

Aguas residuales industriales: retos actuales y perspectivas futuras para su tratamiento biológico

Industrial wastewater: current challenges and future prospects for biological treatment

Sergio Alcaraz Ibarra, Mario Esparza Soto, Mercedes Lucero Chávez
Gehovana González Blanco & Miroslava de los A. Mier Quiroga

Resumen

La problemática del agua residual en México es un problema persistente, debido a la falta de control sobre su generación, tratamiento y disposición final. Las aguas residuales industriales son difíciles de diagnosticar y controlar debido a la variabilidad de sus contaminantes, caudal y composición. La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 ha renovado los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual tratada, haciéndolos en algunos casos más rigurosos y tomando en cuenta nuevos parámetros que eran desestimados en la versión anterior. Las aguas residuales industriales presentan gran incertidumbre en cuanto a su tratamiento y representan un reto adicional para las plantas de tratamiento habituales, en interés de cumplir con los nuevos lineamientos y normatividades. En este artículo, se abordan los sistemas biológicos de tratamiento como la alternativa más utilizada para la depuración de las aguas residuales, así como sus ventajas, desventajas y retos a futuro.

Palabras clave: contaminantes recalcitrantes, sistema de tratamiento biológico, proceso aerobio, proceso anaerobio, procesos de oxidación avanzada.

Recibido: 06 de agosto de 2025.

Abstract

The issue of wastewater in Mexico is a persistent problem due to the lack of control over its generation, treatment, and final disposal. Industrial wastewater is difficult to diagnose and control due to the variability of its contaminants, flow rate, and composition. The Mexican Official Standard NOM-001-SEMARNAT-2021 has renewed the physicochemical and microbiological parameters of treated wastewater, making them in some cases more rigorous and considering new parameters that were disregarded in the previous version. Industrial wastewater presents great uncertainty in terms of treatment and poses an additional challenge for conventional treatment plants in the interest of complying with new guidelines and regulations. This article discusses biological treatment systems as the most widely used alternative for wastewater purification, along with their advantages, disadvantages, and future challenges.

Key words: recalcitrant compounds, biological treatment system, aerobic process, anaerobic process, advanced oxidation process.

Aceptado: 16 de enero de 2025.

Introducción

Todas las actividades antropogénicas requieren del uso de agua de distinta calidad, ya sea para actividades domésticas, industriales, agrícolas, pecuarias, comerciales, servicios, etc. Esta agua servida se convierte en agua residual y presenta una composición variada.

La diferente composición de las aguas residuales conlleva a una clasificación de estas. Una clasificación general agrupa las aguas residuales en tres categorías: agua residual doméstica, agua residual municipal y agua residual industrial (Cisneros-Estrada & Saucedo-Rojas 2016). De estos tres grupos, el agua residual industrial es la que representa el mayor

Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca – Ixtlahuaca km. 14.5, San Cayetano Morelos, Toluca, Estado de México, 50120. México.

* Autor de correspondencia: salcarazi@uaemex.mx (SAL)

Esta obra fue creada bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento No Comercial- Sin Obra Derivada 4.0 International



reto para su tratamiento y reutilización.

El agua residual industrial resulta de los diferentes procesos de transformación de materias primas en productos y subproductos de interés económico, social, comercial y para servicios. Al existir una amplia gama de giros industriales, también existe una extensa variedad de contaminantes que pueden estar presentes en el agua residual. Entre algunos de estos componentes se encuentran: materia orgánica compleja (principalmente en forma de grasas y aceites), compuestos tóxicos (solventes orgánicos, químicos inorgánicos, agroquímicos), compuestos recalcitrantes (sales inorgánicas, principios activos de medicamentos, antioxidantes alcaloides), metales pesados, etc. La presencia de algún contaminante específico en el agua residual deriva en la necesidad de implementar un tratamiento especial para poder atacarlo, ya sea biológico, fisicoquímico o avanzado.

En esta revisión se aborda un panorama general de la problemática de las aguas residuales en México, particularmente las de origen industrial. Primeramente, se considera la infraestructura de tratamiento de aguas residuales disponible en el país, seguido de las opciones mayormente utilizadas para tal fin. Además, se mencionan los retos que representa el tratamiento y disposición final del agua residual, en concordancia con la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de agua tratada a los cuerpos nacionales. Finalmente, se presentan algunas alternativas de tratamiento combinadas con los sistemas biológicos de depuración de agua residual, al ser los sistemas más utilizados en México. Se recopiló información de diversas fuentes como artículos científicos, artículos de

divulgación y libros en materia de aguas residuales. La información fue revisada y analizada por los autores, quienes la sintetizaron y describieron cada una de las secciones con base en su experiencia profesional como investigadores en el tema hídrico, desde un enfoque multidisciplinario.

