

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Los Lagos



"Análisis y Modelado de Parámetros Biocinéticos de Fangos Activos Provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Municipal de Lagos de Moreno"

Protocolo de Tesis para obtener el Título de Ingeniero Bioquímico

Presenta:

Luis David Rodríguez Centeno

Director de Tesis:

M. en C. Gabriela Camarillo Martínez

Lagos de Moreno, Jal. 21 de noviembre de 2022

Introducción

En los últimos años, el correcto uso de los recursos hidráulicos se ha convertido en tema de interés. Esto se debe principalmente a la cada vez más notable escasez de agua potable, tanto por acción del cambio climático como por el creciente uso indiscriminado de este recurso para satisfacer las crecientes necesidades de la población y al prácticamente nulo tratamiento de las aguas residuales (2, 13).

Con base a los datos presentados por el monitor de sequía (4), en los últimos años Lagos de Moreno ha enfrentado problemas de sequía moderada a severa durante la temporada seca, aunado a los crecientes problemas de sobre-explotación de los acuíferos de la cuenca pone en riesgo la sustentabilidad con base a los Objetivos de Desarrollo Sustentable 2030 (2). De acuerdo a los datos disponibles en el portal de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (3) el acuífero cuenta con una capacidad de recarga estimada de 196 Mn³/año y un volumen de extracción de aguas subterráneas de 22811730 m³ anuales; teniendo como resultado un déficit de 3211730 m³ anuales y, por consecuencia, la nula posibilidad de generar nuevas concesiones para la creación de pozos de extracción.

La Comisión Estatal del Agua (CEA) que es la institución encargada del vigilar el uso correcto del agua en el estado de Jalisco, mediante la ficha técnica hidrológica del municipio, informa que se cuentan con 3 plantas de tratamiento de aguas residuales en funcionamiento con capacidad de operación de 114.6 L/s, cubriendo un 33.8 % de saneamiento (datos pertenecientes al 2015) (1).

En México las principales normas que existen en materia de tratamiento y calidad del agua son la **NOM-003-ECOL-1997**, la cual determina los límites máximos permisibles de contaminantes presentes en los efluentes de las plantas de tratamiento que sean reusadas; y la reciente **NOM-001-SEMARNAT-2021** la cual remplace a la **NOM-001-ECOL-1996** que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales sin tratar en cuerpos receptores nacionales.

Antecedentes

Características de las aguas residuales

Podemos definir a las aguas residuales como aquellas que provienen de las actividades del hombre y de los animales, tanto como de las precipitaciones, y que son recolectadas en los sistemas de alcantarillado o vertidas directamente al ambiente (9).

Los principales ensayos para determinar la carga orgánica de un desagüe son: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) (9).

Podemos dividir las según su origen en seis clases:

Aguas residuales domésticas Las aguas residuales domésticas son flujos de agua conformados por la combinación de las excretas eliminadas por la población, que incluye heces y orina; además, contiene desechos de animales domésticos, residuos de lavandería, residuos de industrias caseras. La gente excreta de 100 a 500 g de heces por día y de 1 a 3 L de orina al día, contribuyendo con una DBO_5 DE 20 a 45 g por día (9).

Aguas residuales municipales Son aquellas provenientes tanto de los efluentes domésticos como de las pequeñas industrias y otras actividades realizadas en las áreas urbanas (comercios, oficinas, restaurantes, mercados de abasto, etc.) y que incrementan los contaminantes con algunos componentes que pueden resultar indeseables para los tratamientos convencionales (9).

Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales, es un servicio que consiste en la separación de la carga orgánica que contienen las aguas residuales, eliminando al máximo la cantidad de residuos y contaminantes, siendo algunos de los más importantes los descritos en el Cuadro 1 (5, 7), de tal forma que reúnan los requisitos de calidad que permiten las normas legales y regulaciones de cada país, con la finalidad de que los estándares de calidad ambiental (ECA) permanezcan inalterables en el tiempo, y que la preservación sustentable de los ecosistemas sea posible. Sin embargo, en los países en desarrollo esto no se cumple, por lo que solo un pequeño porcentaje de aguas residuales tienen

tratamiento y el resto son vertidas al mar, ríos, suelos, etc., originando riesgos de infecciones gastrointestinales de origen hídrico (9).

