas. Bajo condiciones anóxicas, sin embargo se forma aproximadamente 40% menos de ATP por cantidad de  $\text{NADH}_2$  cuando se le compara contra la condiciones aeróbicas. Esta baja relación ATP/ $\text{NADH}_2$  significa que el resultado final es una menor producción de biomasa bajo condiciones anóxicas.

Factores que influyen en el proceso:

- > Disponibilidad de sustrato.

La disponibilidad de sustrato en forma de material fácilmente biodegradable, principalmente VFAs, es fundamental para el desarrollo del proceso de EBIF. Entre los sustratos disponibles en el agua residual o generados a través de la hidrólisis y fermentación del material orgánico complejo son los VFAs más abundantes.

- > Nitratos

El nitrato puede inhibir la liberación anaeróbica de fósforo, perjudicando todo el proceso de EBIF. Pero por el otro lado, el nitrato es un aceptor de electrones que en condiciones apropiadas puede contribuir a la asimilación incrementada de fósforo en condiciones anóxicas. Este proceso se lleva a cabo por los organismos acumuladores de fósforo con capacidad desnitrificadora (OAFDN).

➤ Potencial de oxidación-reducción (ORP).

La fermentación acidogénica tiene lugar a partir de - 300 mV, mientras la metanogénesis se presenta por debajo de los - 550 mV. En condiciones anóxicas, el ORP puede oscilar entre valores positivos y negativos, según la concentración de nitratos.

➤ Oxígeno Disuelto.

El oxígeno disuelto es necesario en la fase aeróbica de los procesos de EBIF para provocar la asimilación del ortofosfato por los OAF. La concentración óptima de OD está entre 1,5 -3,0 mg/l para la asimilación del ortofosfato en la fase aeróbica, sin afectar a los estados anóxicos o anaerobios de un proceso de eliminación conjunta.

➤ pH

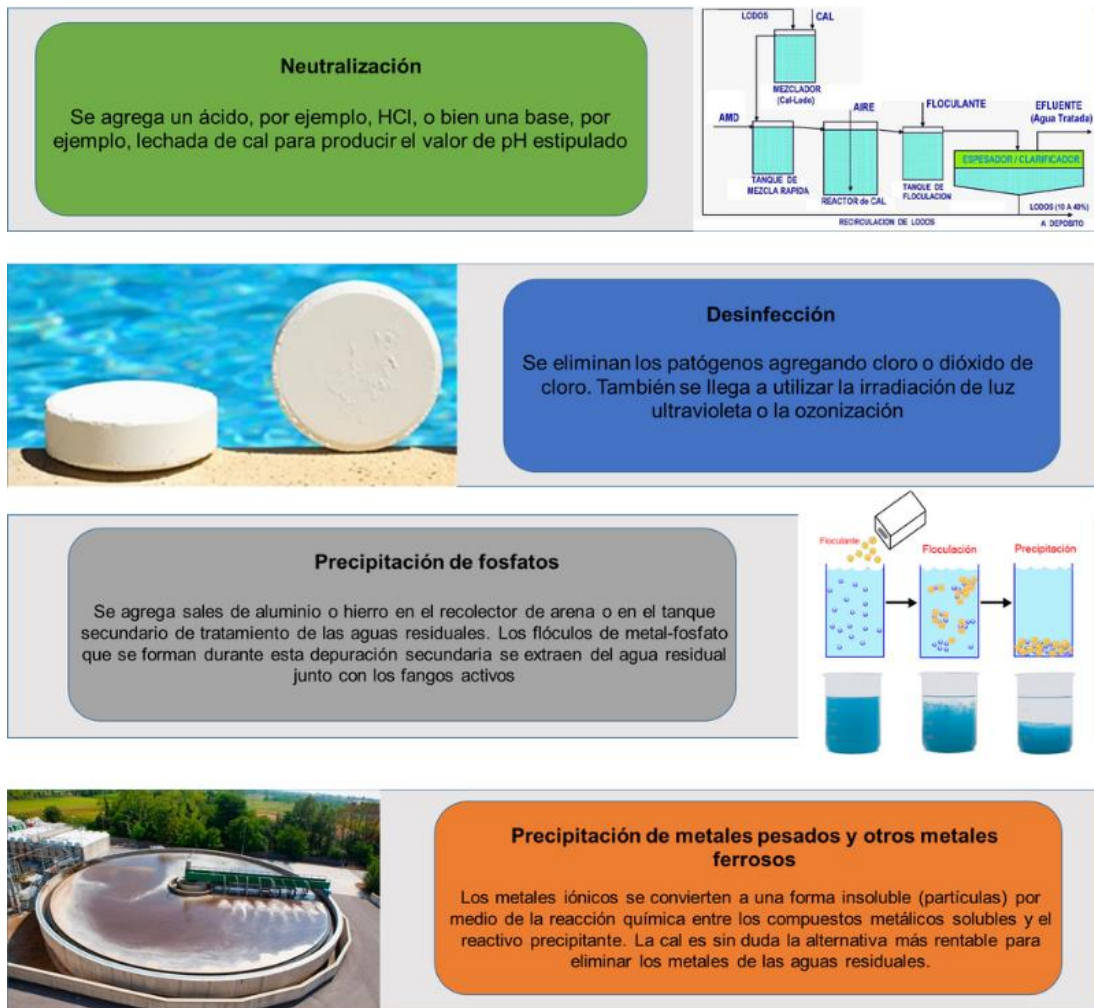
El pH debe mantenerse en el intervalo de 6,5-8,0 para una buena asimilación por parte de los OAF.

➤ Iones metálicos.

El potasio y el magnesio se usan como iones contadores durante la liberación y la asimilación de fósforo, respectivamente. Las relaciones molares típicas de  $K^+/P$  y  $Mg^{+3}/P$  se encuentran dentro del rango de 0,20 a 0,40 y de 0,25 a 0,30 respectivamente.

➤ Temperatura.

Los OAF no son tan sensibles a las bajas temperaturas como las bacterias nitrificantes. Se han obtenido altas tasas de eliminación de fósforo a temperaturas inferiores a 6 °C.<sup>77</sup>



**Figura 19.** Métodos de tratamientos químicos para las aguas residuales. La neutralización, la desinfección, la precipitación de fosfatos, precipitación de metales pesados y otros metales ferrosos <sup>66, 67</sup>.



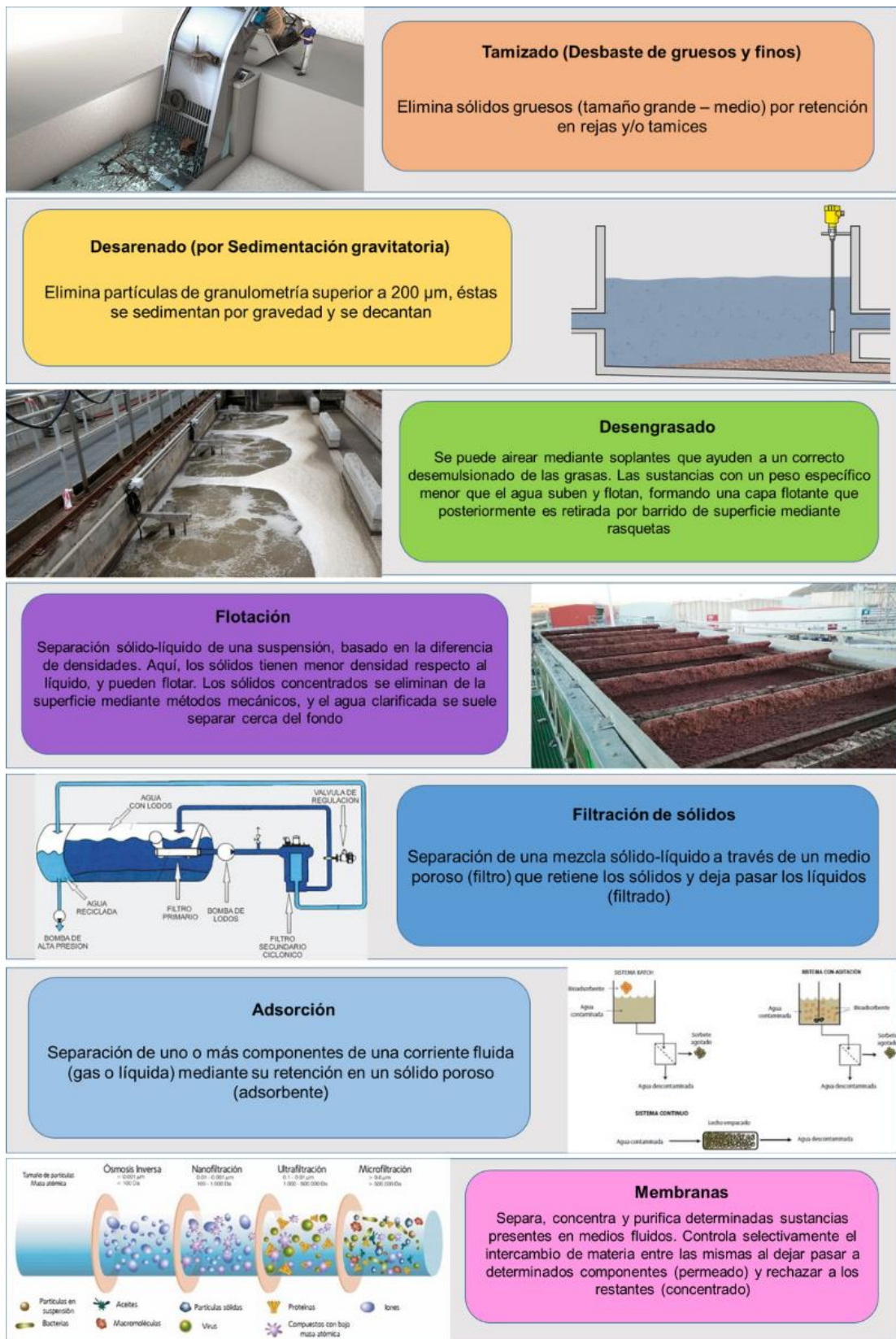


Figura 20. Métodos de tratamiento físico de aguas residuales. Tamizado, desarenado, desengrasado, flotación, filtración, adsorción, membranas <sup>65, 79</sup>.

