

Tratamiento de aguas residuales de rastro: un caso de estudio en México

Slaughterhouse wastewater treatment: a case study in Mexico

Miguel Mauricio Aguilera-Flores¹, Karla Yessenia Soriano-Espinoza², Mónica Judith
Chávez-Soto³, Gabriela Teresa Guerrero-Trejo⁴, Verónica Ávila-Vázquez⁵

[Recibido: 22 de septiembre de 2025; Aceptado: 4 de diciembre de 2025; Corregido: 15 de enero de 2026; Publicado: 25 de febrero de 2025]

Resumen

[Introducción]: Los rastros son instalaciones donde se sacrifican animales para obtener carne y otros productos. Las aguas residuales generadas en estos establecimientos impactan el ambiente y la salud pública debido a su alto contenido de materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y patógenos, cuando se descargan sin tratamiento. Por lo tanto, la gestión adecuada de estas aguas residuales es crucial para garantizar la protección de la salud humana. **[Objetivo]:** Proponer un sistema de tratamiento para las aguas residuales de un rastro municipal, tomando como caso de estudio Zacualpan de Amilpas en el estado de Morelos, México. **[Metodología]:** Se caracterizó físico-química y biológicamente una muestra representativa de las aguas residuales del rastro. Con base en los resultados, se diseñó un sistema de tratamiento, se construyó un prototipo para tratar el efluente y se caracterizó el agua tratada, comparando los resultados con los límites de calidad establecidos en las normas oficiales mexicanas. **[Resultados]:** Los sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, demanda química de oxígeno, nitrógeno total y coliformes fecales excedieron los límites de calidad en un 536 %, 1 250 %, 566 %, 2 846 % y 48 0%, respectivamente; además de la presencia de *Escherichia coli*. Se propuso y construyó un prototipo con un sistema de tratamiento basado en sedimentación, coagulación-floculación, lodos activados y desinfección. Altas eficiencias de remoción (89.9 % – 99.9 %) fueron logradas para la mayoría de los parámetros fuera de norma. Solo nitrógeno total mostró una eficiencia del 67.5 %, permaneciendo fuera de los límites de calidad. **[Conclusiones]:** El sistema de tratamiento propuesto fue favorable, logrando porcentajes de remoción eficientes; sin embargo, se podría incluir un reactor anóxico en el sistema, para reducir el nitrógeno por debajo de los límites de calidad.

Palabras clave: aguas residuales de rastro; coagulación-floculación; demanda química de oxígeno; eficiencia de remoción; lodos activados.

- 1 Docente-investigador de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas en el Instituto Politécnico Nacional, Zacatecas, México; maguileraf@ipn.mx; <https://orcid.org/0000-0002-7833-0830>
- 2 Ingeniera ambiental de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas en el Instituto Politécnico Nacional, Zacatecas, México; ksoriano2000@alumno.ipn.mx; <https://orcid.org/0009-0005-3335-3835>
- 3 Docente-investigadora de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas en el Instituto Politécnico Nacional, Zacatecas, México; mjchavez@ipn.mx; <https://orcid.org/0000-0003-3420-1030>
- 4 Docente-investigadora de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas en el Instituto Politécnico Nacional, Zacatecas, México; gguerrerot@ipn.mx; <https://orcid.org/0009-0004-3188-7668>
- 5 Docente-investigadora de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas en el Instituto Politécnico Nacional, Zacatecas, México; vavila@ipn.mx; <https://orcid.org/0000-0001-9244-6699>



Abstract

[Introduction]: Slaughterhouses are facilities where animals are slaughtered for meat and other products. The wastewater generated in these establishments impacts on the environment and public health due to its high organic matter content, nutrients (nitrogen and phosphorus), and pathogens when discharged untreated. Therefore, the proper management of these wastewaters is crucial to ensure the protection of human health. **[Objective]:** To propose a treatment system for wastewater from a municipal slaughterhouse, taking Zacualpan de Amilpas in the state of Morelos, Mexico, as a case study. **[Methodology]:** A representative sample of the slaughterhouse wastewater was characterized physicochemically and biologically. Based on the results, a treatment system was designed, a prototype was built to treat the effluent, and the treated water was characterized, comparing the results with the quality limits established in official Mexican standards. **[Results]:** Total suspended solids, settleable solids, chemical oxygen demand, total nitrogen, and fecal coliforms exceeded quality limits by 536 %, 1 250 %, 566 %, 2 846 %, and 480 %, respectively. *Escherichia coli* was also present. A prototype treatment system based on sedimentation, coagulation-flocculation, activated sludge, and disinfection was proposed and built. High removal efficiencies (89.9 % – 99.9 %) were achieved for most parameters outside the standard. Only total nitrogen showed an efficiency of 67.5 %, remaining outside the quality limits. **[Conclusions]:** The proposed treatment system was favorable, achieving efficient removal percentages. However, an anoxic reactor could be included in the system to reduce nitrogen below quality limits.

Keywords: activated sludge; chemical oxygen demand; coagulation-flocculation; removal efficiency; slaughterhouse wastewater.

1. Introducción

A nivel mundial, la calidad del agua se ha degradado, de manera significativa, desde la década de los 90 y se prevé que empeore aún más, generando una amenaza para la supervivencia humana y la salud de los ecosistemas (du Plessis, 2022). En el año 2020, la Organización Mundial de la Salud [OMS] estimó que más de 1 500 millones de personas mundialmente no tienen acceso a los servicios básicos de sistemas de saneamiento, el 44 % de las aguas residuales domésticas generadas en el mundo se vierten sin ningún tratamiento y, al menos el 10 % de la población mundial, consume alimentos regados con aguas contaminadas. La falta de un sistema de saneamiento o una condición deficiente reduce el bienestar humano y el desarrollo social y económico (OMS, 2024). Por lo que, implementar acciones para mejorar y mantener la calidad del agua es urgente para evitar una crisis hídrica global en un futuro cercano (du Plessis, 2022).