El problema de cálculo, diseño y operación, empieza a complicarse en el intento de elimi-

Cuadro 1: Principales constituyentes de interés en el tratamiento de aguas residuales

Constituyentes	Razones de interés
Sólidos suspendidos totales	Formación de depósitos de lodos y condiciones anaerobias
Compuestos orgánicos biodegradables	Agotamiento del oxígeno en fuentes naturales y desarrollo de condiciones sépticas
Constituyentes inorgánicos disueltos (p.ej. sólidos disueltos totales)	Constituyentes inorgánicos adicionados por el uso. Aplicaciones en el reciclaje y en la reutilización de aguas residuales
Metales pesados	Constituyentes metálicos adicionados por el uso. Muchos se clasifican como polulantes de prioridad
Nutrientes	Crecimiento excesivo de la vida acuática indeseable, eutroficación, concentración de nitratos en agua para consumo
Patógenos	Trasmisión de enfermedades
Polulantes orgánicos prioritarios	Sospechosos de ser carcinogénicos, mutagénicos, teratogénicos o de toxicidad aguda alta. Muchos de los polulantes prioritarios son resistentes a los métodos de tratamiento convencionales (conocidos como compuestos orgánicos refractarios)

Fuente: Crites y Tchobanoglous (2000)

nar las sustancias orgánicas putrescibles, ya disueltas, o en forma coloidal por biodegradación, presentando la mayor dificultad en la etapa de tratamiento secundario, donde se logra hacer desaparecer la contaminación de las aguas (6).

Al reactor biológico llegan las corrientes procedentes de la etapa de tratamiento primario y la de retorno de lodos, a la vez que se suministra oxígeno al sistema mediante aireación. De modo que el sustrato orgánico es biodegradado por los lodos activos, generándose nueva masa de lodos activos. El contenido del reactor biológico fluye al sedimentador secundario, también llamado clarificador final, en donde se separa una corriente superior clarificada, que pasa a tratamiento terciario. la corriente inferior del sedimentador, constituida por lodos activos concentrados, retorna Q_r en su mayor parte del reactor biológico,

y una pequeña fracción Q_w se lleva fuera de esta etapa para su tratamiento específico posterior (ver Figura 1) (8).

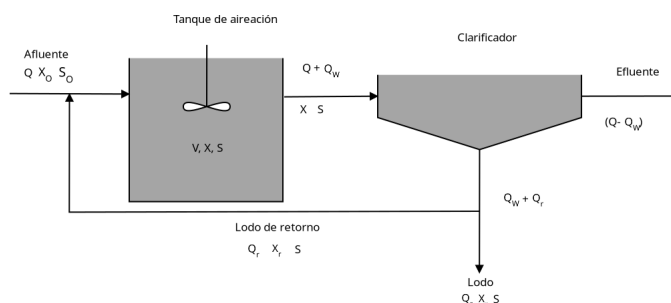


Figura 1: Tratamiento secundario de Aguas Residuales
Fuente: Elaboración propia

Lodos activados

El tratamiento con lodos activados es un proceso de tratamiento biológico que involucra cultivo en suspensión de microorganismos aeróbicos con el fin de degradar los contaminantes presentes en el afluente. El cultivo se lleva a cabo en condiciones de mezclado tanto por movimiento mecánico, utilizando propelas y difusores; como por el uso de aereadores que permitan la unión de todos los componentes del caldo de cultivo. Una serie de reacciones bioquímicas tienen lugar en los tanques de aireación, en las cuales se degradan los componentes orgánicos para generar nuevos componentes celulares (14).

La unidad ecológica de los lodos es el flóculo individual. Los flóculos de los lodos son cúmulos de varios millones de células bacterianas (principalmente cepas gram-negativas), junto con algunos otros organismos como: hongos, protozoos, rotíferos y nematodos; y materias inertes, orgánicas e inorgánicas (Figura 2). La naturaleza floculenta de los lodos activados resulta importante, en primer lugar para la absorción de las materias coloidales, iónicas y en suspensión dentro del agua residual, y en segundo lugar para la separación rápida, eficiente y económica de la masa microbiana del agua residual tratada (14).

