

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Comparación de Metales Pesados En Tres Plantas Tratadoras de la Comarca
Lagunera

Por:

ANDREA RODRÍGUEZ LÓPEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE SUELOS

Comparación de Metales Pesados En Tres Plantas Tratadoras de la Comarca
Lagunera

Por:

ANDREA RODRÍGUEZ LÓPEZ

TESIS

Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobada por:


DR. MARIO GARCÍA CARRILLO
Presidente


DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO
Vocal


DR. ALFREDO OGAZ
Coasesor


DR. EDUARDO ARON FLORES HERNÁNDEZ
Vocal Suplente
Universidad Autónoma Agraria
ANTONIO NARRO


DR. J. ISABEL MARQUEZ MENDOZA
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
DICIEMBRE 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE SUELOS

**Comparación de Metales Pesados En Tres Plantas Tratadoras de la Comarca
Lagunera**

Por:


ANDREA RODRÍGUEZ LÓPEZ


TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobada por el Comité de Asesoría:


DR. MARIO GARCÍA CARRILLO
Asesor Principal


DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO
Coasesor


DR. ALFREDO OGAZ
Coasesor


DR. EDUARDO ARON FLORES HERNÁNDEZ
Coasesor


DR. J. ISABEL MARQUEZ MENDOZA
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
DICIEMBRE 2022

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera.

Al Dr. José Luis Reyes Carrillo, porque ha sido un pilar fundamental a lo largo de mi Ingeniería, siempre me ha alentado a dar más de lo que a veces creo no poder. Gracias por los regaños, las observaciones, las felicitaciones y sobre todo por la confianza. Gracias por brindarme su tiempo, pero sobre todo por enseñarme su entrega, dedicación, compromiso y amor por la profesión, eso me ha enriquecido enormemente como persona y profesionista pero sobre todo por su apoyo, ayuda y tiempo en la revisión del mismo.

Al Dr. Mario García Carrillo por todo el apoyo que siempre tuve de su parte y por las enseñanzas y la orientación brindadas que me permitieron enriquecer mi trabajo. Por el tiempo tan valioso que dedicó a cada una de las observaciones de este trabajo y las facilidades brindadas para capacitarme en algunas etapas de la experimentación.

Al Dr. Alfredo Ogaz, Dr. Aron Flores, por sus enseñanzas para mejorar la redacción del presente trabajo de tesis.

A los laboratoristas Norma Lydia Rangel y Juan Carlos Mejía, por su amistad, confianza, consejos y su apoyo en la realización de mis resultados de este proyecto.

A todos los docentes que han sido parte de mi camino universitario, y a todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Sin ustedes los conceptos serían sólo palabras, y las palabras ya sabemos quién se las lleva, el viento.

DEDICATORIA

A DIOS:

En primer lugar por darme la oportunidad de vivir en este mundo y ser mi guía durante el trayecto de mi carrera y a lo largo de mi vida.

A MIS PADRES:

Eduardo Rodríguez Morales

Ana Laura López Cosío

Les dedico este trabajo con todo mi cariño a quienes debo todo lo que soy, primero por darme la vida y después por formarme como una persona de bien, como una forma de recordarles cuanto los amo y respeto. Realmente no tengo formas, ni palabras para agradecer todo lo que me han dado: por su lucha incansable, por su guía y ejemplo, por su cariño, lealtad, y confianza y por todo lo que han hecho por mí, espero jamás defraudarlos. GRACIAS!

PAPÁ.- Gracias por buscar siempre la manera de que yo estuviera bien tanto emocional como económicamente, sin tu presencia, sin tus anhelos, sin tus ilusiones que eran semejantes a las mías, este sueño hubiera sido muy difícil de alcanzar, te amo papá.

MAMÁ.- Por haber confiado incondicionalmente en este proyecto de mi vida que es mi carrera que estoy a punto de culminar, gracias a ti mami por dedicarme tantos desvelos y preocupaciones, te dedico este trabajo de tesis que es una forma de decirte ya culmine mi proyecto en el cual siempre estuviste apoyando y alentando para seguir siempre adelante con esto, te amo mamá.

A mi hermana:

Tania Rodríguez López porque siempre estuviste conmigo, escuchándome, ayudándome y brindándome, gracias por todos los momentos que haces que mi vida sea feliz, te amo hermana.

RESUMEN

El deterioro de la calidad del agua superficial en México se atribuye a las actividades antropogénicas, principalmente a la descarga de agua de origen urbanoindustrial y a las actividades agrícolas. La importancia de la calidad del agua se debe a que se destina 76.3% para uso agrícola, de las cuales el 61.1% proviene de fuentes superficiales. En este trabajo se caracterizan y evalúan las aguas residuales de tres plantas tratadoras ubicadas en: Planta Tratadora 1. CERESO, Planta Tratadora 2. CAMPESTRE, y Planta Tratadora 3. SIDEAPA.

Esta investigación tiene como **Objetivo** principal evaluar mediante un estudio fisicoquímico la calidad del agua y analizar la concentración de metales pesados Cadmio (Cd), Cobre (Cu) y Plomo (Pb) en las tres Plantas Residuales.

Se determinó la variación de la calidad del agua por el Manual de Procedimientos Analíticos para Análisis de Suelos y Plantas del Laboratorio de Fertilidad de suelos, en base a los parámetros del agua: conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, carbonatos, y cloruros.

Ninguno de los metales pesados, sobrepasa el límite máximo permisible en ninguna de las tres plantas de tratamiento. Por otro lado, la 2ª Cruda Planta Campestre fue, el primer lugar en tener mayor concentración de metales.

De acuerdo con los resultados obtenidos, bajo las condiciones en que se llevó a cabo la presente investigación, se concluye que la concentración de metales pesados es baja y cumple con los valores establecidos en la NOM-002-SEMARNAT-1996, es decir no sobrepasa los límites máximos permisibles de ningún metal.

Palabras clave: Metales pesados, Calidad del agua, Aguas residuales, Antropogénicas, Agrícolas

ABSTRACT

The deterioration of surface water quality in Mexico is attributed to anthropogenic activities, mainly urban-industrial discharges and agricultural activities. The importance of water quality is due to the fact that 76.3% of the water is used for agriculture, of which 61.1% comes from surface sources. This work characterizes and evaluates the wastewater of three treatment plants located in: Treatment Plant 1. CERESO, Treatment Plant 2. CAMPESTRE, and Treatment Plant 3. SIDEAPA. The main **objective** of this research is to evaluate the water quality by means of a physicochemical study and analyze the concentration of heavy metals Cadmium (Cd), Copper (Cu) and Lead (Pb) in the three Waste Plants.

The variation of water quality was determined by the Manual of Analytical Procedures for Analysis of Soils and Plants of the Soil Fertility Laboratory, based on water parameters: electrical conductivity, calcium, magnesium, sodium, carbonates, and chlorides.

None of the heavy metals exceed the maximum permissible limit at any of the three treatment plants. On the other hand, the 2= Crude Country Plant was the first place to have the highest concentration of metals.

On the basis of the results obtained, under the conditions under which this investigation was carried out, it is concluded that the concentration of heavy metals is low and complies with the values set out in NOM-002-SEMARNAT-1996, i.e. does not exceed the maximum permissible limits of any metal.