La industrialización, las actividades agropecuarias, la vida urbana, los factores naturales, la insuficiencia en el suministro de agua y la falta de instalaciones de tratamiento de aguas residuales que operen de manera adecuada han provocado la degradación y contaminación del ambiente, afectando, principalmente, a los cuerpos de agua, indispensables para la vida (Lin *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2022). Una de las actividades que genera grandes volúmenes de aguas residuales es la de los rastros, ocasionando problemas ambientales y de salud pública (dos Santos Pereira *et al.*, 2024). El requerimiento de agua promedio para la producción de una tonelada de carne es de 15 500 m³ para ganado vacuno, 4 800 m³ para ganado porcino, 6 100 m³ para ganado ovino y



4 000 m³ de agua para avicultura (Philipp *et al.*, 2021). La demanda de agua se ve incrementada a medida que aumenta la de producción de carne como alimento y, en consecuencia, también se genera una mayor cantidad de aguas residuales.

Los rastros son una industria de gran amplitud, ya que la carne constituye una parte importante de la dieta de los seres humanos. La producción de carne a nivel mundial ha experimentado una tendencia creciente en los últimos años; el volumen pasó de 317 Mt en el año 2016 a 351 Mt para el año 2024, mostrando un aumento del 10 % en 8 años (Statista, 2025). La cantidad de agua residual generada, por tonelada de carne producida, varía según la especie animal y el método de producción. Sin embargo, se estima que se generan de 1.5 m³ a 18 m³ de aguas residuales vertidas por cada tonelada de carne producida (Philipp *et al.*, 2021). Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD-FAO, 2020) se espera que la producción anual de carne aumente a 366 Mt al año 2029, por lo que, tan solo este sector estaría generando entre 545 Mm³ y 6 588 Mm³ de aguas residuales.

Las aguas residuales generadas en los rastros tienen un impacto significativo en el ambiente, ya que contienen cargas orgánicas que incluyen heces, orina, sangre, grasas, alimentos no digeridos, microorganismos patógenos, productos farmacéuticos, desinfectantes, carne suelta, material en suspensión, entre otros (Ng *et al.*, 2022); por lo que la composición de las aguas residuales y su vertido final deben evaluarse rigurosamente. Algunos países, principalmente en desarrollo, desechan estas aguas residuales sin ningún tratamiento, lo que puede provocar enfermedades transmitidas por el agua, como cólera, hepatitis A, fiebre tifoidea, disentería, gastroenteritis y salmonelosis, entre otras (dos Santos Pereira *et al.*, 2024).

La presencia de microorganismos patógenos en las aguas residuales de rastro es uno de los mayores problemas en América Latina, Asia y África, ya que la prevalencia de virus, protozoos, huevos de helmintos y bacterias en el agua, tratada de forma inadecuada, se convierte en una gran amenaza para la salud pública. La población sufre graves trastornos gastrointestinales, diarrea con sangre, disfunciones hepáticas y, en algunos casos, incluso la muerte, provocados por una gestión inadecuada de este tipo de aguas residuales (Ahmad *et al.*, 2023). En consecuencia, es esencial que las aguas residuales de rastro reciban un tratamiento eficaz antes de su vertido.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales en los rastros son cruciales para proteger la salud humana y el ambiente, porque permiten remover los contaminantes presentes en el agua antes de su descarga, evitando la contaminación de los cuerpos de agua y la propagación de enfermedades. Generalmente, un sistema de tratamiento está conformado por etapas que consisten en: *pretratamiento* para la remoción de sólidos gruesos, como sangre y grasa; *tratamiento primario* para la remoción de sólidos sedimentables y material particulado o coloidal; *tratamiento secundario* para la remoción de materia orgánica mediante procesos biológicos; y *tratamiento terciario o avanzado* para la remoción de nutrientes y microorganismos patógenos a través de la desinfección (Kato y Kansha, 2024). Las aguas tratadas se descargan en cuerpos de agua o se reutilizan para fines no potables. Por consiguiente, es relevante caracterizar estos efluentes y



proponer sistemas de tratamiento eficaces para alcanzar los estándares de calidad establecidos por los organismos reguladores y reducir los riesgos de salud pública, por contaminación.

Actualmente, el problema de las aguas residuales de rastro en América Latina y otros países es abordada a partir del diseño de sistemas de tratamiento que consisten en una combinación de tratamientos primarios, secundarios, y terciarios, basados en el uso de tecnologías innovadoras y la implementación de marcos regulatorios específicos y rigurosos, aunque persisten desafíos significativos en la cobertura y la operación efectiva, permaneciendo como áreas de oportunidad en la investigación (Castellanos-Rivera *et al.*, 2023). Por lo que, afrontar esta problemática representa un desafío global crítico en temas como la escasez de agua, la salud pública y la protección del ambiente. Ofrecer algunas alternativas de solución, como un sistema de tratamiento para las aguas residuales de rastro, tienen impacto a nivel internacional, especialmente en el contexto del desarrollo sostenible de una región.

Este proyecto se relaciona con dos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. El ODS 2 Hambre Cero, tiene como una de sus metas “Para 2030, asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción, contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejoren progresivamente la calidad del suelo y la tierra”. El ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento, establece entre sus metas “De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial” (Naciones Unidas, 2025). El trabajo tuvo como objetivo proponer un sistema de tratamiento útil y asequible para las aguas residuales de un rastro municipal, tomando como caso de estudio Zacualpan de Amilpas en el estado de Morelos, México, destacando las oportunidades y limitaciones que el tren de tratamiento presenta, así como su destino más apropiado, una vez que son tratadas.

2. Metodología

La **Figura 1** muestra la ubicación del rastro de estudio en Zacualpan de Amilpas, municipio ubicado al Noreste del estado de Morelos, México; a 18°47' de latitud Norte y 98°46' de longitud Oeste, 1 640 m s. n. m.