Al airear un agua residual que contenga nutrientes orgánicos tenderá a desarrollar un lodo procedente de los microorganismos ya presentes en ella, o que han entrada de la atmósfera. El proceso de desarrollo de los lodos se puede acelerar por una siembra con

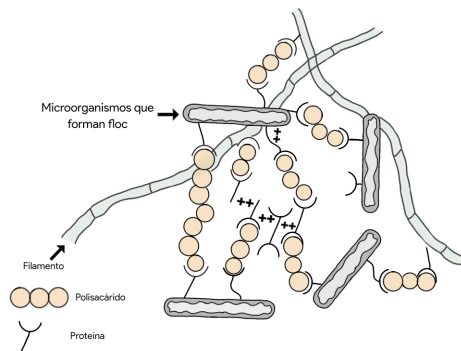


Figura 2: Modelo de formación de los flocs en lodos activados propuesto por Higgins (1997)
Fuente: Elaboración propia



Figura 3: Esquema de clasificación de los procesos de lodos activados
Fuente: Crites (2000)

una población microbiana, como lodos procedentes de otro proceso, tierras, o en el caso de un desecho industrial que contenga nutrientes fuera de lo común, un cultivo especialmente desarrollado en el laboratorio o una planta piloto (16). Con el paso de los años se han desarrollado variaciones del proceso de lodos activados. Los procesos principales de lodos activados se pueden clasificar como lo muestra la Figura 3.

La temperatura, el pH y el potencial de óxido-reducción son otros de los factores que juegan un papel importante si se busca que el proceso de lodos activos se lleve a cabo de manera efectiva. El rango óptimo de pH se encuentra entre 6.5 y 9.0; si el pH está por debajo de 6.5 los hongos podrían ser sustrato por encima de las poblaciones bacterianas. El rol que tienen las bacterias en el proceso de lodos activos se muestra de manera detallada en la Figura 4 (14, 16).

Es importante señalar que los lodos biológicos deben sedimentar adecuadamente, con la finalidad de tener una buena clarificación del agua residual tratada, por lo que es nece-

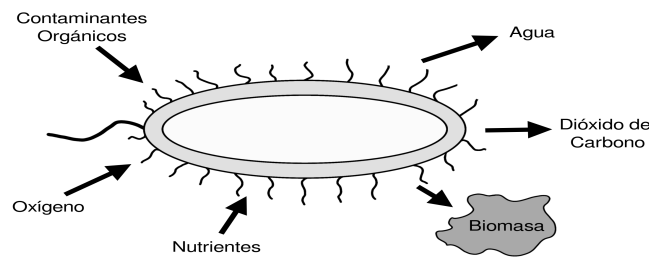


Figura 4: Proceso metabólico bacteriano durante el proceso de lodos activados
Fuente: Rathoure (2016)

sario evaluar las características de sedimentación utilizando los siguientes parámetros:

- a) Velocidad de sedimentación zonal (**VSZ**): depende de la concentración de los lodos.
- b) Índice volumétrico de lodos (**IVL**): El índice volumétrico de lodos se define como el volumen, en mL, ocupado por 1 g de sólidos suspendidos totales en la muestra, expresados como peso seco, después de sedimentar durante 30 min, en una probeta de 1 L.

Oxígeno disuelto

La cantidad de oxígeno presente en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) determina sus condiciones aerobias, microaerófilas, anóxicas y anaerobias para los procesos biológicos. Los desagües crudos, generalmente tienen bajas concentraciones de OD, mientras que los desagües sépticos son anaeróbicos; para los procesos de desnitrificación es necesario un ambiente anóxico, es decir no necesariamente anaeróbico estricto; mientras que en los tanques de aireación de lodos activados y las lagunas aireadas es necesaria la incorporación de oxígeno al sistema (9).

Demanda bioquímica de oxígeno

Se define como la cantidad de OD consumido por los microorganismos para la oxidación de la materia orgánica carbonácea (DBO carbonácea: DBO). Puede considerarse como un procedimiento en el cual los organismos vivos sirven como medio para la oxidación de la materia orgánica hasta dióxido de carbono y agua (9).

Las reacciones bioquímicas de esta actividad metabólica se resumen en reacciones de síntesis de nuevos organismos, reacciones de producción de energía, para desarrollo de su actividad y reacciones de degradación de los propios microorganismos, consumiendo estas tres reacciones oxígeno, hasta que el sustrato disponible se agota, comenzando entonces la fase de metabolismo endógeno, caracterizado por un consumo mínimo de oxígeno. la DBO mide el consumo de oxígeno en una muestra causado por las reacciones indicadas (ver Figura 5) (8).

Demanda química de oxígeno

La Demanda Química de Oxígeno, DQO, es el índice general de contaminación más usado. Para aguas blancas, alternativamente se utiliza en lugar de la demanda química de oxígeno, la oxidabilidad al permanganato. En algunas aguas residuales la oxidabilidad al permanganato suministra valores numéricos sensiblemente inferiores a la DQO (8).

