



Biorrecuperación de aguas residuales con microorganismos

Biorecovery of wastewater with microorganisms

Juan José Humanante Cabrera¹; Carlos Alberto Deza Navarrete¹; Lucrecia Cristina Moreno Alcivar¹⁻²; Ana Mercedes Grijalva Endara¹⁻³

- 1 Universidad Nacional de Tumbes, Escuela de Posgrado. Ciudad Universitaria, Av. Universitaria S/N, Pampagrande, Tumbes, Perú.
- 2 Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Avda. principal La Libertad – Santa Elena, Ecuador.
- 3 Universidad de Guayaquil (UG), Facultad de Ciencias Químicas, Avda. 10 NO Guayaquil, Ecuador.

Autor correspondiente: jhumanante@hotmail.com (J. J. Humanante Cabrera).

J. J. Humanante Cabrera:  <http://orcid.org/0000-0003-1761-4159>
C. A. Deza Navarrete:  <http://orcid.org/0000-0002-3324-3741>

L. C. Moreno Alcivar:  <http://orcid.org/0000-0001-8928-9813>
A. M. Grijalva Endara:  <http://orcid.org/0000-0003-4143-5863>

RESUMEN

El agua es un elemento insustituible que requiere de procesos y medidas sanitarias. La creciente demanda ha promovido de diseños para recuperarla y reutilizarla, uno de los sistemas de innovación es la biorremediación que permite la aplicación de agentes microbianos capaces de degradar los contaminantes. Esta investigación está constituida por la revisión de literatura de fuente primaria para obtener criterios en la aplicación de bacterias para el tratamiento de aguas residuales y la reutilización. La Biorremediación ha demostrado ser una de las alternativas más eficientes y rentables para la eliminación de cuerpos que contaminan el ecosistema, en comparación con los sistemas convencionales físicos – químicos. Sin embargo, los resultados de esta estrategia remediadora dependerán del lugar y condiciones ambientales, es por esta razón la importancia del hallazgo de nuevas biotecnologías e implementación de técnicas rentables aplicadas al bienestar del ambiente y seguridad de la sociedad. Para estudios futuros relacionados a la aplicación de algún tipo de biorremediación se debe realizar un análisis previo de la factibilidad ecológica y económica según las condiciones del ecosistema dañado.

Palabras clave: biorremediación; tratamiento; bacterias; contaminantes; reutilización.

ABSTRACT

Water is an irreplaceable element that requires sanitary processes and measures. The growing demand has promoted of designs to recover and reuse it, one of the innovation systems is bioremediation that allows the application of microbial agents capable of degrading contaminants. This research consists of the review of primary source literature to obtain criteria in the application of bacteria for wastewater treatment and reuse. Bioremediation has proven to be one of the most efficient and cost-effective alternatives for the elimination of bodies that pollute the ecosystem, compared to conventional physical – chemical systems. However, the results of this remediation strategy will depend on the place and environmental conditions, which is why it is the importance of finding new biotechnologies and implementing cost-effective techniques applied to the well-being of the environment and safety of society. For future studies associated to the application of some type of bioremediation, a previous analysis of the ecological and economic feasibility must be carried out according to the conditions of the damaged ecosystem.

Keywords: bioremediation; treatment; bacteria; contaminants; reuse.

Recibido: 26-08-2021.
Aceptado: 14-11-2021.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El agua representa un elemento insustituible en la humanidad y es objeto de preocupación debido que es un recurso limitado cada vez menos disponibles, además requiere de procesos y medidas sanitarias para su desinfección y descontaminación (Dariva & Araujo, 2021; Grunwald, 2016; Lee & Schwab, 2005; Lehn & Parodi, 2009; Postel, 2000; Shannon et al., 2008). Por lo general desde tiempos remotos las entidades municipales e industriales descargaban los desechos al medio natural sin tratamiento previo (Niemczynowicz & Iwra, 1996; Salgot et al., 2001). La mitad de la población carece de agua y saneamientos adecuados (Harremoës, 2002; Rosemarin, 2005) y la creciente demanda de estos recursos en las zonas urbanas, agrícolas, comerciales, industriales y mineras (Pereira et al., 2014; Sen, 2015) han promovido el diseño de medidas para recuperar, sanear y reutilizar el agua (Jasim, 2020; Quist-Jensen et al., 2015).

La ausencia de medios adecuados de tratamientos sanitarios resulta ser un foco infeccioso causante de graves enfermedades digestivas transmitidas por el consumo de agua, las mismas que no presentan descensos significativos (Craun & Calderon, 2001; Del Puerto et al., 1999; Grasso, 2019; Gregorio et al., 2010; Mara & Feachem, 1999; Rodríguez et al., 2016). Pérez et al., (2008) mencionan que el 4% del total de muertes a nivel mundial se vinculan con problemáticas relacionadas con el agua, desagüe e higiene. Adicional, el uso del agua de los efluentes se ha vuelto una de las principales alternativas para fines agrícolas debido a su gran escasez (Al-Zboon & Al-Ananzeh, 2008; Bouwer, 2000; Cairncross, 2003;

Hanjra et al., 2012; Lakatos, 2018; Scheierling et al., 2011).

En América Latina y el Caribe únicamente el 5% de las aguas residuales municipales reciben tratamiento y saneamiento adecuado (Idelovitch & Ringskog, 1997; Rosemarin, 2005). El desarrollo del agua potable se reflejó en el año 2010, sin embargo, en el 2015 la carencia del líquido vital afectó aproximadamente a 663 millones de personas. En este año se definieron los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) con los derechos normativos para el acceso de agua potable y saneamiento establecidos en el artículo N^o 6 (Bartram et al., 2014; Giné et al., 2017; Who/Unicef, 2015). En base a estos objetivos se provee un sistema de mejora de calidad de vida y desarrollo sostenible para la Agenda 2030 (Jasim, 2020; Queiroz et al., 2020).

El crecimiento rápido de la población genera una mayor demanda y a la vez la necesidad de emplear métodos sostenibles que impulsen nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales es así como uno de los sistemas de innovación en la actualidad es la Biorremediación; permite la aplicación de agentes microbianos capaces de degradar de manera eficaz nutrientes presentes en las aguas residuales que permitan la conservación y recuperación del recurso agua.

La esencia de esta investigación está constituida por la revisión de la literatura de fuente primaria para obtener criterios técnicos en la aplicación de bacterias en el tratamiento de aguas residuales y su posterior uso en el riego de zona agrícola.

MATERIAL Y MÉTODOS

El presente artículo de revisión abarcó una búsqueda de la literatura científica y conceptual sobre el tema de estudio, empleando el método bibliométrico (Rinia et al., 1998; Sancho, 2001). Se recurrió a una búsqueda avanzada con palabras

claves, número de citas y tipo de documentos que verificaron la calidad y confiabilidad de los datos extraídos (Costas et al., 2008).

El análisis bibliométrico se desarrolló en tres fases detalladas en la Figura 1.

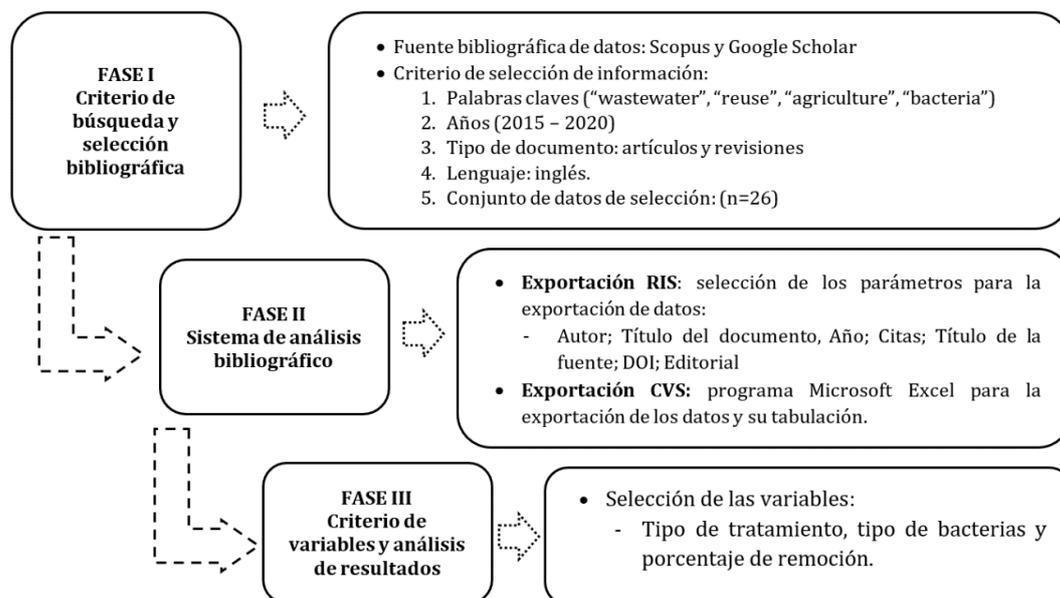


Figura 1. Diagrama de flujo del método desarrollado.

