



Diseño y Optimización de Redes de Tratamiento de Agua Sustentables

Design and Optimization of Sustainable Wastewater Treatment Networks

Alicia Román-Martínez^{1*}, Juan I. Padrón-Páez¹.

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Doctor Manuel Nava 6, San Luis Potosí, S.L.P., 78600, México.

*Autor de correspondencia: alicia.roman@uaslp.mx

Recibido 26 de agosto de 2020; aceptado 23 de octubre de 2020

RESUMEN

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales permiten eliminar algunos de los contaminantes presentes en el agua para cumplir con las normas y regulaciones de calidad vigentes dependiendo de la disposición y/o reúso de las aguas residuales tratadas. Para contrarrestar los efectos de la contaminación del agua por causas antropogénicas, se propone implementar redes de plantas de tratamiento de aguas residuales (RPTAR) como una alternativa para mejorar la calidad del agua. Un diseño adecuado de las RPTAR es fundamental, así como su optimización, que en la actualidad debe centrarse en todas las dimensiones de sustentabilidad: económica, ambiental y social. Para alcanzar los objetivos mencionados, este trabajo busca desarrollar una metodología sistemática para el diseño óptimo de RPTAR. Esta metodología se basa en la generación, evaluación y selección de configuraciones y tecnologías de tratamiento (físicas, químicas y/o biológicas), mediante el uso de una superestructura (que incluye todas las opciones de proceso) para identificar las diferentes etapas del tratamiento. La metodología consta de seis pasos: (1) Recolección de información/datos e identificación de cuellos de botella, (2) Generación de la superestructura, (3) Formulación del problema de optimización, (4) Definición del modelo, (5) Estrategia de solución, y (6) Análisis de resultados y

selección de la configuración óptima. Se aborda el problema de diseño sustentable mediante la formulación y solución de problemas de optimización de programación no lineal (NLP) o programación mixta entera no lineal (MINLP), que involucran múltiples funciones objetivo que incluyen los tres aspectos de sustentabilidad: minimización del costo total, minimización del consumo de energía, y maximización de las aguas residuales reutilizadas. La programación matemática se implementó en el software GAMS utilizando el solucionador IPOPT. Estos diseños están sujetos al problema de toma de decisiones de criterios múltiples (MCDM), basado en el método M-TOPSIS, que permite la selección de una RPTAR sustentable óptima

PALABRAS CLAVE: Redes de Tratamiento de Agua, Diseño Sustentable de Tratamiento de Agua, Optimización Multiobjetivo, Programación Mixta Entera No-lineal, Toma de Decisiones con Múltiples Criterios

ABSTRACT

Wastewater treatment systems allow the elimination of some of the pollutants present in the water to comply with current quality standards and regulations depending on the disposal and / or reuse of the treated wastewater. To counteract the effects of water pollution by anthropogenic causes, the implementation wastewater treatment networks (WWTN) as an alternative to improve water quality, is proposed. An adequate design of the WWTN is essential, as well as its optimization, which currently must focus on all dimensions of sustainability: economic, environmental and social. To achieve the aforementioned objectives, this work seeks to develop a systematic methodology for the optimal design of WWTN. This methodology is based on the generation, evaluation and selection of treatment configurations and technologies (physical, chemical and / or biological), through the use of a superstructure (which includes all the process options) to identify the different treatment stages. The methodology consists of six steps: (1) Collection of information / data and identification of bottlenecks, (2) Generation of the superstructure, (3) Formulation of the optimization problem, (4) Definition of the model, (5) Strategy solution, and (6) Analysis of results and selection of the optimal configuration. The sustainable design problem is addressed by formulating and solving nonlinear programming optimization problems (NLP) or nonlinear mixed integer programming (MINLP), which involve

multiple objective functions that include the three aspects of sustainability: minimization of the total cost, minimization of energy consumption, and maximization of reused wastewater. The mathematical programming was implemented in the GAMS software using the IPOPT solver. These designs are subject to the multiple criteria decision-making problem (MCDM), based on the M-TOPSIS method, which allows the selection of an optimal sustainable WWTN.

KEY WORDS: Wastewater Treatment Networks, Sustainable WWT Design, Multiobjective Optimization, Mixed Integer Nonlinear Programming, Multiple Criteria Decision Making.

INTRODUCCIÓN

La creciente importancia de respetar y difundir los estándares ambientales, así como la ineficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a los diseños y prácticas deficientes motivan la necesidad de herramientas sistemáticas para el diseño de sistemas de tratamiento (Galan y Grossmann, 1998). El objetivo final de la gestión de aguas residuales es establecer medidas de protección ambiental, mientras que las preocupaciones económicas y sociales también deben ser consideradas (Metcalf & Eddy, 2014). Entonces, se debe abordar el objetivo del desarrollo sustentable, que se define como “el desarrollo que satisface las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (WCED, 1987). Una de las preguntas principales que deben responderse antes de diseñar/installar un sistema de tratamiento está relacionada con el costo de la mejor tecnología que cumple con las regulaciones ambientales del agua descargada (para diferentes usos), así como para promover el desarrollo de la comunidad y la aceptación del público. El responsable de la toma de decisiones intenta encontrar la mejor opción al menor costo, pero

la selección del sistema de tratamiento más adecuado no es solo un problema económico, ya que otros criterios, como los aspectos ambientales y sociales, deben considerarse en el proceso de decisión (Molinos-Senante et al., 2014). Para esto, la naturaleza multidimensional de la sustentabilidad es fundamental y considera tres dimensiones: económica, ambiental y social. Para el aspecto económico, la mayoría de los análisis abarcan los costos y beneficios financieros. En el criterio ambiental, la viabilidad a largo plazo del medio ambiente natural debe mantenerse para apoyar el desarrollo a largo plazo mediante el suministro de recursos y la captación de emisiones. La dimensión social se basa en las relaciones humanas, la necesidad de que las personas interactúen, se desarrollen y organicen su sociedad (Balkema et al., 2002). La inclusión de una evaluación de sustentabilidad que cubra sus tres dimensiones puede conducir a una mejor gestión de las aguas residuales porque puede generar mejores condiciones de vida, impacto favorable en la salud, beneficios económicos, utilización eficiente de los recursos ambientales, entre otros beneficios.

Se han propuesto varios procedimientos para diseñar plantas de tratamiento de aguas residuales o redes de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, la mayoría

de los procedimientos se basan en la aplicación de reglas de dedo o heurísticas. En general, los métodos utilizados para obtener buenos diseños de estos sistemas se pueden clasificar en dos clases: los basados en la programación matemática y los basados métodos gráficos, heurísticos o algorítmicos, es decir, en enfoques conceptuales (Bagajewicz, 2000). Diversos trabajos han abordado problemas de gestión del agua utilizando estos enfoques. Con respecto al enfoque conceptual, Wang y Smith (1994) y Kuo y Smith (1997) abordaron el problema general para el diseño de redes de aguas residuales considerando la disposición final utilizando representaciones gráficas, conocidas como el método del "punto de pliegue del agua", y diferentes técnicas de aguas residuales en superestructuras de diseños alternativos. Además, un procedimiento de diseño conceptual para redes de tratamiento de aguas residuales distribuidas con múltiples contaminantes fue presentado por Liu et al. (2013). El caudal mínimo de tratamiento de cada proceso se calculó utilizando el análisis del punto de pliegue del agua y el diseño final se determinó con reglas heurísticas. A través de ejemplos de la literatura, los autores demostraron que los resultados obtenidos están cerca de los resultados

óptimos reportados. Li et al. (2016) propusieron un método basado en reglas heurísticas que es simple y con una percepción física clara para el diseño de redes de tratamiento de aguas residuales distribuidas de múltiples contaminantes. Según los autores, el diseño final es comparable a las soluciones óptimas del enfoque de programación matemática. Recientemente, Liu et al. (2018) presentaron un método basado en el caudal mínimo de tratamiento, calculado con el método del punto de pliegue del agua y reglas heurísticas para el diseño de redes de tratamiento de aguas residuales distribuidas. Los autores concluyen que el procedimiento propuesto no es complicado y es beneficioso en la práctica de ingeniería. Sin embargo, el método es aproximado y no puede garantizar optimalidad. Por lo tanto, el diseño conceptual ha demostrado limitaciones para enfrentar la complejidad del problema.

Debido a la incapacidad de los enfoques conceptuales para proporcionar de manera efectiva soluciones rigurosas a problemas complejos, por ejemplo, problemas con múltiples contaminantes, la programación matemática ha aumentado desde la década de los ochenta, y se enfrenta a los desafíos asociados con el problema de asignación de agua (WAP) o el diseño de redes de

tratamiento. El WAP se puede definir de la siguiente manera: Dado un conjunto de unidades que utilizan agua, un conjunto de fuentes de agua con las correspondientes concentraciones de contaminantes, procesos potenciales de regeneración y unidades de tratamiento de aguas residuales, se desea obtener una red de reutilización de aguas residuales o una red integrada de agua que optimiza un objetivo u objetivos dados con cualquier agua descargada que cumpla con las regulaciones ambientales de concentración para cada contaminante (Bagajewicz y Faria, 2009). Con respecto a las unidades de tratamiento de aguas residuales, se tienen en cuenta varias opciones de tratamiento para asegurar que las aguas residuales tratadas se descarguen con una carga de contaminantes inferior al máximo permitido por los límites de descarga establecidos por las normas ambientales. Este trabajo se centra en el estudio de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, aunque existe una relación muy estrecha entre el estudio de los sistemas de asignación de agua y los de tratamiento de aguas residuales. En este sentido, varias metodologías propuestas para resolver los WAP se adaptan para resolver sistemas de tratamiento de aguas residuales y viceversa. Por

ejemplo, Takama et al. (1980) originalmente propusieron el WAP desarrollando una estrategia de optimización para diseñar una red integrada de agua o una red de aguas residuales en una refinería de petróleo. Las operaciones que utilizan agua y los procesos de tratamiento formaron una superestructura, y el problema de optimización se formuló como programación no lineal (NLP) para reducir la estructura del sistema. La principal contribución de este trabajo fue abordar el problema de asignación óptima de agua y considerar unidades de proceso que requieren agua y unidades de tratamiento de aguas residuales, mientras se define la distribución de las corrientes dentro del sistema. Posteriormente, muchos trabajos se centraron en aspectos relevantes para el diseño de sistemas de tratamiento, como la búsqueda de algoritmos que permitan la optimalidad global; el estudio de los sistemas integrados de agua; análisis de incertidumbre; el estudio de sistemas de cero descarga líquida, evaluación del ciclo de vida, optimización multiobjetivo, entre otros. Algunos de estos trabajos se mencionan a continuación.