Cuadro 2: Comparación de relaciones de varios parámetros utilizados para caracterizar aguas residuales

Tipo de agua residual	DBO₅/DQO	DBO₅/COT
No tratada	0.3-0.8	1.2-2.0
Después de sedimentación primaria	0.4-0.6	0.8-1.2
Efluente final	0.1-0.3	0.2-0.5

Fuente: Crites y Tchobanoglous (2000)

Desde el punto de vista operacional, una de las principales ventajas de la prueba de la DQO estriba en que se puede completar en dos horas y media (comparado con los cinco días o más empleados para la prueba de la DBO). Los valores de la relación DBO₅/DQO en aguas residuales municipales no tratadas oscilan 0.3 y 0.8. Si la relación DBO₅/DQO para las aguas residuales no tratadas es mayor que 0.5, los residuos se consideran fácilmente tratables mediante procesos biológicos. Si la relación DBO₅/DQO es menor de 0.3, el residuo puede contener constituyentes tóxicos o se pueden requerir microorganismos aclimatados para su estabilización. La relación DBO₅/DQO para aguas residuales no

tratadas varía de 1.2 a 2.0. Al usar estas relaciones, se debe recordar que ellas cambiarán significativamente de acuerdo con el tratamiento que se haya realizado a los residuos como se muestra en el Cuadro 2 (5).

Parámetros de crecimiento de lodos

Los parámetros biocinéticos manifiestan el comportamiento de los lodos activados al desarrollarse en determinada agua residual. con base a estos, se pueden obtener por ejemplo: la carga de oxígeno (kg/d) que los lodos biológicos requieren para oxidar la materia orgánica presente; los kilogramos de lodos producidos por la oxidación de la materia orgánica contaminante; las constantes de velocidad; de remoción de contaminantes; de crecimiento; igualmente, a partir de esos parámetros, podemos conocer otros datos importantes con relación a la ingeniería básica del sistema de tratamiento. como lo son: los tiempos de residencia en el biorreactor; el volumen del biorreactor; la capacidad del sistema de aireación; la recirculación de lodos al biorreactor; la carga de lodos que es preciso desechar, etc (10).

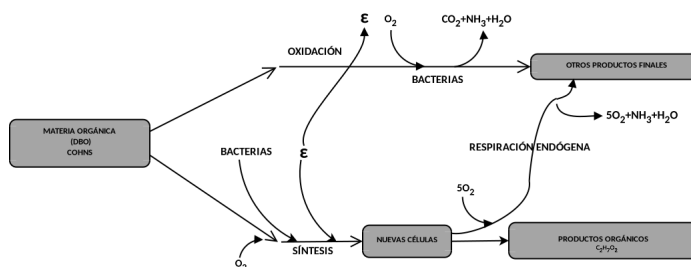


Figura 5: Estabilización de la materia orgánica (DBO) con formación de células nuevas y productos finales

Fuente: Crites (2000)

Los microorganismos degradan la materia orgánica soluble en el agua residual siguiendo una cinética específica de remoción de materia orgánica, expresada como remoción de la DBO soluble (véase Figura 5); otras veces puede expresarse como DQO soluble. Entre los modelos más comunes de cinética de remoción de DBO soluble, se encuentran el modelo de **primer orden**, el de **orden variable** o **Monod**, y el de **Grau**. Los datos experimentales que se obtengan, se utilizan para ajustar un modelo de cinética de remoción,

que puede estar entre los anteriormente señalados; de no ser así, se tendrá que probar con otros reportados en bibliografía; incluso, podría ser necesario generar un modelo propio (10).

La obtención de los parámetros biocinéticos se basa en la suposición de que el reactor está completamente mezclado y no se tienen limitaciones en la actividad de los lodos activados por oxidación o algún nutriente (nitrógeno y fósforo) (10). Por otra parte, los parámetros se definen como sigue:

- **k** = constante específica de velocidad de remoción de sustrato ($d^{-1}L/mg$). Cinética de primer orden
- **K_s** = constante de afinidad (mg/L). Cinética de orden variable o Monod
- **q_{max}** = constante de velocidad específica máxima de consumo de sustrato (h^{-1}). Cinética de orden variable o Monod
- **μ_{max}** = constante de velocidad específica de crecimiento (h^{-1})
- **Y** (rendimiento) = producción de lodo biológico / Kg de DBO removida (Kg (SSV)/Kg DBO_r)
- **a** = Kg de O₂ (en la oxidación del sustrato) / Kg de DBO removida
- **b** = Kg de O₂ (para la respiración endógena) / día Kg (SSV) en el reactor
- **kd** (constante de decaimiento o muerte) = Kg de (SSV) (oxidados por respiración endógena) / día Kg (SSV) en el reactor