Etapa I: Criterios de búsqueda

Se realizó una búsqueda exploratoria, descriptiva y bibliográfica con la finalidad de llevarse a cabo las características del objeto de investigación (Hider & Pymm, 2008; Rizzo, 2017; Salmon, 2017). Para la recopilación de datos, se examinaron indagaciones exhaustivas de artículos científicos de revistas especializadas en la base de datos Scopus y Google Scholar con el uso de palabras claves (Di Matteo et al., 2018; Zhang et al., 2019). Se incluyeron artículos y revisiones publicados sólo en idioma inglés desde 1996 hasta abril 2020. Se determinaron resultados con los términos "wastewater" (aguas residuales) combinados con "reuse" (reutilización), "agriculture" (agricultura) y "bacteria" (bacteria) empleando lenguaje booleano ("OR", "Y") artículos de los últimos 5 años, predominando el análisis cualitativo (Stevenson & Cordy, 2015). Se delimitaron los resultados de búsqueda por términos dentro del campo título, resumen y palabras claves (TITLE-ABS-KEY), proceso que permite el alcance de fuentes más profundas. Los códigos de campo a través de la base Scopus fueron: ((TITLE-ABS-KEY (wastewater) AND TITLE-ABS-KEY (reuse) AND TITLE-ABS-KEY (agriculture))) AND (bacteria) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE, "j")) AND (LIMIT-TO

(LANGUAGE, "English")), se detectaron 207 documentos científicos, de los cuales fue necesario descartar aquellos que no se relacionan con el área de estudio. Se seleccionó un total de 107 journal para el desarrollo de esta investigación.

Etapa II: Sistema de análisis bibliográfico

Para la extracción de datos de los artículos científicos, desde la plataforma Scopus se analizó los parámetros de mayor interés en la investigación, seleccionando los campos: Autor; Título del documento; Año; Recuento de citas; Título de la fuente; DOI y Editorial. Estos parámetros mencionados anteriormente se seleccionaron para su exportación al Software Microsoft Excel de tipo de archivo CVS, para tabulación de los datos resultantes.

Etapa III: Criterio de variables y análisis de resultados.

El trabajo de revisión tuvo como finalidad la revisión de los principales problemas de contaminación por los cuales la Biorremediación ha tenido que inferir para el desarrollo de estrategias de gestión ambiental, que permitan resolver, mitigar y prevenir los problemas de aguas residuales generadas por las industrias a nivel mundial. Las variables que se consideró fueron: tipo de tratamiento, tipo de bacterias y porcentaje de remoción. En esta sección, la investigación se realizó de forma cuantitativa/descriptiva donde se evaluó los datos recolectados para su análisis.

Tabla 1

Conjunto de fuentes bibliográficas seleccionadas desde la base Scopus

Efluente	Tipo de Biorremediación	% Remoción	Referencia
Para tratamiento de aguas residuales industriales textiles con 10,000 mg ^l -1 de DQO y 3330 mg ^l -1 de DBO.	Anaeróbica-microaerófila	En fase anaeróbica, casi el 60% de la DQO y la DBO de eliminación. HRT óptima de 2d y OLR de 5,0 kg DQO m ⁻³ d ⁻¹ .	Balasure et al., 2016
Tratamiento de aguas residuales industriales.	Aeróbica con bacteria: <i>Pseudomonas stutzeri</i> SDU10	Tasas de remoción de 91,1%; 61,6% de NH ₄ ⁺ ; -N y altas concentraciones de 1500,0 y 2000,0 mg/l en 120 h, respectivamente.	Chen et al., 2020
Tratamiento de aguas residuales sintéticas por presencia de metales pesados.	Contactador biológico rotatorio anaeróbico (An-RBC) a escala de laboratorio	Remoción máxima de Cu (II) 97%, Cd (II) 90% y más del 77% de otros metales, Pb (II), Fe (III), Zn (II) y Ni (II).	Gopi et al., 2017
Aguas residuales para nitrificación heterotrófica con amonio y desnitrificación aeróbica con nitrato o nitrógeno nítrito.	Bacteria desnitrificante aeróbica: <i>Pseudomonas tolaasii</i> cepa Y-11	Remoción de amonio, nitrato y nítrito del 93,6%, 93,5 % y 81,9% y concentraciones de 2,04, 1,99 y 1,74 mg/L/h, respectivamente.	He et al., 2016
Tratamiento de aguas residuales industriales textiles para eliminación del tinte rojo Congo (CR).	Microalga <i>Chlorella vulgaris</i> mediante procesos de biosorción y biodegradación	Eliminación del 83% y 58% del colorante en concentraciones de 5 y 25 mg L ⁻¹ , respectivamente.	Hernández et al., 2015
Tratamiento de aguas residuales.	<i>Pseudomonas putida</i> Y-9, bacteria de nitrificación heterotrófica y desnitrificación aeróbica	Remoción el 82% de nitrato con una acumulación de amonio y disminución del nitrógeno total.	Huang et al., 2020
Tratamiento de aguas residuales industriales textiles para liberación de tintes azoicos.	Cepa HSL1 Providencia rettgeri y <i>Pseudomonas</i> sp. SUK1 para degradación y desintoxicación	Eficiente decoloración del 98-99%.	Lade et al., 2015
Tratamiento de aguas residuales para desnitrificación aeróbica y nitrificación heterotrófica.	Cepa <i>Pseudomonas stutzeri</i> YG-24	Eliminación de TN (Nitrógeno Total), NH ₄ ⁺ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N y P de 85,28%, 88,13%, 86,15%, 70,83% y 51,21% respectivamente.	Li et al., 2015