Infraestructura para el tratamiento del agua residual en México

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en México, al cierre del año 2022, se contaba con 2,774 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de tipo municipal en operación, con una capacidad instalada de 195.5 m³/s y un caudal tratado de 143.7 m³/s, lo que representa una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 73.5% (CONAGUA 2022). Desafortunadamente, apenas cerca del 60% de estas PTAR funcionan de manera óptima. De las 2,774 PTAR en México, más del 90% de estas operan bajo el esquema de tratamiento biológico, el cual se discutirá más adelante. Cerca del 30% de las PTAR instaladas se basan en lagunas de estabilización; alrededor del 28% se basan en el sistema de lodos activados (microorganismos aerobios que demandan oxígeno); un 13% corresponde a reactores anaerobios de flujo ascendente (microorganismos anaerobios que producen biogás, similar al gas natural) y el resto de los sistemas se basan en opciones de tratamiento mixto, tales como biodiscos, biofiltros, humedales, etc. (CONAGUA 2022).

En el caso de las aguas residuales industriales, la información disponible para consulta es limitada e incierta. Esto se debe principalmente a dos motivos: el primero relativo a las obligaciones

establecidas en la legislación mexicana donde se señala que la industria es responsable de tratar sus aguas residuales antes de descargarlas en los cuerpos receptores (red de drenaje y alcantarillado municipal), por lo que los inventarios de PTAR industriales en operación pueden estar incompletos. La legislación mexicana en materia de agua comprende la Ley de Aguas Nacionales (DOF 08-05-2023) y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (DOF 01-04-2024). En ellas se establecen las obligaciones, restricciones y sanciones a las que puede ser acreedor el sector industrial en caso de infringir los lineamientos en materia de descarga y tratamiento. El segundo motivo es relativo al volumen real de aguas residuales generado por la industria. Algunas estadísticas señalan que cerca del 40% de las aguas residuales totales generadas en México corresponden al sector industrial. Sin embargo, existe mucha incertidumbre respecto a este número debido a la gran cantidad de actividades industriales informales que existen en el país, principalmente algunos talleres caseros no regulados y descargas clandestinas. Algunos datos de CONAGUA señalan que la industria trató 87.0 m³/s de agua residual en 3,144 PTAR en operación (CONAGUA 2019) y, de acuerdo con Hernández-Salazar *et al.* (2017), los sistemas más empleados en las industrias para el tratamiento de sus aguas son las lagunas de estabilización y los lodos activados, ambos catalogados como sistemas de tratamiento biológico.

Tratamiento biológico de aguas residuales

El saneamiento adecuado de las aguas residuales fue votado como uno de los avances médicos más importantes de la historia, en un concurso realizado por la British Medical Journal (Revista Médica

Británica) en 2007 (Ferriman 2007). Desde las antiguas culturas del viejo mundo, como los griegos y los romanos, se le daba una utilidad a las excretas humanas provenientes de letrinas, las cuales se combinaban con aguas pluviales y eran conducidas hacia las afueras de las ciudades y utilizadas como alternativa de irrigación y fertilización de los campos agrícolas (López-Vázquez *et al.* 2017). Fue hasta finales del siglo XIX, en 1893, cuando se reconoció la labor de los "organismos" presentes en las aguas residuales y se estableció uno de los primeros filtros "biológicos" para el tratamiento de las aguas residuales (López-Vázquez *et al.* 2017). Estos filtros consistían en sistemas de biopelícula (comunidad de microorganismos que se adhieren a una superficie) provenientes del lecho de los ríos. Posteriormente, en 1913, se descubriría el sistema de lodos activados en Reino Unido (Ardern & Lockett 1914), creando así la base y los fundamentos para el desarrollo de los sistemas de tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales. Por otro lado, la crisis energética de los años 70's provocó que la atención sobre los procesos aerobios cambiara hacia los procesos anaerobios. Así, a finales de la década de 1970, se dio origen al desarrollo de reactores anaerobios por el doctor Gatze Lettinga en Países Bajos (Lettinga *et al.* 1980).

El fundamento del tratamiento biológico de aguas residuales, tanto aerobio como anaerobio, se basa en la capacidad de los microorganismos (bacterias, arqueas, microalgas y hongos microscópicos) para biodegradar los contaminantes presentes en el agua residual. Los sistemas de tratamiento biológico tienen como objetivo transformar los constituyentes disueltos y particulados biodegradables en productos finales aceptables. También

tienen la función de capturar e incorporar sólidos coloidales suspendidos y no sedimentables a otro tipo de sólidos que puedan separarse del agua tratada (biopelículas, flóculos, lodos). Un sistema de tratamiento biológico también debe transformar o remover nutrientes, tales como nitrógeno y fósforo. Finalmente, en algunos casos, deben ser capaces también de remover compuestos traza, como metales y compuestos tóxicos específicos (Metcalf & Eddy 2014).