Galan y Grossmann (1998) abordaron el diseño óptimo de redes de aguas residuales distribuidas considerando corrientes con múltiples componentes. Se propuso una búsqueda heurística para encontrar el mínimo global del

caudal total procesado por todas las unidades, para los modelos de programación no lineal (NLP) no convexa y de programación mixta entera no lineal (MINLP) no convexa de varios ejemplos publicados en la literatura. Karuppiah y Grossmann (2006) abordaron el problema de la síntesis óptima de un sistema integrado de agua (unidades de utilización de agua y tratamiento de aguas residuales). Se consideró una superestructura que incorpora todas las alternativas de diseño posibles para el tratamiento, reutilización y recirculación de agua. Para resolver el problema, se presentó una ramificación espacial determinista y un algoritmo de contracción para optimizar la NLP no convexa y los problemas de MINLP no convexos, que se utilizó para alcanzar la optimalidad global. A través de varios ejemplos tomados de la literatura, encontraron que el método propuesto se desempeña más rápido computacionalmente para problemas a gran escala en comparación con un solucionador comercial de propósito general. Una extensión del trabajo previamente mencionado fue hecha por Karuppiah y Grossman (2008), quienes estudiaron el problema de optimización de redes de agua integradas que operan en condiciones inciertas en la industria de procesos. Las

incertidumbres se encuentran en las cargas de contaminantes, en las unidades de proceso y las eficiencias de eliminación de contaminantes dentro de las unidades de tratamiento. Se propuso un algoritmo espacial de ramificación y corte que utiliza la descomposición lagrangiana para la optimización global del gran modelo MINLP con múltiples escenarios. El algoritmo se aplicó para optimizar dos sistemas de agua integrados y los tiempos de solución se reducen en más de un orden de magnitud en comparación con un solucionador de optimización global comercial. Faria y Bagajewicz (2011) presentaron un algoritmo de optimización global basado en la contracción de cotas para los problemas de MINLP que contienen bilinealidades. La metodología se aplicó a un par de ejemplos de WAP tomados de la literatura que muestran que el algoritmo propuesto realiza una contracción de cotas sin la necesidad de usar variables binarias adicionales. Después, Yang et al. (2014) presentaron una estrategia de optimización global para el diseño de redes integradas de agua de proceso, donde se incorporaron modelos cortos para unidades de tratamiento de aguas residuales. Se propuso un algoritmo de descomposición basado en Lagrangiano modificado para resolver el

problema resultante de MINLP no convexo. Se presentaron varios ejemplos ilustrativos, como un tratamiento de aguas residuales de la industria de acabado de metales.

Además, la solución de cero descarga líquida para sistemas de agua integrados con sistemas que consideran un único contaminante o múltiples contaminantes fue explorada por Koppol et al. (2003), donde se aplicaron metodologías de programación matemática a cuatro casos industriales, una planta de triortocresilfosfato, una planta de cloruro de etilo, una fábrica de papel y una refinería de petróleo. Según los autores, la viabilidad de la descarga cero de líquidos depende de la relación entre el costo de la regeneración de aguas residuales y el costo del agua limpia. Lim y Park (2009) desarrollaron un modelo de optimización matemática para analizar la síntesis de plantas de tratamiento de aguas residuales distribuidas desde una perspectiva de ciclo de vida. Estos autores formularon un modelo de MINLP a partir de una planta de hierro y acero, y se resolvió considerando dos funciones objetivo por separado; estas fueron el caudal total de las aguas residuales tratadas y la puntuación total del efecto ambiental, que incluye la evaluación del ciclo de vida

del proceso. Los resultados de este trabajo sugieren que este tipo de enfoques pueden contribuir a una producción más limpia y un desarrollo sustentable. Asimismo, Lim et al. (2009) propusieron investigar la síntesis de plantas de tratamiento de aguas residuales distribuidas en el contexto del costo del ciclo de vida. La función objetivo se formuló a partir de los principales contribuyentes de costos a las etapas de construcción, operación y mantenimiento, y eliminación. Se llevó a cabo un estudio de caso para validar el modelo MINLP demostrando que el sistema de red de tratamiento de aguas residuales generado a partir del modelo tenía el costo de ciclo de vida más bajo. Ting et al. (2016) abordaron el diseño de redes de tratamiento de aguas residuales desde una perspectiva de optimización global. Su algoritmo de optimización global consideró las relajaciones de la desagregación multiparamétrica para minimizar el caudal total de un modelo de programación lineal mixta entera (MILP). Mediante la solución y el análisis de dieciséis problemas de referencia tomados de la literatura, los autores ilustraron un mejor rendimiento computacional de su algoritmo en comparación con los solucionadores comerciales. Recientemente, Lu et al. (2017) abordaron el problema de la síntesis y operación óptimas de los

procesos de tratamiento de aguas residuales considerando las corrientes de influencia multiescenario bajo diferentes estándares de descarga y tasas de penalización de emisiones que no cumplen con los límites de descarga. Se propuso un algoritmo de descomposición basado en un Lagrangeano para resolver el modelo MINLP multiperiodo resultante buscando optimalidad global. La efectividad del algoritmo se verificó mediante estudios numéricos. Los autores, llegaron a la conclusión de que los resultados podrían proporcionar perspectivas de gestión y políticas para los tomadores de decisiones.

El carácter multidimensional de la sustentabilidad hace que la selección de sistemas de tratamiento de aguas residuales sustentables sea un problema de optimización multiobjetivo. Sin embargo, en trabajos previos, el diseño sustentable de redes de tratamiento de aguas residuales no se evaluó completamente, porque las funciones objetivo estaban relacionadas con la estructura del sistema de tratamiento, la dimensión económica de la sustentabilidad y muy pocos consideraban aspectos ambientales, como el consumo de energía, y ninguno ha abordado criterios sociales. Por ejemplo, Boix et al. (2011) abordaron el diseño óptimo

de redes de agua industriales con múltiples contaminantes teniendo en cuenta múltiples objetivos. Tres objetivos se minimizaron simultáneamente, el caudal de agua limpia en la entrada de la red, el caudal de agua residual en la entrada de las unidades de tratamiento de aguas residuales, y el número de interconexiones en la red. Se implementó una estrategia lexicográfica basada en el método de restricción ϵ (ϵ -constraint) para resolver el problema multiobjetivo, donde se plantea un modelo de MINLP de una planta petroquímica. Aparte de ese trabajo, Ramos et al. (2014) estudiaron la optimización multiobjetivo de las redes de agua industriales mediante la programación por metas utilizando la formulación MILP. Para fines de optimización, se consideraron múltiples funciones objetivo según el caso, como el caudal total de agua limpia, la cantidad de conexiones y el consumo total de energía. Este método exploró el problema del diseño de redes de agua y/o energía considerando un par de casos de estudio reportados en la literatura. Después, De-León Almaraz et al. (2016) propusieron una estrategia de solución para el diseño de redes de agua distribuidas y de intercambio de calor basada en una formulación de optimización. Se aplicó una metodología de diseño secuencial a un caso de estudio

para una refinería de petróleo simplificada. Primero, se resolvió un problema de optimización multiobjetivo para el diseño de la red de asignación de agua utilizando el método de restricción épsilon (ϵ -constraint), considerando la minimización del número de conexiones de la red y el costo equivalente global. Posteriormente, la red de intercambio de calor se resuelve mediante dos enfoques, (1) minimizando el requerimiento de energía mediante análisis del punto de pliegue, y (2) minimizando el costo anual total utilizando la programación matemática. En ninguno de estos trabajos se abordaron las tres dimensiones de la sustentabilidad.

Aunque el enfoque conceptual ha mostrado limitaciones, es capaz de proporcionar una descripción simplificada del problema, que puede ayudar a mejorar la formulación de los modelos de programación matemática. Por lo tanto, un enfoque que combina ambos métodos (conceptual y programación matemática) parece ser una alternativa más efectiva para enfrentar los desafíos asociados con el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) o el diseño de redes de plantas de tratamiento de aguas residuales (RPTAR). En ese sentido, Statyukha et al.