Tratamiento de aguas residuales en pruebas por lotes (anaeróbicamente).	Anammox: tratamiento anaeróbico	Remoción del 68% de nitrógeno a través de biopelículas portadoras anóxicas.	Li et al., 2020
Tratamiento de aguas residuales de baja resistencia.	AnMBR con filtro de malla	Remoción de DQO altas y estables de $95 \pm 5\%$ y rendimiento promedio de metano de $0,24 \text{ L CH}_4/\text{g DQO}$ eliminado.	Li et al., 2016
Tratamiento de aguas residuales domésticas; nitrificación-anammox convencional de nitrificación de flujo ascendente.	Reactor anaeróbico híbrido (HAR)	Remoción de DQO 92% y concentración final promedio de 22 mgL^{-1} , se eliminó más del 90% del amonio y una tasa de remoción de nitrógeno de $81,0 \text{ gNm}^{-3} \text{ d}^{-1}$ en la etapa final.	Li et al., 2017
Tratamiento de aguas residuales para la bioaumentación.	Bacteria <i>Corynebacterium pollutisoli</i> SPH6 en sistema A/O-MBBR	Tasa máxima de degradación del nitrógeno total ($4,9302 \text{ mgN}/(\text{mg}\cdot\text{células}\cdot\text{h}^{-1})$) con temperatura de $30,5 \text{ }^\circ\text{C}$, pH de $7,97$, relación de inoculación de $7,73\%$ y (DQO/TN) de $7,77$.	Liu et al., 2018
Tratamiento en aguas residuales en proceso de fitorremediación.	<i>Eichhornia crassipes</i>	Capacidades de sorción en monocapa (qm) de $26,32$, $12,60$ y $12,55 \text{ mg/g}$ para metales Pb (II), Cd (II) y Zn (II), respectivamente.	Mahamadi & Nharingo, 2010
Tratamiento de aguas residuales petroquímicas.	<i>Pseudomonas guguanaensis</i> cepa 4-n-1 y cepa 5-d-1 de <i>Pseudomonas guariconensis</i> , bacterias desnitrificantes aeróbicas	Remoción del $93,2\%$ con <i>Pseudomonas guguanaensis</i> cepa 4-n-1 y $89,2\%$ con cepa 5-d-1 de <i>Pseudomonas guariconensis</i> .	Motamedi & Jafari, 2020
Tratamiento de aguas residuales de acuicultura.	<i>Clorella</i> sp.	Eliminación óptima de N-NH_4^+ y P-PO_4 del $98,5\%$ y $92,24\%$ respectivamente.	Nasir et al., 2015
Tratamiento de aguas residuales para la nitrificación heterotrófica con amonio y desnitrificación aeróbica con nitrato o nitrógeno nitrato.	<i>Pseudomonas tolaasii</i> cepa Y-11	Eliminación de amonio, nitrato y nitrito del $93,6\%$, $93,5\%$ y $81,9\%$ y tasas de remoción hasta $2,04$, $1,99$ y $1,74 \text{ mg/L/h}$ respectivamente.	Sun et al., 2016
Tratamiento de aguas residuales con el cultivo de microalgas.	<i>Chlorella</i> sp. en el uso de estiércol de leche digerido como suplemento nutritivo	Las algas eliminaron el amoníaco, nitrógeno total, fósforo total y DQO en un 100% , $75,7$ a $82,5\%$, $62,5$ a $74,7\%$ y $27,4$ a $38,4\%$, respectivamente.	Wang et al., 2010
Tratamiento de aguas residuales industriales.	<i>Chlamydomonas</i> sp. TAI-2	Eliminación del 100% $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($38,4 \text{ mg/L}$) y $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($3,1 \text{ mg/L}$) y 33% $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($44,7 \text{ mg/L}$).	Wu et al., 2012
Aplicación de un SRT de 10d y HRT de 24h en configuración de tanques.	Biorreactor de membrana de algas (A-MBR)	Contenía $0,09 \pm 0,05 \text{ mg/L}$ TP (Fósforo Total) y $0,45 \pm 0,08 \text{ mg/L}$ TN (Nitrógeno Total) y tuvo eficiencias de remoción promedio de $94,9 \pm 3,6\%$ y $95,3 \pm 0,9\%$, respectivamente.	Xu et al., 2015
Tratamiento de aguas residuales para desnitrificación aeróbica y nitrificación heterotrófica.	<i>Pseudomonas putida</i> Y-9, adaptada al frío para la remoción de nitrógeno en 15°C	Eliminó eficientemente amonio, nitrato y nitrito a una tasa promedio de $2,85 \text{ mg}$, $1,60 \text{ mg}$ y $1,83 \text{ mg NL}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivamente.	Xu et al., 2017
Tratamiento de aguas residuales industriales textiles a escala piloto.	Reactor anaeróbico de circulación reforzada (SCA)	Eliminación de DQO de $62,7\%$ y eliminación de cromaticidad máxima de $73,5\%$.	Yang et al., 2016
Tratamiento de aguas residuales para desnitrificación aeróbica y nitrificación heterotrófica.	<i>Acinetobacter junii</i> YB	Eliminación de amonio, nitritos y nitratos de $8,82$, $8,45$ y $7,98 \text{ mg/L/h}$, respectivamente.	Yang et al., 2015
Tratamiento de aguas residuales industriales para nitrificación heterotrófica y capacidad de desnitrificación aeróbica.	Consorcio microbiano FG-06: <i>Acinetobacter</i> spp. y <i>Pseudomonas</i> spp.	<i>Acinetobacter</i> spp. y <i>Pseudomonas</i> spp., lograron una eliminación de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en $90,40\%$ y $93,84\%$ respectivamente.	Yang et al., 2017
Tratamiento de aguas residuales sintéticas por presencia de metales pesados.	Cepa microbiana <i>Pseudomonas umsongensis</i> CY-1	Tasas de reducción de Cr (VI) ($93,9\%$) y Hg (II) ($82,8\%$).	Yao et al., 2020
Tratamiento de las aguas residuales industriales para desnitrificación aeróbica y nitrificación heterotrófica.	<i>Pseudomonas putida</i> ZN1	Remoción eficaz de amonio, nitrato y nitrito del $97,47\%$, $86,08\%$ y $71,57\%$ respectivamente.	Zhang et al., 2019
Tratamiento de aguas residuales de gasificación de carbón (CGW).	Sistema de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) con ayuda de grafeno	Eliminación de DQO y tasa de producción de metano con la ayuda de grafeno el $64,7\%$ y $180,5 \text{ ml/d}$, respectivamente.	Zhu et al., 2018

Nota: Biorremediación de aguas residuales con microorganismos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Desarrollo sostenible

El desarrollo del agua y saneamiento es uno de los indicadores para el seguimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), además que un objetivo fundamental y de importancia es la igualdad en el acceso de agua y el alcance de guías de agendas gubernamentales que hagan posible su efecto (Cetrulo et al., 2020; Queiroz et al., 2020).

Fuller et al., (2016), emplearon datos públicos y disponibles para la evaluación de la reserva de agua potable y saneamiento, clasificándolos por técnicas variadas: modelado no lineal con cobertura del 100%, crecimiento lineal, declive lineal, sin cambios, aceleración o desaceleración negativa, saturación, aceleración y desaceleración.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible pretenden presentar objetivos base para el mundo en especial a los países en vías de desarrollo. Las Organizaciones No Gubernamentales deberán controlar el cumplimiento de este compromiso (Gupta & Vegelin, 2016; Hák et al., 2016). La falta de agua afecta no solamente las actividades humanas e industriales, también a una producción alimentaria apropiada y llevadera (Mora et al., 2017).

El 70% de la superficie terrestre está cubierta de agua, el 96% de esta agua es retenida en océanos salinos, y sólo el 2,5% se mantiene en reservas de agua dulce determinando que <1% del agua es apta para consumo humano, actividades domésticas y agricultura (Becerra et al., 2015; Perlman, 2016). El 70% de extracciones anuales de agua dulce en todo el mundo se deriva a la agricultura (Helmecke et al., 2020; Khalid et al., 2018; World Bank Group, 2016). La demanda y la calidad del agua de riego genera un problema importante a nivel mundial debido a la poca disponibilidad de agua potable y agravándolo la mala gestión, como resultado las crisis económicas sociales y ambientales (Kalavrouziotis, 2015).

El consumo de agua en algunos países del mundo ha crecido el doble de la población humana. Anualmente la extracción del agua ha aumentado 6,3 veces más que lo habitual, a inicios del siglo XX dotaba de menos de 600 Km³/año y a principios del siglo XXI más de 3800 Km³/año. Por consecuencia se ha superado los niveles de uso mínimo de recarga, lo que provoca que las aguas subterráneas y otras corrientes de agua se agoten. En los próximos 50 años, más del 50% de la población enfrentará una escasez de agua, por ello es importante una gestión sostenible de este recurso (World Health, 2016)

2. Industrias y contaminación

Los grandes volúmenes de aguas residuales contaminadas urbanas e industriales son consecuencia del crecimiento poblacional. Estos cuerpos de agua de composición cambiante representan un problema ambiental que se originan en hogares, agricultura e industria (Siles & Michán, 2020) y la eliminación de aguas residuales sin tratar en un ecosistema acuático (como ríos, estanques, océanos, etc.) resulta un grave deterioro de este sistema (Chauhan & Kumar, 2020).

3. Tratamiento de aguas residuales

Existen cinco tipos de aguas residuales: domésticas, industriales, urbanas, comercial, y agrícolas. Las aguas residuales domésticas o sanitarias transportan el agua usada de los baños, fregaderos, cocinas de unidades residenciales y comerciales. A pesar que las aguas residuales domésticas representan un porcentaje bajo de toxicidad, en volúmenes grandes de aguas, hacen que el reaprovechamiento de las aguas residuales sea un factor relevante (Machineni, 2019).

Las aguas residuales se tratan por diferentes etapas, el tratamiento primario comprende a procesos físicos como cribado, remoción de arena, trituración y sedimentación, removiendo materiales grandes y pesados que flotan o se depositan fácilmente, el secundario reduce los niveles de contaminación química (DQO) y biológica (DBO) mediante procesos químicos y/o biológicos y el terciario mejora la calidad de las aguas residuales antes de que se descarguen o reutilicen en entornos abiertos (Chauhan & Kumar, 2020). Existen tipos de microorganismos que evolucionan para adaptarse a los compuestos químicos, causando su eliminación (Petrovich et al., 2019; Wu & Yin, 2020).

Existen diversas operaciones físicas antes del tratamiento: cribas vibratorias y giratorias, adsorción, sedimentación, trituración, flotación, filtración granular y uso de membranas; aprovechando las fuerzas mecánicas: la gravedad, los gradientes de energía, la atracción eléctrica y las fuerzas de Van der Waal como fuerza motriz para separar los contaminantes y preparar los procesos de tratamiento. Estos procesos separan los contaminantes físicos sin alterar la composición química de la sustancia en cuestión. Para la eliminación de compuestos tóxicos tales como pesticidas, plaguicidas, detergentes, etc., se usa carbón activado, gel de sílice y piedra pómez artificial (Machineni, 2019).