Considerando lo anterior, se puede establecer que los componentes mayoritarios de las aguas residuales y de interés para un tratamiento biológico son: materia orgánica (compuestos químicos basados en carbono, hidrógeno y oxígeno), nutrientes (sustancias derivadas del nitrógeno y fósforo) y microelementos (iones, metales, sales disueltas). Un balance adecuado entre estos tres grupos de componentes beneficia la proliferación y metabolismo de los microorganismos, favoreciendo así su capacidad de depuración de contaminantes en el agua residual.

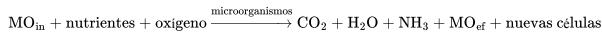
En el caso de las aguas residuales industriales, un sistema de tratamiento tiene como objetivo remover o disminuir la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos. Dado que algunos de los componentes del agua residual industrial pueden ser tóxicos para los microorganismos o inhibidores de su actividad metabólica, muchas veces es requerido un pretratamiento de estas aguas antes de ingresarlas a las redes de alcantarillado municipal, previo a su ingreso a un sistema biológico de tratamiento. Para el agua de retorno (drenaje) utilizada en la irrigación agrícola que contiene nutrientes, el objetivo es disminuir el contenido de nutrientes, específicamente nitrógeno y

fósforo, que son capaces de estimular el crecimiento de plantas acuáticas (Metcalf & Eddy 2014). Esto debido a que se puede favorecer la eutrofización, la cual consiste en el enriquecimiento desmesurado de nutrientes y minerales en un cuerpo de agua, que provoca un sobrecrecimiento de plantas y algas, así como la disminución del oxígeno disuelto.

Sistemas de tratamiento biológico aerobio

Los sistemas de tratamiento biológico aerobio (STB-Aer) requieren forzosamente de la presencia de oxígeno, pues los microorganismos responsables de la biodegradación aerobia utilizan el oxígeno como aceptor de electrones y la materia orgánica como donador, dando así paso a la degradación bioquímica de los contaminantes del agua. Debido al requerimiento de oxígeno, los STB-Aer demandan grandes cantidades de energía para la oxigenación, ya sea con aireación (inyección de aire atmosférico) u oxigenación directa (inyección de oxígeno puro – O₂). También, para poder llevarse a cabo el proceso de biodegradación aerobia, es necesaria la presencia de nutrientes en el agua para permitir el desarrollo de las funciones metabólicas de los microorganismos. En este proceso de biodegradación aerobia, los contaminantes del agua residual se convierten en otro tipo de sólidos, llamados biosólidos o lodos biológicos. Estos pueden ser fácilmente separados del agua residual tratada y dispuestos según las normativas locales vigentes.

De manera global, una ecuación que ejemplifica el proceso de los STB-Aer de aguas residuales es la siguiente (Arcos 2013):



Donde:

MOin= Materia orgánica en el influente;

Nutrientes= Compuestos químicos basados en amoniaco (NH_3) y fosfatos (PO_4^{3-});

Oxígeno= Oxígeno molecular (O_2) en forma gaseosa;

Microorganismos= Conjunto de bacterias provenientes del inóculo (preexistentes);

CO_2 , H_2O , NH_3 = Bióxido de carbono, agua y amoniaco, respectivamente;

MOef= Materia orgánica en el efluente (una parte de la MO_{in} no se degrada y se mantiene a la salida del sistema);

Nuevas células= Nuevos microorganismos (biosólidos) generados a partir de la MO_{in} biodegradada. En un sistema biológico aerobio, aproximadamente el 40% de la materia orgánica es convertida en nuevas células o microorganismos.

Una de las ventajas de los STB-Aer es que han sido ampliamente estudiados desde hace décadas, lo que los convierte en alternativas viables, eficientes y relativamente fáciles de operar. Con condiciones ambientales adecuadas, un buen inóculo (microorganismos previamente adaptados a las condiciones de operación) y un corto periodo de aclimatación, los STB-Aer pueden dar muy buenos resultados en muy corto tiempo para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Sin embargo, las principales desventajas de estos STB-Aer son: la gran cantidad de energía eléctrica para proveer la oxigenación adecuada de los reactores biológicos y las grandes cantidades de biosólidos que se generan durante el proceso. Estos dos conceptos pueden representar hasta el 50 % de los costos operativos anuales de una PTAR convencional (Canziani & Spinosa 2019). Aunado a esto, la generación de los biosólidos implica un tratamiento adicional previo a su disposición final, lo que incrementa los costos operativos aún más. Una desventaja adicional es la gran huella de carbono, es decir, la cantidad de gases de efecto invernadero que se producen en los sistemas de aireación de los STB-Aer.