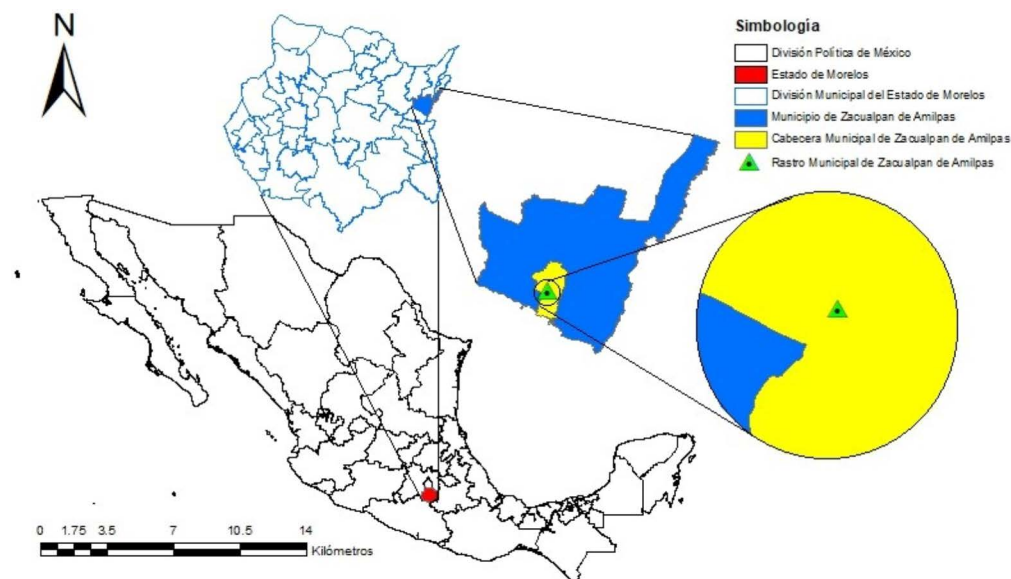


Figura 1. Ubicación del rastro municipal de Zacualpan de Amilpas, Morelos, México.

Figure 1. Location of the municipal slaughterhouse of Zacualpan de Amilpas, Morelos, Mexico.

En este establecimiento se realiza la matanza de animales (cerdos y reses) los martes, jueves y viernes de cada semana; siendo el viernes el día en que más animales ingresan. Este sitio es clasificado como una unidad de sacrificio o matadero, con base en el estándar mexicano NOM-194-SSA1-2004 (Secretaría de Salud, 2004), ya que llegan a ingresar hasta 40 animales en un día. En esta unidad, el proceso de sacrificio dura aproximadamente 40 minutos. Se consumen alrededor de 200 litros de agua por animal en sacrificio, por lo que, en su operación máxima, se llegan a utilizar hasta 8 000 litros de agua por día. El agua utilizada proviene de un pozo que es exclusivamente para uso del rastro. La unidad no cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales, razón por la que estas se descargan directamente al drenaje o alcantarillado sin ningún tratamiento previo.

Se realizaron 4 muestreos simples del agua residual de rastro durante el 2024, obteniendo 2 litros en cada toma de muestra, con un intervalo de 2 horas entre cada una, ya que el establecimiento opera 8 horas en los días de matanza. Se conformó 1 muestra compuesta homogénea de agua residual de rastro de 8 litros, la cual fue utilizada para la caracterización fisicoquímica y biológica, y el diseño del sistema de tratamiento. Este procedimiento se repitió en 2 ocasiones más para comprobar la reproducibilidad del tratamiento. Las muestras de agua residuales fueron tomadas con base en las recomendaciones del estándar mexicano NMX-AA-003-1980 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1980).

El estándar mexicano NOM-002-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1998). Derivado de que,



el rastro de Zacualpan de Amilpas, Morelos, México, descarga sus aguas residuales al sistema de drenaje y alcantarillado del municipio, los parámetros fisicoquímicos y biológicos analizados en la muestra de agua residual son los considerados en este estándar mexicano y se muestran en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos y biológicos analizados en la muestra de agua residual de rastro.
Table 1. Physicochemical and biological parameters analyzed in the slaughterhouse wastewater sample.

Parámetro fisicoquímico o biológico	Estándar mexicano (método)	Referencia
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (2000)
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016	Secretaría de Economía (2016)
Sólidos suspendidos totales (SST)	NMX-AA-034-SCFI-2015	Secretaría de Economía (2015a)
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2013	Secretaría de Economía (2013a)
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2013	Secretaría de Economía (2013b)
Materia flotante	NMX-AA-006-SCFI-2010	Secretaría de Economía (2010a)
Demanda química de oxígeno (DQO)	NMX-AA-030/2-SCFI-2011	Secretaría de Economía (2011)
Coliformes fecales y <i>Escherichia coli</i>	NMX-AA-042-SCFI-2015	Secretaría de Economía (2015b)
Arsénico, cadmio, cobre, cromo hexavalente, mercurio, níquel y plomo	NMX-AA-051-SCFI-2001	Secretaría de Economía (2001b)
Nitrógeno total	NMX-AA-026-SCFI-2010	Secretaría de Economía (2010b)
Fósforo total	NMX-AA-029-SCFI-2001	Secretaría de Economía (2001a)

En función de los parámetros fisicoquímicos y biológicos no cumplidos, respecto a los límites máximos permisibles establecidos en el estándar mexicano NOM-002-SEMARNAT-1996 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1998), se propuso un sistema de tratamiento que contempló las etapas siguientes:

- 1) *Sedimentador primario*. El agua se dejó en reposo durante 120 minutos. Los lodos se separaron por la parte inferior y el agua clarificada fue recuperada para pasar a la etapa siguiente.
- 2) *Cámara de coagulación-floculación*. Este proceso se llevó a cabo en 3 fases. La primera consistió en la adición de 15 mg/L de sulfato de aluminio como agente coagulante con una agitación de 150 rpm durante 5 minutos. La segunda fase consistió en la adición de 1 mL/L de un floculante comercial aniónico, preparado a una concentración de 1 ppm, con una agitación de 50 rpm durante 25 minutos. En la tercera fase, se dejó el agua en reposo durante 45 minutos para permitir que los flóculos sedimenten y recuperar el agua clarificada.
- 3) *Cámara de lodos activados*. El reactor biológico fue inoculado con 600 ml de una mezcla licor de lodos activados obtenidos de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipal. Se utilizó una bomba para la aireación y proveer de oxígeno al reactor, considerando una concentración de 2 mg/L. El reactor se operó durante 7 horas.