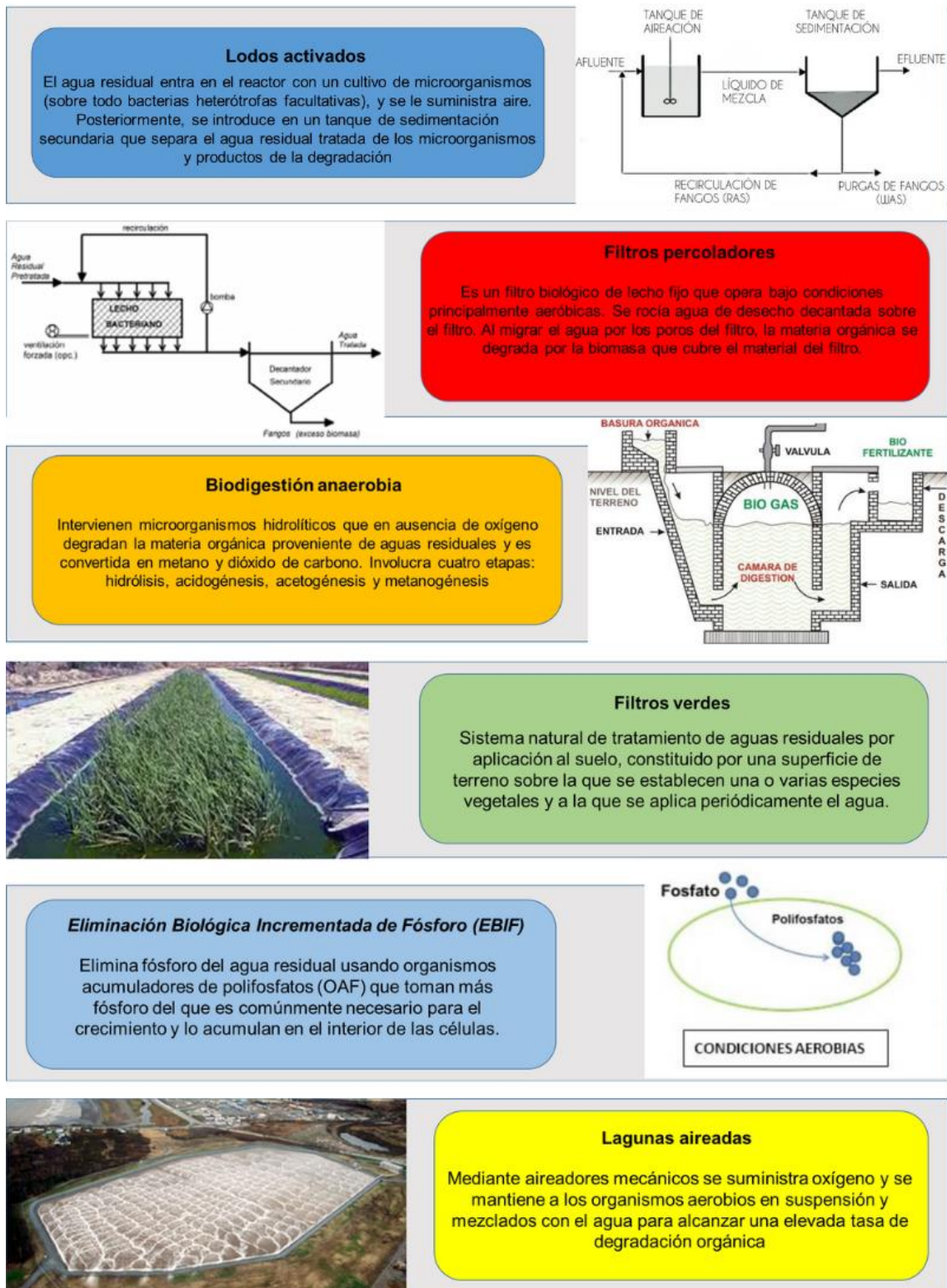
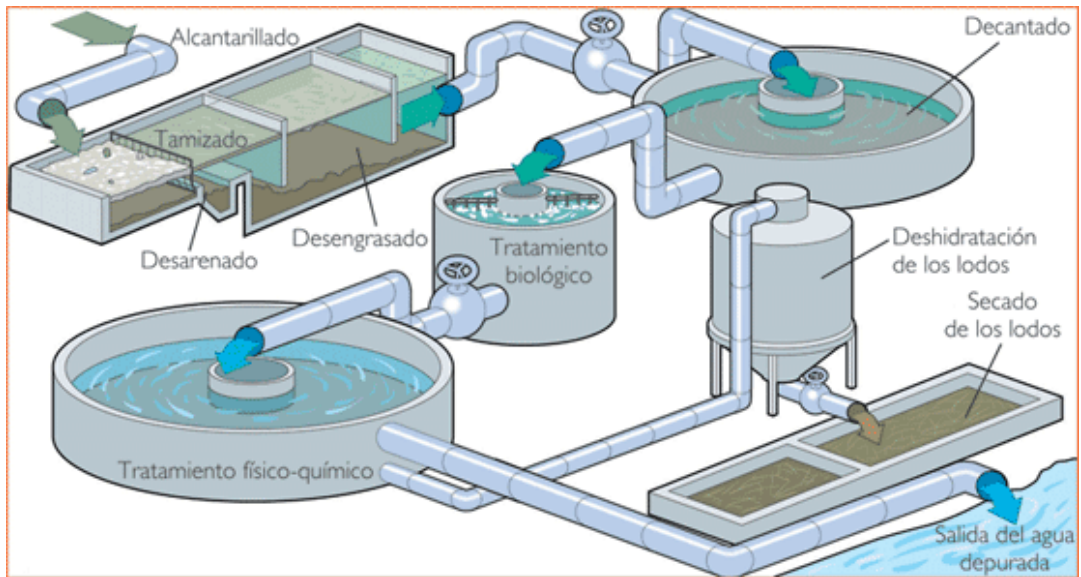


Figura 21. Métodos de tratamientos biológicos para las aguas residuales. Los lodos activados, los filtros percoladores, la biodigestión anaerobia y las lagunas aireadas <sup>80, 81, 82, 83, 76, 78</sup>



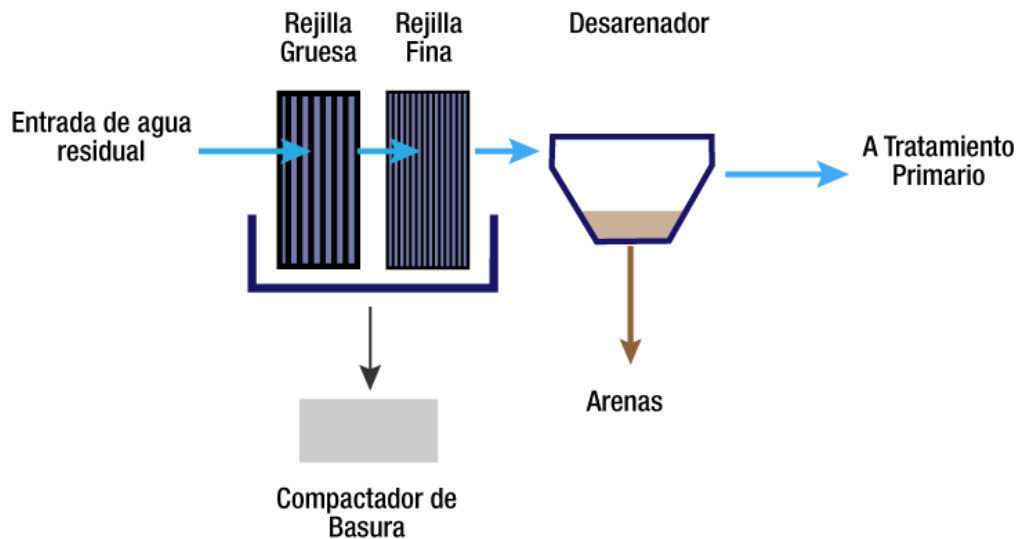
**Figura 22.** Tipos de métodos para el tratamiento de aguas residuales. Tamizado, desarenado, desengrasado, decantación, tratamiento biológico (lodos activados, filtros percoladores, digestión anaerobia o lagunas aireadas), tratamientos físico-químicos (neutralización, desinfección, precipitación de fosfatos y/o metales pesados).

### 3.2. Etapas de tratamiento

Existen principalmente 3 tipos de tratamiento de aguas residuales: Tratamiento Primario, Tratamiento Secundario y Tratamiento Terciario, algunos consideran un cuarto tipo antes del tratamiento primario llamado Tratamiento preliminar o pretratamiento.

#### 3.2.1. Pretratamiento

Esta es la etapa preliminar del tratamiento de la depuradora. Este proceso regula y mide el caudal de aguas residuales entrantes en la estación. En esta etapa se eliminan los sólidos de mayor tamaño, la arena y la grasa, que hay presente en las aguas negras. Estos compuestos son eliminados mediante filtración y/o tamizado (Figura 23). También suele realizarse un proceso de pre-aireación, para disminuir así los compuestos orgánicos volátiles disueltos en el agua, los cuales otorgan mal olor y aumentan la DQO del agua. Entre los dispositivos utilizados, se encuentran el pozo de gruesos, el desbaste de gruesos, desbaste de finos y desarenado-desengrasado.



**Figura 23.** Pre-tratamientos de las aguas residuales. El pozo de gruesos y el desbaste de gruesos (donde se utilizan rejas gruesas que retienen materia y/o basura grande), desbaste de finos (se utilizan rejillas más finas para recolectar basura o materia con menor tamaño) y desarenado-desengrasado <sup>59</sup>.

### 3.2.2. Tratamiento primario

La función de esta primera etapa es la de eliminar los sólidos suspendidos, lo cual se realiza mediante un proceso de sedimentación gravitatoria o bien mediante precipitación, bien asistida o bien por sustancias químicas añadidas. La eliminación de sólidos se realiza mediante la criba en base al tamaño de partícula.

Posteriormente, se añaden compuestos como aluminio, polielectrolitos floculantes y sales férricas, además de precipitar el fósforo disuelto en pequeños coloides o en una suspensión muy fina, mediante el uso de maquinaria hidráulica.