Si bien los sistemas de lodos activados son los más utilizados, existen una gran variedad de STB-Aer, entre los cuales se encuentran los mencionados en la tabla I (adaptado de Metcalf & Eddy 2014).

Sistemas de tratamiento biológico anaerobio

En los sistemas de tratamiento biológico anaerobio (STB-Ana) (sin aire) o anóxico (sin gas O_2 , pero con oxígeno combinado), la biodegradación de la materia orgánica se lleva a cabo por microorganismos anaerobios en ambientes de bajo potencial redox (baja o nula concentración de oxígeno), existiendo

Tabla I. Tipos y variantes de sistemas de tratamiento biológico aerobio (STB-Aer).

Tipo	Nombre común
Crecimiento suspendido En estos sistemas, los microorganismos se encuentran en suspensión en el medio (mezcla de agua residual y microorganismos).	Lodos activados Lagunas aireadas Digestión aerobia Biorreactores de membrana Proceso de nitrificación aerobia
Crecimiento fijo (de lecho fijo) Estos sistemas están dotados de un medio de soporte para los microorganismos, los cuales generan una biopelícula en la superficie del lecho y donde el contacto con el agua residual es momentáneo.	Lodos activados Filtros biológicos aireados Biorreactores de cama móvil Reactores empacados Biorreactores rotatorios (biodiscos) Filtro percolador

microorganismos que pueden tolerarlo en una baja concentración (aerotolerantes) o que no lo toleran (estrictos). Por otro lado, se produce energía útil en forma de biogás (biometano – CH₄) en lugar de requerir un alto consumo de energía como ocurre con los sistemas aerobios.

Los STB-Ana han sido aplicados con éxito en el tratamiento de residuos en un amplio rango de concentración de contaminantes, desde baja hasta extremadamente alta. Otras ventajas que presentan son un bajo requerimiento energético, una baja producción de biosólidos, un menor requerimiento de nutrientes para los microorganismos, la posibilidad de aplicar altas cargas volumétricas de contaminantes, entre otras. Sin embargo, las principales desventajas de estos sistemas, en comparación con los aerobios, se muestran en la tabla II (adaptada de Metcalf & Eddy 2014).

Haciendo una comparación de los STB-Aer y los STB-Ana con relación a la masa (en kilogramos) de materia orgánica que ingresa al sistema (medido como demanda química de oxígeno o DQO), se puede observar que los STB-Ana tienen una gran ventaja sobre los STB-Aer en cuestión de baja producción

de lodos. Además, los STB-Ana cuentan con una producción de biogás con un 70% aproximadamente de metano, lo que lo convierte en un sistema con una ganancia energética considerable. En la figura 1 tomada de López-Vázquez *et al.* (2017) se puede visualizar este balance de masas y energético, donde se observa la clara ventaja del sistema anaerobio.

Como se muestra en la Figura 1, tomando como base una cantidad de 100 kg de DQO que ingresa a un STB-Aer y a un STB-Ana, se observan mayores ventajas en este último. Ambos sistemas tienen la capacidad de generar un efluente con la misma cantidad de DQO (10-12 kg de DQO), por lo que la calidad del efluente es hipotéticamente la misma. Sin embargo, la cantidad de lodos que se generan en un STB-Aer (30-60 kg) frente a los 5 kg de lodos que genera un STB-Ana, disminuye considerablemente los costos operativos para el tratamiento y disposición final de estos biosólidos. Además, el STB-Aer implica la inversión de energía externa (100 kWh), la cual es consumida principalmente por los sistemas de aireación. Los gases de efecto invernadero que generan estos sistemas

Tabla II. Ventajas y desventajas de los STB-Ana en comparación con los STB-Aer.

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Menor requerimiento de energía. 2. Menor producción de lodo biológico. 3. Menor requerimiento de nutrientes. 4. Producción de biogás (metano + bióxido de carbono + otros gases) que representa una fuente de energía. 5. Menor volumen de reactor requerido. 6. Menor contaminación del aire por gases de efecto invernadero. 7. Periodos de recuperación rápidos después de largos períodos de inactividad. 8. Eficiente como proceso de pretratamiento en aguas altamente contaminadas. 9. Potencialmente tiene una menor huella de carbono. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayor tiempo de inicio (por primera vez). 2. Puede requerir alcalinidad adicional. 3. Puede requerir otro postratamiento para cumplir con la normativa vigente de descarga. 4. No es tan viable la remoción de nitrógeno y fósforo. 5. Mucho más sensible a cambios de temperatura; a baja temperatura, las tasas de remoción de contaminantes son muy bajas. 6. Puede ser susceptible a fallas debido a sustancias tóxicas. 7. Puede generar gases corrosivos (sulfuro de hidrógeno) y malos olores.