(2008) abordaron el diseño de la red de tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de los enfoques conceptual y programación matemática. La estrategia secuencial empleó el análisis del punto de pliegue del agua para desarrollar una superestructura, y en la etapa de programación matemática, el costo del proceso de tratamiento se minimizó para el modelo NLP, que se resolvió aplicando la técnica de optimización de búsqueda aleatoria. El algoritmo fue ilustrado usando ejemplos de la literatura y casos industriales. Además, Quaglia et al. (2014) propusieron un marco de trabajo para el diseño de redes de tratamiento y reutilización de aguas residuales. El marco de trabajo consideró el conocimiento de ingeniería de aguas residuales, herramientas de análisis de problemas y métodos de optimización dentro de un entorno asistido por computadora. El problema de optimización de la PTAR integrada se formuló como MILP o MINLP en función del modelo de red, que puede tratarse como un problema de corriente única o múltiples corrientes, con el objetivo de minimizar el costo total anualizado. El marco de trabajo se aplicó a las aguas residuales de una refinería de petróleo, lo que permitió reducir la huella hídrica y los costos de tratamiento. Sueviriyapan et al. (2016) extendieron el trabajo antes

mencionado, centrándose en el diseño sistemático de un sistema de gestión de agua para redes de tratamiento de aguas residuales de un proceso industrial existente. Se empleó un procedimiento de solución secuencial para resolver un problema de optimización basado en la superestructura de la red formulada como MILP o MINLP, donde se minimizó el costo total anualizado y la tasa de descarga de aguas residuales. Las redes óptimas de tratamiento de aguas residuales que obtuvieron presentaron beneficios económicos y ambientales. Adicionalmente, Castillo et al. (2016) presentaron un marco de trabajo integrado para la selección de una red óptima de la configuración de una planta de tratamiento de aguas residuales. La metodología integrada combina una técnica basada en el conocimiento (como NOVEDAR_EDSS) y la optimización basada en una superestructura (minimizando el costo total anualizado). La metodología de tres pasos se aplicó a un caso de estudio real, una instalación ubicada en el norte de España que trata las aguas residuales en un área doméstica. Según los autores, existe un beneficio mutuo y una sinergia lograda cuando ambas herramientas están integradas.

Sin importar el enfoque que se utilice para el diseño de

la red de tratamiento (conceptual, programación matemática o combinación de ambos), se debe abordar el objetivo del desarrollo sustentable. Por lo tanto, la naturaleza multidimensional de la sustentabilidad es fundamental y considera tres dimensiones, es decir, económica, ambiental y social. A pesar de esto, algunos estudios en la literatura intentan capturar los requisitos de sustentabilidad utilizando un solo indicador, por ejemplo, a través del análisis económico (Balkema et al., 2002; Muga y Mihelcic, 2008). La mayoría de los estudios se centran en las dimensiones ambientales y/o económicas, ignorando los aspectos sociales (Molinos-Senante et al., 2014). De hecho, la evaluación cuantitativa del aspecto social es especialmente complicada, por lo que la gran mayoría de los indicadores considerados son de carácter cualitativo (Popovic et al., 2014). Entonces, la implementación de redes de plantas de tratamiento de aguas residuales para mejorar la calidad del agua, es una alternativa para disminuir la escasez y contaminación del agua, ya que permiten eliminar contaminantes provenientes de actividades humanas e industrias, lo cual implica una reducción en la contaminación del medioambiente.

Actualmente, un diseño adecuado para los sistemas de

tratamiento de aguas residuales basado en métodos de optimización es fundamental y puede lograrse mediante el desarrollo de una metodología sistemática basada en modelos que utilice como criterios de decisión métricas que consideren las tres dimensiones de la sustentabilidad. La metodología sistemática requiere una serie de métodos y herramientas, entre los cuales, se encuentran métodos para identificar cuellos de botella, estrategias de optimización en marcos mono y multiobjetivo, y métodos para la toma de decisiones. En este trabajo, se propone y aplica un marco de trabajo que aborda un enfoque integral para el diseño de redes de plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que permite la evaluación de las tres dimensiones de la sustentabilidad, combinando el enfoque conceptual y de programación matemática. Para abordar un enfoque global de la sustentabilidad, es obligatoria una metodología de diseño para una red de tratamiento con múltiples contaminantes mediante la optimización de múltiples objetivos, donde todos los aspectos de la sustentabilidad se consideran en las diferentes funciones objetivo. En consecuencia, el objetivo de este trabajo es doble. En primer lugar, es proponer una metodología sistemática para resolver problemas de

redes de tratamiento con múltiples contaminantes con el fin de tener un planteamiento apropiado del problema. En segundo lugar, la formulación de un nuevo modelo matemático que considere la sustentabilidad mediante la integración de aspectos económicos, ambientales y sociales relacionados con las redes de tratamiento de aguas residuales.

La metodología propuesta abarca la generación, evaluación y selección de configuraciones y tecnologías de tratamiento a través de la formulación y solución de un problema de optimización. La etapa de formulación se divide en cuatro pasos. Primero, se reúnen todos los datos necesarios sobre el sistema, como las técnicas disponibles y las características de los contaminantes. En segundo lugar, se desarrolla una superestructura de las opciones de la red de tratamiento. En el tercer paso, se formula el problema de optimización, es decir, la definición de las funciones objetivo y las restricciones. Para el siguiente paso, el objetivo es proporcionar los modelos matemáticos de procesos que complementen el problema de programación matemática. Por otro lado, la etapa de resolución se divide en dos pasos. En primer lugar, se realiza una optimización mono-objetivo para cada criterio con el fin de analizar las superestructuras respectivas y

verificar la idoneidad de los criterios mencionados anteriormente. Posteriormente, el problema multiobjetivo se resuelve mediante un método híbrido que combina los métodos de restricción épsilon (ϵ -constraint) y lexicográfico (Mavrotas y Florios, 2013), para obtener un Frente de Pareto. Como segundo paso, el mejor diseño en términos de sustentabilidad se elige mediante el análisis M-TOPSIS (Ren et al., 2007) para abordar el problema de la toma de decisiones con criterios múltiples. Este procedimiento permite la identificación, comparación y selección de opciones de la red de tratamiento a través de restricciones y evaluación de funciones objetivo. El capítulo 4 está dedicado a presentar la metodología sistemática para el diseño multiobjetivo de redes de tratamiento de aguas residuales sustentables.

El enfoque integral se ha aplicado a un caso de estudio para aguas residuales municipales considerando dos escenarios. En primera instancia, se analiza una planta de tratamiento de aguas residuales. En este caso, se plantea un problema de optimización mixto entero no lineal mono y multiobjetivo, el cual considera cuatro criterios de evaluación como son los costos totales (*CT*), eficiencia de eliminación (*RE*), consumo de energía

(*CE*), y reutilización de agua (*AR*). En la formulación multiobjetivo se remueve la eficiencia de eliminación como criterio de decisión, ya que se puede evaluar indirectamente a partir de la reutilización de agua. En el segundo escenario se analiza una red de tratamiento de aguas residuales, en la cual se formula y resuelve un problema de optimización no lineal mono y multiobjetivo. En lo que respecta a los criterios de sustentabilidad, primero se evalúa el compromiso entre la eficiencia de eliminación y el costo total utilizando un método híbrido (lexicográfico + ϵ -constraint). Después, se cambia el criterio ambiental por el análisis de ciclo de vida (ACV) y mediante el método de restricción épsilon (ϵ -constraint) se analiza la relación de compromiso entre ambas funciones objetivo, con un claro umbral de impacto ambiental, donde se obtienen dos tipos de configuraciones de diseño (una o dos plantas). Finalmente, se estudian las tres dimensiones de la sustentabilidad (económica, ambiental y social), al minimizar los costos totales y el consumo de energía, mientras se maximiza el porcentaje de agua reutilizada.

Por otro lado, se investiga el comportamiento no lineal para un tratamiento biológico de aguas residuales, utilizando la integración directa de las ecuaciones

gobernantes del modelo (ASM1 y ASM2d). De esta manera se busca determinar cómo los parámetros de control, tales como el tiempo de residencia (τ) y el coeficiente de transferencia de oxígeno ($K_L a$), afectan a la eficiencia de eliminación de contaminantes. Además, se evalúa la influencia de la configuración en una planta de tratamiento, mediante el diseño de una batería de reactores óptimos minimizando el volumen total y la sumatoria de $K_L a$ utilizando un enfoque secuencial para lograr las eficiencias de remoción deseadas.

La optimización multiobjetivo formulada y resuelta en este trabajo revela que tres criterios presentan relaciones antagónicas (costo total, energía consumida y agua reutilizada). Los resultados del problema de toma de decisiones de criterios múltiples (MCDM) confirman la importancia de estudiar los tres aspectos de la sustentabilidad al mismo tiempo, en lugar de optimizar un criterio por separado. Se obtiene el diseño óptimo de una PTAR y una RPTAR sustentables. Además, la relación entre algunos parámetros de control en un tratamiento biológico y su impacto en la eficiencia de eliminación.

METODOLOGÍA

El planteamiento del diseño óptimo de una red de

tratamiento de aguas residuales sustentables considera las corrientes de aguas residuales con sus respectivos contaminantes, y los diferentes efluentes de descarga de aguas residuales (o corrientes de aguas residuales tratadas que pueden reutilizarse) a un nivel de contaminación establecido por las leyes ambientales. De esta información, se obtiene el mejor diseño para una red de tratamiento cuando se evalúa con los criterios de sustentabilidad seleccionados. El diseño de la red de tratamiento incluye las tecnologías de tratamiento utilizadas, así como los caudales tratados, la concentración de los contaminantes, la configuración del proceso y los caudales de las corrientes de las aguas residuales tratadas para los diferentes tipos de descarga, y/o oportunidades de reutilización. Para resolver el problema de diseño descrito, la metodología propuesta se basa en la generación, evaluación y selección de configuraciones y tecnologías óptimas, mediante el uso de una superestructura (que incluye todas las opciones de proceso y configuraciones) para identificar las diferentes etapas del tratamiento, en términos de la demanda química y bioquímica de oxígeno, la cantidad total de sólidos suspendidos y metales pesados, entre otras variables que deben permanecer dentro de los límites de

las métricas de sustentabilidad. En la Figura 4.1 se muestra el marco de trabajo propuesto, que es un proceso iterativo, donde en algunos casos es necesario volver a uno o más pasos si no se puede completar un paso posterior. El enfoque integral considera descartar por adelantado aquellas opciones que no cumplan con las diferentes reglas heurísticas y restricciones, permitiendo una reducción del espacio de búsqueda antes de resolver el problema de optimización. Por lo tanto, la metodología es una combinación de los enfoques conceptual y programación matemática. El marco de trabajo general y los pasos metodológicos se describen a continuación.