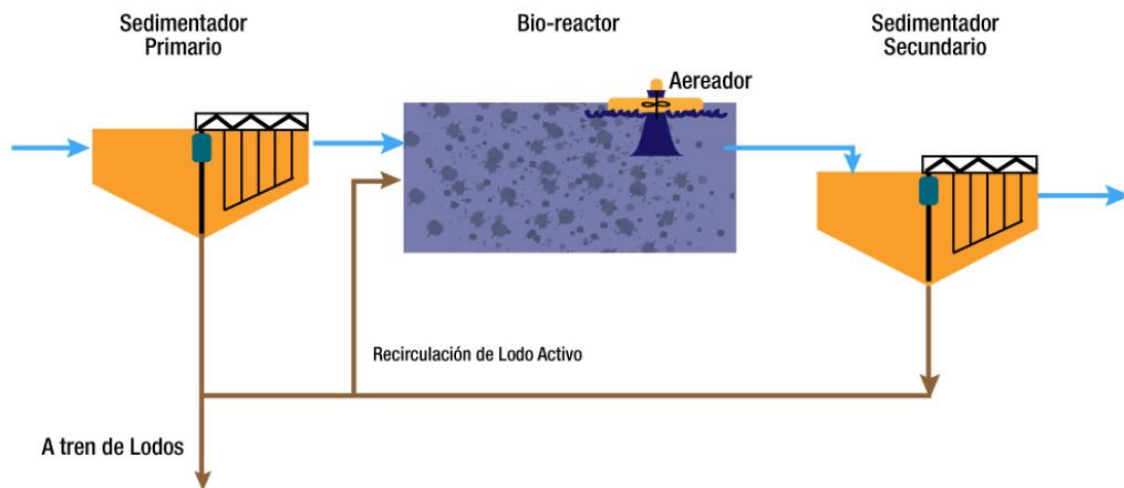
Entre los principales métodos nos encontramos el decantador primario (sedimentación gravitatoria), el flotador por aire disuelto (separación de partículas en suspensión mediante burbujas) y los tratamientos químicos, con adición de reactivo para aumentar la sedimentación de los sólidos disueltos (Figura 24).

### 3.2.3. Tratamiento secundario

El objetivo de esta segunda etapa es eliminar la materia orgánica disuelta y en estado coloidal, mediante procesos de oxidación bioquímica. Además, se degradan sustancias biológicas originadas por los desechos humanos. En estos tratamientos nos encontramos con procesos aeróbicos y anaeróbicos. Los procesos aerobios son realizados en presencia de oxígeno, introducido mediante burbujeo en los tanques de almacenamiento.

Los procesos anaerobios están realizados en ausencia de oxígeno. En estos procesos tienen lugar las reacciones de fermentación de la materia orgánica, que se convierte en energía liberada, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y carbono. Algunos de los procesos aerobios y anaerobios más empleados son los lodos activados, los filtros verdes, las lagunas aireadas, los lechos bacterianos y la digestión anaerobia. También existen procesos fisico-químicos como los lechos particulados. Estos procesos disminuyen gran parte de la DBO y eliminan el resto de sólidos sedimentables. Generalmente suelen darse combinaciones entre estos distintos tratamientos, dando lugar a procesos biológicos

de dos o más etapas. También se pueden emplear reactores biológicos, como el de cama móvil o el de membrana, aunque el coste de construcción y operación de estos es usualmente más caro que el de un sistema de tratamiento de aguas residuales convencional de filtros. En esta etapa también se incluye la decantación secundaria, separando el agua tratada y el fango generado en el proceso biológico (Figura 24).



**Figura 24.** Tratamiento primario y secundario de las aguas residuales. En el tratamiento primario se lleva a cabo una sedimentación, se puede utilizar el flotador por aire disuelto (separación de partículas en suspensión mediante burbujas) y/o la adición de reactivos para aumentar la sedimentación de los sólidos disueltos. En el tratamiento secundario se elimina la materia orgánica disuelta y en estado coloidal, mediante procesos de oxidación bioquímica <sup>59</sup>.

### 3.2.4. Tratamiento terciario o avanzado

En esta etapa final del tratamiento se realizan procesos para la eliminación de agentes patógenos, como bacterias de origen fecal, aumentando los estándares de calidad requeridos para ser devuelta al ciclo del agua, por descarga al mar, en ríos, lagos, recargas de acuíferos, embalses y demás sistemas hídricos. Este tipo de tratamiento solo se realiza en EDAR's que realicen vertidos a una zona protegida.

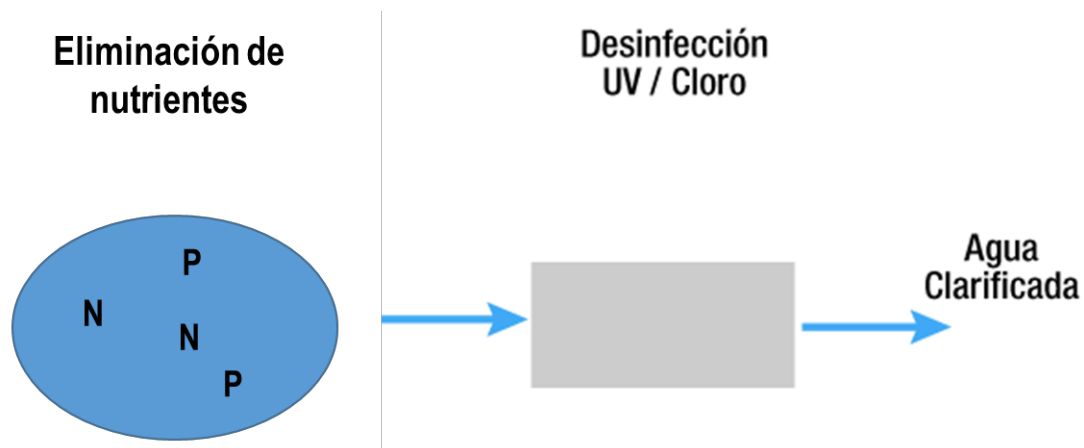
Entre los procesos que se realizan encontramos en primer lugar la filtración en filtros de arena, que retiene gran parte de la materia en suspensión. El carbón activo retiene el resto de toxinas. El tratamiento en lagunas proporciona la sedimentación necesaria, además de una ventaja biológica adicional. Es básicamente una imitación de los procesos naturales de autodepuración que realiza un río o un lago.

La eliminación de nutrientes también se realiza en esta etapa. El nitrógeno se elimina mediante oxidación biológica de bacterias como las Nitrobacter o la Nitrosomus, que convierten el  $\text{NH}_3$  en nitratos, y después en  $\text{N}_2$ . En este proceso de desnitrificación, los nitratos y nitritos son empleados por dichas bacterias en condiciones anaeróbicas, formando  $\text{CO}_2$  y agua como productos finales, además de nitrógeno gaseoso <sup>59</sup>.

El fósforo se elimina a través del proceso de EBIF <sup>84</sup> en el cual, bacterias acumuladoras de polifosfatos van recogiendo el fósforo del agua dentro de ellas. El fango resultante es complicado de operar, lo cual resulta un ligero inconveniente frente a la mejora de eficiencia del proceso de eliminación de fósforo. Además de la eliminación biológica del fósforo también hay otra variante, que es la fisicoquímica, en la que se utilizan químicos

(principalmente sales de aluminio o hierro) para la formación de flóculos y estos son eliminados mediante filtración <sup>85</sup>.

En último lugar, se realiza una desinfección del agua residual para reducir el número de organismos que se han creado en las etapas intermedias. Los métodos más comunes utilizados son la ozonización, tratamiento con luz UV o tratamiento con clorina; aunque la desinfección con cloro sigue siendo la forma más común de desinfección, sobretodo en Estados Unidos, mientras que en Reino Unido la UV se está volviendo la forma más común de desinfección (Figura. 25)



**Figura 25.** Tratamiento terciario de las aguas residuales. Eliminación de nutrientes (fósforo y nitrógeno) y desinfección mediante radiación ultravioleta o cloro. La desinfección únicamente se utiliza en caso de que la descarga del agua sea en zonas protegidas <sup>59</sup>.

### 3.2.5. Eliminación de contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes se definen como contaminantes previamente desconocidos o no reconocidos como tales, cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva pero sí la preocupación por las posibles consecuencias de la misma. Los contaminantes emergentes son compuestos de los cuales se sabe relativamente poco o nada acerca de su presencia e impacto en los distintos entornos ambientales, razón por la cual, estos no han sido regulados, y de que la disponibilidad de métodos para su análisis sea nula o limitada.

Por ejemplo, está el caso de los parabenos que son los ésteres parafínicos del ácido p-hidroxibenzoico que son utilizados como conservante alimentario, y también es utilizado en la industria cosmética y farmacéutica, todo esto debido al carácter fungicida que tienen. Sin embargo, no es del todo conocido su impacto en el medio ambiente y en la salud humana; se le ha relacionado con diversos tipos de casos de alergias como irritaciones de piel y ojos, infertilidad masculina o directamente con el cáncer de mama. Actualmente la eficiencia de eliminación de los parabenos en las plantas de tratamiento de aguas residuales es superior al 90%, lo cual reduce significativamente la concentración, pero no evita que se vaya acumulando de manera periódica <sup>59</sup>.

## 4. MICROORGANISMOS PARA EL TRATAMIENTO Y PURIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

### 4.1. Microorganismos eficientes (EM, de Effective Microorganisms)

EM, es una abreviación de Effective Microorganisms (Microorganismos Eficaces, efectivos o eficientes), es un cultivo mixto de microorganismos benéficos naturales, sin manipulación genética, fisiológicamente compatibles unos con otros, presentes en ecosistemas naturales, y que pueden aplicarse como inoculante para incrementar la diversidad microbiana de los suelos. Cuando los EM incrementan su población, como una comunidad en el medio en que se encuentran, se incrementa la actividad de los microorganismos naturales, enriqueciendo la microflora, balanceando los ecosistemas microbiales, suprimiendo microorganismos patógenos.

La tecnología EM, fue desarrollada por Teruo Higa, profesor de horticultura de la universidad de Ryukyus en Okinawa, Japón. A comienzos de los años sesenta, el profesor Higa comenzó la búsqueda de una alternativa que reemplazará los fertilizantes y pesticidas sintéticos, popularizados después de la segunda guerra mundial para la producción de alimentos en el mundo entero.

Higa encontró que el éxito de su efecto potenciador estaba en su mezcla; por esto se ha planteado que los EM trabajan en sinergia (Figura 27), ya que su suma tiene mayor efecto que cada uno por separado. Los EM proceden de cinco especies diferentes: bacterias fototróficas o fotosintéticas, bacterias ácido lácticas, levaduras, actinomicetos y hongos de fermentación (Figura 26). Estos microorganismos son muy conocidos, puesto que se llevan utilizando en medicina y en la producción de alimentos desde la antigüedad, siendo muy beneficiosos para los suelos, agua, plantas, animales y, por supuesto, para el ser humano.

Las principales especies de microorganismos incluyen:

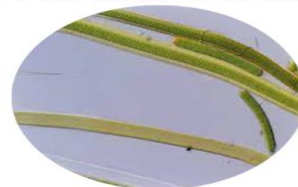
- Bacterias del ácido láctico: *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactics*.
- Bacterias fotosintéticas: *Rhodopseudomonas plastrus*, *Rhodobacter spaeroides*.
- Levaduras: *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*.
- Actinomicetos: *Streptomyces albus*, *Streptomyces griseus*.
- Hongos de fermentación: *Aspergillus oryzae*, *Mucorhiemalis*.