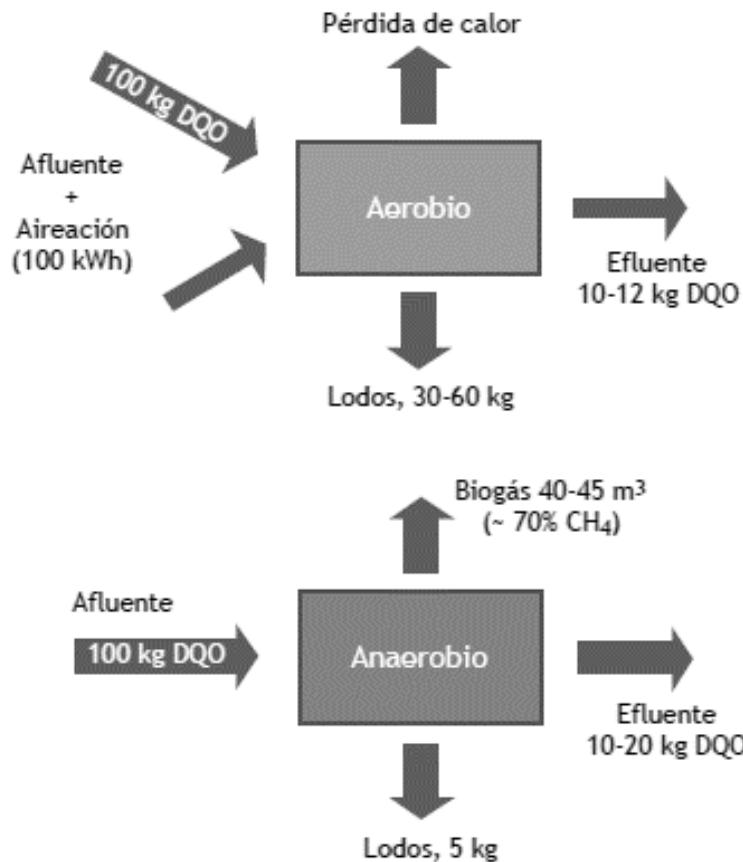


Figura 1. Destino de la materia orgánica y la energía en los procesos aerobios y anaerobios, tomado de López-Vázquez *et al.* (2017).

de aireación, así como la pérdida de calor, resultan en un balance energético negativo, colocando en desventaja a los STB-Aer. Por otro lado, los STB-Ana producen biogás, con aproximadamente un 70 % de metano, el cual es una fuente potencial y aprovechable para energía calorífica y/o eléctrica. Esta condición de los STB-Ana favorece una ganancia

neta de energía positiva en todo el sistema, haciéndolos más viables y costeables.

En la Tabla III, se muestran algunos de los STB-Ana más utilizados para las aguas residuales.

A nivel mundial, más de 2,200 reactores anaerobios de flujo ascendente han sido

Tabla III. Sistemas de tratamiento biológico anaerobio (STB-Ana).

Tipo	Nombre común
Crecimiento suspendido	Procesos de contacto anaerobio Digestión anaerobia Proceso ANAMMOX (oxidación anaerobia del amonio)
Crecimiento fijo (de lecho fijo)	Reactor de cama fluidizada y empacada
De cama de lodos	Reactor de lecho expandido granular Reactor anaerobio de flujo ascendente
Híbridos	Reactor anaerobio de flujo ascendente / crecimiento en lecho fijo

instalados a gran escala para el tratamiento de aguas residuales industriales, agroindustriales y de la industria petroquímica (López-Vázquez *et al.* 2017), debido al elevado potencial energético de sus subproductos. Particularmente en México, los sistemas biológicos aerobios son preferidos por encima de los anaerobios; sin embargo, esta tendencia está cambiando y cada vez son más atractivos los sistemas biológicos anaerobios.

Aplicación de sistemas de tratamiento biológico en aguas residuales industriales

Los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales son los más utilizados en México, tanto para agua municipal (más del 90% de las PTAR) como para las aguas residuales industriales. Los sistemas de tratamiento biológico como los lodos activados o los reactores anaerobios de flujo ascendente son una buena opción para el tratamiento de aguas residuales industriales de origen alimenticio, ya que estas contienen una elevada concentración de materia orgánica biodegradable y nutrientes. Sin embargo, la concentración elevada de estos contaminantes sugiere un reto adicional para la implementación de estos sistemas biológicos. Los requerimientos de oxígeno de un STB-Aer, los tiempos de retención hidráulico y, por ende, el volumen de reactor, son mayores para las aguas residuales industriales en comparación con las domésticas y municipales. Además, en el caso de los STB-Ana, los requerimientos de fuentes adicionales de alcalinidad y reactivos para incrementar el pH (como bicarbonato e hidróxido de sodio, respectivamente) se

elevan, aumentando los costos de tratamiento.