Keywords: heavy metals, water quality, wastewater

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
I. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA	7
2.2 LA PROBLEMÁTICA DE LA ESCASEZ DE AGUA	7
2.3 NORMATIVIDAD	8
NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES	8
2.4 ANÁLISIS DE LAS AGUAS	10
2.5 AGUAS RESIDUALES	11
2.5.1 ¿CÓMO SE CLASIFICAN LAS AGUAS RESIDUALES?	11
2.6 METALES PESADOS EN EL AGUA RESIDUAL	12
2.7 COBRE	14
2.8 CADMIO.....	15
2.9 PLOMO	17
3. AGUAS RESIDUALES DE USO DOMÉSTICO	19
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES E INDUSTRIALES	20
3.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	20
3.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (INORGÁNICOS)	22
3.1.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (ORGÁNICOS)	23
3.1.4 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	24
4. CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES (POR EL GRADO DE TRATAMIENTO)	24
4.1 TRATAMIENTOS PRELIMINARES.....	25

4.1.1 CRIBADO	25
4.1.2 DESARENADORES	25
4.1.3 HOMOGENIZACIÓN	25
4.2 TRATAMIENTOS PRIMARIOS	25
4.2.1 SEDIMENTACIÓN PRIMARIA.....	26
4.2.2 FLOTACIÓN.....	26
4.3 TRATAMIENTOS SECUNDARIOS	26
4.3.1 LODOS ACTIVADOS	27
4.3.2 SISTEMA DE BIOMASA ADHERIDA	27
4.4 TRATAMIENTO TERCIARIO	28
4.4.1 MICROFILTRACIÓN Y ULTRAFILTRACIÓN.....	28
4.4.2 INTERCAMBIO IÓNICO.....	29
4.4.3 DESINFECCIÓN	29
4.4.4 MEDIANTE SISTEMA DE CLORACIÓN.....	29
4.4.5 ÓSMOSIS INVERSA	30
4.4.6 MEDIANTE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (LUZ ULTRAVIOLETA)	30
4.4.7 OZONIZACIÓN.....	30
4.5 REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA.....	31
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
3.1 Análisis estadístico de los datos	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
V. CONCLUSIONES.....	47
VI. REFERENCIAS	48

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Límites Máximos Permisibles	10
Cuadro 2 Parámetros analizados y métodos empleados	34
Cuadro 3 Resultados correspondientes a los parámetros de contaminación ambiental en la caracterización físico-química.....	36
Cuadro 4 Promedio de las concentraciones Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd).....	39
Cuadro 5 Concentración del Cobre (Cu) de las Plantas tratadoras en sus cuatro repeticiones.....	39
Cuadro 6 Concentración del Plomo (Pb) de las Plantas tratadoras en sus cuatro repeticiones.....	40
Cuadro 7 Concentración del Cadmio (Cd) de las Plantas tratadoras en sus cuatro repeticiones	40
Cuadro 8 Análisis de varianza Cobre (Cu).....	41
Cuadro 9 Análisis de varianza Plomo (Pb).....	41
Cuadro 10 Análisis de varianza Cadmio (Cd)	42
Cuadro 11 Resultados del Cobre (Cu) de Pruebas de medias α al 0.05 nivel de significancia	42
Cuadro 12 Resultados del Plomo (Pb) de Pruebas de medias α al 0.05 nivel de significancia	43
Cuadro 13 Resultados del Cadmio (Cd) de Pruebas de medias α al 0.05 nivel de significancia	43

I. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más abundantes y valiosos para la humanidad, pero su disponibilidad para el consumo humano es mínima. “Los eventos climáticos extremos ocasionan grandes retos para la sostenibilidad social, económica y medioambiental (Camacho-Ballesteros *et al.*, 2020). La medición de parámetros físico -químicos como: pH, Temperatura (T), Conductividad Eléctrica (CE) y Oxígeno Disuelto (OD), entre otros, en los cuerpos de agua es tal vez la forma más sencilla de identificar sus variaciones composicionales, tanto espaciales como temporales, resultantes de cambios en factores naturales como la litología, relieve, vegetación y clima de la región además, son útiles para determinar el grado de contaminación, tanto orgánica como inorgánica, por lo que su uso resulta conveniente en estudios que permitan evaluar el impacto ambiental del sitio en cuestión (Barceló Quintal *et al.*, 2020).

En México y otros países la demanda de agua tiene como objetivo principal satisfacer las necesidades de la industria, la producción de alimentos y, en general, de la población y sus patrones de consumo en consecuencia se genera agua de origen residual y representa focos de infección y toxicidad a la salud humana y al ambiente, esto está condicionado por su composición, concentración, tiempo y tipo de contacto (Hernández-Torres *et al.*, 2016).

Estos parámetros son también portadores de información acerca de la evaluación de los procesos químicos y biológicos que ocurren en los sistemas acuáticos y se plantea que podrían ser útiles de igual forma para identificar procesos geoquímicos, tales como los de auto purificación (Castañeda Casas *et al.*, 2021).

Uno de los principales retos que enfrentan los países a nivel mundial es el abastecimiento de agua en cantidad y calidad adecuada para sus habitantes. Su escasez es uno de los mayores problemas que se presenta actualmente y que se agravará en un futuro cercano en cuanto al abastecimiento y uso de este vital recurso. El consumo de las aguas varía según el tipo de actividad para lo

cual se emplea. El empleo para consumo doméstico, tiene en cuenta la higiene particular, lavado de utensilios, cocina, bebida, lavado de autos, riego de jardines, etc (Castro-Pastrana *et al.*, 2021). A la mayoría de nosotros nos parece natural tener acceso al agua potable, la usamos para todo, la dejamos correr, siempre estuvo ahí y siempre estará, como el aire que respiramos y también así de imprescindible, sin embargo en tan sólo dos décadas se ha duplicado el consumo de agua en nuestro planeta, hoy más de 1,500 millones de personas en el mundo no pueden gozar de este privilegio, se afirma que para el año 2025 la demanda de agua potable será el 56% mayor al suministro disponible (Gómez-Torres *et al.*, 2019).

La determinación de la calidad del agua superficial implica realizar el análisis de varios parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, los cuales no son posibles de realizar en la vida diaria, debido a los costos que estos conllevan, además de lo dificultoso en la interpretación de los resultados obtenidos (Vidal-Álvarez, 2018).

Por lo anterior los objetivos de este trabajo fueron:

Evaluar mediante un estudio físico-químico el Tratamiento del Agua que se efectúa en la Plantas Residuales a base a los parámetros del agua: pH, conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, carbonatos, y cloruros.

Analizar los metales pesados Cobre (Cu), Cadmio (Cd), y Plomo (Pb), así como compararlos en las Plantas Tratadoras de Aguas Residuales, y ver si no sobrepasan los límites máximos permisibles de la NOM-002-SEMARNAT-1996.

I. REVISIÓN DE LITERATURA

El agua, es un recurso ecológico y económico esencial, es indispensable para la vida humana, y sostenibilidad ambiental, además es un factor estratégico de seguridad nacional, así como de estabilidad social y política de México, por ello en el Programa Nacional Hídrico 2014-2018, el agua se considera como un bien promotor del desarrollo sustentable (Arada-Pérez *et al.*, 2017).

Constituye los cuatro recursos básicos donde se apoya la vida en cualquiera de sus formas, sin embargo la importancia de la calidad del agua, ha tenido un lento desarrollo, sólo hasta finales del siglo XIX se le reconoció como origen de numerosas enfermedades infecciosas, hoy en día su importancia, está fuera de toda duda (Ordúz *et al.*, 2017).