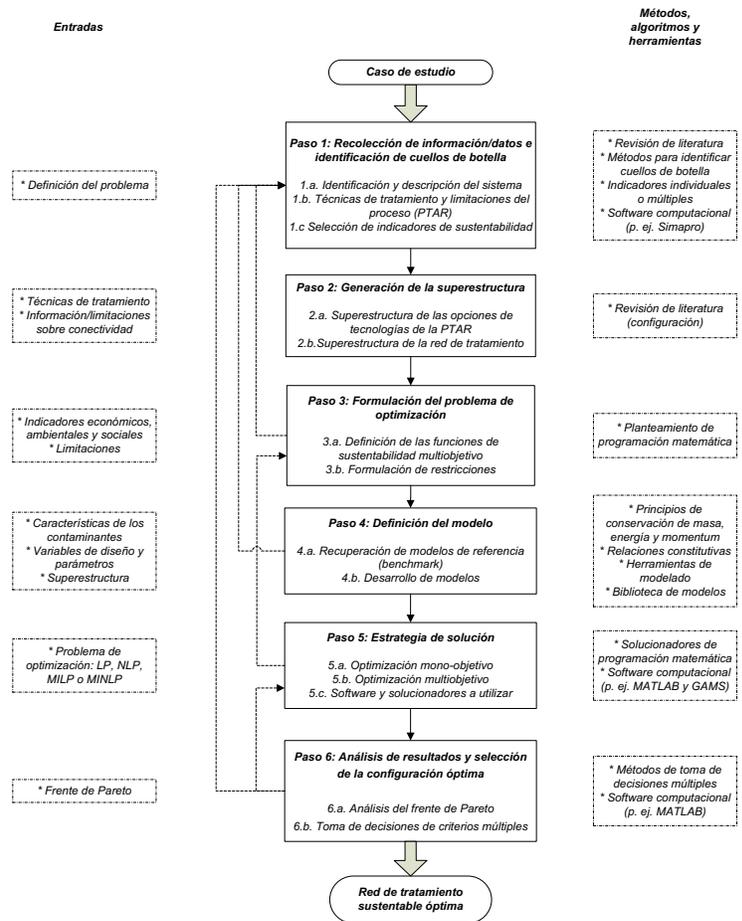


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología sistemática para el diseño óptimo de redes de tratamiento de aguas residuales.

RESULTADOS

En esta sección, el marco de trabajo presentado para el diseño óptimo de redes de tratamiento de aguas residuales sustentables se aplica a un caso de estudio, que aborda el problema del tratamiento de aguas residuales municipales. La selección del caso de estudio está basada en la disponibilidad de información (revisión de literatura) y tiene como objetivo representar la

complejidad del diseño de una PTAR municipal, que se relaciona con la cantidad y el tipo de contaminantes, la cantidad de opciones de técnicas de tratamiento, el cumplimiento de las regulaciones ambientales y la gestión sustentable del agua. El problema se puede definir como: dado un conjunto de corrientes de aguas residuales municipales con caudales conocidos, que contienen ciertos contaminantes con concentraciones conocidas y diferentes efluentes de descarga de aguas residuales o corrientes de aguas residuales tratadas para su reutilización, el objetivo es diseñar una planta de depuración que pueda eliminar una carga de contaminantes hasta los límites deseados (estándares) para su descarga y/o reutilización. Se espera obtener el mejor diseño en términos de la sustentabilidad, que incluye las tecnologías de tratamiento utilizadas y los caudales tratados, la configuración del proceso y las corrientes de caudales de las aguas residuales tratadas para su descarga o reutilización.

Paso 1: Recolección de información/datos e identificación de cuellos de botella

Paso 1.a. Identificación y descripción del sistema

En México, hay 2526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, que tratan el 63%

de las aguas residuales municipales que se recolectan a través de los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2018). Estos datos indican que existe la necesidad de satisfacer la demanda del tratamiento de las aguas residuales generadas en los centros de población. Por lo tanto, se considera un caso de estudio de aguas residuales municipales de la Ciudad de México que se utilizan para el riego agrícola en el Valle de Tula, conocido como el Valle del Mezquital (Jiménez, 2005). La ciudad de México genera alrededor de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ de aguas residuales (municipales), que se recolectan en un sistema unificado de alcantarillado combinado. Las aguas residuales deben tratarse antes de la descarga para cumplir con los límites ambientales establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas (SEMARNAT, 2014). En este caso, las concentraciones de metales están dentro de los límites permitidos. Entonces, el estudio se enfocara en tratar los contaminantes de interés en términos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total (TN) y Fósforo Total (TP). La Tabla 5.1 muestra las características promedio de estas aguas residuales. Dependiendo de la configuración de la PTAR, puede haber más de una descarga porque no todos los tipos (ríos, aguas costeras

para la pesca, etc.) deben cumplir con los mismos límites de descarga establecidos por las regulaciones ambientales. Por lo tanto, tres tipos de cuerpos receptores se consideran A, B y C. Para el tipo A, los ríos son el cuerpo receptor, las aguas costeras se toman en cuenta para el tipo B y el tipo C considera depósitos de agua naturales para la protección de la vida acuática. Con respecto al agua recuperada, se consideran dos tipos posibles de reutilización del agua tratada, servicios al público con contacto directo (CD) y servicios al público con contacto indirecto u ocasional (CI). La selección de los efluentes de descarga de aguas residuales y los propósitos de reutilización se basa en los estándares ambientales establecidos por la SEMARNAT (2014).

Tabla 1. Características de las aguas residuales de la Ciudad de México y límites de descarga (cuerpos receptores, A: ríos; B: aguas costeras; C: depósitos de agua natural para la protección de la vida acuática).

| Contaminantes (mg/l) | Promedio | Límites del cuerpo receptor A | Límites del cuerpo receptor B | Límites del cuerpo receptor C | Límites para CD | Límites para CI |
|----------------------|----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| DBO ₅ | 240 | 200 | 150 | 60 | 20 | 30 |
| SST | 295 | 200 | 125 | 60 | 20 | 30 |
| NT | 26 | 60 | 60 | 25 | 60 | 60 |
| PT | 10 | 30 | 30 | 10 | 30 | 30 |

Paso 1.b. Técnicas de tratamiento y limitaciones del proceso (PTAR)

Se realizó una revisión exhaustiva de la información disponible en la literatura con respecto a los contaminantes y las técnicas de tratamiento (Metcalf y Eddy, 2014; Brinkmann et al., 2016; Hendricks, 2006; Romero-Rojas, 2004). Esta información se analizó considerando el enfoque basado en la experiencia (métodos heurísticos) para identificar cuellos de botella, con la finalidad de descartar aquellas técnicas que no son capaces de eliminar los contaminantes en el afluente para el caso de estudio y/o no son adecuadas para lograr los objetivos del tratamiento en la PTAR. En el Anexo 1 se muestra una tabla comparativa de las ventajas y desventajas (limitantes) de cada técnica. Más aún, en la Figura 5.1 se presenta el esquema de las técnicas que conforman los niveles de tratamiento en una PTAR. En esta se muestran las posibles interacciones entre las técnicas de un nivel con el siguiente, así como su interacción en el mismo nivel.

Además, la selección de técnicas de tratamiento depende de la disponibilidad y la calidad de los datos. Luego, las técnicas consideradas son el cribado, el separación de arena, la separación de aceite y agua, la sedimentación

primaria, la filtración, la flotación, la coagulación/floculación combinadas con la sedimentación primaria, el proceso aeróbico, el proceso anaeróbico, el proceso aeróbico combinado con el proceso anaeróbico, los procesos anaeróbico-anóxico-aeróbicos combinados, oxidación química, precipitación química, procesos con membranas, adsorción de carbono, intercambio iónico, desorción y procesos electroquímicos. En la sección 2.5 se tiene la descripción de las técnicas. En este estudio, el tratamiento de lodos no se considera, pero algunas de las técnicas seleccionadas también se pueden usar para este propósito, como la filtración, procesos anaeróbicos, procesos con membranas, entre otros.

Paso 1.c. Selección de indicadores de sustentabilidad

A partir de la revisión de la literatura, se determinó que el costo total, la eficiencia de eliminación de contaminantes, el consumo de energía y el valor del cliente son los indicadores que representan de manera confiable las tres dimensiones de la sustentabilidad. El costo total es la suma de los costos capitales (CAPEX) y los costos de operación (OPEX), y se considera para evaluar el aspecto económico. La eficiencia de remoción de contaminantes (DBO₅, SST, NT y PT) y

el consumo de energía se proponen para cubrir el aspecto ambiental. El primer criterio es un indicador de la eficiencia global del sistema.