La tecnología de membranas ha avanzado con más frecuencia debido a que ofrece desarrollo sostenible y de manera simultánea intensifica procesos que brindan beneficios a otros procesos de producción. Se disminuye de manera considerable el tamaño de los equipos, incrementa la eficiencia, ahorra energía, comprime costos, ayuda a la minimización del impacto ambiental, aumento de la seguridad (Mora et al., 2017).

En un estudio para la desinfección de aguas residuales provenientes de degolladeros se utilizaron procesos basados en separación por membranas, en las que se incluye: ultra-filtración (UF), micro-filtración (MF) y nano-filtración (Brandt et al., 2006). Para la eliminación de sales se utiliza la osmosis inversas; con remoción de hasta el 90% (Machineni, 2019).

4. Biorremediación

Utiliza microorganismos vivos y vegetales para descontaminar aguas mediante proceso metabólicos. La Biorremediación va a depender de las actividades catabólicas de los organismos y de su capacidad de degradación de contaminantes que

tengan origen orgánico utilizándolo como alimento y energía. Las técnicas de Biorremediación más comunes son la fitorremediación, el electro biorremediación, la lixiviación, la quelación, la metilación y la precipitación (Garzón et al., 2017; Mora et al., 2017).

4.1.1 Por Microorganismos

Las actividades domésticas e industriales son contaminantes por el contenido de metales pesados. El uso de microbios sirve para degradar As y Se. bajo técnicas que implican el uso de plantas, planta-microbio, células vivas y biomasa microbiana muerta (Paul & Saha, 2019).

4.1.2 Microalgas MBWT

El tratamiento de aguas residuales basado en microalgas (MBWT) es otro proceso alternativo y avanzado para la eliminación de nutrientes (N y P), eficiencia y productividad de la biomasa (Wang et al., 2016). Li et al. (2019) menciona que dicho proceso aplicado en aguas residuales agrícolas mostró beneficios positivos y significativos en comparación con el tratamiento convencional de aguas residuales, así como la alta remoción de DQO, nitrógeno, fósforo, ahorro de energía y el funcionamiento con reducidas emisiones de carbono.

Xu et al. (2015) determinaron en una configuración de tanques en serie el efecto del desacoplamiento entre el tiempo de retención de sólidos (SRT) y el tiempo de retención hidráulica (HRT) y la relación SRT / HRT en el crecimiento de algas y eliminación de nutrientes (N y P) en un biorreactor de membrana de algas (*A-MBR*). Se aplicó un SRT de 10d y HRT de 24h, que resultó en un permeado el mejor rendimiento de eliminación de nutrientes, contenía $0,09 \pm 0,05$ mg / L TP y $0,45 \pm 0,08$ mg / L TN (Nitrógeno Total) basado en con eficiencias de remoción promedio de $94,9 \pm 3,6\%$ y $95,3 \pm 0,9\%$, respectivamente. Esto significó un 45% aproximadamente de productividad en las algas de los efluentes secundarios de aguas residuales.

Wang et al. (2010) aplicaron *Chlorella sp.* en el uso de estiércol de leche digerido como suplemento nutritivo para el cultivo de microalgas, se aplicaron múltiplos de dilución de 10, 15, 20 y 25 al estiércol digerido, las algas eliminaron el amoníaco, el nitrógeno total, el fósforo total y la DQO en un 100%, 75,7 a 82,5%, 62,5 a 74,7% y 27,4 a 38,4%, respectivamente, aplicado en las aguas residuales.

Wu et al. (2012) utilizaron *Chlamydomonas sp. TAI-2* en aguas residuales industriales y eliminaron 100% $\text{NH}_4^{++}\text{-N}$ (38,4 mg/L) y $\text{NO}_3\text{-N}$ (3,1 mg/L) y 33% $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (44,7 mg/L).

5. Aplicaciones de Biorremediación

En el Valle del Mezquital, Hidalgo-México se han utilizado las aguas residuales urbanas por más de 100 años, se encontró prevalencia de *Ascaris lumbricoides*, *Giardia lamblia* y *Entamoeba histolytica* entre la población, además que las aguas residuales contenían altas concentraciones de organismos indicadores: 108 coliformes fecales/100 mL (Mora et al., 2017), es por esto que los procesos de rizo-filtración se han dirigido al

tratamiento de estas aguas, resultando solo una remoción parcial de nitratos (60%) y fosfatos (40%) utilizando *Helianthus annuus* (L.) y *Mentha deriva* (L.) (Torres, 2013) y en condiciones hidropónicas *Vetiveria zizanioides* (L.) (Seguier.) redujo los niveles de nitrógeno y fósforo al 94% y 90% respectivamente (Brandt et al., 2006).

He et al. (2016) determinaron que *Pseudomonas tolaasii* cepa Y-11 es una bacteria desnitrificante de nitrato aeróbica hipotermia, que mostró una alta capacidad de eliminación para la nitrificación heterotrófica con amonio y para la desnitrificación aeróbica con nitrato o nitrógeno nitrato de las aguas residuales. Las eficiencias de eliminación de amonio, nitrato y nitrito fueron del 93,6%, 93,5 % y 81,9% sin acumulación de nitrito, y las tasas de remoción correspondientes alcanzaron hasta 2,04, 1,99 y 1,74 mg/L/h, respectivamente.

Li et al. (2015) manifestaron que la aplicación de la cepa *Pseudomonas stutzeri* YG-24 en muestras de aguas residuales resultó eficiente en la eliminación de TN, $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ y P con 85,28%, 88,13%, 86,15%, 70,83% y 51,21% respectivamente, reflejando capacidad de desnitrificación aeróbica y una nitrificación heterotrófica eficiente. Li et al. (2020) mencionan que *Anammox* contribuyó una remoción del 68% de nitrógeno a través de biopelículas portadoras anóxicas en pruebas por lotes (anaeróbicamente) de aguas residuales. Combinando la desnitrificación y el anammox, el nitrógeno se eliminó aproximadamente un 16,9% para las aguas residuales reales con bajas relaciones DQO/TN.

En la industria textil en México, existe la descarga de aguas residuales que portan colorantes y afecta los ecosistemas acuáticos. Se ensayó la biomasa activa e inactiva de la microalga *Chlorella vulgaris* mediante procesos de biosorción y biodegradación para exclusión del tinte rojo Congo (CR) de soluciones acuosas, y resultó el 83% y el 58% de eliminación en concentraciones de 5 y 25 mg^*L^{-1} , respectivamente (Hernández et al., 2015).

Cupriavidus sp. S1. demostró la capacidad de nitrificación heterotrófica y desnitrificación aeróbica de aguas residuales. Las eficiencias de remoción de amonio, nitrato y nitrito fueron 99,68%, 98,03% y 99,81%, con tasas de remoción de 10,43, 8,64 y 8,36 mg/L/h, respectivamente (Sun et al., 2016).

Pseudomonas stutzeri SDU10. demostró la alta eliminación de $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ en las aguas residuales, con tasas de remoción de 91,1% y 61,6%, y eliminar altas concentraciones de $\text{NH}_4^{++}\text{-N}$ de 1500,0 y 2000,0 mg/L en 120 h respectivamente. En los ensayos por lotes, la tasa de eliminación de $\text{NH}_4^{++}\text{-N}$ más alta del 97,6% y la tasa de eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) del 94,2% (Chen et al., 2020).

En las aguas residuales industriales los metales pesados afectan seriamente la remoción de nitrógeno, por esto se experimentó la bacteria de nitrificación-heterotrófica-desnitrificación aeróbica *Pseudomonas putida* ZN1 para eliminación de nitrógeno, resultó eficaz la remoción del amonio, el nitrato y el nitrito del 97,47%, 86,08% y 71,57% respectivamente (Zhang et al., 2019).

Las aguas residuales petroquímicas tienen alto contenido de amonio que causa graves problemas ambientales. Para la eliminación de nitrógeno heterotrófico en las aguas residuales petroquímicas se prepararon bacterias desnitrificantes aeróbicas de *Pseudomonas guguanensis cepa 4-n-1* con 93,2% de remoción y cepa *5-d-1* de *Pseudomonas guariconensis* con desnitrificación del 89,2% (Motamedi & Jafari, 2020).

Pseudomonas putida Y-9 es una bacteria de nitrificación heterotrófica y desnitrificación aeróbica eliminó el 82% del nitrato acompañado de una acumulación de amonio y una disminución del nitrógeno total. El amonio inhibió la transformación de nitratos el 22,65% (Huang et al., 2020). Esta bacteria adaptada al frío resultó excelente para la remoción de nitrógeno en 15 °C, pues eliminó eficientemente amonio, nitrato y nitrito a una tasa promedio de 2,85 mg, 1,60 mg y 1,83 mg NL⁻¹ h⁻¹, respectivamente (Xu et al., 2017).