Es uno de los compuestos más abundantes en la naturaleza y cubre aproximadamente tres cuartas partes de la superficie terrestre, en contra de lo que pudiera parecer, diversos factores limitan su disponibilidad para el uso humano; más del 97% del agua total del planeta se encuentra en océanos y otras masas salinas, por lo que su utilización es limitada, del 3% restante más del 2% se encuentra en estado sólido, como hielo resultando prácticamente inaccesible (Concha y Sosa, 2021).

En términos generales sólo el 0.62 % de toda el agua en el planeta es apta para el hombre y sus actividades domésticas, agrícolas e industriales, este volumen de agua se encuentra en lagos, ríos y acuíferos subterráneos (Caviedes-Rubio *et al.*, 2017).

La cantidad de agua disponible es ciertamente escasa, mayor problema es aun su distribución irregular en el planeta, por otro lado, el uso de los recursos naturales provoca un efecto sobre los ecosistemas de donde se extrae y donde se utilizan; el caso del agua es uno de los ejemplos más claros y contundentes: un mayor suministro de agua significa una mayor generación de aguas

residuales, si se entiende por desarrollo sustentable aquél que permita compatibilizar el uso de los recursos con la conservación de los ecosistemas, entonces se debe propiciar el balance entre la explotación, el tratamiento y el restablecimiento de todos los recursos naturales, incluyendo el agua en todas sus formas y presentaciones (García-Ubaque *et al.*, 2015).

Las Naciones Unidas, han declarado un derecho humano al acceso a fuentes seguras de agua potable para las poblaciones de todo el planeta; sin embargo este derecho se ve postergado, sobre todo en países en vías de desarrollo (Can-Chulim *et al.*, 2019a). El agua está contaminada cuando se ven alteradas sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, por lo que pierde su potabilidad para consumo diario o para su utilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas (Bolong *et al.*, 2019).

En nuestro país para cuantificar el grado de contaminación y poder establecer el sistema de tratamiento más adecuado, se utilizan varios parámetros expresados en la normatividad oficial vigente, contenidas principalmente en las normas oficiales mexicanas: NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-004-SEMARNAT-2002. En México el 58% de las aguas residuales generadas son colectadas en los sistemas formales de alcantarillado municipales, estimándose en más de 208 metros cúbicos por segundo, de los cuales sólo el 40.2% (83.6 m³/s) reciben algún tipo de tratamiento, adicionalmente se generan 190 m³/s de aguas residuales de uso no municipal incluyendo a la industria, de las cuales únicamente se tratan 33.7 m³/s (17.7%) (Alvarez *et al.*, 2021).

Hoy en día la calidad sanitaria del agua para garantizar la prevención de enfermedades asociadas al consumo de esta, es de vital importancia a nivel mundial (Barahona-Castillo *et al.*, 2018). El concepto de calidad del agua ha sido definido por diversos autores como “las propiedades químicas, físicas y biológicas del agua que afectan su uso”. Desde el punto de vista agrícola, la calidad del recurso se refiere al tipo y a la cantidad de sales presentes en ella

así como a su efecto sobre el suelo, el desarrollo y crecimiento de los cultivos (Alcantara *et al.*, 2019).

Las principales variables que determinan la calidad del agua de riego, desde una perspectiva agrícola, son la concentración total de sólidos disueltos o sales solubles, la presencia relativa de sodio, el contenido de carbonatos y bicarbonatos y la concentración de otros iones específicos que pueden ser tóxicos, como cloro y boro (Bejarano-Ayala *et al.*, 2019).

Estos elementos que inciden sobre la calidad del agua se originan en la disolución o meteorización de las rocas y otros componentes edáficos que son transportados mediante corrientes superficiales o subterráneas y, posteriormente, depositados en el suelo de forma natural o mediante el riego (Mateo-Pérez *et al.*, 2021). Existen varios parámetros para determinar la calidad del agua que incluyen la acidez y la alcalinidad, el pH, la conductividad eléctrica (CE), la relación de adsorción de sodio (RAS), la salinidad efectiva, la salinidad potencial y el índice de permeabilidad (Ledezma-Elizondo *et al.*, 2018).

En la actualidad existe gran interés en la determinación de la calidad del agua de las fuentes hídricas, siendo un factor determinante en el bienestar humano, ya que trae repercusiones en la salud de la población, el desarrollo económico y sobre todo la calidad ambiental de sus ecosistemas. Teniendo en cuenta que solo un 3,5% de la totalidad del agua existente en el planeta es agua dulce (González-Pérez *et al.*, 2019). El control de la calidad del agua de los ecosistemas acuáticos se lleva a cabo mediante análisis físicos-químicos e indicadores biológicos como es el uso de macroinvertebrados que comprenden una gran parte de la diversidad acuática. La diversidad de especies es un parámetro muy importante en el estudio y descripción de comunidades, centrándose en la búsqueda de parámetros para su caracterización (Gómez-Torres *et al.*, 2019).

Algunas condiciones naturales y la mayoría de las actividades antropogénicas generan la degradación de las aguas superficiales y subterráneas, así el

enriquecimiento de oligoelementos disueltos, los contaminantes de metales pesados y semi metálicos en el sistema de agua la hacen inadecuada para beber (Hernández-Morales *et al.*, 2020). Por lo tanto, es crucial evaluar la calidad del agua considerando parámetros químicos, biológicos y físicos utilizando límites estándares nacionales e internacionales. El tener acceso al agua mediante redes públicas no es garantía de que sea de calidad. El 80% de enfermedades infecciosas y parasitarias, gastrointestinales y una tercera parte de la tasa de mortalidad se debe al uso y consumo de agua insalubre. En el año 2019, 2020, el 90,8% (29 millones 525 mil) de la población del país accedió a agua para consumo humano proveniente de red pública. Asimismo, el 9,2% se abastecen de agua de otras formas (Rincón-Silva, 2017).

Las Naciones Unidas establece que el ser humano tiene derecho a agua limpia de calidad y saneamiento. Por su parte, el Objetivo 6 de la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), representa un compromiso de carácter mundial para garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua para consumo, y saneamiento para todos; ya que tanto el bienestar social, como el desarrollo económico de las naciones no se sostienen sin un suministro de agua confiable y de buena calidad (Mateo-Pérez *et al.*, 2021). Como recurso de agua dulce, el agua subterránea juega un papel importante en la producción agrícola, el desarrollo económico y la vida misma de la población, aportando aproximadamente el 36% del agua utilizada en hogares a nivel mundial. Las comunidades rurales no escapan de esta realidad, ya que dependen principalmente del agua subterránea que a menudo utilizan sin previo tratamiento; lo que deja en evidencia que el conocimiento de la composición y variabilidad del agua subterránea, a fin de identificar los parámetros del agua que deben eliminarse o controlarse, es fundamental para garantizar la salud (González-Pérez *et al.*, 2019).

Por su parte, la Organización Mundial de la Salud indica que la falta de agua segura, de servicios sanitarios y de higiene constituye el factor de riesgo ambiental más importante a nivel mundial en términos de años de vida

ajustados por discapacidad y el segundo factor de riesgo más importante en términos de muertes (Ledezma-Elizondo *et al.*, 2018). Una evaluación de los impactos que tendría la provisión de servicios de saneamiento indica que, si el acceso a los servicios fuera universal, el número mundial de episodios de diarrea se reduciría en promedio un 16,7%. Si se suma la desinfección del agua en el lugar de consumo, la reducción de los episodios alcanzaría en promedio el 53%. Por último, proporcionar acceso a un abastecimiento regulado de agua corriente, conexión en la vivienda a la red de cloacas y tratamiento parcial de las aguas residuales, permitiría conseguir una reducción promedio del 69% (Fernández-Rodríguez y Guardado-Lacaba, 2021).