Tabla 2. Costo capital y operacional para las técnicas de la PTAR.

| Unidad de tratamiento o combinación | Costo capital (USD) | Costo operacional (USD/año) | Referencias |
|--|---|--|--|
| Cribado | 196F ^{0.56} | 0.0215F ^{0.4398} *** | Romero-Rojas, 2004 |
| Desarenado | 123F ^{0.76} | 0.0215F ^{0.4398} *** | Martin y Martin, 1991 |
| Separación aceite-agua | 4,800F ^{0.7*} | 0.0215F ^{0.4398} *** | Kuo y Smith, 1997 Martin y Martin, 1991 |
| Sedimentación (primaria) | 375F ^{0.7} | 11.02F ^{1.01} | Romero-Rojas, 2004 |
| Filtración | 1,405F ^{0.61} | 11.02F ^{1.01} | |
| Flotación | 29,837F ^{0.37} | 842.4F ^{0.6135} | Brinkmann et al., 2016 |
| Coagulación/ Floculación + Sedimentación | 375F ^{0.7} + 30F ^{0.91} | 11.02F ^{1.01} | Romero-Rojas, 2004 |
| Procesos aerobios | 72F + 368,043 | 4.58F + 36,295 | |
| Procesos anaerobios | 11,512F ^{0.452} | 0.67F + 26,748 | |
| Proceso aerobio + Proceso anaerobio | 72F + 368,043 + 11,512F ^{0.4} | 5.25F + 63,043 | Qasim, 1998 |
| Procesos anaerobios + anóxicos + aerobios combinados | 162F + 980,820 + 11,512F ^{0.4} | 93F ^{0.834} + 5.25F + 63,043 | |
| Oxidación química | 121,204F ^{0.37} | 1,287.4F | Brinkmann et al., 2016 |
| Precipitación química *** | 0.0488F + 0.0218 | 0.0265F + 0.0218 | Martin y Martin, 1991 |
| Procesos con membranas ** | 70.419F ^{0.745} | 265.97F ^{0.5429} | Sharma, 2010 |
| Adsorción con carbón | 262.22F ^{0.936} | 1,480.1F ^{0.6076} | Qasim, 1998 |
| Intercambio iónico ** | 1,074F ^{0.445} | 654.07F ^{0.3878} | Sharma, 2010 |

| | | | |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--|
| Desorción * | 16,800F ^{0.7} | 8,600F | Kuo y Smith, 1997 |
| Procesos electroquímicos | 73,073F ^{0.226} | 0.48F ^{1.44} | Romero-Rojas, 2004 Brinkmann et al., 2016 |

Esta métrica no se ha estudiado previamente dentro de un problema de optimización. Sin embargo, es ampliamente utilizado como un indicador ambiental de los procesos de tratamiento de aguas residuales, ya que en algunos casos podría considerarse que cumplir con los límites de concentración de contaminantes establecidos por las regulaciones ambientales es una medida indirecta de la eficiencia de eliminación de contaminantes. Por otro lado, el consumo de energía en la PTAR se puede utilizar como una alternativa para evaluar la dimensión ambiental. Para la dimensión social de la sustentabilidad, se propone un indicador para medir el valor del cliente. Esta métrica evalúa la cantidad de agua tratada que se reutiliza y su propósito (Popovic et al., 2014). Las Tablas 5.2-5.4 muestran la información obtenida de la literatura sobre las ecuaciones para calcular los costos (capital y operacional), las eficiencias de eliminación y el consumo de energía para las tecnologías seleccionadas.

Tabla 3. Eficiencia de eliminación de las técnicas de la PTAR.

| Unidad de tratamiento o combinación | Eficiencia de eliminación (%) | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----|----|----|-------------|
| | DBO ₅ | SST | PT | NT | Referencias |

| | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|------------------------|
| Cribado | 0-5 | 5-10 | - | - | Qasim, 1998 |
| Desarenado | 0-5 | 0-10 | - | - | Romero-Rojas, 2004 |
| Separación aceite-agua | - | 50 | - | - | Kuo y Smith, 1997 |
| Sedimentación (primaria) | 30-40 | 50-65 | 10-20 | 20-40 | Qasim, 1998 |
| Filtración | 20-60 | 60-80 | 20-50 | 50-70 | |
| Flotación | 10-50 | 70-95 | - | - | Romero-Rojas, 2004 |
| Coagulación/ Floculación + Sedimentación | 40-70 | 50-80 | 70-90 | 50-90 | Qasim, 1998 |
| Procesos aerobios | 80-85 | 80-90 | 10-25 | 60-85 | Qasim, 1998 |
| Procesos anaerobios | 75-85 | - | - | - | Metcalf y Eddy 2014 |
| Proceso aerobio + Proceso anaerobio | 99 | - | - | - | Brinkmann et al., 2016 |
| Procesos anaerobios + anóxicos + aerobios combinados | 90-95 | 80-95 | 70-90 | 70-95 | Qasim, 1998 |
| Oxidación química | 70-99 | - | - | 80-95 | Brinkmann et al., 2016 |
| Precipitación química | 50-85 | 70-90 | - | - | Romero-Rojas, 2004 |
| Procesos con membranas | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | |
| Adsorción con carbón | 50-85 | 50-80 | 10-30 | 30-50 | Qasim, 1998 |
| Intercambio iónico | - | - | - | 90-95 | |
| Desorción | - | - | - | 60-95 | |
| Procesos electroquímicos | 85 | 95 | - | - | Statyukha et al., 2008 |

Tabla 4. Energía consumida para las técnicas de la PTAR.

| Unidad de tratamiento o combinación | Consumo de energía (kWh/m ³) | Referencias |
|-------------------------------------|--|----------------------|
| Cribado | 0.0003-0.0005 | Metcalf y Eddy, 2014 |
| Desarenado | 0.003-0.013 | |
| Separación aceite-agua | 0.06 | Quaglia et al., 2014 |
| Sedimentación (primaria) | 0.0057-0.0082 | EPRI, 2013 |
| Filtración | 0.003 | Persson et al., 2006 |
| Flotación | 0.03-0.04 | Metcalf y Eddy, 2014 |

| | | |
|--|-------------------|--|
| Coagulación/ Floculación + Sedimentación | 0.0177- 0.02 | EPRI, 2013 |
| Procesos aerobios | 0.13-0.32 | Metcalf y Eddy, 2014 |
| Procesos anaerobios | 0.093- 0.16 | Eddy, 2014 |
| Proceso aerobio + Proceso anaerobio | 0.6 | Amiri et al., 2015 |
| Procesos anaerobios + anóxicos + aerobios combinados | 0.503- 0.57 | Metcalf y Eddy, 2014 Molinos- Senante et al., 2014 |
| Oxidación química | 0.05-0.1 | Metcalf y Eddy, 2014 |
| Precipitación química | 0.0002- 0.0024 | EPRI, 1996 |
| Procesos con membranas | 0.5-0.65 | Metcalf y Eddy, 2014 |
| Adsorción con carbón | 0.02- 0.035 | Mousel et al., 2017 |
| Intercambio iónico | 0.395 | RPSEA, 2009 |
| Desorción | 0.1-0.5 | Brinkmann et al., 2016 |
| Procesos electroquímicos | 1.1-2.2 | Metcalf y Eddy, 2014 |

Paso 2: Generación de la superestructura

Paso 2.a. Superestructura de las opciones de tecnologías de la PTAR

Se retoma la superestructura general para la PTAR desarrollada. A partir de la información recolectada y el análisis de las limitaciones para las técnicas de tratamiento, se determinaron las unidades de tratamiento más apropiadas para las diferentes etapas (pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario) de la PTAR. Las técnicas para el primer nivel son el cribado, el desarenado y la separación de aceite-agua. El

tratamiento primario considera estas técnicas: sedimentación primaria, filtración, flotación y coagulación/floculación combinadas con sedimentación primaria. Los procesos aerobios, los procesos anaerobios, el aerobio combinado con el anaerobio, los procesos aerobios-anaerobio-anóxicos combinados y los tratamientos de oxidación química están presentes en la etapa de tratamiento secundario. En el tratamiento terciario, se incluyen la precipitación química, los procesos con membranas, la adsorción con carbono, el intercambio iónico, la desorción y los procesos electroquímicos. El paso 2.b. (superestructura de la red de tratamiento) de la metodología se omite porque el análisis se enfoca en una PTAR.

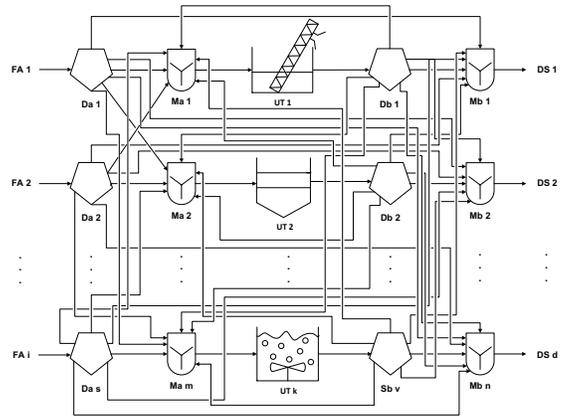


Figura 1. Superestructura general para una PTAR (FA: Fuente de aguas residuales, D_a y D_b : Divisores, M_a y M_b : Mezcladores, UT: Unidades de tratamiento y DS: Efluentes de aguas residuales tratadas).

Paso 3: Formulación del problema de optimización

5.1.3.1 Paso 3.a. Definición de las funciones de sustentabilidad multiobjetivo

Se consideran simultáneamente varios criterios, que están relacionados con las tres dimensiones de la sustentabilidad, es decir, ambiental, económica y social. Se prefiere evaluar el criterio económico por medio del costo total (CT), que es la suma de los costos capitales (CAPEX) y los costos operacionales (OPEX) en función del caudal tratado:

$$\min CT = \sum_k^{NT} \sum_h^{UT} C_{h,k}(F_{h,k}) + O_{h,k}(F_{h,k}), \quad (5.1)$$

$$\forall h \in UT, \forall k \in NT$$

donde, $F_{h,k}$ es el caudal de agua residual de la unidad de tratamiento h en el nivel de tratamiento k , $C_{h,k}(F_{h,k})$ es una función dependiente del caudal tratado ($F_{h,k}$) que permite calcular el costo capital total de la unidad de tratamiento h en el nivel de tratamiento k , y $O_{h,k}(F_{h,k})$ es una función dependiente del caudal tratado ($F_{h,k}$) que permite calcular los costos operacionales de la unidad de tratamiento h en el nivel de tratamiento k . Las funciones pueden tomar diferentes formas, como lineal, exponencial, potencial y polinomial (Tabla 5.2).