Los microorganismos que constituyen la fórmula de esta tecnología no han sido químicamente sintetizados ni alterados con ingeniería genética, no son nocivos, ni tóxicos, ni genéticamente modificados por el hombre; por el contrario son naturales, benéficos y altamente eficientes, simplemente han sido seleccionados de la misma naturaleza por sus cualidades beneficiosas y se han puesto a actuar juntos <sup>86, 87, 88</sup>.

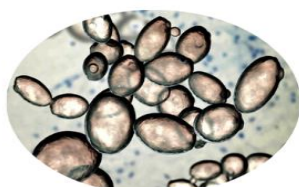
## B. ÁCIDO LÁCTICO



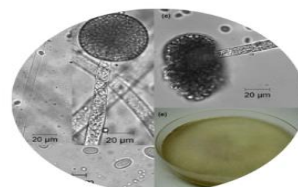
## B. FOTOSINTÉTICAS



## ACTINOMICETES



## LEVADURAS



## HONGOS DE FERMENTACIÓN

**Figura 26.** Principales Microorganismos Eficientes. Bacterias ácido lácticas, bacterias fotosintéticas, actinomicetos, levaduras y hongos de fermentación.

### 4.2. Tipos de Microorganismos Eficientes (EM)

#### 4.2.1. Bacterias Ácido Lácticas (BAL)

Son microorganismos que tienen diversas aplicaciones, siendo una de las principales la fermentación de alimentos como la leche, carne y vegetales para obtener productos como el yogur, quesos, encurtidos, embutidos, ensilados, bebidas y cervezas, entre otros <sup>86, 87</sup>.

Son cocos o bacilos Gram positivos, no esporulados, inmóviles, anaerobios, microaerófilos o aerotolerantes; oxidasa, catalasa y benzidina negativos, carecen de citocromos, no reducen el nitrato a nitrito y producen ácido láctico como el único o principal producto de la fermentación de carbohidratos. Además, las BAL son ácido tolerantes pudiendo crecer algunas a valores de pH tan bajos como 3,2; otras a valores tan altos como 9,6; y la mayoría crece a pH entre 4 y 4,5. Estas características les permiten sobrevivir naturalmente en medios donde otras bacterias no lograrían sobrevivir.

Las mismas pueden mostrar efecto antagónico frente a diferentes agentes fitopatógenos del suelo debido fundamentalmente a la disminución del pH, la producción de péptidos con actividad antimicrobiana como son bacteriocinas clase I y la nisina muy activa contra bacterias Gram positivas. Desde el punto de vista bioecológico estas bacterias son microaerófilas por ello se desarrollan bien en una atmósfera con un 5 % de CO<sub>2</sub>. Son microorganismos de lento crecimiento muy dependiente de la temperatura <sup>89</sup>. Por lo general, para su crecimiento se emplea una incubación de 3 días, a 37 °C o hasta 5 días a 30 °C, puesto que son microorganismos de crecimiento relativamente lento y sus rendimientos metabólicos dependen de la temperatura directamente.

Estas bacterias (*Lactobacillus spp.*) son las más abundantes dentro del consorcio de los EM, producen ácido láctico a partir de azúcares y otros carbohidratos sintetizados por bacterias fototróficas y levaduras. Diversos documentos



señalan que el ácido láctico es un compuesto esterilizante fuerte, que suprime microorganismos dañinos y ayuda a la descomposición de materia orgánica como por ejemplo la lignina y la celulosa, fermentándolos, removiendo efectos no deseables de la materia orgánica no descompuesta. Este compuesto a su vez, transforma esos materiales sin causar influencias negativas en el proceso.

No existe mucha información precisa acerca de la forma en la cual actúan las bacterias ácido lácticas en el tratamiento de las aguas contaminadas, pero teniendo en cuenta sus características, se plantea que al disminuir el pH se genera una inhibición de patógenos.

#### 4.2.2. Bacterias Fototróficas

Son bacterias autótrofas representados fundamentalmente por la especie *Rhodopseudomonas palustris* que sintetizan sustancias útiles de secreciones de raíces, materia orgánica y/o gases dañinos como el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) con el uso de luz solar y calor del suelo como fuentes de energía. Estas sustancias útiles son aminoácidos, ácidos nucleicos, sustancias bioactivas y azúcares.

Dentro del gremio de organismos fotosintéticos que forman parte del EM se encuentra *Rhodopseudomonas palustris*. Estas son bacterias fototróficas facultativas clasificadas dentro de las bacterias gram negativas púrpura sin azufre, comprendiendo un grupo variado, tanto en morfología, filogenia y su tolerancia a diferentes concentraciones de azufre. Son microorganismos capaces de producir aminoácidos, ácidos orgánicos y sustancias bioactivas como hormonas, vitaminas y azúcares empleados por otros microorganismos, heterótrofos en general, como sustratos para incrementar sus poblaciones. La *Rhodopseudomonas palustris* es encontrada comúnmente en suelo y aguas, y posee un metabolismo muy versátil al degradar y reciclar gran variedad de compuestos aromáticos, como bencénicos de varios tipos encontrados en el petróleo, lignina y sus compuestos constituyentes y por lo tanto está implicado en el manejo y reciclaje de compuestos carbonados. No sólo puede convertir dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en material celular, sino también nitrógeno (N<sub>2</sub>) en amonio y producir hidrógeno (H<sub>2</sub>) gaseoso. Este microorganismo crece tanto en ausencia como en presencia de oxígeno. En ausencia de oxígeno, obtiene toda su energía de la luz por medio de la fotosíntesis, crece y aumenta su biomasa absorbiendo CO<sub>2</sub>, pero también puede crecer degradando compuestos carbonados tóxicos y no tóxicos donde el oxígeno esté presente llevando a cabo la respiración. Su crecimiento óptimo ocurre a una temperatura de 30-37 °C y pH 6.9 (rango 5.5-8.5). Tiene una gran variedad de rutas metabólicas que puede llegar a tomar este microorganismo según sean sus necesidades y condiciones ambientales, como parte del mismo produce una serie de enzimas y coenzimas según sea el caso, dentro de las que se encuentran amilasas, hidrolasas y proteasas, así como ubiquinonas y la coenzima Q10, las cuales participan directamente en los procesos de remoción de sulfuro de hidrógeno, nitratos, sulfatos, sulfitos, hidrocarburos, halógenos y nitratos reduciendo de esta forma la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Teniendo en cuenta las condiciones de crecimiento de esta bacteria fototrófica así como, los estudios reportados en el Manual de usos de microorganismos eficaces para agua residual, donde se optimiza el crecimiento de estos microorganismos bajo condiciones de anaerobiosis para el tratamiento de aguas residuales, se considera que las poblaciones de estos microorganismos pueden llegar a adaptarse de forma exitosa a las condiciones que presentan las aguas residuales domésticas.

#### 4.2.3. Levaduras

Las levaduras son hongos unicelulares que representan un puente biológico entre las bacterias y los organismos superiores, manteniendo las ventajas de los microorganismos en cuanto a su fácil manipulación y crecimiento rápido. *Saccharomyces cerevisiae*, es quizás, la levadura más importante para la humanidad, ya sea por su utilización desde hace miles de años en la producción de pan y bebidas alcohólicas por fermentación, o por ser uno de los organismos eucarióticos modelos más intensamente estudiados a nivel de su biología celular y molecular.

Todos los miembros de *Saccharomyces* emplean diversas fuentes de carbono y energía. En primer lugar se encuentran la glucosa y la sacarosa, aunque también pueden emplearse fructosa, galactosa, maltosa y suero hidrolizado, pero no puede asimilar lactosa. También puede utilizarse etanol como fuente de carbono. El nitrógeno asimilable debe administrarse en forma de amoníaco, urea o sales de amonio, aunque también se pueden emplear mezclas de aminoácidos. El nitrato y el nitrito no pueden ser asimilados. Estos microorganismos sintetizan sustancias antimicrobianas a partir azúcares, y aminoácidos secretados por las bacterias fotosintéticas, también producen sustancias bioactivas como hormonas y enzimas que son sustancias empleadas por las BAL y los actinomicetos presentes en el gremio de EM. Como parte de su metabolismo fermentativo, las levaduras producen etanol en relativamente altas concentraciones, que es también reconocido como sustancia antimicrobiana. Se asume por lo tanto que al degradar los carbohidratos presentes en aguas residuales, se producirá etanol, el cual puede funcionar como sustancia antagónica frente a microorganismos patógenos. Así mismo, para las poblaciones de levaduras, la temperatura óptima se ha establecido en 28.5 °C, dado que a mayores temperaturas disminuye el rendimiento, probablemente debido al aumento de energía de mantenimiento. El rendimiento celular puede también afectarse por la presencia de inhibidores como dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ácido aconítico y metales pesados o restos de herbicidas o bactericidas que pueden estar presentes en las mieles.

#### 4.2.4. Actinomicetos

Los actinomicetos son una estructura intermedia entre bacterias y hongos, que pueden coexistir con las bacterias fotosintéticas y producen sustancias antimicrobianas a partir de los aminoácidos y la materia orgánica secretados por éstas. Ambas especies (actinomicetos y bacterias fotosintéticas), mejoran la calidad de los suelos desarrollados, al incrementar su actividad antimicrobiana controlando hongos y bacterias patogénicas <sup>86, 87</sup>.

Los actinomicetos son bacterias filamentosas con cierta similitud con los hongos. El crecimiento consiste en un micelio ramificado que tiende a fragmentarse en elementos bacterianos. Muchos actinomicetos son de vida libre, particularmente en el suelo. Se destacan por su papel principal en la solubilización de la pared celular o componentes de las plantas, hongos e insectos. Por ello tienen gran importancia en el compostaje y en la formación de suelos. Como componentes de ME *Streptomyces albus* y *Streptomyces griseus* son las principales especies de actinomicetos informadas.