Acinetobacter junii YB con una tasa eficiente de eliminación de amonio, nitritos y nitratos de 8,82, 8,45 y 7,98 mg/L/h, respectivamente, resultó exhibiendo una nitrificación heterotrófica eficiente y capacidad de desnitrificación aeróbica (Yang et al., 2015).

La liberación de tintes azoicos textiles al medio acuático es un problema a la salud, es así que se experimentó la cepa *HSL1* de *Providencia rettgeri* y *Pseudomonas sp. SUK1* para la degradación y desintoxicación, esta mostró una eficiente decoloración del 98-99% (Lade et al., 2015).

La cepa microbiana *Pseudomonas umsongensis CY-1*, se aisló en sitios contaminados con múltiples metales pesados como el cromo y mostró potencial de remediación para la contaminación. En concentración inicial de 5 mg/L, se obtuvo las tasas de reducción más altas de Cr (VI) (93,9%) y Hg (II) (82,8%) (Yao et al., 2020).

En las aguas residuales industriales, se descubrió un consorcio microbiano llamado *FG-06* exhibía una nitrificación heterotrófica eficiente y una capacidad de desnitrificación aeróbica, se componía de *Acinetobacter spp.* y *Pseudomonas spp.*, logró una eliminación de NH⁴⁺-N en 90,40% y 93,84% respectivamente (Yang et al., 2017).

Mahamadi & Nharingo (2010) indicó que en los procesos de fitorremediación empleando *Eichhornia crassipes* (Hernández et al., 2015) que es un tipo de macrófito garante de la remediación, resultó con capacidades de sorción en monocapa (qm) de 26,32, 12,60 y 12,55 mg/L para iones metálicos Pb (II), Cd (II) y Zn (II), respectivamente. Nasir et al., (2015) manifestaron que el uso de *Clorella sp.* en aguas residuales de acuicultura al 30% tuvo una eliminación óptima de N-NH⁴⁺ y P-PO₄ del 98,5% y 92,24% respectivamente.

Para el tratamiento de aguas residuales domésticas con uso eficiente de la energía se desarrolló la nitrificación-anammox convencional de nitratación de flujo ascendente para tratar el efluente primario con un reactor anaeróbico híbrido (HAR), este sistema logró el 92% de remoción de DQO y concentración de DQO en efluente final promedio de 22 mgL⁻¹, se eliminó más del 90% del amonio y

una tasa de remoción de nitrógeno de 81,0 gNm⁻³ d⁻¹ en la etapa final (Li et al., 2017).

Yang et al. (2018) experimentaron en tratamiento de aguas residuales industriales textiles a escala piloto un reactor anaeróbico de circulación reforzada (SCA) aplicado, los resultados demostraron que una eficiencia de eliminación de DQO de 62,7% y eliminación de cromaticidad máxima de 73,5%.

Balasure et al. (2016) desarrollaron un estudio de biorremediación anaeróbica-microaerófila para el tratamiento de aguas residuales industriales textiles con 10,000 mg*L⁻¹ de DQO y 3330 mg*L⁻¹ de DBO, Los resultados mostraron que, en una fase anaeróbica, casi el 60% de la DQO y la DBO se eliminó de las aguas residuales textiles a una HRT óptima de 2d y una OLR de 5,0 kg DQO m⁻³d⁻¹.

Gopi et al. (2017) evaluaron el rendimiento de un reactor de *contactor biológico rotatorio anaeróbico (An-RBC)* a escala de laboratorio que elimina metales pesados de aguas residuales sintéticas de forma continua con un tiempo de residencia (RT) de 24 y 48 h en condiciones reductoras de sulfato. Presentó una remoción máxima de Cu (II) (97%) seguida de Cd (II) (90%) y más del 77% de remoción de otros metales, Pb (II), Fe (III), Zn (II) y Ni (II), en concentración máxima de metal en el rango de 50 a 175 mg/L a las 48 h TA.

Zhu et al. (2018) desarrollaron para el tratamiento de aguas residuales de gasificación de carbón (CGW) un sistema de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) con ayuda de grafeno, los resultados revelaron que a largo plazo la eficiencia de eliminación de DQO y la tasa de producción de metano con la ayuda de grafeno alcanzaron el 64,7% y 180,5 mL/d, respectivamente.

Liu et al. (2018) evaluaron en la eliminación de nitrógeno del tratamiento de aguas residuales para la bioaumentación una nueva bacteria *Corynebacterium pollutisoli SPH6* en el sistema *A/O-MBBR*. Resultó una tasa máxima de degradación del nitrógeno total (4,9302 mgN/(mg-células·h⁻¹)) con temperatura de 30,5 °C, pH de 7,97, relación de inoculación de 7,73% y relación de demanda química de oxígeno y nitrógeno total (DQO/TN) de 7,77.

Li et al. (2016) utilizaron para el tratamiento de aguas residuales de baja resistencia los *AnMBR con filtro de malla* como una tecnología prometedora y sostenible en la mejora de la calidad del efluente, investigó su rendimiento como material de soporte mediante burbujeo de biogás in situ y exhibió eficiencias de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) altas y estables de 95 ± 5% y un rendimiento promedio de metano de 0,24 L CH₄/g DQO eliminado.

6. Reutilización de las aguas residuales en la agricultura

Las aguas residuales agrícolas son las aguas que desembocan por el extremo inferior de los surcos, fronteras, cuencas y bosques en la preparación de la tierra para cultivos agrícolas (Machineni, 2019). Las aguas residuales domésticas e industriales sin tratar o medianamente tratadas son utilizadas para el riego de cultivos de aproximadamente 20

millones de hectáreas a nivel mundial (Azunre et al., 2019; Khalid et al., 2018).

El regadío de aguas residuales es una actividad desarrollada en la agricultura en varios países a nivel mundial, sin embargo, la disponibilidad de datos que respalden las cantidades de aguas residuales producidas, tratadas y recuperadas es escasa. De 181 países solo 55 cuentan con datos recientes disponibles, representando el 37% desde el periodo 2008 – 2012 (Pereira et al., 2014; Sato et al., 2013; Siebert et al., 2010; Thebo et al., 2017).

La reutilización de aguas residuales en la agricultura reducirá la carga de la extracción de agua de los cuerpos de agua naturales y también los mantendrá menos contaminados, ya que se reducirá la eliminación de aguas residuales en arroyos y ríos cercanos. Para esto es esencial un tratamiento adecuado, ecológico, rentable, eficiente y útil para las industrias de pequeña escala (Chauhan & Kumar, 2020; Tripathi et al., 2019).

Muchos países como India, China, países del Medio Oriente, naciones africanas, Estados Unidos, países europeos como Alemania, etc., probaron el riego fertilizante con aguas residuales domésticas e industriales. La mayoría de estos países no han implementado la fertiirrigación de aguas residuales ya que notaron limitaciones en este proceso como patógenos, metales pesados, altas sales, etc. (Flores et al., 2011; Kalavrouziotis, 2015; Sapkota, 2019).

Utilizando más del 50% de aguas residuales para riego países como Israel, Turquía y Jordania lograron reducir estas limitaciones adoptando tecnologías avanzadas como la desalinización, desinfección solar, el uso de humedales, etc., en combinación con los métodos convencionales para tratar las aguas residuales (Al-Zboon & Al-Ananzeh, 2008).

En Israel, se alcanzaron niveles aceptables de boro y sodio a través de regulaciones promulgadas por el Ministerio de Medio Ambiente en 1994, que establece controles para reducir la salinidad en el desagüe de las aguas residuales tratadas, domésticas e industriales (Sapkota, 2019).

Las aguas residuales se han convertido en un recurso cada vez más valioso y no solo en un producto desechable. De hecho, el riego con aguas residuales tratadas ya es usado en algunos países como: Estados Unidos, Israel, Chipre, Italia, Francia y España (Becerra et al., 2015; Kalavrouziotis, 2015).

7. Ventajas y desventajas de aguas tratadas para el riego agrícola

7.1 Ventajas

Cuando se usa agua regenerada y se maneja cuidadosamente sus propiedades se obtienen cantidades sustanciales de nutrientes lo que reduce los costos y optimiza el rendimiento de los cultivos (Carr et al., 2011). La composición del suelo mejora la conductividad eléctrica y aporta nutrientes gracias al agua recuperada, aumento de nitrógeno, fósforo y minerales como el amonio y sodio (Fito & Van Hulle, 2020; Mora et al., 2017).