Planteamiento del problema

Ateniéndonos a los datos presentes en la *Agenda del Agua 2030* (2), tan solo el 91.3 % de la población cuenta con servicio de agua potable y 89.9 % tiene cobertura de alcantarillado del cual, solo un 43.4 % recibe tratamiento. Las estimaciones esperadas rumbo a 2030 indican que se requerirá infraestructura para dar un tratamiento correcto a 7.157 miles de millones de metros cúbicos, generando una brecha de 4.3 miles de millones de metros cúbicos (2).

La finalidad de este proyecto es obtener las condiciones que mejor se adaptan al proceso con el fin de estandarizar un sistema de tratamiento eficiente y de bajo coste que pueda ser utilizado en localidades que no cuenten con un proceso de tratamiento de residuos.

Justificación

Los datos presentados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (15) muestran que menos de la mitad del agua residual generada es tratada de manera adecuada (ver Figura 6), sobre todo en la región hidrológica Lerma-Santiago donde se tiene un deficiente control de las zonas de descarga de las redes colectoras, vertiendo la mayoría en cuerpos de agua superficiales generando problemas sanitarios en poblaciones que no cuentan con plantas potabilizadoras (como es el caso de Lagos de Moreno) (2)

Por tal motivo resulta esencial el fomentar la investigación en técnicas de tratamiento de aguas residuales con vistas a reducir la carga de contaminantes de los cuerpos de agua y generar una recarga artificial de los acuíferos, reduciendo el déficit de agua al que se enfrentan actualmente la mayoría de actividades humanas.

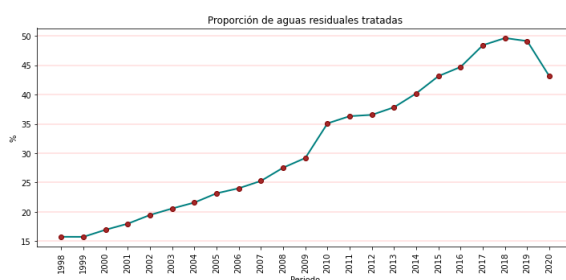


Figura 6: Proporción aguas tratadas de manera adecuada
Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)

Hipótesis

El uso de lodos activados de una PTAR en funcionamiento permite la puesta en marcha de un reactor biológico a escala de laboratorio en condiciones controladas y reduce

el tiempo de tratamiento al no ser necesario la producción de lodos desde cero.

Objetivos

Objetivo General

Establecer los parámetros cinéticos de remoción de contaminantes óptimos empleando distintas fuentes de alimentación (aguas sintéticas y aguas crudas) a escala de laboratorio utilizando lodos activados.

Objetivos particulares

- Calcular las constantes de crecimiento microbiano de manera experimental de lodos provenientes de una planta de tratamiento en función
- Comparar las diferencias que se generan empleando agua residual de constituyentes conocidos frente a un afluente real.
- Simular el proceso de remoción de contaminantes utilizando las herramientas presentes en el programa MATLAB® y las constantes que se generan en el proceso.

Metodología

La línea de trabajo que seguirá la presente investigación es la siguiente:
Se elaborarán 4 biorreactores idénticos siguiendo las medidas descritas por Martínez (1999) (11), para posteriormente realizar la determinación de los parámetros biocinéticos. Una vez terminados los reactores, se procederá a preparar el agua residual sintética utilizando como base el *sustrato sintético N°2* usado por Méndez *et. al.* (2004) (12), a su vez, el inóculo se obtendrá de la PTAR municipal de Lagos de Moreno, aclimatándolos por un periodo de 6 días para proseguir con la puesta en marcha de los reactores.

Determinación de los parámetros cinéticos

Para la obtención de los parámetros cinéticos se pondrán en marcha los 4 reactores,

cada uno con diferente caudal de entrada, tal y como lo establece Martínez (1999) (11) en el *Método Experimental 6*. El tiempo en el que los reactores se mantendrán en funcionamiento es aproximadamente de 2 a 4 semanas hasta que el sistema alcanza el equilibrio, realizando análisis de los constituyentes de acuerdo al Cuadro 3.