- 4) *Sedimentador secundario*. El agua del reactor biológico se dejó en reposo durante 60 minutos. Los lodos se separaron por la parte inferior, y el agua clarificada fue recuperada para pasar a la etapa siguiente.
- 5) *Cámara de desinfección*. Se utilizó una dosis de 0.1 mL/L de hipoclorito de sodio con un tiempo de contacto de 15 minutos.

Las condiciones de operación se basaron en las recomendaciones realizadas por Aima-le-Troy *et al.* (2024), Kesar y Bhatti (2022), Mouhri *et al.* (2024) y Tchobanoglous *et al.* (1998). El sistema de tratamiento operó con un influente de 5 litros de agua residual de rastro por lote, llevando a cabo 3 pruebas para determinar la reproducibilidad del tratamiento.

El agua tratada fue caracterizada fisicoquímica y biológicamente basada en los parámetros, métodos y estándares mexicanos presentados en el **Cuadro 1**. A partir de los resultados, se evaluó la efectividad en porcentaje del sistema de tratamiento, comparando las concentraciones de contaminantes iniciales (antes del tratamiento) con las finales (después del tratamiento).

3. Resultados y discusión

El **Cuadro 2** muestra los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y biológica realizada a la muestra de agua residual de rastro, además de los límites de calidad establecidos en los estándares mexicanos y su cumplimiento.

Cuadro 2. Parámetros fisicoquímicos y biológicos de la muestra de agua residual de rastro.

Table 2. Physicochemical and biological parameters in the slaughterhouse wastewater sample.

Parámetro fisicoquímico o biológico	Valor	Límite de calidad ¹	Cumple	Parámetro fisicoquímico o biológico	Valor	Límite de calidad ¹	Cumple
Temperatura (°C)	28 ±0.5	40	Sí	Arsénico (mg/L)	0.075	1	Sí
pH	6.8 ±0.3	5.5 – 10	Sí	Cadmio (mg/L)	<0.01	1	Sí
SST (mg/L)	450 ±5.0	84	No	Cobre (mg/L)	0.337	20	Sí
Sólidos sedimentables (mL/L)	125 ±5.6	10	No	Cromo hexavalente (mg/L)	0.072	1	Sí
Grasas y aceites (mg/L)	5.3 ±0.3	100	Sí	Mercurio (mg/L)	<0.01	0.02	Sí
Materia flotante	Presencia	Ausencia	No	Níquel (mg/L)	<0.01	8	Sí
DQO (mg/L)	1 189 ±54.5	210	No	Plomo (mg/L)	1.442	2	Sí
Coliformes fecales (NMP/mL)	>2,400	<500	No	Nitrógeno total (mg/L)	996 ±10.1	35	No
<i>Escherichia coli</i> (NMP/mL)	Presencia	Ausencia	No	Fósforo total (mg/L)	3.5 ±0.5	21	Sí

¹ Límites de calidad establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (1998) en México. Los parámetros en los que no se presenta la desviación estándar es porque no se considera significativa, al tener valores en el orden $\leq 10^{-3}$.



La temperatura, pH, grasas y aceites, metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo hexavalente, mercurio, níquel, y plomo), y fósforo total son los parámetros del agua residual de rastro que están por debajo de los límites de calidad establecidos para la descarga a drenaje o alcantarillado (**Cuadro 2**). Estos resultados coinciden con lo reportado por *Borja et al. (2019)*, ya que la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), la DQO, los SST, y la presencia de coliformes fecales y *Escherichia coli* son los parámetros más comunes, fuera de los límites máximos permisibles, establecidos por los estándares ambientales.

Los SST y sólidos sedimentables superaron el límite de calidad en 536 % y 1 250 %, respectivamente (**Cuadro 2**). Estos sólidos se componen de minerales, arcillas, materia orgánica, microorganismos y otros contaminantes como metales pesados; aparte de ser un parámetro que afecta la calidad del agua, es importante removerlos a niveles deseados para evitar afectaciones durante el tratamiento del agua. Por ejemplo, si no son removidos, en el tratamiento biológico del agua su presencia afecta la transferencia de oxígeno, la retención de microorganismos, la estabilidad del reactor y la calidad del efluente (*Lin et al., 2022*). Por esta razón, procesos de sedimentación, en los que el agua se deja en reposo por cierto tiempo de retención, y procesos de coagulación-floculación, en los que se utilizan agentes coagulantes o floculantes (sulfato de aluminio o hierro) para favorecer la sedimentación de partículas suspendidas y coloidales (*Mouhri et al., 2024*); son los tratamientos más adecuados para llevar estos parámetros por debajo de los límites de calidad establecidos.

La materia flotante debe estar ausente en el agua residual para ser descargada. El agua de rastro caracterizada mostró presencia de esta materia (**Cuadro 2**), la cual se compone principalmente de grasa, estiércol, sangre, trozos de carne, pelambre y microorganismos patógenos. Estos materiales pueden ser removidos por cribado fino, sistemas de flotación y procesos de sedimentación (*Abouelenien et al., 2022*).

La DQO superó el límite de calidad en 566 % (**Cuadro 2**). Este parámetro es un indicador de la cantidad de materia orgánica e inorgánica que puede ser oxidable por reactivos químicos. Por otro lado, el nitrógeno total superó el límite de calidad en 2 846 % (**Cuadro 2**). Las aguas residuales presentan alto contenido de DQO y nitrógeno debido a la presencia de proteínas, grasas, sangre y excrementos animales (*Philipp et al., 2021*). Es importante reducir la concentración de estos dos parámetros, ya que sus impactos en el ambiente involucran, principalmente, la eutrofización, la proliferación de algas, la disminución de oxígeno disuelto y la contaminación de las aguas superficiales. Los tratamientos basados en procesos biológicos como sistemas de lodos activados, filtros percoladores, cámaras anóxicas, entre otros (*Fernandes et al., 2024*); son los principales métodos utilizados para remover estos dos contaminantes del agua.

Los coliformes fecales superaron el límite de calidad en 480 % (**Cuadro 2**). Asimismo, el agua residual de rastro mostró la presencia de *Escherichia coli* (**Cuadro 2**). La presencia de estos microorganismos patógenos implica una fuerte contaminación fecal, aumentando el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua como gastroenteritis, disentería, fiebre tifoidea y cólera (*Chavarría-Márquez et al., 2023*). Se pueden utilizar procesos de desinfección (cloración o radiación UV), filtración y sedimentación para removerlos significativamente (*Mofidi et al., 2025*).