2.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El agua es un excelente disolvente de sustancias polares e iones, una propiedad que se aprovecha tanto en la naturaleza como en el laboratorio o en la industria. Desafortunadamente, esta misma propiedad convierte al agua en un medio que se contamina con facilidad. Los contaminantes que ingresan a cuerpos de agua como ríos y océanos pueden transportarse en altas concentraciones a través de largas distancias (Jacobo-Marín y De León-Santacruz, 2021).

Las categorías más importantes de contaminantes del agua son: químicos orgánicos, metales pesados, ácidos, nutrientes y energéticos. Las fuentes de contaminantes químicos orgánicos más comunes incluyen el uso voluntario de herbicidas o pesticidas, derrames accidentales de hidrocarburos y descargas domésticas o industriales (Fernández-Rodríguez y Guardado-Lacaba, 2021).

2.2 LA PROBLEMÁTICA DE LA ESCASEZ DE AGUA

En los últimos años existe una preocupación creciente sobre el problema del abastecimiento de agua, así lo demuestran los informes de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo que se han ido publicando durante la última década. A nivel social se lanzan campañas de concienciación para hacer un uso razonable de este recurso (Carreño-Ortiz *et*

al., 2019). Sin embargo, no solamente es el uso personal del agua el que representa un peligro, existen otras actividades humanas que suponen una mayor necesidad de agua, entre ellas podemos encontrar la agricultura y la industria. El agua es un componente de vital importancia entre los sectores socio-económicos de mayor relevancia, participando ésta de distinta forma (Cervantes Gallegos *et al.*, 2021).

En la agricultura se requieren grandes cantidades de agua para el riego y ésta debe cumplir con unos valores de calidad adecuados. El proceso de obtención de energía necesita de agua para impulsar turbinas en plantas hidroeléctricas, refrigerar las plantas termales y nucleares y, finalmente, también producir biocombustibles. Además, el agua proporciona unos ecosistemas sanos que al mismo tiempo significa disponibilidad de recursos naturales (Castañeda-Villanueva y Flores-López, 2014).

Hoy en día, las estimaciones de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos y los procesos hidrológicos han permitido que hasta la actualidad se haya podido contar con recursos hídricos suficientes (Vidal-Álvarez, 2018). A pesar de todo, las presiones sobre el sistema hidrológico continental aumentan a medida que aumenta la población y su desarrollo económico, esto plantea graves retos frente a la falta progresiva de agua y a su contaminación (Hernández-Morales *et al.*, 2020).

2.3 NORMATIVIDAD

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES

La NOM-001-SEMARNAT-1996 estableció un cumplimiento gradual y progresivo conforme a los rangos de población para las descargas municipales y conforme a la carga contaminante expresada como demanda bioquímica de oxígeno5 (DBO5) o sólidos suspendidos totales (SST) para las descargas

no municipales, cuyas fechas límite de cumplimiento vencieron para todos los casos el 1 de enero de 2010.

Objetivo y campo de aplicación: La Norma Oficial Mexicana tiene por objeto establecer los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y bienes nacionales. Es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas de aguas residuales en cualquier tipo de cuerpo receptor propiedad de la Nación. La Norma no aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes destinados exclusivamente para aguas pluviales ni a las descargas que se vierten directamente a sistemas de drenaje y alcantarillado municipales ("NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996," 2022)

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.

Objetivo y campo de aplicación: Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

Cuadro 1 Límites Máximos Permisibles

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cobre total	10	15	20
Plomo total	1	1.5	2

Fuente: NOM-002-SEMARNAT-1996

Los límites máximos permisibles establecidos en la columna instantáneo, son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan. ("NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996," 2008)

2.4 ANÁLISIS DE LAS AGUAS

La eficacia e idoneidad práctica de cualquier técnica de análisis aplicada al agua, independientemente de su origen, está condicionada por varios factores, pero fundamentalmente por dos: el analito a investigar, es decir, el compuesto o grupo de compuestos químicos, o microorganismo o grupo de microorganismos, de interés; y la matriz en la que se encuentra, puesto que el entorno que engloba al analito puede interferir, y de hecho lo hace y de forma determinante, en el posterior resultado analítico obtenido (Galvín, 2014).

En cuanto al analito, puede tratarse con compuestos químicos (cloruros, metales pesados, compuestos orgánicos de síntesis...), mediante propiedades

fisicoquímicas (conductividad, pH, turbidez...) de la disolución (agua) y, también, con elementos biológicos o microbiológicos presentes (virus, *Escherichia coli*, protozoos, dafnia..) en los que su estadio de crecimiento, así como su concentración (cantidad/volumen), serán determinantes (Guzmán-González *et al.*, 2019).

2.5 AGUAS RESIDUALES

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas ("SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA," 2008).

La mayoría de las actividades humanas que utilizan agua generan aguas residuales. A medida que crece la demanda global de agua, el volumen de aguas residuales generadas y su nivel de contaminación se encuentran en constante aumento en todo el mundo. En todos los países, excepto los más desarrollados, la mayor parte de las aguas residuales se vierte directamente al medio ambiente sin un tratamiento adecuado (Afanador-Rico *et al.*, 2020).

Esto tiene repercusiones negativas en la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos de agua dulce ambiental y los ecosistemas (Gómez-Torres *et al.*, 2019).

2.5.1 ¿CÓMO SE CLASIFICAN LAS AGUAS RESIDUALES?

Aguas residuales industriales: Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras (Milla *et al.*, 2019).

Aguas residuales domésticas: Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente (Montañez *et al.*, 2019).

Aguas residuales municipales: Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales

de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado (Muñoz-Navarro *et al.*, 2022).

2.6 METALES PESADOS EN EL AGUA RESIDUAL

Metales: Es la suma de las concentraciones de cada uno de los elementos en sus diferentes formas (en solución o disueltos y en suspensión). Para fines de esta norma se consideran los siguientes: Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plomo y Zinc ("NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996," 2022).

La contaminación con metales pesados es uno de los problemas más importantes que afectan al medio ambiente, debido a la toxicidad y a los daños que provocan en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Debido a su naturaleza química, estos compuestos son persistentes en el medio ambiente y no se degradan por métodos biológicos, químicos o físicos a productos más inocuos; sino que permanecen en el ambiente, acumulándose como iones o como metal o compuestos en los organismos por largos períodos de tiempo (Arada-Pérez *et al.*, 2021).

Entre los metales pesados más peligrosos para la vida acuática se encuentran el Pb, Cu, Zn y Cd, ya que son muy tóxicos aún en concentraciones relativamente bajas, no son biodegradables y por el contrario se acumulan a lo largo de la cadena trófica. Estos metales, sin embargo son ampliamente utilizados en diferentes procesos tecnológicos y llegan al río como resultado de las aguas residuales deficientemente tratadas y del escurrimiento de la ciudad (Belizario-Quispe *et al.*, 2019).

Los metales pesados son considerados según la tabla periódica como elementos químicos de alta densidad (mayor a 4 g/cm^3), masa y peso atómico por encima de 20 y son tóxicos en concentraciones bajas. Algunos de estos elementos son Aluminio (Al), Berilio (Be), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), plomo (Pb), entre otros (Mancilla-Villa *et al.*, 2012).