Por otro lado, las aguas residuales industriales de giros como el automotriz, el farmacéutico, el agrícola, el textil, la petroquímica, entre otros, representan un desafío muy grande para el tratamiento de sus aguas residuales, pues estas contienen grandes cantidades de contaminantes de difícil biodegradación. Algunos de los contaminantes más comunes en este tipo de aguas residuales se muestran en la tabla IV.

A estos contaminantes se les denomina de tipo recalcitrante. Los contaminantes recalcitrantes presentes en agua son aquellos que no pueden ser eliminados fácilmente por medio de operaciones unitarias de un tren de tratamiento de agua residual convencional biológico. Los sistemas de tratamiento primario y secundario (como los sistemas biológicos) difícilmente pueden realizar la remoción de este tipo de contaminantes, debido a la compleja estructura química que presentan. Usualmente, las enzimas del metabolismo microbiano se ven limitadas para descomponer estos compuestos o romper sus enlaces. Si bien muchos de estos contaminantes recalcitrantes corresponden a materia orgánica, su naturaleza química los hace muy complejos de biodegradar. Por lo anterior, la utilización de un sistema de tratamiento biológico para tratar aguas residuales industriales representa un reto muy grande, debido a que el parámetro establecido en la normatividad mexicana (previo a su actualización) para determinar la presencia de materia orgánica en el agua tratada, omitía o menospreciaba la presencia de estos

Tabla IV. Principales contaminantes de difícil biodegradación producidos por actividades industriales

Tipo de actividad industrial	Contaminante común
Automotriz	Metales tóxicos y pesados
Minera	Metales tóxicos y pesados
Agrícola	Pesticidas y herbicidas
Farmacéutica	Principios activos de fármacos
Textil	Colorantes de síntesis química
Petroquímica	Hidrocarburos

compuestos de difícil biodegradación.

Perspectivas del tratamiento de agua residual industrial frente a la actualización de la normativa

La normativa mexicana anterior en materia de aguas residuales menospreciaba la cantidad de materia orgánica recalcitrante presente en las aguas servidas y únicamente se enfocaba en la materia orgánica biodegradable, considerando que la mayoría de los sistemas de tratamiento en México eran de tipo biológico. Además, las normativas nacionales se basaban en las internacionales, las cuales se establecían en función de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), una medida indirecta para medir el grado de contaminación de una muestra de agua. Sin embargo, la prueba de DBO indica la cantidad de materia orgánica que puede ser fácilmente biodegradable, no así la fracción recalcitrante. Por lo tanto, la normativa anterior menospreciaba esta fracción que, en caso del agua industrial, puede ser considerablemente alta e incluso mucho mayor que la fácilmente biodegradable.

Actualmente, la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021 eliminó la determinación de la DBO como principal indicador del grado de contaminación (150 mg/L) y, en su lugar, implementó la determinación de la DQO. De esta manera, se garantiza la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales previo a su descarga en los cuerpos de aguas nacionales. Esto puede lograrse fácilmente con las aguas municipales, pero las aguas residuales industriales requieren de modificaciones importantes en los trenes de tratamiento o implementación de operaciones unitarias adicionales al tren para lograr el objetivo y cumplimiento de la NOM.

La DBO establecida en la versión anterior de la NOM-001-SEMARNAT-2021 realizaba la cuantificación de la materia orgánica desde un enfoque microbiológico, la cual estaba limitada por la capacidad de biodegradación de los microorganismos, basada a su vez en el metabolismo y las enzimas extracelulares

producidas por dichos microorganismos. Una equivalencia aproximada entre la DBO y la DQO ($150 \text{ mg/L de DBO} = 330 \text{ mg/L de DQO}$) era suficiente para realizar los reportes en las descargas de agua tratada en las distintas plantas de tratamiento. Sin embargo, no era obligatorio realizar el análisis real de la DQO. Por esta razón, el nivel real de contaminación en las descargas de agua tratada era mucho mayor que lo estimado.

Una gran cantidad de aguas residuales industriales cumplía con el parámetro medido de la DBO, no así con la DQO real. Por tanto, los sistemas de tratamiento biológico tienen una capacidad limitada para el tratamiento efectivo y la depuración de contaminantes presentes en el agua residual, sobre todo cuando los principales contaminantes son de tipo recalcitrante, emergente o refractario. Por esta razón, resulta indispensable cambiar el enfoque de un sistema de tratamiento biológico, ya sea utilizarlo como opción de pretratamiento, obien, como uno posttratamiento. La implementación de tratamientos previos que permitan disminuir la complejidad de la materia orgánica recalcitrante, rompiendo sus enlaces y generando moléculas más sencillas, daría la oportunidad a los microorganismos de biodegradar estos compuestos menos complejos. De esta manera, el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021 sería más viable de lograr.