Derivado de que los SST, sólidos sedimentables, materia flotante, DQO, coliformes fecales, *Escherichia coli*, y nitrógeno total fueron los parámetros que estuvieron por encima de los parámetros de calidad, establecidos por la [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales \(1998\)](#) para la descarga de agua residual a drenaje o alcantarillado en México, se propuso un sistema de tratamiento como se esquematiza en la **Figura 2**, indicando el principal contaminante a remover en cada etapa de proceso. Fotografías del sistema de tratamiento construido y operado se muestran en el **Apéndice 1**.

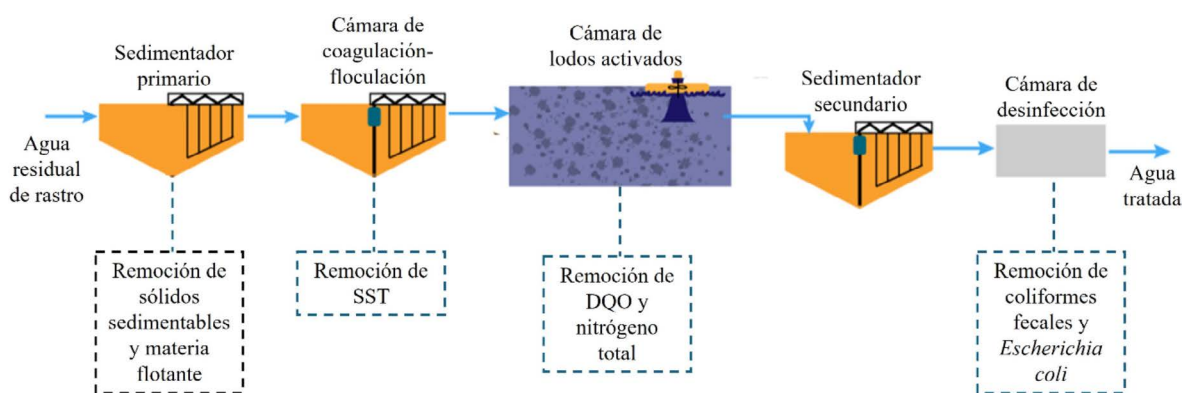


Figura 2. Etapas de proceso del sistema de tratamiento para las aguas residuales de rastro.

Figure 2. Process stages of the treatment system for slaughterhouse wastewater.

El prototipo diseñado y construido del sistema de tratamiento fue operado en lote utilizando como influente 5 litros de agua residual de rastro en cada prueba. Como se observa en la **Figura 2**, la primera etapa consistió en un sedimentador primario en el que el agua residual se dejó en reposo por un tiempo de retención de 120 minutos. De acuerdo con [Tchobanoglous et al. \(1998\)](#) con este tiempo de retención se podría alcanzar una remoción del 35 % de SST y 55 % de DQO. Aunque estos parámetros no fueron monitoreados en esta etapa del proceso sino al término del tratamiento, hubo una remoción importante de sólidos sedimentables ya que el agua residual de rastro contaba con una concentración de 125 mg/L, por lo que al menos se recuperaron 625 mg.

Posterior al proceso de sedimentación, el agua de rastro en tratamiento aún contaba con un color rojizo-violeta (**Apéndice 1**), con presencia visible de material particulado coloidal y suspendido, por lo que fue sometida, en una segunda etapa, al proceso de coagulación-floculación (**Figura 2**), llevado a cabo en tres fases. [Zamani et al. \(2019\)](#) utilizaron el tratamiento de coagulación-floculación para tratar aguas residuales de rastro expuestas, previamente, a un reactor anaerobio, encontraron que una dosis de 10 mg/L de sulfato de aluminio permitió reducir el 71 % de SST y 41 % de DQO. Este trabajo utilizó una dosis de 15 mg/L, siendo suficiente para remover la mayor cantidad de SST. Sin embargo, este proceso no es diseñado para remover DQO o nutrientes (como nitrógeno) de forma significativa ([Mouhri et al., 2024](#)), por lo que el agua requirió de un tratamiento basado en procesos biológicos.



La tercera etapa consistió en una cámara de lodos activados (**Figura 2**). Después de 7 horas de tratamiento con aireación, se visualizó una clarificación del agua de rastro, perdiendo el color rojizo-violeta (**Apéndice 1**). Un sistema de lodos activados se caracteriza por tener eficiencias de remoción de DQO superiores al 80 % (Fernandes *et al.*, 2024), por lo que este parámetro del agua de rastro se reduciría significativamente. No obstante, este sistema no está diseñado, propiamente, para una alta remoción de nutrientes como el nitrógeno total, menos si este parámetro se encuentra en altos niveles de concentración (Fernandes *et al.*, 2024), por lo que, si bien, la cámara de lodos activados permitiría también la remoción de nitrógeno, posiblemente se llegaría a niveles de concentración de nitrógeno total inferiores, pero, aún fuera de los límites de calidad. Este trabajo propuso el sistema de lodos activados por su practicidad y simplicidad, esperando resultados eficientes en la remoción de DQO y nitrógeno.

La cuarta etapa consistió en un sedimentador secundario, para permitir que los lodos utilizados o producidos en el tratamiento biológico se separaran por sedimentación (**Figura 2** y **Apéndice 1**). Finalmente, el agua clarificada se sometió a la quinta y última etapa, que consistió en una desinfección efectiva con hipoclorito de sodio (**Figura 2**). Se ha reportado que una dosis de 0.1 mL/L resulta válida para lograr una eficiencia de desinfección del 99.9 % (Kesar y Bhatti, 2022), por lo que, después de esta etapa, se esperó que ya no hubiera presencia de coliformes fecales y *Escherichia coli*.

El **Cuadro 3** muestra las eficiencias o porcentajes de remoción de los contaminantes presentes en el agua residual de rastro, una vez que fue sometida al sistema de tratamiento mostrado en la **Figura 2**. Asimismo, se presentan los límites de calidad establecidos en los estándares mexicanos y su cumplimiento.