Se proponen dos funciones objetivo para cubrir el

aspecto ambiental, eficiencia global de eliminación de los contaminantes (RE) y el consumo de energía (CE). El primer criterio ambiental se define como la suma de la eficiencia de eliminación global de contaminantes:

$$\max RE = \sum_{j=1}^J \eta_{j,co} W_j, \quad j = 1,2, \dots, J \quad (5.2)$$

donde

$$\eta_{j,co} = \frac{C_{j,cen} - C_{j,csal}}{C_{j,cen}} \quad (5.3)$$

con $C_{j,cen}$ como la concentración del contaminante j a la entrada, $C_{j,csal}$ como la concentración del contaminante j a la salida, $\eta_{j,co}$ es la eficiencia global de remoción para el contaminante j y W_j es el peso para el contaminante j .

Por otro lado, el consumo de energía (CE) en un sistema de tratamiento de aguas residuales se puede definir como:

$$\min CE = \sum_k^{NT} \sum_h^{UT} CE_{h,k} F_{h,k}, \quad (5.4)$$

$$\forall h \in UT, \forall k \in NT$$

donde, $F_{h,k}$ es el caudal de agua residual de la unidad de tratamiento h en el nivel de tratamiento k y $CE_{h,k}$ es una proporción de la cantidad de energía (generalmente electricidad) consumida por la unidad de tratamiento h en el nivel de tratamiento k .

Para la dimensión social se propone como indicador el

valor para el consumidor, que evalúa la cantidad de agua tratada que se reutiliza y con qué propósito. Dada por la siguiente ecuación:

$$\max AR = \left(\frac{\sum_r^R F_r}{F_t} \right) \times 100, \quad (5.5)$$

$$r = 1, 2, \dots, R$$

Con AR como el porcentaje de agua reusada, F_t es el caudal total de agua residual a tratar y, F_r es el caudal reusado para el propósito r .

5.1.3.2 Paso 3.b. Formulación de restricciones

Las restricciones se formulan de acuerdo con el paso 3.b., para las restricciones lógicas, solo es posible seleccionar una técnica de tratamiento por etapa (ecuación (5.6)), y en la descarga final, tres flujos salen a dos tipos de reutilizaciones (CD e CI) y un solo tipo de cuerpo receptor (ecuaciones (5.7) y (5.8)).

$$\sum_h^{UT} Y_{h,k} \leq 1, \quad \forall k \in NT \quad (5.6)$$

$$\sum_r^R Y_r \leq 2, \quad r = 1, 2 \quad (5.7)$$

$$\sum_{ds}^{DS} Y_{ds} \leq 1, \quad ds = 1, 2, 3 \quad (5.8)$$

donde $Y_{h,k}$ son variables de decisión binarias para el tratamiento h con el número de equipos UT para cada nivel de tratamiento k con el número de etapas NT en la PTAR, y las variables binarias utilizadas para seleccionar el tipo de reutilización (r) y el tipo de cuerpo receptor (ds) son Y_r y Y_{ds} , respectivamente. Todas las variables binarias en el problema de optimización pueden tomar los valores de 0 o 1. Además, se define un máximo de cuatro etapas de tratamiento:

$$\sum_k^{NT} \sum_h^{UT} Y_{h,k} \leq 4, \quad \forall h \in TU, \forall k \in TL \quad (5.9)$$

En el caso de las restricciones estructurales, la recirculación a la misma unidad de tratamiento no está permitida, porque esto implicaría que la técnica es inadecuada para el tratamiento de los contaminantes que se eliminan (ecuaciones (5.10) y (5.11)).

$$F_k^{osr} Y_{sr,k} = F_k^{isr}, \quad \forall k \in TL \quad (5.10)$$

$$\sum_k^{TL} Y_{sr,k} = 0, \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (5.11)$$

donde, F_k^{osr} es el caudal de la corriente del auto-reciclo en la salida osr para el nivel de tratamiento k , F_k^{isr} es el caudal de la corriente del auto-reciclo en la entrada isr para el nivel de tratamiento k y $Y_{sr,k}$ es la variable binaria utilizada para restringir la existencia de corrientes de

auto-reciclo en la PTAR. Para obtener las características apropiadas de las aguas residuales a tratar en cada nivel del sistema, solo es posible recircular una corriente a la etapa previa del tratamiento (por ejemplo, desde el tratamiento secundario al tratamiento primario), y una corriente no puede saltar el orden secuencial de tratamiento para una o más etapas de la PTAR (derivaciones), dado por las ecuaciones (5.12), (5.13) y (5.14).

$$F_{k-1}^{irs} Y_{rs,k} = F_k^{ors}, \quad k = 2,3,4 \quad (5.12)$$

$$F_k^{oby} = \sum_k^2 F_{k+2}^{iby} Y_{by,k}, \quad k = 1,2 \quad (5.13)$$

$$\sum_k^2 Y_{by,k} = 0, \quad k = 1,2 \quad (5.14)$$

donde, F_{k-1}^{irs} es el caudal de la corriente recirculada hacia la entrada *irs* para la etapa $k - 1$, F_k^{ors} es el caudal de la corriente recirculada desde la salida *ors* para la etapa k , $Y_{rs,k}$ es la variable binaria utilizada para restringir la existencia de una corriente recirculada, F_k^{oby} es el caudal de la corriente de derivación desde la salida *oby* para el nivel de tratamiento k , $F_{k+2}^{iby} Y_{by,k}$ es el caudal de la corriente de derivación hacia la entrada *iby* para el nivel de tratamiento $k + 2$, y $Y_{by,k}$ es la variable binaria utilizada para restringir la existencia de

la corriente de derivación. Para la formulación de las restricciones operacionales, las concentraciones de contaminantes en las corrientes de descarga deben cumplir con las regulaciones ambientales, así como las concentraciones de contaminantes para cada tipo de reutilización, dadas por las siguientes ecuaciones:

$$c_{j,ds}^{min} \leq c_{j,ds} \leq c_{j,ds}^{max}, \quad \forall j \in J, \forall ds \in DS \quad (5.15)$$

$$c_{j,cd}^{min} \leq c_{j,cd} \leq c_{j,cd}^{max}, \quad \forall j \in J, \forall cd \in CD \quad (5.16)$$

$$c_{j,ci}^{min} \leq c_{j,ci} \leq c_{j,ci}^{max}, \quad \forall j \in J, \forall ci \in CI \quad (5.17)$$

donde, las concentraciones de contaminantes en las posibles corrientes de descarga ($c_{j,ds}$, $c_{j,dc}$ y $c_{j,ic}$) deben cumplir un límite inferior y superior ($c_{j,ds}^{min}$, $c_{j,ds}^{max}$, $c_{j,cd}^{min}$, $c_{j,cd}^{max}$, $c_{j,ci}^{min}$ y $c_{j,ci}^{max}$) establecidos por las regulaciones ambientales (SEMARNAT, 2014). Las restricciones lógicas y estructurales tienen un impacto directo en la configuración de la PTAR bajo estudio (Figura 5.2). Si estas restricciones se evalúan antes de resolver el problema de optimización, se puede reducir el número de configuraciones posibles (espacio de búsqueda). Entonces, la configuración a optimizar se incluye en la superestructura general, como se muestra en la Figura 3.

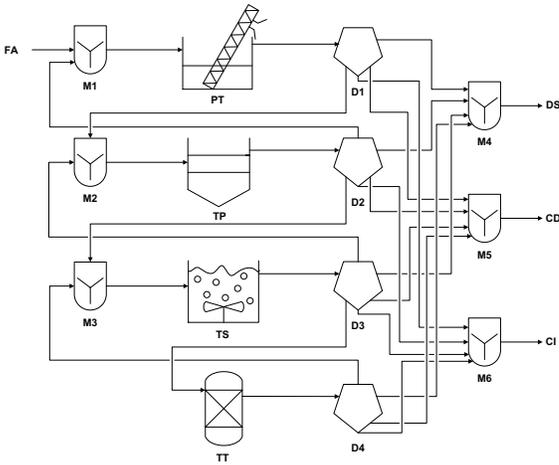


Figura 2. Superestructura para la PTAR del caso de estudio, que considera una corriente de descarga (DS) y la reutilización de las aguas residuales tratadas en los servicios públicos (CD y CI). Además, los cuatro niveles de tratamiento: pretratamiento (P-T), tratamiento primario (TP), tratamiento secundario (TS) y tratamiento terciario (TT).

Paso 4: Definición del modelo

Paso 4.a. Recuperación de modelos de referencia (benchmark)

En este estudio, se considera solamente una relación constitutiva, que es la eficiencia de eliminación de cada contaminante en las diferentes unidades de tratamiento. Definido como un valor constante independiente del caudal de aguas residuales a tratar. En la Tabla 5.3, los valores porcentuales máximos reportados se establecen para el cálculo de la cantidad de contaminante

eliminado en las unidades de tratamiento (ecuación (5.18)).

$$E_{j,h,k} = \frac{pmax_{j,h,k}}{100}, \quad \forall j \in J, \forall h \in TU, \forall k \in TL \quad (5.18)$$

donde, $E_{j,h,k}$ es el coeficiente de eficiencia de eliminación del contaminante j para la unidad de tratamiento h en el nivel de tratamiento k , y $pmax_{j,h,k}$ es el porcentaje máximo de eliminación reportado de contaminante j para el tratamiento h en el nivel de tratamiento k en la superestructura.