Actualmente uno de los mayores problemas a nivel ambiental es la contaminación de las fuentes hídricas del mundo por metales pesados, ya que es debido a la toxicidad que presentan los metales pesados en el agua de los ríos, que son considerados como un serio problema para los habitantes de las poblaciones que se abastecen de dichos ríos en especial si se considera que el incremento en la concentración de estos metales en las fuentes hídricas procede de las diversas actividades antropogénicas, elevando además los efectos potencialmente nocivos sobre los diferentes sistemas ecológicos y el ambiente, los cuales son el soporte de la vida humana lo cual acarrea serios problemas a nivel económico tanto a nivel económico tanto a nivel local como nacional debido al aumento en los costos de los tratamientos médicos y una disminución en la productividad de los habitantes de la zona (Hernández-Torres et al., 2016).

Dentro de los principales factores que afectan los ecosistemas por contaminación por metales pesados, se encuentra las actividades humanas donde destacan como mayoritarias las operaciones de tipo minero y de fundición entre otras actividades de tipo industrial y urbana , donde se tiene que la tasa de contaminación del agua puede rondar cerca de los 200 millones de metros cúbicos diarios (Benítez et al., 2020).

Las sales solubles en agua de los metales pesados como el plomo y cadmio son muy tóxicas y acumulables por los organismos que los absorben, los cuales a su vez son fuente de contaminación de las cadenas alimenticias al ser ingeridos por alguno de sus eslabones. Al ser ingeridos por el hombre en el agua y alimentos contaminados por los compuestos de mercurio, plomo o cadmio le provocan ceguera, amnesia, raquitismo, miastenia o hasta la muerte (Belizario-Quispe et al., 2019).

Límite permisible: Valor o intervalo de valores asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las aguas residuales descargadas en cuerpos receptores propiedad de la Nación.

Parámetros básicos: En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes: grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, demanda de química de oxígeno, carbono orgánico total, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno total *Kjeldahl*, de nitritos y de nitratos, expresadas como mg/L de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.

Riego: Es la utilización del agua residual destinada a la superficie de terrenos de cultivos ("NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996," 2022)

2.7 COBRE

El cobre es un material de color rojizo que se encuentra ligado a la humanidad desde que se descubriera en forma nativa. Se encuentra (a veces) en la naturaleza en forma metálica (al igual que el oro), y fue por esta razón que fue uno de los primeros metales conocidos y usados por el ser humano para la elaboración de utensilios, adornos, herramientas y armas. Su segunda época de utilización masiva fue en los siglos XIX y XX con la extensión de la electricidad. La mitad del cobre se utiliza en la industria eléctrica y una cuarta parte en la construcción (Cáñez-Cota, 2022).

Las aplicaciones del cobre de alta calidad (99.99 %), del que se produce el 95% del cobre primario se utiliza debido a su conductividad eléctrica en aplicaciones eléctricas (> 50% del consumo mundial) de baja tensión fundamentalmente. Máquinas eléctricas, como generadores, motores y diversos equipos eléctricos. Debido a su conductividad térmica encuentra aplicación en vasijas y tuberías de intercambio térmico (tuberías de calefacciones, etc.) (Arada-Pérez et al., 2021).

Se emplea el cobre en la industria química y alimentaria por su resistencia a la corrosión. También se emplea en la industria naval, del automóvil o en la de equipos de medida. También se usa en construcción en conducciones y recubrimientos. En electrodomésticos, decoración y moneda. Munición en cobre y latón. Las sales y compuestos de cobre, se usa en agricultura para evitar hongos con baja toxicidad. Otros compuestos de cobre se usan como insecticidas y conservantes. El cobre y compuestos de cobre se emplean como

catalizadores en cierto tipo de reacciones, también se emplea como pigmento en vidrios, cerámicas y esmaltes (Benítez et al., 2020).

Propiedades físicas: Las propiedades físicas dependen de su pureza, y esta de la mena y del proceso de obtención. Las impurezas pueden formar soluciones sólidas o fases segregadas en los bordes de grano debidas a los tratamientos del metal, lo que altera sus características. En este sentido, se establecen dos grupos en función del efecto de las impurezas: aquellas independientes del ordenamiento cristalino, véase algunas termodinámicas o el comportamiento magnético, aquellas que dependen de los defectos cristalinos (dislocaciones, soluciones sólidas sustitucionales), véase la conductividad térmica y eléctrica, el comportamiento plástico y la resistencia a la corrosión (Milla *et al.*, 2019).

Propiedades químicas: El cobre es un metal de transición perteneciente al grupo del oro y la plata en la tabla periódica con estados de oxidación +1 y +2 que forma compuestos coloreados. El Cu^{2+} es el estado de oxidación más estable a relativamente baja temperatura. Por encima de los 800°C predomina el Cu^{1+} , lo cual es importante para los procesos pirometalúrgicos. Se trata de un metal noble comparado con otros elementos. El hidrógeno es soluble en el cobre líquido. El hidrógeno reacciona con el oxígeno disuelto formando agua vapor que al no ser soluble en el cobre se escapa o forma porosidad residual (Vidal-Álvarez, 2018).

2.8 CADMIO

El cadmio es un metal pesado considerado como uno de los elementos más tóxicos, junto con el mercurio y el plomo. Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza asociado a distintos minerales (Ceballos Freire, 2020).

A su vez, el hombre ha contribuido enormemente a su dispersión desde los inicios de la actividad minero-metalúrgica de otros metales, y más tarde, al descubrirse la gran utilidad del cadmio en el ámbito industrial. La problemática del cadmio radica, además de en su elevada toxicidad, en su larga vida media y

en la capacidad para ser acumulado por los seres vivos (García Moreno *et al.*, 2017).

El cadmio es un elemento químico que se encuentra en el grupo 12 de la tabla periódica, junto con el mercurio y el zinc. En su forma de metal puro es blando, dúctil y maleable, de color plateado claro. Al ser calentado se combina con oxígeno, azufre, fósforo y halógenos, y es fácilmente disuelto por ácidos (Chávez-Ortiz *et al.*, 2016).

El cadmio es un metal pesado considerado como uno de los elementos más tóxicos. Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, asociado principalmente a los depósitos de zinc. Su movilidad en el medio depende de varios factores tales como el pH, el potencial redox, la cantidad de materia orgánica y la presencia de arcillas y óxidos de hierro (Sánchez-Barboza, 2015).

El cadmio emitido al medio procede mayoritariamente de actividades industriales, minería, metalurgia, fabricación y aplicación de fertilizantes de fosfato y de la incineración de residuos urbanos. Aunque tiene numerosas aplicaciones industriales, su uso ha decrecido en las últimas décadas debido al peligro para la salud que supone (Vidal-Álvarez, 2018).

Este metal se puede encontrar en las aguas residuales de laboratorio, de procesos de galvanotecnia y del procesamiento de minerales, formando diferentes tipos de compuestos: solubles, insolubles, inorgánicos, organometálicos, compuestos de coordinación, entre otros. La contaminación con Cd proviene principalmente de fuentes geogénicas, actividades antropogénicas, fundición y refinado de metales, quema de combustibles fósiles, aplicación de fertilizantes fosfatados y lodos de depuradora (Rincón-Silva, 2017).

Por ello, la contaminación por cadmio es persistente e irreversible, y no sólo degrada la calidad de las masas de agua, la atmósfera y los cultivos alimentarios, sino que también supone una gran amenaza para la salud y el bienestar de los organismos y los seres humanos por su acumulación en la

cadena alimentaria. Las principales fuentes de Cd en el aire son las partículas de polvo, las erupciones volcánicas, los incendios forestales y las actividades industriales con Cd (Sánchez-Barboza, 2015).