Cuadro 3. Parámetros fisicoquímicos y biológicos de la muestra tratada de agua residual de rastro.
Table 3. Physicochemical and biological parameters in the treated slaughterhouse wastewater sample.

Parámetro fisicoquímico o biológico	Valor en el agua residual (influyente)	Valor en el agua tratada (efluente)	Eficiencia o porcentaje de remoción (%)	Límite de calidad ¹	Cumple
SST (mg/L)	450 ±5.0	1 ±3.5	99.8	40	Sí
Sólidos sedimentables (mL/L)	125 ±5.6	<0.01	99.9	10	Sí
Materia flotante	Presencia	Ausencia	99.9	Ausencia	Sí
DQO (mg/L)	1,189 ±54.5	119.8 ±26.2	89.9	210	Sí
Coliformes fecales (NMP/mL)	>2,400	0	99.9	<500	Sí
<i>Escherichia coli</i> (NMP/mL)	Presencia	Ausencia	99.9	Ausencia	Sí
Nitrógeno total (mg/L)	996 ±10.1	324 ±6.7	67.5	35	No

¹ Límites de calidad establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (1998) en México.



Eficiencias de remoción del 99.9 % fueron logradas para los parámetros de SST, sólidos sedimentables, materia flotante, coliformes fecales y *Escherichia coli* (**Cuadro 3**), siendo el sistema de tratamiento propuesto, eficiente para reducir estos contaminantes del agua de rastro a niveles inferiores a los límites de calidad establecidos por la *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (1998) en México (**Cuadro 3**).

Una eficiencia de remoción del 89.9 % fue lograda para la DQO (**Cuadro 3**). Esta eficiencia coincide con lo reportado por *Zamani et al.* (2019) y *Fernandes et al.* (2024). Aunque, una eficiencia de remoción del 99.9 % no fue lograda para este parámetro, como en los otros expuestos, el valor obtenido (89.9 %) fue suficiente para que la DQO en el agua tratada quede en niveles inferiores a los límites de calidad establecidos por la *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (1998) en México (**Cuadro 3**).

El nitrógeno total fue el único parámetro que no resultó, en el agua tratada, en una concentración inferior a los límites de calidad establecidos por la *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (1998) en México (**Cuadro 3**). A pesar de que, después de someter el agua de rastro al sistema de tratamiento solo se logró una remoción del 67.5 %, superando aún en un 926 % el límite de calidad (*Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 1998). Este resultado pudo deberse a que la remoción de nitrógeno total en aguas es un desafío complejo en el que suelen utilizarse reactores anóxicos (sistemas con limitación de oxígeno). Estos reactores crean condiciones limitadas de oxígeno para que bacterias desnitrificantes puedan convertir los nitratos y nitritos en nitrógeno gaseoso (*Fernandes et al.*, 2024; *Tchobanoglous et al.*, 1998). La cámara de lodos activados, propuesta en este trabajo, no permitió una remoción eficiente del nitrógeno. Por este motivo, se sugiere acoplar una cámara anóxica como una etapa de proceso posterior a la cámara de lodos activados, así la aireación del sistema de lodos activados permitirá la nitrificación y, en seguida, la cámara anóxica promoverá una desnitrificación efectiva.

Un análisis de costos fue realizado a partir de los insumos y condiciones llevadas a cabo en este trabajo, con el propósito de estimar el costo de tratamiento del agua residual de rastro. Los resultados se muestran en el **Cuadro 4**.

El costo total del sistema de tratamiento fue de MXN 1 986.13 (**Cuadro 4**), lo que significa que el litro de agua tratada costó MXN 397.22 aproximadamente. Los costos del tratamiento de aguas residuales de rastro varían entre 2 y 7 centavos, en pesos mexicanos (MXN 0.02 a MXN 0.07) por litro de agua a tratar, dependiendo de la tecnología de tratamiento utilizada y su eficiencia (*Akhtar et al.*, 2024). Por lo tanto, llevar a cabo, la propuesta de este sistema, a una escala mayor reduciría los costos de tratamiento calculados en este trabajo, y sería un sistema asequible para tratar las aguas residuales de rastro, previo a su descarga.



Cuadro 4. Estimación de costos en el tratamiento de aguas residuales de rastro.

Table 4. Cost estimation for slaughterhouse wastewater treatment.

Etapas de proceso	Gasto en insumos: materiales y/o reactivos (MXN)	Gasto en energía (MXN)	Costo total (MXN)
Sedimentación primaria	263.00 ¹	0	263.00
Coagulación-floculación	801.06 ²	0.01 ³	801.07
Cámara de lodos activados	554.00 ⁴	0.17 ⁵	554.17
Sedimentación secundaria	113.00 ⁶	0	113.00
Cámara de desinfección	99.01 ⁷	0	99.01
Tubería, válvulas, y conexiones	155.88	0	155.88
Costo total (MXN)			1 986.13

¹ Considera el bidón utilizado como cárcamo y el recipiente de plástico transparente empleado como sedimentador.

² Considera el recipiente, la dosis de sulfato de aluminio, y el agitador mecánico.

³ Considera la potencia del agitador 8 W, utilizado por un tiempo de 0.5 h, y el costo de la energía de MXN 3.07/kWh

⁴ Considera el costo del recipiente utilizado y 4 bombas.

⁵ Considera 4 bombas utilizadas con potencia de 2 W, utilizadas por un tiempo de 7 h, y el costo de la energía de MXN 3.07/kWh

⁶ Considera el costo del recipiente de plástico transparente.

⁷ Considera el costo del dosificador y el desinfectante utilizado.

4. Conclusiones

Las aguas residuales del rastro de Zacualpan de Amilpas, Morelos, México, mostraron concentraciones excedentes a los límites de calidad del agua en 536 %, 1 250 %, 566 %, 2 846 %, y 480 % para SST, sólidos sedimentables, DQO, nitrógeno total, y coliformes fecales, respectivamente. Asimismo, se tuvo presencia de materia flotante y *Escherichia coli*; contaminantes característicos de los establecimientos dedicados a la matanza y faenado animal. Por esta razón, se diseñó un sistema de tratamiento basado en las etapas de proceso de sedimentación, coagulación-floculación, lodos activados, y desinfección con hipoclorito de sodio para tratar estos efluentes.