Combinación de tratamientos y mejora de los tratamientos biológicos

Desde hace muchos años, se han utilizado los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales en combinación con otro tipo de procesos, incluidas otras variantes biológicas, procesos de oxidación avanzada (POA), procesos fisicoquímicos de coagulación-floculación, por mencionar algunos.

Como se describió previamente, los STB-Ana pueden funcionar como una excelente alternativa de pretratamiento de aguas residuales industriales con elevada carga orgánica. Por tal motivo, se han utilizado con éxito sistemas de tratamiento biológico

combinado, anaerobio - aerobio, para el tratamiento de aguas residuales tanto municipales como industriales (Chan *et al.* 2009). Los microorganismos anaerobios son capaces de tolerar condiciones de elevada carga orgánica aplicada, contrario a los microorganismos aerobios que pueden perder su capacidad de sedimentación o cambiar la estructura de los flóculos (proliferación de microorganismos filamentosos no deseados), lo que desencadena una falla en el sistema de tratamiento. Las variaciones mínimas de la relación de alimento - microorganismo pueden generar estos problemas en un sistema de lodo activado, por lo que la combinación de un STB-Ana, que remueve gran cantidad del alimento en un proceso previo a un STB-Aer, resulta en una sinergia efectiva para tratar aguas residuales industriales.

En otros casos, se ha recurrido a la utilización de tratamientos fisicoquímicos como la coagulación - floculación para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, en combinación con STB-Aer y STB-Ana (Ayed *et al.* 2021). La presencia de compuestos fenólicos y colorantes de síntesis química son un problema común en las aguas residuales textiles. Al ser compuestos de naturaleza recalcitrante, resulta complejo remover estos contaminantes con un sistema biológico. La combinación de procesos de coagulación - floculación con los sistemas biológicos ha dado un excelente resultado, logrando así obtener eficiencias de remoción de la DQO hasta en más del 75%, así como disminución de color por arriba del 80% (Ayed *et al.* 2021).

Actualmente se han realizado diferentes investigaciones sobre la efectividad de los POA en el tratamiento de aguas residuales industriales, observándose una alta eficiencia de remoción de contaminantes recalcitrantes. Sin embargo, la mayoría de los estudios de este tipo de procesos se realiza a escala laboratorio. Una de las principales razones de esta situación, es que existen limitantes para el escalamiento de estos sistemas, principalmente en términos de factibilidad económica. Por ello, desde inicios del siglo XXI comenzaron a realizarse investigaciones

donde se combinaron POAs con STB-Aer y STB-Ana.

La combinación de sistemas de lodos activados con un POA para el tratamiento de aguas residuales de la industria de la curtiduría (Vidal *et al.* 2000), así como la combinación de un reactor anaerobio de flujo horizontal y biomasa inmovilizada con un POA basado en ozonización para tratar aguas residuales hospitalarias contaminadas con hormonas, antibióticos, etc. (Muñoz-Ortiz & Chaparro 2014) son ejemplos de combinaciones de procesos biológicos y POAs en investigaciones realizadas en Latinoamérica. La combinación de estos sistemas ha permitido obtener buenas eficiencias de remoción de contaminantes. Los POA son capaces de romper los enlaces de la materia orgánica recalcitrante por medio de la oxidación, generando así compuestos de estructura química más sencilla y, por ende, más viables para ser biodegradados.

Y en un panorama más reciente, la utilización de POAs que sean sustentables en combinación con la presencia de bioenzimas de los procesos biológicos, ha ido en aumento. Los resultados de estas investigaciones son prometedores para combatir los elevados costos operativos, los cuales representan el mayor reto para el escalamiento de estos sistemas de tratamiento de agua residual industrial (Babuponnusami *et al.* 2023). Algunos de los POAs que se han implementado aprovechan la radiación solar como fuente de energía, en combinación con radicales hidroxilo, para la ruptura de los enlaces químicos de los contaminantes recalcitrantes (por ejemplo, el proceso foto - fenton y el solar - fenton) (Hernández-Linares *et al.* 2022). Otros POAs como la ozonización, la radiación UV y la oxidación anódica electrolítica, en combinación con tratamientos biológicos también han sido estudiados (Shtepa *et al.* 2021).

Conclusiones

Los sistemas biológicos de tratamiento de agua residual son, por mucho, una de las opciones de saneamiento más atractivas por los distintos subproductos de interés que se

generan. Además, son relativamente más económicos que los sistemas de tratamiento avanzado y factibles para el tratamiento de aguas residuales municipales y domésticas. Sin embargo, el principal reto de estos sistemas es su optimización cuando se trata de aguas residuales industriales, dada su naturaleza compleja y su variabilidad en su composición.