Las principales fuentes de exposición humana por inhalación son el humo de los cigarrillos y los impactos laborales, así como también por ingestión de aguas y alimentos contaminados con este metal pesado. Adicionalmente, el Cd puede ser acumulado por animales y plantas, y de esta manera ingresar a las cadenas tróficas, magnificando los efectos tóxicos del contaminante a todo el ecosistema, y por supuesto al hombre. Por este motivo, la contaminación con Cd es un problema de interés general para la sociedad, ya que este metal pesado no tiene ninguna función biológica conocida, y los efectos tóxicos por exposición a este (Vidal-Álvarez, 2018).

Por otro lado, la presencia de Cd en aguas residuales proviene principalmente de fuente industriales y domésticas, trasladando al metal pesado a través de áreas más extensas, pudiendo contaminar las aguas subterráneas o afectar cultivos si se emplean estas aguas residuales para riego (Belizario-Quispe *et al.*, 2019).

2.9 PLOMO

Su símbolo es Pb, su número atómico es 82 y su masa atómica es 207.2 g/mol . El plomo es un metal de color gris azulado que pierde su brillo cuando se expone al aire. Es muy suave y maleable con gran facilidad para ser fundido, para generar alambres y para extruirlo (Cadme *et al.*, 2021).

El plomo forma compuestos en los que su estado de oxidación es de 2+ y 4+, el más común de ellos es de 2+. Los compuestos de Pb⁴⁺ son covalentes, mientras que los de Pb²⁺, son iónicos principalmente. Este metal es anfotérico y forma sales plúmbicas y plumosas. Tiene una excelente resistencia a la corrosión en el aire, agua y suelo. Se llevan a cabo reacciones entre el metal y el medio ambiente, sin embargo, se forma una capa protectora de sales insolubles de plomo (Arada-Pérez *et al.*, 2021).

Por ejemplo en presencia de oxígeno, el agua lo ataca, pero si contiene carbonatos y silicatos, se forma una capa protectora de sus derivados y la corrosión se hace muy lenta. Reacciona con ácido nítrico, formando el nitrato soluble en agua. Lo mismo sucede con el ácido acético y otros ácidos orgánicos débiles, formando las sales correspondientes. En el caso del ácido sulfúrico concentrado, este forma sulfato de plomo, el cual es insoluble y forma una capa protectora sobre el metal. Con HCl la reacción es muy lenta y el cloruro correspondiente es poco soluble en agua (Belizario-Quispe et al., 2019).

El plomo es un metal que se encuentra en forma natural en la corteza terrestre. Se puede encontrar en todas partes de nuestro medioambiente, como el aire, el agua y la tierra. El plomo se puede combinar con otras sustancias químicas para crear distintos compuestos. Se usa en la fabricación de pilas, municiones y productos de metal (soldaduras y tuberías). Debido a preocupaciones de salud, se ha reducido radicalmente el uso de plomo en pinturas, cerámicas, calafateo (*caulking*) y soldadura de tuberías. El uso de plomo como un aditivo de la gasolina de automóviles se prohibió en 1996 en los Estados Unidos (Mancilla-Villa et al., 2012)

La contaminación del agua por plomo no se origina directamente por el plomo sino por sus sales solubles en agua que son generadas por las fábricas de pinturas, de acumuladores, por alfarerías con esmaltado, en fototermografía, en pirotécnia, en la coloración a vidrios o por industrias químicas productoras de tetraetilo de plomo (se usa como antidetonante en gasolinas) y por algunas actividades mineras, etc (Cáñez-Cota, 2022).

Las dos principales vías de acceso de los compuestos de plomo al organismo son el tracto gastrointestinal y los pulmones. Cerca del 10 % del plomo ingerido es excretado en la orina y en menor cantidad en el sudor, en el pelo y en las uñas. El 90 % del plomo que se encuentra en el cuerpo humano se deposita en el esqueleto óseo y es relativamente inerte, y el que pasa a través del torrente sanguíneo puede depositarse en los tejidos. Los signos más comunes de intoxicación por plomo son los gastrointestinales y sus síntomas comprenden

anorexia, náusea, vómito, diarrea y constipación, seguida de cólicos (Ceballos Freire, 2020).

3. AGUAS RESIDUALES DE USO DOMÉSTICO

Las aguas residuales de uso doméstico son aquellas que provienen de las actividades del hombre en su rutina diaria, las cuales son recolectadas en los sistemas de alcantarillado o vertidas, son flujos de agua conformados por la combinación de las excretas eliminadas por la población incluyendo heces y orina que son provenientes de viviendas o instalaciones comerciales privadas o públicas, concretan que se denominan también aguas servidas a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial por haber sido utilizadas en procesos de transformación y limpieza. La caracterización de las aguas residuales domésticas se basa en determinar el olor, color, temperatura, densidad, turbiedad, sólidos totales, nitratos, sulfatos, cromo, hierro, cloruros, calcio, zinc, y el pH (Ledezma-Elizondo *et al.*, 2018).

De manera específica, las aguas residuales domésticas hacen referencia a aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.), consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares (Deago *et al.*, 2021).

Además, se entiende que la acción y efecto en la que el hombre introduce materias contaminantes, formas de energía o inducir condiciones en el agua de modo directo o indirecto; implica alteraciones perjudiciales de su calidad con relación a los usos posteriores o con su función ecológica. El agua residual doméstica está compuesta de componentes físicos, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos (Chávez *et al.*, 2018). Se ha comprobado que estas aguas se encuentran compuestas por aguas fecales, además de aguas de lavado y limpieza. Por lo que, se puede asimilar que estas aguas contienen gérmenes patógenos,

materia orgánica, sólidos, detergentes, nitrógeno y fósforo, además de otros pero en una menor proporción (Camacho-Ballesteros *et al.*, 2020).

Datos promediados según Cifuentes, demuestran que la gente excreta de 100 a 500g de heces al día y de 1 a 3L de orina al día, contribuyendo con una DBO5 de 20 a 45 g por día así mismo probabilísticamente se obtiene que las aguas residuales domésticas están formadas en un 99,9% por agua y en un 0,1% por residuos sólidos orgánicos más inorgánicos; esta pequeña fracción de sólidos es la que origina los problemas en el tratamiento y su disposición (Alcorta-García *et al.*, 2018). Las proteínas son los compuestos que se encuentra en mayor cantidad, seguidos de los carbohidratos y las grasas. Además, están presentes compuestos surfactantes, fenoles, aceites, pesticidas y otros compuestos menos comunes, como metales pesados, compuestos organoclorados, etc (Barceló Quintal *et al.*, 2020).

Los principales ensayos para determinar la carga orgánica de un desagüe son: la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno. Estas aguas contienen gérmenes patógenos que pueden afectar el sistema digestivo del ser humano (Castañeda Casas *et al.*, 2021).

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES E INDUSTRIALES

3.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Olor: es un punto importante de caracterización ya que se debe a la presencia de los gases liberados durante la descomposición de la materia orgánica, donde el agua residual posee un olor peculiar debido a la presencia de sulfuro de hidrogeno que es el resultado del proceso de la reducción de los sulfatos a sulfitos producido por la acción de los microorganismos, la caracterización y medida de olores se debe a cuatros factores importantes como el carácter, detectabilidad, sensación y la intensidad (Calderón Huamaní *et al.*, 2019).