El sistema de tratamiento permitió el 99.9 % de remoción de contaminantes asociados a SST, sólidos sedimentables, materia flotante, coliformes fecales, y *Escherichia coli*, y del 89.9 % para DQO. No obstante, el nitrógeno total fue removido solamente en un 67.5 %, permaneciendo todavía fuera de los límites de calidad.

A pesar de que el sistema de tratamiento propuesto fue favorable para lograr porcentajes de remoción eficientes, para casi todos los parámetros de calidad del agua, se recomienda incluir un reactor anóxico que opere en conjunto con el sistema de lodos activados, para reducir la concentración de nitrógeno por debajo de los límites de calidad.

Este estudio evidencia que las aguas residuales de rastro deben ser tratadas antes de su descarga, por la gran cantidad de contaminantes como materia orgánica, nutrientes, sólidos suspendidos y patógenos que podrían poner en riesgo la salud pública y la protección del ambiente. Además, propone un sistema de tratamiento simple y asequible para tratar estos efluentes antes



de su descarga a los sistemas de drenaje y alcantarillado o su liberación al ambiente; condiciones que competen a varios países del mundo y a los retos y demandas enmarcadas en los ODS de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, por lo que se le debe dar especial atención a esta problemática global.

El sistema de tratamiento de las aguas residuales de rastro propuesto, para este caso de estudio, puede implementarse en otros países de Latinoamérica, dado que las aguas residuales de esta industria tienen características similares en toda la región. No obstante, tanto la factibilidad técnica y económica, como el éxito de la implementación del sistema de tratamiento dependerán de varios factores locales, como la tecnología específica utilizada, las condiciones socioeconómicas, la normativa ambiental aplicable y el recurso económico disponible. Por lo tanto, todo país deberá hacer frente a cada uno de estos factores para poder tratar, de manera efectiva, los efluentes de rastro, favoreciendo la protección ambiental, la salud pública y la economía.

Finalmente, el conocimiento generado por este estudio deja en evidencia los impactos ambientales y de salud pública que pueden generarse si no se tiene una prevención y control de los efluentes de rastro. Asimismo, brinda alternativas para mitigar estos impactos al proponer un sistema de tratamiento que contribuya significativamente a la solución de problemas ambientales en México, América Latina, y otros países, al atenuar la contaminación del agua y del suelo, proteger los ecosistemas y la salud humana, y promover el desarrollo sostenible en la región.

5. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están en total acuerdo con la versión final editada del artículo.

6. Agradecimientos

Las personas autoras quieren brindar un especial agradecimiento a la Dirección de Desarrollo Agropecuario del H. Ayuntamiento Zacualpan de Amilpas, Morelos, México, por otorgar las facilidades para la toma de muestra de agua residual en el rastro de estudio.



7. Referencias

- Abouelenien, F., Trabik, Y. A., Shukry, M., El-Sharnouby, M., Sayed, S., Gaber, A. y Elsaidy, N. R. (2022). A pilot model for the treatment of slaughterhouse wastewater using zeolite or psidium-leaf powder as a natural coagulant, followed by filtration with rice straw, in comparison with an inorganic coagulant. *Processes*, 10(5), 887. <https://doi.org/10.3390/pr10050887>
- Ahmad, N. F., Pathak, N. V. y Singh, N.A. (2023). Effect of slaughterhouse waste on sewage channel. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 19(3), 1227-1236. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.3.1968>
- Aimale-Troy, A., Guwy, A. y Massanet-Nicolau, J. (2024). Effect of dissolved oxygen concentration on activated sludge bacterial community and oxygen uptake rate in a SBR using co-produced oxygen from a PEM hydrogen electrolyser. *Journal Of Water Process Engineering*, 59, 105045. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105045>
- Akhtar, N. A., Kyzy, K. K., Kobya, M. y Gengec, E. (2024). Operating cost and treatment analysis of cattle slaughterhouse wastewater by coagulation-flocculation and electrooxidation processes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27, 3999-4014. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-03084-7>
- Borja, D., Salazar-Llangarí, K. y Brito-Moina, H. (2019). Cuantificación de efluentes de aguas residuales del Camal Frigorífico Riobamba. *Ciencia Digital*, 3(2), 783-794. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.497>
- Castellanos-Rivera, J., Sandoval-Herazo, L. C. y Nani González, G. E. (2023). Gestión de aguas residuales de rastros municipales en México: cantidades producidas, legislación existente, procesos de tratamiento aplicados y desafíos futuros. *Tendencias en energías Renovables y Sustentabilidad*, 2(1), 446-457. <https://doi.org/10.56845/terys.v2i1.386>
- Chavarría-Márquez, E. Y., Huamaní-Astocaza, L. L., Basurto-Contreras, C. M., Gutiérrez-Coillao, J. E. y Cusiche-Huamaní, M. L. (2023). Determinación clásica de coliformes fecales en agua entubada en el distrito de Ahuaycha, Perú. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 7(21), 560-566. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i21.236>
- dos Santos Pereira, A. K., Cardoso Teixeira, K., Henrique Pereira, D. y Soares Cavallini, G. (2024). A critical review on slaughterhouse wastewater: Treatment methods and reuse possibilities. *Journal of Water Process Engineering*, 58(3), 104819. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104819>
- du Plessis, A. (2022). Persistent degradation: Global water quality challenges and required actions. *One Earth*, 5(2), 129-131. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.005>