La fuente de agua alternativa que era ecológica proporcionaba un mejor crecimiento de las plantas y la calidad de los frutos (Chauhan & Kumar, 2020). Presiones reducidas sobre acuíferos sobrecargados (Intriago et al., 2018).

Recarga exitosa del agua subterránea (Angelakis & Durham, 2008; Jaramillo & Restrepo, 2017)

Aplicaciones reducidas de fertilizantes (Drechsel & Evans, 2010; Jaramillo & Restrepo, 2017; Lyu et al., 2016).

Altos rendimientos de cultivos que se surcan con agua reutilizada (Intriago et al., 2018; Vergine et al., 2017; Vivaldi et al., 2015).

Aprovechando los nutrientes de las aguas residuales en los cultivos, reduce los costos de uso de fertilizantes para los alimentos (Kalavrouziotis, 2015).

7.2 Desventajas

El agua que se recupera es ligeramente salina, por tanto, la productividad de los cultivos puede verse reducida (Carr et al., 2011).

El riego puede tener efectos adversos sobre el cultivo, el suelo, la vida del sistema o incluso servir como vehículo para la contaminación de la población (Da Silva, 2018).

El tratamiento, almacenamiento y distribución inclusive el tipo de técnica y otras condiciones como el clima implican riesgos químicos, por tanto, se debe considerar los factores de exposición durante la práctica de reutilización del agua para riego agrícola (Helmecke et al., 2020).

Los métodos físicos, químicos y combinados convencionales generan altos costos de instalación, mantenimiento y operación (Machineni, 2019).

Algunos países no cuentan con guías o regulaciones sobre la reutilización del agua, resultando ser continua de crudo o sin tratar para el uso agrícola (Khalid et al., 2018).

La irrigación con aguas residuales de alto contenido de cromo genera impactos negativos ambientales al ser fuente de contaminación de aguas subterráneas y suelos, como consecuencia las personas presentan enfermedades hídricas puesto que las aguas residuales se utilizan sin ningún tratamiento de depuración (Drechsel & Evans, 2010; Mora et al., 2017).

8. Perspectivas futuras

Con la finalidad de evolucionar conceptual y científicamente la acción de proteger las fuentes de agua y el tratamiento adecuado para los diferentes tipos de agua, se levanta el interés de la academia, el gobierno y otros interesados.

El impacto ambiental amenaza potencialmente a la salud humana por la exposición, proliferación y descarga de residuos domésticos e industriales, debiéndose formular esfuerzos junto a organizaciones que permitan reducir estos problemas medioambientales.

La crisis de agua en aumento representa un compromiso social y político de carácter obligatorio a nivel mundial.

El agua es un recurso limitado, menos del 1% de agua dulce en la tierra es de consumo humano y uso

agrícola, comprometiendo la seguridad alimentaria y salud pública.

El uso de aguas residuales en los cultivos sin un tratamiento correcto puede ocasionar trastornos en la alimentación del consumidor, además que no es exenta de riesgos para el medio ambiente, suelo, fauna y vegetación.

La falta de estudios científicos y técnicos crean limitaciones a las industrias, inclinándose a los tratamientos convencionales y desfavoreciendo la tecnología evolutiva de prácticas rentables para la reutilización del agua.

CONCLUSIONES

Mediante el uso de tratamientos físicos, químicos y biológicos aplicados en las aguas residuales se logrará la reutilización del agua manteniendo un equilibrio entre innovación, desarrollo y contaminación.

Las organizaciones entre países deberán proponer planes estratégicos para la correcta gestión, distribución, uso y reutilización del recurso hídrico, o bien hallar nuevas fuentes de agua sin explorar y proporcionar el proceso que requiere para que su orientación y aprovechamiento equitativo.

Es importante asegurar el crecimiento de la productividad de los cultivos sin explotar el

recurso agua. El control de saneamiento del agua significa un factor fundamental para la salud del consumidor de los productos a beneficiarse de las aguas tratadas.

El tratamiento adecuado mediante técnicas de descontaminación del agua se prevé como una ventaja debido a la conservación de las propiedades de los cultivos, siendo inclusive favorecidos con nutrientes.

Debido a ser competentes surge la necesidad de desarrollar técnicas de Biorremediación con las cuales complementarían las tradicionales

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Zboon, K., & Al-Ananzeh, N. (2008). Performance of wastewater treatment plants in Jordan and suitability for reuse. *African Journal of Biotechnology*, 7(15), 2621-2629.
- Angelakis, A. N., & Durham, B. (2008). Water recycling and reuse in EUREAU countries: Trends and challenges. *Desalination*, 218(1-3), 3-12.
- Azunre, G. A., Amponsah, O., Peprah, C., Takyi, S. A., & Braimah, I. (2019). A review of the role of urban agriculture in the sustainable city discourse. *Cities*, 93, 104-119.
- Balasure, K., Jain, K., Bhatt, N., & Madamwar, D. (2016). Exploring bioremediation strategies to enhance the mineralization of textile industrial wastewater through sequential anaerobic-microaerophilic process. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 106, 97-105.
- Bartram, J., Brocklehurst, C., Fisher, M. B., Luyendijk, R., Hossain, R., Wardlaw, T., & Gordon, B. (2014). Global monitoring of water supply and sanitation: History, methods and future challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(8), 8137-8165.
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., & Nunes, O. C. (2015). Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment International*, 75, 117-135.
- Bouwer, H. (2000). Integrated water management: Emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*, 45(3), 217-228.
- Brandt, R., Merkl, N., Schultze-Kraft, R., Infante, C., & Broll, G. (2006). Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. *International Journal of Phytoremediation*, 8(4), 273-284.
- Cairncross, S. (2003). Water supply and sanitation: Some misconceptions. *Tropical Medicine and International Health*, 8(3), 193-195.
- Carr, G., Potter, R. B., & Nortcliff, S. (2011). Water reuse for irrigation in Jordan: Perceptions of water quality among farmers. *Agricultural Water Management*, 98(5), 847-854.
- Cetrulo, T. B., Marques, R. C., Malheiros, T. F., & Cetrulo, N. M. (2020). Monitoring inequality in water access: Challenges for the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Science of the Total Environment*, 727.
- Chauhan, J. S., & Kumar, S. (2020). Wastewater fertigation: an eco-technology for sustainable agriculture. *Sustainable Water Resources Management*, 6(3).
- Chen, L., Lin, J., Pan, D., Ren, Y., Zhang, J., Zhou, B., ... Lin, J. (2020). Ammonium Removal by a Newly Isolated Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria *Pseudomonas Stutzeri* SDU10 and Its Potential in Treatment of Piggery Wastewater. *Current Microbiology*, 77(10), 2792-2801.
- Costas, R., Moreno, L., & Bordons, M. (2008). Overlapping and singularity of MEDLINE, WoS and IME for the analysis of the scientific activity of a region in Health Sciences. *Revista Espanola de Documentacion Cientifica*, 31(3), 327-343.
- Craun, G. F., & Calderon, R. L. (2001). Waterborne disease outbreaks caused by distribution system deficiencies. *Journal / American Water Works Association*, 93(9), 64-75.
- Da Silva, T. L. (2018). Wastewater quality for reuse in irrigated agriculture. *IRRIGA*, 1(Special Edition 30 years PGIRRIGA), 101-111.
- Dariva, M. A., & Araujo, A. (2021) Implementation, Performance and Waste Management Analysis of Decentralized Wastewater Treatment Systems Using BIM Technology. In: *Vol. 98. Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 297-319): Springer.
- Del Puerto Rodríguez, A. M., Concepción Rojas, M., & Iglesias Fernández, A. M. (1999). Calidad del agua y enfermedades de transmisión digestiva. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 15(5), 495-502.
- Di Matteo, G., Nardi, P., Grego, S., & Guidi, C. (2018). Bibliometric analysis of Climate Change Vulnerability Assessment research. *Environment Systems and Decisions*, 38(4), 508-516.
- Drechsel, P., & Evans, A. E. V. (2010). Wastewater use in irrigated agriculture. *Irrigation and Drainage Systems*, 24(1-2), 1-3.