Cuadro 3: Programa de Muestreo

Fuente: Martínez (1999)

Tipo de análisis	Frecuencia	Afluente	Licor Mezclado	Efluente
DQO, DBO o COT (muestras compuestas; mezclada y sin mezclar)	3 veces por semana	X		X
pH	diario	X	X	X
Sólidos (SST, (SSV)), VSZ e IVL	3 veces a la semana		X	
Oxígeno disuelto	diario		X	
VUO	3 veces a la semana		X	
Observación microscópica	cada semana		X	

Modelado del proceso de lodos activados

Una vez alcanzado el equilibrio, se procederá a calcular, por el método gráfico de resolución de ecuaciones, las constantes necesarias para el modelado junto con las 4 ecuaciones de estado del sistema. El modelado se realizará usando el comando *ode45* para la solución de las ecuaciones de estado con las condiciones de operación del reactor, las condiciones iniciales de operación y el periodo de tiempo en el cual se desarrollará el experimento.

Cronograma

Referencias

- 1 Comisión Estatal del Agua Jalisco. Ficha técnica hidrológica municipal. Ficha técnica, Secretaría General del Estado de Jalisco, Guadalajara, México, 2015.
- 2 Conagua. *Agenda del Agua 2030*. SEMARNAT México, México, D. F., Marzo 2011.
- 3 Conagua. *Actualización de la Disponibilidad de agua en el acuífero Lagos de Moreno, estado de Jalisco*. Subdirección General Técnica, Ciudad de México, México, Agosto 2020. Accesado el 20/09/2022.
- 4 Conagua. *Monitor de Sequía en México (MSM)*. Sistema Meteorológico Nacional, 2022. Accesado el 20/09/2022.
- 5 Ron Crites, George Tchobanoglous. *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*, página 20. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia, 2000. pag: 25.
- 6 María Eugenia De la Peña, Jorge Ducci, Viridiana Zamora. Tratamiento de aguas residuales en México. *Nota técnica IDB-TN-521*, 12:10–20, Junio 2013.
- 7 FONATUR-Infraestructura. Tratamiento de aguas residuales. Disponible en: <https://www.gob.mx/fmt/acciones-y-programas/tratamiento-de-aguas-residuales-162692>, Junio 2018. Accesado el 16/09/2022.
- 8 Manuel Gil Rodríguez. *Depuración de aguas residuales: Modelización de procesos de lodos activos (2ª ed.)*, página 3. Ibergarceta Publicaciones S.L., Madrid, España, 2013.
- 9 César Augusto Lazcano Carreño. *Bioteología ambiental de aguas y aguas residuales (2ª Ed.)*, páginas 231 – 290. Ecoe Ediciones Ltda., Bogotá, Colombia, Julio 2017. pag. 230 – 290.
- 10 Sergio A. Martínez D., Miriam G. Rodríguez R. *Tratamiento de Aguas Residuales con MATLAB®*, Determinación de los Parámetros Biocinéticos, páginas 124 – 153. Editorial Reverté, México D. F., 2005.

- 11 Sergio A. Martínez Delgadillo. *Parámetros de Diseño de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales: Métodos Experimentales*, Determinación de los Parámetros Biocinéticos, páginas 41 – 54. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D. F., 1999.
- 12 Leonor Méndez, Victor Miyashiro, Ricardo Rojas, Mariela Cotrado,, Nancy Carrasco. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio. *Revista Del Instituto de investigación De La Facultad De Minas, Metalúrgia y Geografía*, 7(14):74 – 83, 2004.
- 13 ONU. Informe de los objetivos de desarrollo sostenible 2021. Disponible en: http://unstats.un.org/sdgs/report/2021/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2021_Spanish.pdf, Julio 2021. Accesado el 12/10/2022.
- 14 Ashok K. Rathoure, Vinod K. Dhatwalia. *Toxicity and waste management using bioremediation*, páginas 240–246. IGI Global, Hershey, Pensilvania, Enero 2016.
- 15 Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Proporción de aguas residuales tratadas de manera adecuada. Disponible en: <https://agenda2030.mx/ODSind.html?ind=ODS006000250010&cveind=193&cveCob=99&lang=es#/Indicator>, Septiembre 2022. Accesado el 12/10/2022.
- 16 Michael A. Winkler. *Tratamiento biológico de aguas de desecho*, páginas 116–118. Editorial Limusa, Ciudad de México, México, 1996.