Temperatura: es otra característica particular ya que las aguas residuales presentan temperaturas mayores que las aguas no contaminadas, a esto se debe a que a que este tipo de agua al existir mayor actividad bioquímica por

parte de los microorganismos va a ser un factor proporcional al aumento de la temperatura, también se toma los puntos de descargas de aguas calientes como las procedentes de las casas y de los diferentes usos industriales, la temperatura del agua es un parámetro importante ya que incide sobre el desarrollo de la vida acuática, debido a que el oxígeno es menos soluble en agua caliente (Angelaccio *et al.*, 2013).

Densidad: comúnmente se define como la masa por unidad de volumen expresado en Kg/m^3 y g/cm^3 , también se emplea como una alternativa el peso específico del agua residual obtenido del coeficiente ya establecido entre la densidad del agua y la densidad de agua residual, lo cual depende mucho de la temperatura y esta a su vez está en función de la concentración total de los sólidos presentes en el agua residual (Can-Chulim *et al.*, 2019b).

Turbiedad: es un procedimiento que nos indica la calidad de las aguas que se vierten debido a la relación de del material coloidal y residual en suspensión, La obtención de la medición de la turbiedad se lleva por métodos prácticos-físicos como es la comparación entre la intensidad de luz dispersada en la muestra y la intensidad de luz ya acotada en un registro de suspensión de referencia, esta característica es importante ya que la materia coloidal suspendida en la superficie del agua absorbe la luz impidiendo su transmisión, donde existe una variabilidad de proporción en relación de las dos características como es la turbiedad y la concentración de sólidos en suspensión de aguas residuales (Castro-Pastrana *et al.*, 2021).

Contenido de sólidos: encuentra representados por las partículas visibles y coloidales que se encuentra en la masa de las aguas residuales que está conformada por la materia orgánica como los carbohidratos, celulosa, partículas de fibra, quitina y otros elementos más de tipo orgánico, también se encuentra las sustancias químicas inorgánicas. El contenido de sólidos se clasifica en los siguientes (Castellanos Onorio *et al.*, 2021).

Sólidos Totales (ST): se definen como los residuos que quedan después de que la muestra ha sido evaporada y secada entorno a una temperatura de 105°C durante un intervalo de tiempo de veinte cuatro horas al calor seco (Sánchez-Barboza, 2015).

Color: el color en las aguas residuales se debe por la presencia de sólidos suspendidos, también un color verde en estas aguas se deduce que por el producto de las sustancias coloidales y sustancias disueltas, el color es punto importante ya que podemos deducir a simple vista que puede ser producto de la sustancias que son arrojadas en los desagües en la que encontramos los colorantes de la industrias, los ácidos húmicos y fúlvicos, taninos y otros muchos elementos más, cabe mencionar que se puede estimar con esta característica las condiciones que se encuentra el agua residual (Rincón-Silva, 2017).

Distribución de Partículas según el Tamaño: el tamaño de las partículas de las aguas residuales varía en cuanto su magnitud tenemos: < 0,08 μm sustancias disueltas; 0,08 hasta 1,0 μm para partículas coloidales; 1 hasta 100 μm para partículas supracoloidales; > 100 μm para partículas sedimentables. (Morón, 2009)

pH: es el grado de alcalinidad o acidez que posee el agua, depende a la proporción de contracción de iones de hidrógenos los valores de pH oscilan en una escala entre 0 y 14 siendo el pH = 7 el neutro, este es característica es importante porque nos permite saber el grado de acidificación que tiene estas aguas residuales (Castañeda Casas *et al.*, 2021).

3.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (INORGÁNICOS)

Nitratos: Procedente de la descomposición de las materias vegetales y animales o de los compuestos nitrogenados que en presencia de oxígeno los microorganismos transforman la materia orgánica presente en el agua (Álvarez *et al.*, 2019).

Sulfatos: son solubles, proceden oxidación bacteriana de sulfuros, su concentración oscila en ríos entre 20 y 50 mg/l (Arada-Pérez *et al.*, 2017).

Cromo: se encuentra en forma natural, pero en aguas residuales se trata de un metal contaminante los cuales en aguas forman complejos aminados y cianurados, complejos de estabilidad con otros compuestos químicos como los cloruros, sulfatos, sales amónicas, cianuros y nitratos presenta un grado de toxicidad en los organismos (Cadme *et al.*, 2021).

Hierro: están presente en las aguas residuales debió a la producción de acero y otros materiales, este se encuentra trivalente en las aguas superficiales, estos compuestos químicos producen serios problemas de salud como la dermatitis (Jaimes-Urbina y Vera-Solano, 2020).

Cloruro: la presencia de los cloruros se debe a la disolución de depósitos de minerales, provenientes de diversos afluentes de la actividad industrial o domestica debido, también se puede tomar como indicador de la presente contaminación de carácter microbiológico de un patógenos indeseable (Deago *et al.*, 2021).

Calcio: la presencia de este metal es que forma sales solubles con aniones de bicarbonato, sulfato, fluoruro y cloruro, están asociadas con el nivel de mineralización (Gómez-Torres *et al.*, 2019).

Zinc: su presencia en las aguas superficiales y subterráneas es rara, donde este elemento químico se encuentra en forma inorgánica, iónica y coloidad, los cuales en grandes cantidades son causan la turbidez de estas aguas, es un claro indicador de contaminación por pilas, aceites de motores que son consecuencia de derrame de vertederos (García Moreno *et al.*, 2017)

3.1.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (ORGÁNICOS)

Carbohidratos: Estas representan el 25% de los componentes orgánicos de las aguas residuales domésticas que están conformadas por azúcares, almidones los cuales se degradan por la actividad microbiana presente en las aguas

residuales, también existe carbohidratos complejos de difícil degradabilidad (Concha y Sosa, 2021).

Proteínas: estas constituyen el 65% del material orgánico de las aguas residuales domésticas y son los principales componentes químicos que se tarta en los sistemas de tratamiento, también se produce el ácido sulfhídrico debido a los aminoácidos azufrados presentes en las proteínas (Gómez-Torres *et al.*, 2019).

Lípidos: están constituidos por aceites y grasa que conforma el 10% de los componentes orgánicos, se los considera componentes indeseables debido a que contribuye a la obstrucción de las tuberías, también producen malos olores e inhiben la proliferación de los microorganismos (Deago *et al.*, 2021).

3.1.4 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales tratada o crudas albarca un sin número de organismos vivos entre los que se encuentra los patógenos de la salud humana como son: Bacterias, Virus, formas parasitarias, también encontramos indicadores de contaminación fecal entre ellos el Escherichia Coli que se usan en los diseños de las lagunas de estabilización, también se encuentra las bacterias nitrificantes como el Nitrobacter, Nitrosomas , y las bacterias que oxidan el azufre, también géneros importantes como *Nocardia*, *Sphaerotillus* y los Ciliados como los rotíferos y pedunculados (Álvarez *et al.*, 2019).

4. CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES (POR EL GRADO DE TRATAMIENTO)

Los procesos de tratamiento pueden ser fisicoquímicos o biológicos; en los primeros se hace uso de las diferencias entre las propiedades de las partículas y el agua, aplicando principios de separación como la sedimentación o flotación. En los procesos químicos se cambia la forma de las partículas que no pueden ser separadas por estos medios, mediante la aplicación de productos químicos para formar partículas de mayor densidad que luego puedan ser separadas por métodos físicos. Algunos aspectos favorables de estos procesos son la rápida adaptación a cambios en la calidad y cantidad del agua residual y su tamaño

compacto cuando se utilizan sedimentadores de alta tasa; sin embargo, las siguientes características limitan su aplicación (Aga *et al.*, 2019).