- Fito, J., & Van Hulle, S. W. H. (2020). Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability. *Environment, Development and Sustainability*.
- Flores-Magdaleno, H., Mancilla-Villa, O. R., Mejía-Saenz, E., del Carmen Olmedo-Bolaños, M., Bolaños, O., & Bautista-Olivas, A. L. (2011). Heavy metals in agricultural soils and irrigation wastewater of Mixquiahuala, Hidalgo, Mexico. *African Journal of Agricultural Research*, 6(24), 5505-5511.
- Fuller, J. A., Goldstick, J., Bartram, J., & Eisenberg, J. N. S. (2016). Tracking progress towards global drinking water and sanitation targets: A within and among country analysis. *Science of the Total Environment*, 541, 857-864.
- Garzón, J. M., Rodríguez-Miranda, J. P., & Hernández-Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible *Universidad y Salud*, 19, 309-318.
- Giné-Garriga, R., Flores-Baquero, Ó., Jiménez-Fdez de Palencia, A., & Pérez-Foguet, A. (2017). Monitoring sanitation and hygiene in the 2030 Agenda for Sustainable Development: A review through the lens of human rights. *Science of the Total Environment*, 580, 1108-1119.
- Gopi Kiran, M., Pakshirajan, K., & Das, G. (2017). A new application of anaerobic rotating biological contactor reactor for heavy metal removal under sulfate reducing condition. *Chemical Engineering Journal*, 321, 67-75.
- Grasso, D. (2019). Evolving Environmental Engineering for the 21st Century. *Environmental Science and Technology*, 53(13), 7183-7184.
- Gregorio Bellido, J., Barcellos, C., Santos Barbosa, F. D., & Inacio Bastos, Y. F. (2010). Environmental sanitation and mortality associated with waterborne diseases in children under 5 years of age in Brazil. *Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health*, 28(2), 114-120.
- Grunwald, A. (2016) Water Ethics – Orientation for Water Conflicts as Part of Inter- and Transdisciplinary Deliberation. In. *Water Resources Development and Management* (pp. 11-29): Springer.
- Gupta, J., & Vegelin, C. (2016). Sustainable development goals and inclusive development. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 16(3), 433-448.
- Hák, T., Janoušková, S., & Moldan, B. (2016). Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. *Ecological Indicators*, 60, 565-573.
- Hanjra, M. A., Blackwell, J., Carr, G., Zhang, F., & Jackson, T. M. (2012). Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 215(3), 255-269.
- Harremoës, P. (2002). Water ethics - A substitute for over-regulation of a scarce resource. *Water Science and Technology*, 45(8), 113-124.
- He, T., Li, Z., Sun, Q., Xu, Y., & Ye, Q. (2016). Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by *Pseudomonas tolaasii* Y-11 without nitrite accumulation during nitrogen conversion. *Bioresource Technology*, 200, 493-499.
- Helmecke, M., Fries, E., & Schulte, C. (2020). Regulating water reuse for agricultural irrigation: risks related to organic micro-contaminants. *Environmental Sciences Europe*, 32(1).
- Hernández-Zamora, M., Cristiani-Urbina, E., Martínez-Jerónimo, F., Perales-Vela, H. V., Ponce-Noyola, T., Montes-Horcasitas, M. C., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2015). Bioremoval of the azo dye Congo Red by the microalga *Chlorella vulgaris*. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(14), 10811-10823.
- Hider, P., & Pymm, B. (2008). Empirical research methods reported in high-profile LIS journal literature. *Library and Information Science Research*, 30(2), 108-114.
- Huang, X., Weisener, C. G., Ni, J., He, B., Xie, D., & Li, Z. (2020). Nitrate assimilation, dissimilatory nitrate reduction to ammonium, and denitrification coexist in *Pseudomonas putida* Y-9 under aerobic conditions. *Bioresource Technology*, 312.
- Idelovitch, E., & Ringskog, K. (1997). *Wastewater treatment in Latin America: old and new options*: World Bank; Directions in Development.
- Intriago, J. C., López-Gálvez, F., Allende, A., Vivaldi, G. A., Camposeo, S., Nicolás Nicolás, E., . . . Pedrero Salcedo, F. (2018). Agricultural reuse of municipal wastewater through an integral water reclamation management. *Journal of Environmental Management*, 213, 135-141.
- Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability (Switzerland)*, 9(10).
- Jasim, N. A. (2020). The design for wastewater treatment plant (WWTP) with GPS X modelling. *Cogent Engineering*, 7(1).
- Kalavrouziotis, I. K. (2015). The reuse of municipal wastewater in soils. *Global Nest Journal*, 17(3), 474-486.
- Khalid, S., Shahid, M., Natasha, Bibi, I., Sarwar, T., Shah, A. H., & Niazi, N. K. (2018). A review of environmental contamination and health risk assessment of wastewater use for crop irrigation with a focus on low and high-income countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5).
- Lade, H., Kadam, A., Paul, D., & Govindwar, S. (2015). Biodegradation and detoxification of textile azo dyes by bacterial consortium under sequential microaerophilic/aerobic processes. *EXCLI Journal*, 14, 158-174.
- Lakatos, G. (2018). Biological wastewater treatment. In *Wastewater and Water Contamination: Sources, Assessment and Remediation* (pp. 105-128): Nova Science Publishers, Inc.
- Lee, E. J., & Schwab, K. J. (2005). Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of Water and Health*, 3(2), 109-127.
- Lehn, H., & Parodi, O. (2009). Water - Fundamental and strategic resource of the 21st century. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 21(3), 272-281.
- Li, C., Yang, J., Wang, X., Wang, E., Li, B., He, R., & Yuan, H. (2015). Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a phosphate accumulating bacterium *Pseudomonas stutzeri* YG-24. *Bioresource Technology*, 182, 18-25.
- Li, J., Peng, Y., Zhang, L., Gao, R., Yang, L., Liu, Q., . . . Wang, S. (2020). Enhanced nitrogen removal assisted by mainstream partial-anammox from real sewage in a continuous flow A2/O reactor. *Chemical Engineering Journal*, 400.
- Li, K., Liu, Q., Fang, F., Luo, R., Lu, Q., Zhou, W., . . . Ruan, R. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource Technology*, 291.
- Li, N., Hu, Y., Lu, Y. Z., Zeng, R. J., & Sheng, G. P. (2016). In-situ biogas sparging enhances the performance of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) with mesh filter in low-strength wastewater treatment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(13), 6081-6089.
- Li, X., Sun, S., Yuan, H., Badgley, B. D., & He, Z. (2017). Mainstream upflow nitritation-anammox system with hybrid anaerobic pretreatment: Long-term performance and microbial community dynamics. *Water Research*, 125, 298-308.
- Liu, X., Wang, L., & Pang, L. (2018). Application of a novel strain *Corynebacterium pollutisoli* SPH6 to improve nitrogen removal in an anaerobic/aerobic-moving