Varias especies de actinomicetos, principalmente las que pertenecen al género *Streptomyces*, son excelentes agentes de control biológico debido a su amplio repertorio para producir compuestos antifúngicos que inhiben el

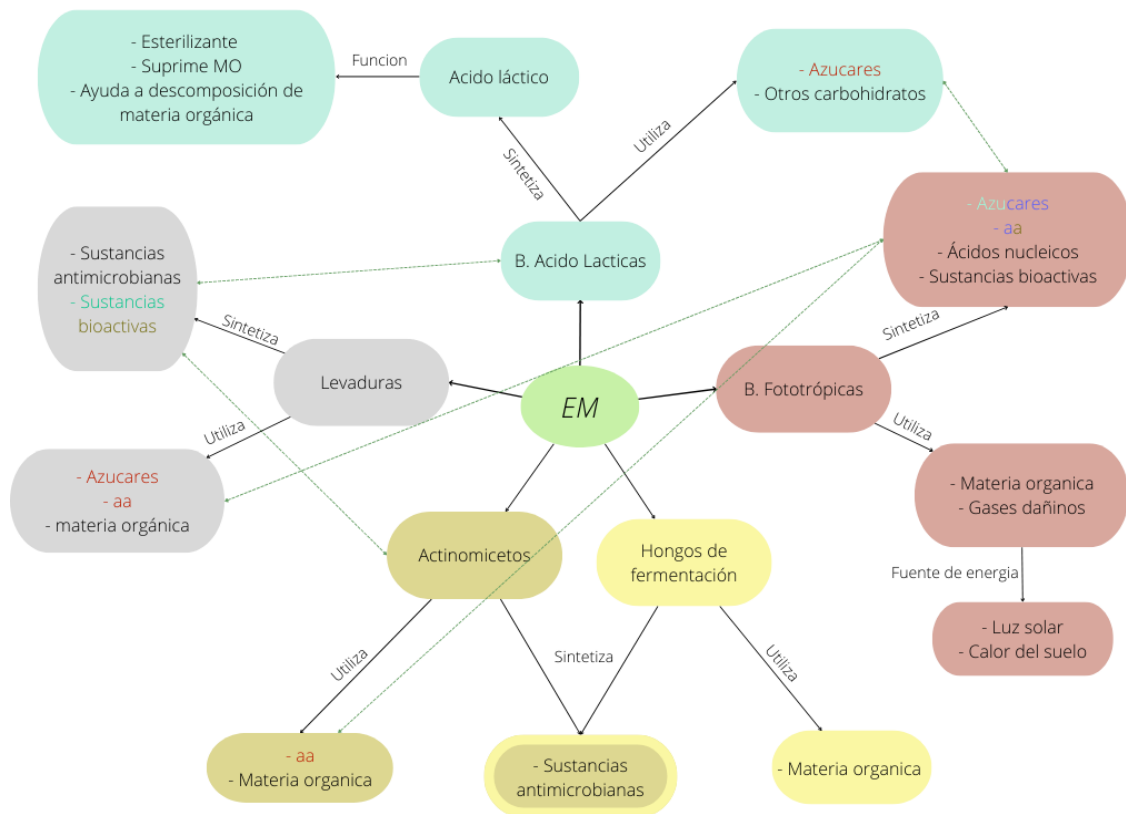
crecimiento micelial de varios hongos fitopatógenos. La actividad antagonista de *Streptomyces* contra hongos patógenos generalmente está relacionada con la producción de compuestos antifúngicos como: enzimas hidrolíticas extracelulares (quitinasas y  $\beta$ -1,3-glucanasa) <sup>89</sup>.

#### 4.2.5. Hongos de Fermentación

Los hongos de fermentación como *Aspergillus* y *Penicillium*, actúan descomponiendo rápidamente la materia orgánica para producir alcohol, ésteres y sustancias antimicrobianas, lo que produce la desodorización y previene la aparición de insectos perjudiciales y larvas de moscas. Al referirse al papel que tienen estos hongos en el EM, explica que aumentan la fragmentación de los componentes de la materia orgánica <sup>86, 87</sup>.

Los hongos contribuyen con los procesos de mineralización del carbono orgánico del suelo; además una gran cantidad de los hongos son antagonistas de especies fitopatógenas. Por otro lado, los hongos poseen la capacidad de reproducirse tanto sexual como asexualmente, en donde la segunda les permite multiplicarse de forma rápida bajo condiciones favorables (sustratos ácidos y ricos en carbono) y la sexual (esporas) es más común bajo condiciones desfavorables.

Dentro de los principales representantes de estos hongos encontramos a las siguientes especies: *Aspergillus oryzae* (Ahlburg) Cohn, *Penicillium* sp, y *Trichoderma* sp. *Aspergillus oryzae* es un hongo microscópico, aeróbico y filamentoso. Esta especie ha sido utilizada milenariamente en la cocina china, japonesa y de otros países de Asia Oriental especialmente para fermentar soja y arroz, aunque también se refiere actividad celulolítica. Varias especies del género *Penicillium* son excelentes degradadores de lignina y celulosa, muy comunes en los ecosistemas tropicales por su capacidad de secretar enzimas extracelulares, su adaptación a ambientes ácidos, y al estrés hídrico, su rápido crecimiento. Las especies pertenecientes al género *Trichoderma* sp se caracterizan por ser hongos saprófitos, que sobreviven en suelos con diferentes cantidades de materia orgánica, los cuales son capaces de descomponerla y en determinadas condiciones pueden ser anaerobios facultativos, lo que les permite mostrar una mayor plasticidad ecológica. Las especies de *Trichoderma* se encuentran presentes en todas las latitudes, desde las zonas polares hasta la ecuatorial. Esta distribución tan amplia y su plasticidad ecológica están estrechamente relacionadas con la alta capacidad enzimática que poseen para degradar sustratos, un metabolismo versátil y resistencia a inhibidores microbianos. Las especies de *Trichoderma* pueden ejercer diferentes mecanismos biocontroladores como: competencia por espacio y nutrientes, el micoparasitismo, la antibiosis y la inducción de resistencia <sup>89</sup>.



-----> Representa la simbiosis entre los ME

**Figura 27.** Sinergia de los Microorganismos Eficientes. Se representa la manera en la que los ME trabajan en conjunto ayudándose unos a otros generando o aportando al otro metabolitos necesarios para su desarrollo.

#### 4.3. Propiedades funcionales de los EM en el tratamiento de las aguas residuales

Las diferentes especies de los EM (bacterias fototróficas, ácido lácticas, levaduras, entre otras) tienen sus respectivas funciones. Sin embargo, las bacterias fototróficas, se pueden considerar como el núcleo de la actividad de los EM. Las bacterias fototróficas refuerzan las actividades de otros microorganismos. A este fenómeno se le denomina coexistencia y coprosperidad.

La utilización de microorganismos como herramienta biológica permite transformar desechos para ser usados como nutrientes; pueden aplicarse en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y en residuos sólidos con lo cual se pueden producir fertilizantes y evitar la proliferación de insectos y vectores. Los EM pueden tener las siguientes funciones:

- En el agua potable: Remueve la materia orgánica; optimiza procesos unitarios en las plantas de tratamiento; reduce la producción de compuestos organoclorados en sistemas convencionales y racionaliza el uso de agentes químicos.

- En el agua residual: Transforma la materia orgánica disminuyendo la producción de lodos; mejora la calidad física, química y microbiológica del efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales e inhibe la producción de olores ofensivos.
- En residuos sólidos: En procesos de compostaje acelera la transformación de la materia orgánica y elimina olores molestos en botaderos, rellenos sanitarios, estaciones de manejo de residuos y en carros recolectores. Los desechos agrícolas, la descarga de aguas contaminadas y la emisión de dioxina que se desarrolla por la incineración y la desintegración de materia orgánica son algunos de los problemas que se pueden enfrentar de manera exitosa con la aplicación de la tecnología de los EM.

#### 4.3.1. Ejemplos de EM en el tratamiento de aguas residuales

Se realizó un experimento entre junio y agosto de 2012 en la Granja Porcina de la Escuela Agrícola Panamericana en Honduras. Se utilizaron tres tratamientos: EM comerciales, EM producidos en Zamorano y un control sin tratamiento. Se le adicionaron los EM a las aguas residuales de la granja porcina de Zamorano y se obtuvo que redujo la cantidad de la DBO, DQO y los ST a los sesenta días después de su aplicación tanto para los EM comerciales como para los ME producidos en Zamorano, observando la mayor reducción al utilizar los EM comercial sobre la DBO y DQO; para los ST no hubo diferencia entre los EM comerciales o los producidos en Zamorano <sup>90</sup>.

Otro experimento con EM es el realizado en 10 puntos ubicados en una zanja del municipio de Güines, provincia Mayabeque, Cuba, en el cual, se realizaron muestreos a las 0 h, 24 h y 48 h posteriores a su aplicación y se concluyó que la mayor eficiencia en la remoción de los distintos parámetros estudiados se alcanzó a las 24 h de aplicado el Versaklin (Tabla 9) , disminuyendo la presencia de microorganismos propios de las aguas contaminadas.

**Tabla 9. Composición de producto Versaklin. Está compuesto por organismos benéficos y altamente eficientes que no son nocivos, ni patógenos, ni genéticamente modificados, ni químicamente sintetizados <sup>91</sup>**

Composición Cuantitativa	
Ácido Lácteo (mg/L)	30 – 90
Ácido Acético (mg/L)	10 – 30
Bacterias aerobias (UFC/mL)	10 <sup>6</sup> – 10 <sup>7</sup>
Hongos y Levaduras (UFC/mL)	10 <sup>6</sup> – 10 <sup>8</sup>
Azúcares reductores (g/L)	1 - 2

En la investigación de Ortiz, et al, se capturaron microorganismos de áreas ricas en diversidad y condiciones climáticas adecuadas; y para su identificación se utilizaron técnicas como la tinción de Gram. Luego, para su reproducción masiva, se construyó un biorreactor y al mismo tiempo se trataron las aguas residuales urbanas de los conjuntos residenciales. En la identificación de los microorganismos se obtuvieron dos cepas de bacterias Gram positivas, las cuales se utilizaron para depurar las aguas residuales vertidas en los ríos Pita y Santa Cecilia respectivamente con una importante carga contaminante de pH, DQO, DBO<sub>5</sub> y sólidos sedimentables. Los

resultados fueron los siguientes: Para la cepa 01- jardín, redujo el pH en un 13,33%, la DQO en un 67,96%, la DBO<sub>5</sub> en un 54,62% y los sólidos sedimentables en un 62,19%. Para la cepa 02- Pululahua', los valores de eficiencia fueron 9.33%, 69.15%, 62.52% y 48.14% para pH, DQO, DBO<sub>5</sub> y sólidos sedimentables, respectivamente (Tabla 10). Los resultados obtenidos sugieren un potencial de biodegradación con estos microorganismos Gram positivos <sup>92</sup>.