CONCLUSIONES

Se propone una metodología integral que combina los enfoques conceptual y de programación matemática. La metodología ha sido aplicada a un caso de estudio de aguas residuales municipales de la Ciudad de México, para el diseño de redes de tratamiento de aguas residuales sustentables. El procedimiento de seis pasos permite la identificación, comparación y selección de las opciones de la red de tratamiento, a través de la identificación de los cuellos de botella, las restricciones y la evaluación de las funciones objetivo.

En lo que respecta a la PTAR, se evaluaron cuatro

métricas (costo total, eficiencia de remoción, energía consumida y aguas residuales reutilizadas) para abordar el desarrollo sustentable. Sin embargo, solo tres criterios muestran relaciones antagónicas (la eficiencia de eliminación no se mantiene) para el problema de optimización mono-objetivo. La implementación del método de optimización (restricción ϵ) proporciona un conjunto de diferentes estrategias de diseño óptimo en el espacio variable asociado en forma de un frente de Pareto, cuando se evalúan las tres dimensiones de la sustentabilidad. Para equilibrar las soluciones entre los aspectos económicos, ambientales y sociales, un problema de MCDM se trata mediante el procedimiento de clasificación M-TOPSIS. Entonces, se obtiene la red de tratamiento sustentable óptima. En otras palabras, se logra la mejor red de tratamiento posible, que maximiza el porcentaje de reutilización de aguas residuales al tiempo que minimiza el costo total y el consumo de energía en una solución de compromiso.

BIBLIOGRAFÍA

Amiri, A.W., Tsutsumi, J.G., Nakamatsu, R., 2015. Energy from Domestic Wastewater and Recovering the Potential Energy of Sewage Sludge. *Journal of Energy Technologies and*

Policy 5, 12, 70-76.

Aranda-Pinilla, J. A. y Orjuela-Castro, J. A. (2015). Optimización Multiobjetivo en la Gestión de Cadenas de Suministro de Biocombustibles. Una Revisión de la Literatura. *Ingeniería*, Vol. 20, N°. 1.

Avendaño Leadem, D., 2016. Identificación de tipologías de asentamiento para el diseño de tratamiento descentralizado de aguas residuales. Caso de estudio: San Isidro de Heredia - Costa Rica. *Geográfica de América Central*, 56,183-207.

Bagajewicz, M., 2000. A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. *Computers and Chemical Engineering* 24, 2093-2113.

Bagajewicz, M.J., Faria, D.C., 2009. On the appropriate architecture of the water/wastewater allocation problem in process plants. *Computer Aided Chemical Engineering 19th ESCAPE*, 1-20.

Balkema, A.J., Preisig, H.A., Otterpohl R., Lambert, F.J.D., 2002. Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water* 4, 153-161.

Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V.,

- Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist, H., Vavilin, V.A., 2002. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 45, 10, 65–73.
- Belotti, P., Lee, P., Liberti, L., Margot, F., Wächter, A., 2009. Branching and bounds tightening techniques for non-convex MINLP. *Optimization Methods and Software*, 24, 4–5, 597–634.
- Ben-Guang, R., Fang-Yu, H., Kraslawski, A., Nyström, L., 2000. Study on the methodology for Retrofitting Chemical Processes. *Chem. Eng. Technol.*, 23, 6, 479-484.
- Boix, M., Montastruc, L., Pibouleau, L., Azzaro-Pantel, C., Domenech S., 2011. A multiobjective optimization framework for multicontaminant industrial water network design. *Journal of Environmental Management* 92, 1802-1808.
- Bonami, P., Biegler, L.T., Conn, A.R., Cornuéjols, G., Grossmann, I.E, Laird, C.D, Lee, J., Lodi, A., Margot, F., Sawaya, N., Wächter, A., 2008. An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs. *Discrete Optimization*, 5, 186–204.
- Brinkmann, T., Giner Santonja, G., Yükseler, H., Roudier, S., Delgado Sancho, L., 2016. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Publications Office of the European Union. EUR 28112 EN.
- Cafaro D.C., Grossmann I.E., 2014. Alternate Approximation of Concave Cost Functions for Process Design and Supply Chain Optimization Problems, *Computers and Chemical Engineering*, 60, 376-380.
- Carvalho A., Mimoso A.F., Mendes A.N., Matos H.A., 2014. From a Literature Review to a Framework for Environmental Impact Assessment Index, *Journal of Cleaner Production*, 64, 36-62.
- Carvalho, A., Gani, R., Matos, H., 2008. Design of sustainable chemical processes: Systematic retrofit analysis, generation and evaluation of alternatives. *Process Safety and Environmental Protection*, 86, 328-346.
- Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M.,

- Sin, G., 2016. An integrated knowledge based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environmental Modelling & Software* 84, 177-192.
- Chiandussi, G., Codegoneb, M., Ferrero, S., Varesio, F.E., 2012. Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications. *Computers and Mathematics with Applications*, 63, 912–942.
- Collette, Y., Siarry, P., 2003. *Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies*. Springer.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2011. *Estadísticas del Agua en México, Edición 2011*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2018. *Estadísticas del Agua en México, Edición 2018*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). http://www.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.
- Copp, J. (ed., 2002). *The COST Simulation Benchmark – Description and Simulator Manual*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, ISBN 92-894-1658-0.
- De Anda Sánchez, J., 2017. *Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México*. *Sociedad y Ambiente*. 14, 119-143.
- De-León Almaraz, S., 2014. *Multi-objective optimisation of a hydrogen supply chain*. PhD thesis. France: Université de Toulouse.
- De-León Almaraz, S., Boix, M., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., Liao, Z., Domenech, S., 2016. Design of a water allocation and energy network for multi-contaminant problems using multi-objective optimization. *Process Saf. Environ. Prot.* 103, 348-364.
- Edgar, T.F., Himmelblau, D.M., Lasdon, L.S., 2001. *Optimization of Chemical Processes*. McGraw-Hill.
- EPRI (Electric Power Research Institute), 1996. *Water*

- and Wastewater Industries: Characteristics and Energy Management Opportunities. CR-106941.
- EPRI (Electric Power Research Institute), 2013. Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2016. AQUASTAT website, visitada en Diciembre de 2018. Disponible en http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2013. Afrontar la Escasez de Agua: Un Marco de Acción para la Agricultura y la Seguridad Alimentaria. Informe sobre temas hídricos 38. Roma, FAO.
- Faria, D.C., Bagajewicz, M.J., 2011. Novel bound contraction procedure for global optimization of bilinear MINLP problems with applications to water management problems. *Computers and Chemical Engineering* 35, 446–455
- Flores-Tlacuahuac A., Esparza M. H., López -Negrete de la Fuente R., 2009. Bifurcation Behavior of a Large Scale Waste Water Treatment Plant, Ind. Eng. Chem. Res., 48, 2605-2615.
- Galan, B., Grossmann, I.E., 1998. Optimal Design of Distributed Wastewater Treatment Networks. Ind. Eng. Chem. Res. 37, 4036-4048.
- Goedkoop M.J., Heijungs R., Huijbregts M.A.J., De Schryver A.M., Struijs J., Van Zelm R., 2009. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition Report I: Characterisation, 6 January 2009, <http://www.lcia-recipe.net>.
- Hangos, K.M., Cameron, I.T., 2001. Process Modelling and Model Analysis. Volume 4, Academic Press, 1st Edition.
- Hendricks, D.W., 2006. Water Treatment Unit Processes: Physical and Chemical. CRC Press.
- Henze M., Willi G., Takashi M., van Loosdrecht M., 2000. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, London: IWA publishing.
- Ho, W., 2008. Integrated analytic hierarchy process and its applications—a literature review. *European Journal of Operational Research*, 186, 211–228.
- Jiménez, B., 2005. Treatment technology and standards

- for agricultural wastewater reuse: a case study in Mexico. *Irrig. and Drain* 54, S23–S33.
- Jung, Y.T., Narayanan, N.C., Cheng, Y.L., 2018. Cost comparison of centralized and decentralized wastewater management systems using optimization model. *Journal of Environmental Management*, 213, 90-97.
- Karuppiah, R., Grossmann, I. E., 2006. Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes. *Computers and Chemical Engineering* 30, 650–673.
- Karuppiah, R., Grossmann, I. E., 2008. Global optimization of multiscenario mixed integer nonlinear programming models arising in the synthesis of integrated water networks under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering* 32, 145-160.
- Koppol, A.P.R., Bagajewicz, M.J., Dericks B.J., Savelski, M.J., 2003. On zero water discharge solutions in the process industry. *Advances in Environmental Research* 8, 151-171.
- Kuo, W.J.C., Smith, R., 1997. Effluent Treatment Systems Design. *Chem. Eng. Sci.* 52 (23), 4273-4290.
- Le Treut, H., Somerville R., Cubasch U., Ding Y., Mauritzen C., Mokssit A., Peterson T. and Prather M., (2007). Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Li, A.H., Zhang J., Liu, Z.Y, 2016. Design of distributed wastewater treatment networks of multiple contaminants with maximum inlet concentration constraints. *Journal of Cleaner Production*, 118, 170-178.
- Lim, S.R., Lee, H., Park, J.M., 2009. Life Cycle Cost Minimization of a Total Wastewater Treatment Network System. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 2965–2971.
- Lim, S.R., Park, J.M., 2009. Environmental impact minimization of a total wastewater treatment network system from a life cycle perspective.