- bed biofilm reactor (A/O-MBBR). *Bioresource Technology*, 269, 113-120.
- Lyu, S., Chen, W., Zhang, W., Fan, Y., & Jiao, W. (2016). Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 39, 86-96.
- Machineni, L. (2019). Review on biological wastewater treatment and resources recovery: Attached and suspended growth systems. *Water Science and Technology*, 80(11), 2013-2026.
- Mahamadi, C., & Nharingo, T. (2010). Utilization of water hyacinth weed (*Eichhornia crassipes*) for the removal of Pb(II), Cd(II) and Zn(II) from aquatic environments: An adsorption isotherm study. *Environmental Technology*, 31(11), 1221-1228.
- Mara, D. D., & Feachem, R. G. A. (1999). Water- and excreta-related diseases: Unitary environmental classification. *Journal of Environmental Engineering*, 125(4), 334-339.
- Mora-Ravelo, S. G., Alarcón, A., Rocandio-Rodríguez, M., & Vanoye-Eligio, V. (2017). Bioremediation of wastewater for reutilization in agricultural systems: A review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(1), 33-50.
- Motamedi, H., & Jafari, M. (2020). Screening Heterotrophic Ammonia Removal and Aerobic Denitrifying Bacteria from Wastewater of Ammonia Production Units of a Petrochemical Industry. *Current Microbiology*, 77(9), 2207-2214.
- Nasir, N. M., Bakar, N. S. A., Lananan, F., Abdul Hamid, S. H., Lam, S. S., & Jusoh, A. (2015). Treatment of African catfish, *Clarias gariepinus* wastewater utilizing phytoremediation of microalgae, *Chlorella* sp. with *Aspergillus niger* bio-harvesting. *Bioresource Technology*, 190, 492-498.
- Niemczynowicz, J., & Iwra, M. (1996). Megacities from a water perspective. *Water International*, 21, 198-205.
- Paul, T., & Saha, N. C. (2019). Environmental Arsenic and Selenium Contamination and Approaches Towards Its Bioremediation Through the Exploration of Microbial Adaptations: A Review. *Pedosphere*, 29(5), 554-568.
- Pereira, L. S., Duarte, E., & Fragoso, R. (2014). Water Use: Recycling and Desalination for Agriculture. In *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 407-424): Elsevier.
- Pérez-Cordón, G., Rosales, M. J., Valdez, R. A., Vargas-Vásquez, F., & Cordova, O. (2008). Detección de parásitos intestinales en agua y alimentos de Trujillo, Perú. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 25(1), 144-148.
- Perlman, H. (2016). How much water is there on, in, and above the Earth? Retrieved December, 6, 2016.
- Petrovich, M. L., Ben Maamar, S., Hartmann, E. M., Murphy, B. T., Poretzky, R. S., & Wells, G. F. (2019). Viral composition and context in metagenomes from biofilm and suspended growth municipal wastewater treatment plants. *Microbial Biotechnology*, 12(6), 1324-1336.
- Postel, S. L. (2000). Entering an era of water scarcity: The challenges ahead. *Ecological Applications*, 10(4), 941-948.
- Queiroz, V. C., de Carvalho, R. C., & Heller, L. (2020). New approaches to monitor inequalities in access to water and sanitation: The SDGs in Latin America and the Caribbean. *Water (Switzerland)*, 12(4).
- Quist-Jensen, C. A., Macedonio, F., & Drioli, E. (2015). Membrane technology for water production in agriculture: Desalination and wastewater reuse. *Desalination*, 364, 17-32.
- Rinia, E. J., Van Leeuwen, T. N., Van Vuren, H. G., & Van Raan, A. F. J. (1998). Comparative analysis of a set of bibliometric indicators and central peer review criteria Evaluation of condensed matter physics in the Netherlands. *Research Policy*, 27(1), 95-107.
- Risso, V. G. (2017). Study of the research methods and data collection techniques used in library and information science. *Revista Espanola de Documentacion Cientifica*, 40(2).
- Rodríguez Miranda, J. P., García-Ubaque, C. A., & García-Ubaque, J. C. (2016). Waterborne diseases and basic sanitation in Colombia. *Revista de Salud Publica*, 18(5), 738-745.
- Rosemarin, A. (2005). Sustainable sanitation and water in small urban centres. *Water Science and Technology*, 51(8), 109-118.
- Salgot, M., Campos, C., Galofré, B., & Tapias, J. C. (2001). Biological control tools for wastewater reclamation and reuse. A critical review. *Water Science and Technology*, 43(10), 195-201.
- Salmon, J. (2017). Quantitative or qualitative research: Methods, ethical issues and future directions. In *Data Collection: Methods, Ethical Issues and Future Directions* (pp. 3-14): Nova Science Publishers, Inc.
- Sancho, R. (2001). Medición de las actividades de ciencia y tecnología. Estadísticas e indicadores empleados. *Revista española de Documentación Científica*, 24(4), 382-404.
- Sapkota, A. R. (2019). Water reuse, food production and public health: Adopting transdisciplinary, systems-based approaches to achieve water and food security in a changing climate. *Environmental Research*, 171, 576-580.
- Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., & Zahoor, A. (2013). Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, 130, 1-13.
- Scheierling, S. M., Bartone, C. R., Mara, D. D., & Drechsel, P. (2011). Towards an agenda for improving wastewater use in agriculture. *Water International*, 36(4), 420-440.
- Sen, T. K. (2015). *Physical, chemical and biological treatment processes for water and wastewater*: Nova Science Publishers, Inc.
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation - A global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1863-1880.
- Siles, J. A., & Michán, C. (2020). Bacteria, archae, fungi and viruses: it takes a community to eliminate waste. *Microbial Biotechnology*, 13(4), 892-894.
- Stevenson, A., & Cordy, J. R. (2015). Parse views with Boolean grammars. *Science of Computer Programming*, 97(P1), 59-63.
- Sun, Z., Lv, Y., Liu, Y., & Ren, R. (2016). Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a novel metal resistant bacterium *Cupriavidus* sp. S1. *Bioresource Technology*, 220, 142-150.
- Thebo, A. L., Drechsel, P., Lambin, E. F., & Nelson, K. L. (2017). A global, spatially-explicit assessment of irrigated croplands influenced by urban wastewater flows. *Environmental Research Letters*, 12(7), 074008.
- Torres Calderón, J. (2013). Fitorremediación de aguas residuales por hidroponía. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Tripathi, M. P., Bisen, Y., & Tiwari, P. (2019). Reuse of wastewater in agriculture. In *Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges* (pp. 231-258): Springer Singapore.
- Vergine, P., Lonigro, A., Salerno, C., Rubino, P., Berardi, G., & Pollice, A. (2017). Nutrient recovery and crop yield enhancement in irrigation with reclaimed wastewater: a case study. *Urban Water Journal*, 14(3), 325-330.

- Vivaldi, G. A., Camposeo, S., Mastro, M. A., Lacolla, G., Lonigro, A., & Rubino, P. (2015) Effect of irrigation with different municipal wastewaters on ripening indexes and chemical components of nectarine fruits. In: *Vol. 1084. Acta Horticulturae* (pp. 401-407): International Society for Horticultural Science.
- Wang, L., Li, Y., Chen, P., Min, M., Chen, Y., Zhu, J., & Ruan, R. R. (2010). Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*, *101*(8), 2623-2628.
- Wang, Y., Ho, S. H., Cheng, C. L., Guo, W. Q., Nagarajan, D., Ren, N. Q., . . . Chang, J. S. (2016). Perspectives on the feasibility of using microalgae for industrial wastewater treatment. *Bioresource Technology*, *222*, 485-497.
- Who/Unicef. (2015). Progress on Sanitation and Drinking Water: 2015 Update and MDG Assessment. Geneva. *Progress on Sanitation and Drinking Water-2015 Update and MDG Assessment*.
- World Bank Group. (2016). *Annual freshwater withdrawals, agriculture (% of total freshwater withdrawal)*. Retrieved from The World Bank: <https://data.worldbank.org/indicator/er.h2o.fwag.zs>
- World Health, O. (2016). *World health statistics 2016: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. Geneva: World Health Organization.
- Wu, G., & Yin, Q. (2020). Microbial niche nexus sustaining biological wastewater treatment. *npj Clean Water*, *3*, 33.
- Wu, L. F., Chen, P. C., Huang, A. P., & Lee, C. M. (2012). The feasibility of biodiesel production by microalgae using industrial wastewater. *Bioresource Technology*, *113*, 14-18.
- Xu, M., Li, P., Tang, T., & Hu, Z. (2015). Roles of SRT and HRT of an algal membrane bioreactor system with a tanks-in-series configuration for secondary wastewater effluent polishing. *Ecological Engineering*, *85*, 257-264.
- Nitrification and Aerobic Denitrification at Low Temperature. *BioMed Research International*, 2017.
- Yang, B., Xu, H., Yang, S., Bi, S., Li, F., Shen, C., . . . Liu, Y. (2018). Treatment of industrial dyeing wastewater with a pilot-scale strengthened circulation anaerobic reactor. *Bioresource Technology*, *264*, 154-162.
- Yang, L., Ren, Y. X., Liang, X., Zhao, S. Q., Wang, J. P., & Xia, Z. H. (2015). Nitrogen removal characteristics of a heterotrophic nitrifier *Acinetobacter junii* YB and its potential application for the treatment of high-strength nitrogenous wastewater. *Bioresource Technology*, *193*, 227-233.
- Yang, Y., Liu, Y., Yang, T., & Lv, Y. (2017). Characterization of a microbial consortium capable of heterotrophic nitrifying under wide C/N range and its potential application in phenolic and coking wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, *120*, 33-40.
- Yao, Y., Hu, L., Li, S., Zeng, Q., Zhong, H., & He, Z. (2020). Exploration on the bioreduction mechanisms of Cr(VI) and Hg(II) by a newly isolated bacterial strain *Pseudomonas umsongensis* CY-1. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *201*.
- Zhang, J., Wang, B., Chen, X., Wu, X., & Zhang, D. (2019). Research trends on land use changes during 1991–2015: A bibliometric analysis. *Lowland Technology International*, *21*(1), 61-70.
- Zhang, N., Chen, H., Lyu, Y., & Wang, Y. (2019). Nitrogen removal by a metal-resistant bacterium, *Pseudomonas putida* ZN1, capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *94*(4), 1165-1175.
- Zhu, H., Han, Y., Ma, W., Han, H., Ma, W., & Xu, C. (2018). New insights into enhanced anaerobic degradation of coal gasification wastewater (CGW) with the assistance of graphene. *Bioresource Technology*, *262*, 302-309.
- Xu, Y., He, T., Li, Z., Ye, Q., Chen, Y., Xie, E., & Zhang, X. (2017). Nitrogen Removal Characteristics of *Pseudomonas putida* Y-9 Capable of Heterotrophic