Los esfuerzos recientes buscan combinar sistemas de tratamiento biológico con otros sistemas avanzados, enfocándose en disminuir los costos del tratamiento y, sobre todo, dar cumplimiento a las nuevas legislaciones en materia de agua residual tratada. Sin embargo, una de las líneas de investigación más prometedoras es la implementación de tecnologías sustentables, como el aprovechamiento de las bioenergías o las energías verdes para disminuir considerablemente los costos del tratamiento.

Otra de las alternativas que deben ser exploradas es la identificación de microorganismos nativos con capacidad de supervivencia y metabolismo eficiente bajo condiciones de estrés por compuestos recalcitrantes, emergentes, refractarios y/o tóxicos. De esta manera, se pueden mejorar los sistemas de tratamiento biológico sin requerir de una modificación costosa en los trenes de tratamiento actuales.

Referencias

- Arcos, Y.** 2013. Microbiología de lodos activados. Hechos microbiológicos, 4(2): 117-122.
- Ardern, E. & W.T. Lockett.** 1914. Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. Journal of the Society of Chemical Industry 33(10): 523.
- Ayed, L., I.E. Ksibi, A. Charef & R.E. Mzoughi.** 2021. Hybrid coagulation-flocculation and anaerobic-aerobic biological treatment for industrial textile wastewater: pilot case study. The Journal of The Textile Institute 112(2): 200-206.
- Babuponnusami, A., S. Sinha, H. Ashokan, M.V. Paul, S.P. Hariharan, J. Arun & A. Pugazhendhi.** 2023. Advanced oxidation process (AOP) combined biological process for wastewater treatment: A review on advancements, feasibility and practicability of combined techniques. Environmental research 237(1): 116944.
- Canziani, R., & L. Spinoza.** 2019. Sludge from wastewater treatment plants. Pp: 3-30 In: Vara Prasad, M.N., P.J. de Campos Favas, M. Vithanage & S. Venkata Mohan (eds), Industrial and Municipal Sludge: Emerging Concerns and Scope for Resource Recovery, Butterworth-Heinemann.
- Chan, Y. J., M.F. Chong, C.L. Law & D.G. Hassell.** 2009. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. Chemical engineering journal 155(1-2): 1-18.
- Cisneros-Estrada, O.X. & H. Saucedo-Rojas.** 2016. Reúso de aguas residuales en la agricultura. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 174 pp.
- CONAGUA.** 2019. Estadísticas del Agua en México Edición 2018. Comisión Nacional del Agua, México, 242 pp.
- CONAGUA.** 2022. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Comisión Nacional del Agua, México, 370 pp.
- Ferriman, A.** 2007. BMJ readers choose the “sanitary revolution” as greatest medical advance since 1840. BMJ (Clinical Research Ed.) 334: 111.
- Hernández-Linares, I., L.A. Castillo-Suárez, J.G. Ibanez, R. Vasquez-Medrano, B.M. López-Rebollar, F. Santoyo-Tepole, E.A. Teutli-Sequeira & I.G. Martínez-Cienfuegos.** 2022. Degradation of commercial paraquat in a solar-Fenton pilot lagoon using iron oxalate as a chelating agent: Hydro-thermal analysis with CFD. Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry 429: 113914.
- Hernández-Salazar, A.B., J.C. Moreno-Seceña & L.C. Sandoval-Herazo.** 2018. Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. RINDERESU 2(1-2): 75-87.
- Lettinga, G., A.F.M. Van Velsen, S.W. Hobma, W. De Zeeuw & A. Klapwijk.** 1980. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering 22(4): 699-734.
- López-Vázquez, C.M., G. Buitrón-Méndez, H.A. García & F.J. Cervantes-Carrillo.** 2017. Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principio, modelación y diseño. IWA Publishing, Reino Unido, 592 pp.

Metcalf, L. & H.P. Eddy. 2014. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw Hill Education, E.U.A, 2044 pp.

Muñoz-Ortiz, C.E. & T.R. Chaparro. 2014. Combinación de procesos de oxidación avanzada y procesos anaerobios para tratamiento de aguas residuales hospitalarias. Afinidad 71(565): 63-67.

Shtepa, V., M. Balintova, Y. Chernysh, V. Chubur, S. Demcak & M. Gautier. 2021. Rationale for the combined use of biological processes and AOPs in wastewater treatment tasks. Applied Sciences 11(16): 7551.

Vidal, G., J. Nieto, F. Márquez, H. Mansilla & C. Bornhardt. 2000. Combinación de Procesos Biológicos y de Oxidación Avanzada para el Tratamiento de una Corriente de Proceso de la Industria de Curtiembre. Chile: AIDIS (Dic. 2003): 10-13.