- Journal of Environmental Management 90, 1454–1462.
- Liu, C. Z., Li, A. H., Klemeš, J. J., Liu, Z. Y., 2018. Design of distributed wastewater treatment networks by combining total mixing influence potential indicator with heuristic rules. Journal of Cleaner Production, 193, 604-613.
- Liu, Z.H., Shi, J., Liu, Z.Y., 2013. Design of distributed wastewater treatment systems with multiple contaminants. Chemical Engineering Journal 228, 381–391.
- Ll., Corominas, J., Foley, J.S., Guest, A., Hospido, H.F., Larsen, S., Morera, A., Shaw, 2013. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art, Water research, 47, 5480-5492.
- López Blanco, J., Rodríguez Gamiño, M. L., 2008. Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México. Geografía para el siglo XXI (Obra general). Serie Libros de Investigación.
- Lu, B., Huang, S., Grossmann, I. E., 2017. Optimal Synthesis and Operation of Wastewater Treatment Process with Dynamic Influent. Ind. Eng. Chem. Res. 56, 8663-8676.
- Lutze, P., Román-Martinez, A., Woodley, J.M., Gani, R., 2012. A systematic synthesis and design methodology to achieve process intensification in (bio) chemical processes. Computers and Chemical Engineering 36, 189–207.
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K., MD, Khalifah, Z., Zakwan, N., Valipour, A., 2015. Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014, Economic Research-Ekonomiska Istraživanja, 28:1, 516-571.
- Martin, E.J., Martin, E.T., 1991. Technologies for Small Water and Wastewater Systems. Van Nostrand Reinhold. New York, New York.
- Massoud, M.A., Tarhini, A., Nasr, J.A., 2009. Decentralized Approaches to Wastewater Treatment and Management: Applicability in Developing Countries. Journal of Environmental Management 90, 652-659.
- Mavrotas G., 2009. Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems, Applied Mathematics and Computation 213, 455– 465.
- Mavrotas, G., Florios, K., 2013. An improved version of

- the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation* 219, 9652–9669.
- Metcalf y Eddy, AECOM, 2014. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill, 5th edition.
- Molinos-Senante, M., Gómez, T., Garrido-Baserba, M., Caballero, R., Sala-Garrido, R., 2014. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach. *Science of the Total Environment* 497–498, 607–617.
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., Barbosa-Povoa, A. P., 2015. Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning, *Journal of Cleaner Production*, 105, 14-27.
- Mousel, D., Palmowski, L., Pinnekamp, J., 2017. Energy demand for elimination of organic micropollutants in municipal wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 575, 1139-1149.
- Muga, H.E., Mihelcic, J.R., 2008. Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management* 88, 437–447.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial), 2019. *Nuestro mandato - El Agua*, visitada en junio de 2019. Disponible en <https://public.wmo.int/es/nuestro-mandato/el-agua>.
- OMS (Organización Mundial de la Salud), 2018. *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda [Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum]*. Ginebra. Licencia: CCBY-NC-SA 3.0 IGO.
- OMS y ONU-HABITAT, Organización Mundial de la Salud (OMS) y Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-HABITAT), 2018. *Progresos en el tratamiento y el uso de las aguas residuales de manera adecuada: Prueba piloto de la metodología de monitoreo y primeras constataciones sobre el indicador 6.3.1 de los ODS [Progress on safe treatment and use of wastewater: piloting the monitoring methodology and initial findings for SDG indicator 6.3.1]*.

- Ginebra: Organización Mundial de la Salud y ONU-HABITAT. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- ONU-DAES (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas), 2014. Decenio del Agua-Escasez de agua, visitada en junio de 2019. Disponible en <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>.
- Ormerod, K.J., Scott, C.A., 2013. Drinking Wastewater: Public Trust in Potable Reuse. *Science, Technology, & Human Values* 38, 3, 351-373.
- Persson, E., Ljunggren, M., La Cour Jansen, J., Strube, R., Jönsson, L., 2006. Disc filtration for separation of flocs from a moving bed bio-film reactor. *Water Science and Technology* 53, 12, 139-147.
- Popovic, T., Kraslawski, A., Avramenko, Y., 2013. Applicability of Sustainability Indicators to Wastewater Treatment Processes. *Computer Aided Process Engineering* 32, 931-936.
- Popovic, T., Kraslawski, A., Heiduschke, R., Repked J.U., 2014. Indicators of Social Sustainability for Wastewater Treatment Processes. *Computer Aided Process Engineering*, 34, 723-728.
- Qasim, S.R., 1998. *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation*. CRC Press, Second Edition.
- Quaglia, A., 2013. *An Integrated Business and Engineering Framework for Synthesis and Design of Processing Networks*. PhD thesis. Technical University of Denmark.
- Quaglia, A., Pennati, A., Bogataj, M., Kravanja, Z., Sin, G., Gani, R., 2014. Industrial Process Water Treatment and Reuse: A Framework for Synthesis and Design. *Ind. Eng. Chem. Res.* 53, 13, 5160-5171.
- Ramalho, R. S., 1996. *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.
- Ramos Olmos, Raudel, Sepúlveda Marqués, Rubén, Villalobos Moreto, Francisco, 2003. *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. Plaza y Valdés.
- Ramos, M.A., Boix, M., Montastruc, L., Domenech, S., 2014. Multiobjective Optimization Using Goal Programming for Industrial Water Network Design. *Ind. Eng. Chem. Res.* 53, 17722–17735.
- Ren, L., Zhang, Y., Wang, Y., Sun, Z., 2007. Comparative

- Analysis of a Novel M-TOPSIS Method and TOPSIS. *Applied Mathematics Research express* Vol. 2007, 10 pages.
- Romero-Rojas, J.A., 2004. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería, 3era edición.
- Ronzano E. y Dapena J.L., 2002. Tratamiento biológico de las aguas residuales, PRIDESA.
- RPSEA Project 07122-12, 2009. Technical Assessment of Produced Water Treatment Technologies, 1st Edition.
- Sanz, J., 2014. Eliminación de sulfatos en aguas de mina mediante proceso de precipitación en serie y nanofiltración. *Canteras y explotaciones*, 572, 6-8.
<http://www.veoliawatertechnologies.es/news/articulos/38836.htm>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2014. "Normas Oficiales Mexicanas", disponible en <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/noms>.
- SEMARNAT, 2019. Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México, consultado en junio de 2019, disponible en https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores15/conjuntob/00_conjunto/marco_conceptual.html.
- Sharma J.R., 2010. Development of a preliminary cost estimation method for water treatment plants. MSc Thesis. The University of Texas at Arlington.
- Statyukha, G., Kvitka, O., Dzhygyrey, I., Jeżowski, J., 2008. A simple sequential approach for designing industrial wastewater treatment networks. *Journal of Cleaner Production* 16, 215-224.
- Sueviriyapan, N., Suriyaphadilok U., Siemanond K., Quaglia A., Gani R., 2016. Industrial wastewater treatment network based on recycling and rerouting strategies for retrofit design schemes. *Journal of Cleaner Production*, 111, 231-252.
- Takács I., Patry G.G., Nolasco D., 1991. A dynamic model of the clarification thickening process., *Wat. Res.*, 25, 10, 1263-1271.
- Takama, N., Kuriyama, T., Shiroko, K., Umeda, T., 1980. Optimal water allocation in a petroleum refinery. *Computers and Chemical Engineering* 4, 251-258.
- Tawarmalani, M., Sahinidis, N. V., 2005. A polyhedral branch-and-cut approach to global optimization,

- Mathematical Programming, 103, 2, 225-249.
- Ting, L., Castro, P.M., Zhimin, L., 2016. Models and relaxations for the wastewater treatment design problem. *Chemical Engineering Research and Design*, 106, 191-204.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) Office of Water Washington, DC 20460, (4305T), 2007. Biological Nutrient Removal Processes and Costs, EPA-823-R-07-002.
- UNICEF y WHO, United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO), 2019. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities. New York. Disponible en <https://washdata.org/sites/default/files/documents/reports/2019-06/jmp-2019-report-launch.pdf>.
- UNICEF y WHO, United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO), 2017. Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene: informe de actualización de 2017 y línea de base de los ODS [Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF); 2017. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Valdez, E. C., Vázquez González, A. B., 2003. Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales. Fundación ICA, A.C., México.
- Vecchietti, A., Lee, S., Grossmann, I.E., 2003. Modeling of discrete/continuous optimization problems: characterization and formulation of disjunctions and their relaxations. *Computers and Chemical Engineering* 27, 433-448.
- Vega P., Lamanna de Rocco R., Revollar S., Francisco M., 2014. Integrated design and control of chemical processes – Part II: An illustrative example, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 71, 618–635.
- Wächter A., Biegler L.T., 2006. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming, *Mathematical Programming*, 106, 1, 25-57, <http://projects.coin-or.org/Ipopt>.
- Wang, Y.P., Smith, R., 1994. Design of distributed

effluent treatment systems. *Chem. Engng Sci.*
49, 18, 3127-3145.

WCED (World Commission on Environment and
Development), 1987. The so called Brundtland
report, "Our common future". New York:
Oxford University Press, ISBN 019282080X.

Weber, W. J., (2003). *Control de la calidad del agua:
procesos fisicoquímicos*. Editorial Reverté,
España.

WWAP (World Water Assessment Programme), 2012.
The United Nations World Water Development
Report 4: Managing Water under Uncertainty
and Risk. Paris, UNESCO.
[http://www.zaragoza.es/ciudad/medioambiente/
onu/es/detallePer_Onu?id=71](http://www.zaragoza.es/ciudad/medioambiente/onu/es/detallePer_Onu?id=71).

Yang, L., Salcedo-Diaz, R., Grossmann, I.E, 2014.
*Water Network Optimization with Wastewater
Regeneration Models*