**Tabla 10. Comparación de resultados de la biorremediación con las cepas aplicadas <sup>92</sup>**

Parámetro	Valores iniciales	Unidad	Valor Cepa 01- Jardín	Valor Cepa 02- Pululahua	Porcentaje de eficiencia Cepa 01- Jardín (%)	Porcentaje de eficiencia Cepa 02- Pululahua (%)
<b>pH</b>	7,5	pH	6,5	6,8	13,33	9,33
<b>DQO</b>	680,63	mg/L	218,06	210	67,96	69,15
<b>DBO<sub>5</sub></b>	187,58	mg/L	85,12	70,3	54,62	62,52
<b>Sólidos sedimentables</b>	23,14	mg/L	8,75	12	62,13	48,14

En el ensayo realizado por Guanilo y colaboradores en 2021, se estudiaron dos concentraciones de EM (0,05 y 0,1%) y un testigo (sin EM) aplicadas al agua subterránea extraída mediante pozo tubular, analizándose los parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Los EM resultan una gran alternativa para la descontaminación de agua y la obtención de productos agrícolas inocuos, debido a su bajo costo y generación de una agricultura más sostenible.

La DBO<sub>5</sub> se redujo en un 25 a 30%; en tanto que, DQO fue de 15 a 20% al adicionar los EM. La adición de EM al agua subterránea redujo la concentración de Ca (20-30%), Mg (30- 40%), K (5-15%), Na (15- 30%), SO<sub>4</sub> (7-15%), H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (20-40%). Ello, podría ser debido a que los microorganismos eficientes también pueden utilizar los compuestos contaminantes como suministro de carbono y energía para su metabolismo y crecimiento. Asimismo, la presencia de NO<sub>2</sub> implicaría que las bacterias anaeróbicas estarían utilizando NO<sub>3</sub> en un proceso de desnitrificación. La dureza del agua está determinada por el contenido de bicarbonatos, cloruros, sulfatos, magnesio y otros minerales; los bajos niveles encontrados con los tratamientos biológicos permiten considerar al agua tratada en la categoría de suave y podría ser utilizada sin problemas para el riego de plantas. Se observó una disminución de metales pesados, como es el caso de Zn (25-20%), Fe (20-40%) y la remisión total de Al y As con la concentración 0,1%. Las interacciones metal-microbiota han sido ampliamente estudiadas en el marco de la biotecnología ambiental, con el propósito de implementar metodologías que permitan remover, recuperar o detoxificar metales pesados. Estos microorganismos tienen la capacidad y especificidad de absorber determinados metales. Se le atribuye la reducción del As al desarrollo de diversos mecanismos biológicos que les permiten utilizar este elemento en su metabolismo, a través de reacciones de transformación enzimática, metilación, quelación, exclusión e inmovilización. Los resultados también muestran una disminución de coliformes totales y fecales en el agua subterránea tratada con EM al 0,05% y su remoción total cuando se duplicó la dosis (Tabla 11)

<sup>93</sup>.

**Tabla 11. Efecto de EM sobre las características físico químicas y microbiológicas del agua de riego. Se utilizaron dos concentraciones de EM, la primera de 0.05% y la segunda de 0.1% <sup>93</sup>.**

Agua de riego	pH	C.E (dS/m)	S.T.D (ppm)	Cationes (ppm)				Aniones (ppm)				Metales pesados (ppm)					DBO (ppm)	DQO (ppm)	Coliformes (NMP/100 ml)		
				K	Ca	Mg	Na	NO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl <sup>-1</sup>	Fe	Al	Cu	Zn			As	Tota-les	feca-les
Potable	7,50	0,47	263	1,6	31,8	7,05	2,2	0,01	0,00	112,2	37	28,4	0,03	0,03	0,48	0,04	0,008	---	---	---	---
Subterránea	7,40	0,79	463	45,4	56,6	19,3	69,0	0,01	0,00	306,2	92	56,8	0,05	0,00	0,17	0,32	0,02	0,71	2,41	800	800
Subterránea + 0,05%	7,30	0,83	575	43,0	43,8	12,8	59,3	0,02	0,00	236,1	86	44,0	0,04	0,00	0,21	0,28	0,00	0,61	1,85	700	200
Subterránea + 0,1%	7,40	0,81	526	39,9	38,6	11,8	49,0	0,02	0,00	178,1	79	38,3	0,03	0,00	0,20	0,26	0,00	0,57	1,73	00	00

En el estudio “Evaluacion y formulacion de microorganismos eficaces para el tratamiento de aguas residuales generadas en una industria porcícola de municipio Pereira, Risaralda”, se evaluó la capacidad de reducción de bacterias patogénicas con el fin de mejorar la calidad microbiológica del agua para su vertimiento, se realizaron 3 mezclas de ME inoculados en un tratamiento de aguas residuales porcícolas bajo condiciones de laboratorio durante 21 semanas.

Las mezclas 2 y 3 presentaron reducción muy significativa en la concentración microbiana patógena, en comparación con la mezcla 1. Al igual que obtuvieron las características organolépticas más cercanas al tratamiento de aguas residuales. Las variables tiempo y tratamiento, existió una dependencia, el comportamiento de los resultados se empezó a comportar mejor mientras pasaba el tiempo. La disminución del pH, provee un medio que no favorece la proliferación de bacterias, lo que conlleva a una disminución de las UFC de enterobacterias. El pH óptimo, que permitió que las mezclas de ME realizaran sus procesos metabólicos, estuvo entre 7, 6.5 y 4. Se presentó una leve disminución de la temperatura en las mezclas 2 y 3, lo cual sugiere menor población microbiana, sin embargo, la disminución no es significativa <sup>94</sup>.

## 5. PERSPECTIVAS DE FUTURO

### 5.1. Enzimas para el tratamiento de aguas residuales

El uso de técnicas modernas de biotecnología conducirá a sistemas enzimáticos con efectos mejorados en diversas condiciones fisiológicas de temperatura y pH, lo que dará como resultado una mayor eficiencia con un menor consumo de energía y menores costos. Se ha informado que una gran cantidad de enzimas de varios microbios desempeñan un papel crucial en las aplicaciones de tratamiento de aguas residuales. Las enzimas pueden actuar específicamente sobre los contaminantes recalcitrantes y eliminarlos mediante la precipitación y la transformación en otros productos, y también pueden cambiar las características de un desecho dado, haciéndolo más susceptible al tratamiento o ayudando a convertir el material de desecho en productos de valor agregado. El uso de enzimas en lugar de reacciones químicas dañinas es extremadamente importante para satisfacer las demandas de tecnologías más limpias y ecológicas para preservar el planeta <sup>95</sup>.

## **5.2. Evolución dirigida de microalgas para la eliminación de metales pesados.**

En las últimas décadas, los métodos de biorremediación basados en microalgas para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados (HM) han atraído mucha atención en virtud de su respeto por el medio ambiente, rentabilidad y sostenibilidad. Se espera que la evolución dirigida sea efectiva para desarrollar microalgas con una eficiencia de eliminación de HM mucho mayor, pero no existe un indicador no invasivo o sin etiquetas para identificarlas. El autor sugiere según sus hallazgos que la morfología de las células de *E. gracilis* pudiera servir como un indicador efectivo de la eficiencia de eliminación de HM para el tratamiento práctico de aguas residuales en todo el mundo <sup>96</sup>.



## 6. REFERENCIAS

1. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. Agua en el planeta [Internet]. Agua.org.mx [Consultado 10 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
2. Fundación Aquala. ¿Sabías que solo el 0.025% del agua de la Tierra es potable? [Internet] iAqua; 02 de agosto de 2018. [Consultado 29 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/fundacion-aquala/sabias-que-solo-0025-agua-tierra-es-potable-infografia-fundacion-aquala>
3. Soto J. ¿Cómo afecta el cambio climático el acceso al agua? [Internet] Greenpeace; 22 de enero de 2021. [Consultado 26 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://www.greenpeace.org/mexico/noticia/9460/como-afecta-el-cambio-climatico-el-acceso-al-agua/>
4. UNESCO. Abordar la escasez y la calidad del agua [Internet]. Unesco; 2021. [Consultado 26 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/escasez-calidad>
5. Hofste RW, Reig P, Schleifer L. 17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High Water Stress. [Internet] World Resources Institute; 06 de agosto de 2019. [Consultado 28 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.wri.org/insights/17-countries-home-one-quarter-worlds-population-face-extremely-high-water-stress>
6. Comité Español del ACNUR. Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias [Internet]. La Agencia de la ONU para los Refugiados; 26 de febrero de 2019. [Consultado 26 de noviembre de 2021]. Disponible en: [https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc\\_alt45664n\\_o\\_pstn\\_o\\_pst/](https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/)
7. López R México experimenta escasez de agua y falta de equidad en su distribución [Internet]. Gaceta UNAM; 2017. [Consultado 30 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/mexico-experimenta-escasez-de-agua-y-falta-de-equidad-en-su-distribucion/>
8. Monitor de Sequía en México (MSM). Monitor de Sequía en México al 15 de marzo de 2021 [Internet]. Gobierno de México: Servicio Meteorológico Nacional; 19 de marzo de 2021. [Consultado 21 de julio de 2022]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
9. Soto J. ¿Por qué en México hay escasez de agua? [Internet]. Greenpeace; 14 de mayo de 2021. [Consultado 30 de junio de 2022], Disponible en: <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/10163/por-que-en-mexico-hay-escasez-de-agua/>
10. Organización Mundial de la Salud (OMS). Agua para consumo humano [Internet]. 21 de marzo de 2022. [Consultado 26 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
11. Organización Mundial de la Salud (OMS). Las 10 principales causas de defunción [Internet]. 09 de diciembre de 2020. [Consultado 21 julio 2022]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
12. United Nations Environment Programme. Towards a Pollution-Free Planet Background Report. [Internet]. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme; 2017 [Consultado 21 julio 2022]. Disponible en: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21800/UNEA\\_towardspollution\\_long%20version\\_Web.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21800/UNEA_towardspollution_long%20version_Web.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
13. Organización Mundial de la Salud. Agua para consumo humano [Internet]. 21 de marzo de 2022 [Consultado 26 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
14. del Puerto AM, Suárez S, Palacio DE. Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud. Rev Cubana Hig Epidemiol [Internet] Dic 2014 [Consultado 22 de julio de 2022]; 52(3): 372-387. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1561-30032014000300010](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032014000300010)