- Fernandes, J., Ramísio, P. J. y Puga, H. (2024). A comprehensive review on various phases of wastewater technologies: Trends and future perspectives. *Eng*, 5(4), 2633-2661. <https://doi.org/10.3390/eng5040138>
- Kato, S. y Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 51064-51097. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>
- Kesar, S. y Bhatti, M. S. (2022). Chlorination of secondary treated wastewater with sodium hypochlorite (NaOCl): An effective single alternate to other disinfectants. *Heliyon*, 8, (11), e11162. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11162>
- Lin, L., Yang, H., y Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 880246. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
- Mofidi, A. A., Linden, K. G., Bedell, E., Vetrovs, A., Friedman, M., Won, D., Deem, S., Rice, N., Jahne, M., Nicholas, T. y Anderson, A. (2025). Development of a disinfection efficiency database for bacterial inactivation: A systematic literature review for selected water treatment technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 55(18), 1413-1429. <https://doi.org/10.1080/10643389.2025.2538881>
- Mouhri, G. E., Elmansouri, I., Amakdouf, H., Belhassan, H., Kachkoul, R., Oumari, F. E. E., Merzouki, M. y Lahrichi, A. (2024). Evaluating the effectiveness of coagulation–flocculation treatment on a wastewater from the moroccan leather tanning industry: An ecological approach. *Heliyon*, 10(5), e27056. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27056>
- Naciones Unidas. (2025). Objetivos de Desarrollo Sostenible: 17 objetivos para transformar nuestro mundo. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Ng, M., Dalhatou, S., Wilson, J., Kamdem, B. P., Temitope, M. B., Paumo, H. K., Djelal, H., Assadi, A. A., Nguyen-Tri, P. y Kane, A. (2022). Characterization of Slaughterhouse Wastewater and Development of Treatment Techniques: A Review. *Processes*, 10(7), 1300. <https://doi.org/10.3390/pr10071300>
- Organization for Economic Cooperation and Development y Food and Agriculture Organization of the United Nations [OECD-FAO]. (2020). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029 Report*. Publications of the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2020-2029_1112c23b-en
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2024). Saneamiento. Notas Descriptivas. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation#:~:text=En%202020%2C%20el%2044%25%20de,alimentos%20regados%20con%20aguas%20residuales>



- Philipp, M., Masmoudi Jabri, K., Wellmann, J., Akrou, H., Bousselmi, L. y Geißen, S.-U. (2021). Slaughterhouse Wastewater Treatment: A Review on Recycling and Reuse Possibilities. *Water*, 13(22), 3175. <https://doi.org/10.3390/w13223175>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1980). *Norma Mexicana NMX-AA-003-1980. Aguas residuales – Muestreo*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166762/NMX-AA-003-1980.pdf>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2000). *Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-007-SCFI-2000.pdf>
- Secretaría de Economía. (2001a). *Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166773/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Economía. (2001b). *Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166785/NMX-AA-051-SCFI-2001.pdf>
- Secretaría de Economía. (2010a). *Norma Mexicana NMX-AA-006-SCFI-2010. Análisis de agua – Determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166765/NMX-AA-006-SCFI-2010.pdf>
- Secretaría de Economía. (2010b). *Norma Mexicana NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de agua – Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf>
- Secretaría de Economía. (2011). *Norma Mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis de agua – Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba – Parte 2 – Determinación del índice de la demanda química de oxígeno – Método de tubo sellado a pequeña escala*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>
- Secretaría de Economía. (2013a). *Norma Mexicana NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de agua – Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166763/NMX-AA-004-SCFI-2013.pdf>



- Secretaría de Economía. (2013b). *Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2013. Análisis de agua – Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166764/nmx-aa-005-scfi-2013.pdf>
- Secretaría de Economía. (2015a). *Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua – Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- Secretaría de Economía. (2015b). *Norma Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua – Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli – Método del número más probable en tubos múltiples*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>
- Secretaría de Economía. (2016). *Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua – Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1998). *Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*. Diario Oficial de la Federación, México. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2004). *Norma Oficial Mexicana NOM-194-SSA1-2004, Productos y servicios. Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos*. Diario Oficial de la Federación, México. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661587&fecha=18/09/2004#gsc.tab=0
- Statista. (2025). *Producción de carne a nivel mundial de 2016 a 2024. Estadísticas – Agricultura y Ganadería – Ganadería*. <https://es.statista.com/estadisticas/1329494/produccion-mundial-de-carne/#statisticContainer>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Trillo Montsoriu, J. de D. y Cajigas, Á. (1998). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill.
- Xu, X., Yang, H. y Li, C. (2022). Theoretical Model and Actual Characteristics of Air Pollution Affecting Health Cost: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3532. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063532>



Zamani, H., Golestani, H.A., Mousavi, S.M., Zhiani, R. y Hosseini, M.S. (2019). Slaughterhouse wastewater treatment using biological anaerobic and coagulation-flocculation hybrid process. *Desalination and Water Treatment*, 155, 64-71. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23914>

8. Apéndices

Apéndice 1. Fotografías del prototipo del sistema de tratamiento construido y operado para las aguas residuales de rastro.

Appendix 1. Photographs of the prototype treatment system built and operated for slaughterhouse wastewater.



Sistema de tratamiento
Treatment system



Muestra de agua residual de rastro antes del tratamiento
Sample of wastewater from the trail before treatment

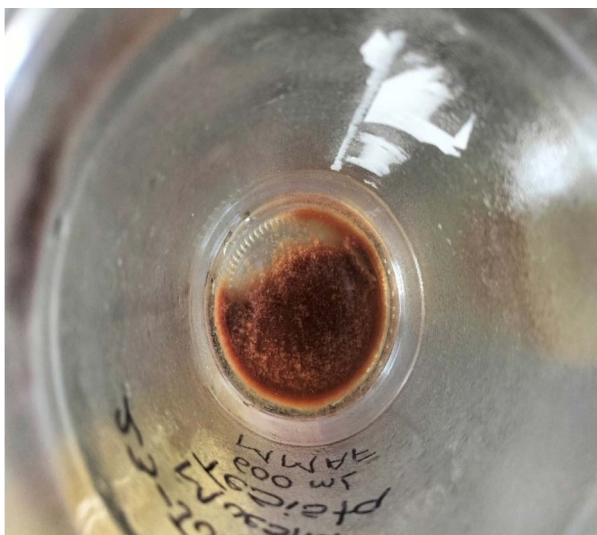




Muestra a la salida del proceso de coagulación-floculación
Sample at the outlet of the coagulation-flocculation process



Sistema de lodos activados (vista aérea)
Activated sludge system (aerial view)



Lodos sedimentados después del proceso biológico
Sludge settled after the biological process



Agua tratada
Treated water