15. Devine GJ, Eza D, Oigusuku E, Furlong MJ. Uso de insecticidas: contexto y consecuencias ecológicas. SciELO Perú [Internet] 2008 [Consultado 23 de julio de 2022]; 25(1). Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-46342008000100011](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342008000100011)
16. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Contaminación por nutrientes [Internet]. EPA; 14 de junio de 2022 [Consultado 23 de julio de 2022]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutrientes>
17. Mendoza O, Sánchez RA, Barrón J, et al. Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. Salud pública Méx [Internet] Feb 2017 [Consultado 23 de julio 2022]; 59(1): 34-40. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0036-36342017000100034](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342017000100034)
18. Correia A, Marcano L. Presencia y eliminación de compuestos farmacéuticos en plantas de tratamientos de aguas residuales: Revisión a nivel mundial y perspectiva nacional. Bol Mal Salud Amb [Internet] Jul 2015 [Consultado 23 de julio 2022]. 55(1): 1-18. Disponible en: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1690-46482015000100001](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482015000100001)
19. Krieger T, Panke D, Pregernig M. Environmental Conflicts, Migration and Governance [Internet]. Bristol, UK: Bristol University Press; 2020 [Consultado 23 de julio 2022]. Disponible en: <https://bristoluniversitypress.co.uk/environmental-conflicts-migration-and-governance>
20. Milne S. Cómo la escasez de agua está provocando cada vez más guerras en el mundo (y dónde serán los próximos conflictos) [Internet]. BBC Future: BBC News; 24 de Agosto de 2021 [Consultado 27 de julio 2022]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/vert-fut-58259908>
21. UN-Water. Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua [Internet]. Sep 2019 [Consultado 17 de agosto de 2022]. Disponible en: [https://www.unwater.org/app/uploads/2019/12/UN-Water\\_PolicyBrief\\_Water\\_Climate-Change\\_ES.pdf](https://www.unwater.org/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf)
22. Martínez PF, Patiño C. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. Tecnología y Ciencias del Agua [Internet] Mar 2012 [Consultado 13 de marzo de 2022]; 3(1): 5-20. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n1/v3n1a1.pdf>
23. UNESCO, ONU-AGUA. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático [Internet]. Paris: UNESCO Publishing; 2020 [Consultado 18 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://es.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2020>
24. OECD. Water Governance in Cities, OECD Studies on Water [Internet]. Paris: OECD Publishing; Feb 2016 [Consultado 18 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/9789264251090-en>
25. Sostenibilidad para todos, Acciona. Desperdicio de agua en las ciudades [Internet] 2019 [Consultado 20 de abril de 2022]. Disponible en: [https://www.sostenibilidad.com/agua/desperdicio-de-agua-en-las-ciudades/?\\_adin=11551547647](https://www.sostenibilidad.com/agua/desperdicio-de-agua-en-las-ciudades/?_adin=11551547647)
26. Fuentes J. Viejas tuberías hacen de México uno de los países con mayor desperdicio de agua: OCDE [Internet] Consejo Consultivo del Agua; 23 de mayo de 2019 [Consultado 28 de julio de 2022]. Disponible en : <https://www.aguas.org.mx/sitio/blog/noticias/item/1683-viejas-tuberias-hacen-de-mexico-uno-de-los-paises-con-mayor-desperdicio-de-agua-ocde.html>
27. Louzada C, César C. El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático [Internet]. UN News. 26 de noviembre de 2020 [Consultado 26 de abril de 2022]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732>
28. Borja S. El crecimiento de la población y la escasez hídrica [Internet]. Universidad de Alicante: Joaquín Melgarejo Moreno; 2019 [Consultado 26 de marzo de 2022]. Disponible en: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/88468/1/Congreso\\_Nacional\\_Agua\\_2019\\_509-519.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/88468/1/Congreso_Nacional_Agua_2019_509-519.pdf)
29. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP). Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y empleo [Internet]. Paris:

- UNESCO; 2016 [Consultado 26 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000244103>
30. Harvard College. Water Pollution [Internet]. Harvard T.H. Chan School of Public Health; 2022 [Consultado 26 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.hsph.harvard.edu/ehep/82-2/>
  31. Zarza LF. ¿Qué son las aguas residuales? [Internet]. iAgua; 2022 [Consultado 26 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-residuales>
  32. Zarza LF. ¿Qué es la contaminación del agua? [Internet]. iAgua; 2022 [Consultado 26 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-contaminacion-agua>
  33. Fundación Ecomar. ¿Qué son las aguas residuales? [Internet] 09 de julio 2020 [Consultado 26 de marzo 2022]. Disponible en: <https://fundacionecomar.org/que-son-las-aguas-residuales/>
  34. SEDEMA. Agua residual - Glosario definición [Internet]. Gobierno de la Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente; 2022 [Consultado 26 de marzo 2022]. Disponible en: <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Agua%20residual>
  35. SEMARNAT. El Medio Ambiente en México 2013-2014: Agua - Calidad [Internet]. 2014 [Consultado 27 de abril de 2022]. Disponible en: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/06\\_agua/6\\_2\\_3.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html)
  36. García ME, López P. Aguas residuales - Composición [Internet]. 2005 [Consultado 01 de agosto de 2022]. Disponible en: [https://www.academia.edu/download/54146700/Aguas\\_Residuales\\_composicion.pdf](https://www.academia.edu/download/54146700/Aguas_Residuales_composicion.pdf)
  37. Rodríguez H. Las aguas residuales y sus efectos contaminantes [Internet]. iAgua; 13 de marzo de 2017 [Consultado 27 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>
  38. Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC). Agua - Parásitos [Internet]. 18 de octubre 2016 [Consultado 02 de agosto 2022]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/parasites/es/water.html>
  39. Priya AK, Pachiappan R, Kumar PS, et al. The war using microbes: A sustainable approach for wastewater management. *Environmental Pollution* [Internet]. 15 de abril de 2021 [Consultado 02 de agosto de 2022]; 275 (116598): 1-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116598>
  40. Oller V, Sanz J. Cáncer por contaminación química del agua de consumo humano en menores de 19 años: Una revisión sistemática. *Rev Panam Salud Pública* [Internet]. 2012 [Consultado 01 de agosto de 2022]; 32(6): 435-443. Disponible en: <https://www.scielosp.org/article/rpsp/2012.v32n6/435-443/>
  41. Quijano A, Castillo TC, Meléndez I. Potencial mutagénico y genotóxico de aguas residuales de la curtiembre Tasajero en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. *Rev. U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* [Internet]. 30 de junio 2015 [Consultado 01 de agosto de 2022]; 18(1): 13-20. Disponible en: <https://doi.org/10.31910/rudca.v18.n1.2015.449>
  42. Cárdenas GL, Sánchez IA. Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Univ. Salud* [Internet]. 07 de junio de 2013 [Consultado 02 de agosto de 2022]; 15(1): 72-88. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-71072013000100007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007)
  43. Banco Mundial. Agua Residual: De Residuo a Recurso [Internet]. 19 de marzo de 2020 [Consultado 19 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative>
  44. Acuatecnica S.A.S. Tratamiento de aguas residuales y su impacto ambiental [Internet]. 31 de agosto de 2018 [Consultado 27 de abril de 2022]. Disponible en: <https://acuatecnica.com/tratamiento-aguas-residuales-impacto-ambiental/>
  45. Baum R, Luh J, Bartram J. Sanitation: A Global Estimate of Sewerage Connections without Treatment and the Resulting Impact on MDG Progress. *Environ Sci Technol* [Internet]. 16 de enero 2013 [Consultado 08 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es304284f>

46. Nathanson JA. Water pollution [Internet]. 03 de marzo de 2022 [Consultado 26 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/water-pollution>
47. BBC News Mundo. La enorme zona muerta que resurgió en el golfo de México y puede convertirse en la más letal de la historia [Internet]. 11 de junio de 2019 [Consultado 18 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48595254>
48. Beltrán TR, Campos CM. Influencia de microorganismos eficaces sobre la calidad de agua y lodo residual, planta de tratamiento de Jauja [Internet]. Universidad Nacional del Centro del Perú; 2016 [Consultado 05 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3461/Beltran%20Beltran-Campos%20Rivero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
49. Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997 [Internet]. 1997 [Consultado 04 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69207.pdf>
50. Bejarano ME, Escobar M. Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de agua residual [Internet]. 2015 [Consultado el 04 de julio de 2022]. Disponible en: [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1298&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1298&context=ing_ambiental_sanitaria)
51. Ramírez LI, Duran MdC, García JA, et al. Demanda química de oxígeno de muestras acuosas [Internet]. México D.F: UNAM, Facultad de Química, PIQAyQA; 2008 [Consultado 04 de julio de 2022]. Disponible en: [http://cmas.siu.buap.mx/portal\\_pprd/work/sites/redica/resources/LocalContent/127/2/Libro%20DQO%202008.pdf](http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/redica/resources/LocalContent/127/2/Libro%20DQO%202008.pdf)
52. Andrade M. Parámetros de contaminación: DQO, DBO y COT [Internet]. HANNA Instruments Bolivia. [Consultado 04 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.hannabolivia.com/blog/post/451/parametros-contaminacion-dqo-dbo-y-cot>
53. Tecnal. DQO vs DBO [Internet]. [Consultado el 18 de agosto de 2022]. Disponible en: [https://tecnal.com.br/es/blog/215\\_dqo\\_vs\\_dbo](https://tecnal.com.br/es/blog/215_dqo_vs_dbo)
54. SEMARNAT. Indicadores de calidad del agua [Internet]. México: Gobierno de México; 2019 [Consultado de julio de 2022]. Disponible en: [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_R\\_AGUA05\\_01%26IBIC\\_user=dgeia\\_mce%26IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01%26IBIC_user=dgeia_mce%26IBIC_pass=dgeia_mce)
55. Universidad Complutense Madrid. Descripción de indicadores [Internet]. 2015 [Consultado el 01 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/952-2015-02-14-pH%20f.pdf>
56. Banco Mundial. El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial [Internet]. 19 de marzo de 2020 [Consultado 19 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>
57. WWAP. Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017: Las aguas residuales: el recurso desaprovechado, resumen ejecutivo [Internet]. Perugia, Italia: UNESCO; 2017 [Consultado 20 de mayo de 2022]. Disponible en: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247552\\_spa/PDF/247552spa.pdf.multi](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247552_spa/PDF/247552spa.pdf.multi)
58. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Estación depuradora de aguas residuales (EDAR) [Internet]. Madrid: Gobierno de España; [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar/default.aspx>
59. Rodríguez L. El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes [Internet]. iAgua: 15 de diciembre de 2020 [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>
60. HydroSHEDS. HydroWASTE: global database of wastewater treatment plants (WWTPs) [Internet]. 2022 [Consultado 27 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://www.hydrosheds.org/products/hydrowaste>

61. Data Commons. Clasificación por Población Todos los Países de Asia [Internet]. [Consultado 08 de septiembre de 2022]. Disponible en: [https://datacommons.org/ranking/Count\\_Person/Country/asia?h=country%2FIND&hl=es](https://datacommons.org/ranking/Count_Person/Country/asia?h=country%2FIND&hl=es)
62. Data Commons. Clasificación por Población Todos los Países de América del Norte [Internet]. [Consultado 08 de septiembre de 2022]. Disponible en: [https://datacommons.org/ranking/Count\\_Person/Country/northamerica?h=country%2FUSA&hl=es](https://datacommons.org/ranking/Count_Person/Country/northamerica?h=country%2FUSA&hl=es)
63. Data Commons. Earth [Internet]. 2020 [Consultado 08 de septiembre de 2022]. Disponible en: [https://datacommons.org/place/Earth?utm\\_medium=explore&mprop=count&popt=Person&hl=es](https://datacommons.org/place/Earth?utm_medium=explore&mprop=count&popt=Person&hl=es)
64. Macedo HE. Distribution and characteristics of wastewater treatment plants within the global river network. *Earth Syst. Sci. Data.* [Internet]. 09 de febrero de 2022 [Consultado 09 de septiembre de 2022]; 14(2): 559–577. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/essd-14-559-2022>
65. Ingeoexpert. Tratamientos físicos en las tecnologías de depuración de aguas residuales [Internet]. [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <https://ingeoexpert.com/articulo/tratamientos-fisicos-las-tecnologias-depuracion-aguas-residuales/>
66. Aerzen. Los procesos básicos del tratamiento de las aguas residuales [Internet]. [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.aerzen.com/es-mx/aplicaciones/agua-y-tratamiento-de-aguas-residuales/asesoramiento-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales/procesos-del-tratamiento-de-las-aguas-residuales.html>
67. Lhoist. Aguas residuales y lodos [Internet]. [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.lhoist.com/es/market-segment/aguas-residuales-y-lodos>
68. Condorchem Envitech. Tratamiento biológico de aguas residuales [Internet]. [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>
69. Wu L, Ning D, Zhang B, et al. Global diversity and biogeography of bacterial communities in wastewater treatment plants. *Nat. Microbiol.* [Internet]. 13 de mayo de 2019 [Consultado 09 de septiembre de 2022]; 4: 1183–1195. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41564-019-0426-5>
70. Di Marzio WD. Microbiología de lodos activados: una herramienta retrospectiva y predictiva de la depuración de efluentes. National Scientific and Technical Research Council [Internet]. Oct 2004 [Consultado 10 de agosto de 2022]; 16-17. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/344208206\\_Microbiologia\\_de\\_lodos\\_activados\\_una\\_herramienta\\_retrospectiva\\_y\\_predictiva\\_de\\_la\\_depuracion\\_de\\_efluentes](https://www.researchgate.net/publication/344208206_Microbiologia_de_lodos_activados_una_herramienta_retrospectiva_y_predictiva_de_la_depuracion_de_efluentes)
71. Acosta YL, Obaya MC. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [Internet]. 2005 [Consultado 09 de septiembre de 2022]; 39(1): 35-48. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
72. Moeller G, Tomasini AC. Microbiología de lodos activados [Internet]. 29 de julio de 2004 [Consultado 10 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/5Microbiologiadelodosactivados.pdf>
73. Sánchez F. Software para diseñar sistemas de lodos activados y lagunas aireadas. *Conciencia Tecnológica* [Internet]. 2005 [Consultado 11 de agosto de 2022]; 27-30. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403010>
74. Aguado D. Laguna aireadas [Internet]. 17 de enero de 2019 [Consultado 11 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/115674>
75. Vergara B. Diseño de un lecho bacteriano para una E.D.A.R [Internet]. Noviembre de 2019 [Consultado 13 de agosto de 2022]. Disponible en: [http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/185337/TFG\\_Bel%c3%a9n\\_Vergara\\_Braulio.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/185337/TFG_Bel%c3%a9n_Vergara_Braulio.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

76. Torres JE. Evaluación de las condiciones de las áreas rurales colombianas para la implementación de filtros verdes como tratamiento de agua residual [Internet]. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia; 2018 [Consultado 12 de agosto de 2022]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10983/16367>
77. Palmero JA. Eliminación biológica simultánea de materia orgánica nitrógeno y fósforo en un efluente industrial avícola, utilizando un reactor discontinuo secuencial (SBR). Caso: una fábrica ubicada en el Estado Barinas, municipio Barinas. Venezuela 2014 [Internet]. Tecana American University. Marzo de 2014 [Consultado 14 de agosto de 2022]. Disponible en: [https://tauniversity.org/sites/default/files/tesis\\_jhonny\\_palmero.pdf](https://tauniversity.org/sites/default/files/tesis_jhonny_palmero.pdf)
78. Barajas MG. Eliminación biológica de nutrientes en un reactor biológico secuencial.- Caracterización y estimulación de las fuentes de carbono del agua residual urbana [Internet]. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya; 2002 [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/93223>
79. Hidrometalica. Desarenador [Internet]. [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.hidrometalica.com/desarenador/>
80. Valdivielso A. ¿Qué es un sistema de lodos activados? [Internet]. [Consultado 06 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sistema-lodos-activados>
81. Akvopedia. Filtro Percolador [Internet]. 11 de junio de 2015 [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: [https://akvopedia.org/wiki/Filtro\\_Percolador](https://akvopedia.org/wiki/Filtro_Percolador)
82. Parra RA. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. Rev. P+L [Internet]. 11 de diciembre de 2015 [Consultado 22 de junio de 2022]; 10(2): 142-159. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552015000200014](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014)
83. Burgos AJ, Joaquín Suárez J, Ures P. Lagunas aireadas (FT-BIO-011) [Internet]. Universidade da Coruña: INDITEX; Septiembre 2015 [Consultado 22 de junio de 2022]. Disponible en: <https://docplayer.es/84140619-Ft-bio-011-lagunas-aireadas-serie-tratamiento-secundario.html>
84. Oyarzo MJ. Precipitación química del fósforo mediante la adición de sulfato de aluminio en plantas de tratamiento de aguas [Internet]. Universidad de Magallanes; 2007 [Consultado 07 de julio de 2022]. Disponible en: [http://www.umag.cl/biblioteca/tesis/oyarzo\\_vargas\\_2007.pdf](http://www.umag.cl/biblioteca/tesis/oyarzo_vargas_2007.pdf)
85. HUBER Technology de México. Filtración por floculación HUBER para la eliminación de fósforo con el filtro de arena HUBER CONTIFLOW [Internet]. [Consultado 07 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.huber.mx/es/huber-report/ablage-berichte/micro-screening-filtration/filtracion-por-floculacion-huber-para-la-eliminacion-de-fosforo-con-el-filtro-de-arena-huber-contiflow.html>
86. Faife E, Roget D, Fandiño C, et al. Empleo de microorganismos eficientes como alternativa para el tratamiento de residuales. Revisión bibliográfica. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar [Internet]. 2018 [Consultado 04 de junio de 2022]; 52(3): 30-38. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/339916510\\_Empleo\\_de\\_microorganismos\\_eficientes\\_como\\_alternativa\\_para\\_el\\_tratamiento\\_de\\_residuales\\_Revision\\_bibliografica](https://www.researchgate.net/publication/339916510_Empleo_de_microorganismos_eficientes_como_alternativa_para_el_tratamiento_de_residuales_Revision_bibliografica)
87. Luna MA, Mesa JR. Microorganismos eficientes y sus beneficios para los agricultores. Revista científica Agroecosistemas [Internet]. 13 de febrero de 2017 [Consultado 08 de julio de 2022]; 4(2): 31-40. Disponible en: <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/84>
88. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Manual Práctico de Uso de EM [Internet]. 2009 [Consultado 08 de julio de 2022]. Disponible en: [https://www.emuruguay.org/images/Manual\\_Practico\\_Uso\\_EM\\_OISCA\\_BID.pdf](https://www.emuruguay.org/images/Manual_Practico_Uso_EM_OISCA_BID.pdf)
89. Morocho MT, Leiva M. Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. Centro Agrícola [Internet]. 2019 [Consultado 07 de julio de 2022]; 46(2). Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0253-57852019000200093](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093)

90. Toc RM. Efecto de los Microorganismos Eficientes (ME) en las Aguas Residuales de la Granja Porcina de Zamorano, Honduras [Internet]. 2012 [Consultado 09 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/d82d4672-d13a-4c9b-9731-c66827b30d2b/content>
91. Romero TdJ, Vargas D. Uso de microorganismos eficientes para tratar aguas contaminadas. Ing. Hidráulica y Ambiental [Internet]. 2017 [Consultado 09 de septiembre de 2022]; 38(3): 88-100. Disponible en: <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/412>
92. Ortiz D, Anrango MJ, Pérez H, et al. Uso de microorganismos eficientes para la depuración de contaminantes orgánicos en aguas residuales urbanas. Ecuadorian Science Journal [Internet]. 31 de octubre de 2021 [Consultado 10 de septiembre de 2022]; 5(3): 355-362. Disponible en: <https://doi.org/10.46480/esj.5.3.165>
93. Guanilo R, Cornejo J, Zamora C, et al. Microorganismos eficientes en la descontaminación de agua subterránea y su implicancia en la producción y calidad de lechuga hidropónica. Manglar [Internet]. 03 de enero de 2021 [Consultado 10 de septiembre de 2022]; 18(1): 77-82. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2021.010>
94. Izquierdo JE, Montealegre OJ, Muñoz E. Evaluación y formulación de microorganismos eficaces para el tratamiento de aguas residuales generadas en una industria porcícola de municipio Pereira, Risaralda [Internet]. Universidad Libre Seccional Pereira Belmonte; 2017 [Consultado 10 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/16161/EVALUACION%20Y%20FORMULACION%20DE%20MICROORGANISMOS.pdf?sequence=1>
95. Pandey K, Singh B, Pandey AK, et al. Application of Microbial Enzymes in Industrial Waste Water Treatment. Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci [Internet]. 10 de agosto de 2017 [Consultado 11 de septiembre de 2022]; 6(8): 1243-1254. Disponible en: <https://doi.org/10.20546/ijemas.2017.608.151>
96. Xu M, Harmon J, Yuan D, et al. Morphological Indicator for Directed Evolution of *Euglena gracilis* with a High Heavy Metal Removal Efficiency. Environ. Sci. Technol. [Internet] 29 de abril de 2021 [Consultado 11 de septiembre 2022]; 55(12): 7880–7889. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05278>