4.1 TRATAMIENTOS PRELIMINARES

4.1.1 CRIBADO

Son rejillas de barras metálicas o paralelas que mantienen el mismo espacio entre ellas, cuya función es retener sólidos gruesos que floten o que se encuentren suspendidos en el agua. Pueden ser de limpieza manual (gruesas) o de limpieza mecánica (finas) (Alvarez *et al.*, 2021).

4.1.2 DESARENADORES

Son estructuras que están destinadas a remover arenas y otros guijarros presentes en las aguas residuales, éstos pueden ser rectangulares o circulares; de flujo horizontal o helicoidal; aireados o no; de limpieza manual o mecánica. Su función es prevenir la abrasión de equipos mecánicos, evitar la sedimentación de arenas en tuberías, canales y tanques ubicados aguas abajo (Álvarez *et al.*, 2019).

4.1.3 HOMOGENIZACIÓN

Se utilizan tanques que ayudan a regular o disminuir los efectos de la variación del flujo o de la concentración de las aguas residuales, son indispensables en el tratamiento de las aguas residuales domésticas. El procedimiento de cálculo se basa en establecer un balance de masa a intervalos regulares de tiempo (Amabilis-Sosa *et al.*, 2022).

4.2 TRATAMIENTOS PRIMARIOS

El proceso de tratamiento primario toma el desagüe crudo o de ingreso y retira entre el 40 y el 60 por ciento de sólidos arrastrados. El tratamiento que tiene lugar en esta parte del proceso es puramente mecánico (Cáñez-Cota, 2022).

Los procesos posteriores son mecánicos, biológicos y químicos. Toda la serie de pasos que componen el tratamiento primario es llamada a veces clarificación. La meta de este proceso es retirar turbidez, partículas sólidas y materiales flotantes. Debido a que estos contaminantes interferirán con los

procesos de tratamiento posteriores deben ser retirados con anterioridad (Gemini *et al.*, 2004).

4.2.1 SEDIMENTACIÓN PRIMARIA

Es un proceso físico que aprovecha la diferencia de densidad y peso entre el líquido y las partículas suspendidas. Los sólidos, más pesados que el agua, precipitan produciéndose su separación del líquido. La sedimentación primaria aplica para partículas floculentas (con o sin coagulación previa). Los sedimentadores pueden ser circulares o rectangulares (Barahona-Castillo *et al.*, 2018).

4.2.2 FLOTACIÓN

Proceso en el cual se utiliza la separación de partículas sólidas o líquidas en un medio líquido. En el tratamiento de las aguas residuales domésticas se utiliza para remover aceites y grasas y también para aglutinar sólidos suspendidos, la separación se consigue por flotación simple o introduciendo burbujas muy finas de aire en la masa líquida para que arrastren las partículas suspendidas hacia la superficie (DAF) (Barceló Quintal *et al.*, 2020).

4.3 TRATAMIENTOS SECUNDARIOS

El Tratamiento Secundario de aguas es la fase de tratamiento final antes de la Desinfección y del regreso del agua al ecosistema. Un tanque de tratamiento secundario (clarificador secundario) recibe las aguas residuales del clarificador primario y del aireador después de que tuvo lugar la evacuación inicial de lodos y de las impurezas de la superficie. En este punto, ya han sido retirados del 40 al 60 por ciento de los sólidos (García Moreno *et al.*, 2017).

El proceso de tratamiento secundario retira aún más. Después de esta etapa se han retirado del agua el 90 por ciento de los contaminantes. Hasta llegar aquí, el tratamiento anterior fue casi completamente mecánico. Se basaba mayormente en la gravedad o en aparatos mecánicos que retiraban los contaminantes. En el tratamiento secundario, la limpieza adquiere también una naturaleza biológica. Para un tratamiento efectivo, se debe lograr un balance

entre el nivel de desperdicios orgánicos, el oxígeno disuelto y los niveles bacteriales (Sánchez-Barboza, 2015). Esta es una simulación del proceso natural que ocurre en ríos y afluentes. Un exceso de desperdicios orgánicos crudos (drenaje) arrojados a un río altera un delicado equilibrio. Al agregar bacteria alimenticia a los desperdicios normales provenientes de los peces que han comido algas y/o pequeños animales marinos en la corriente, se multiplica el crecimiento de las bacterias existentes. Estas consumen y descomponen el excesivo desperdicio pero utilizan el oxígeno disponible a una tasa muy alta (Iriarte, 2019). La corriente se vuelve pobre en oxígeno (anaeróbica), matando las algas y los animales marinos. Esto reduce la población de peces. Si no se añaden desperdicios excesivos, la corriente se re-airea recogiendo oxígeno del aire. La vida marina reaparecerá lentamente, empezando con las algas y los pequeños animales marinos (Chávez-Ortiz *et al.*, 2016).

Esto supone, por supuesto, que el problema se detuvo antes de cometer un daño irreparable. El Tratamiento Secundario de Aguas Residuales está diseñado para descomponer y evacuar el material de las aguas residuales antes de regresarlo a nuestros lagos, riachuelos, ríos y océanos (Mateo-Pérez *et al.*, 2021).

4.3.1 LODOS ACTIVADOS

El nombre del proceso se debe a la formación de una masa de microorganismos activos, capaz de estabilizar un desecho orgánico bajo condiciones aerobias, el ambiente aerobio se logra mediante aireación difusa o mecánica en un tanque de aireación. Después de tratado el residuo en el tanque de aireación, la biomasa es separada en un sedimentador secundario. Parte de la misma se recircula al reactor (Bejarano-Ayala *et al.*, 2019).

4.3.2 SISTEMA DE BIOMASA ADHERIDA

En los sistemas de tratamiento con biomasa adherida los microorganismos se encuentran pegados a un medio de soporte que puede ser de plástico, piedra o cualquier otro material inerte. Dependiendo de las condiciones ambientales que

rodean el medio de soporte, los sistemas de biomasa adherida pueden ser aerobios o anaerobios (Bergues-Garrido *et al.*, 2015).

4.4 TRATAMIENTO Terciario

El tratamiento terciario se emplea para separar la materia residual de los efluentes de procesos de tratamiento biológico, a fin de prevenir la contaminación de los cuerpos de agua receptores, o bien, obtener la calidad adecuada para el reusó, factor de importancia en la planeación de recursos hidráulicos donde el abastecimiento de agua potable es limitado (Bolong *et al.*, 2019).

El tratamiento terciario es el procedimiento más completo para tratar el contenido de las aguas residuales, pero no ha sido ampliamente adoptado por ser muy caro. La finalidad de los tratamientos terciarios es eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como por ejemplo, los nutrientes, fósforo y nitrógeno (Cadme *et al.*, 2021).

Este tratamiento consiste en un proceso físico-químico que utiliza la precipitación, la filtración y/o la cloración para reducir drásticamente los niveles de nutrientes inorgánicos, especialmente los fosfatos y nitratos del efluente final. El agua residual que recibe un tratamiento terciario adecuado no permite un desarrollo microbiano considerable. Estos procesos son de naturaleza biológica o físico química, siendo el proceso unitario más empleado el tratamiento físico-químico. Este consta de una coagulación - floculación y una decantación (Calderón Huamaní *et al.*, 2019).

4.4.1 MICROFILTRACIÓN Y ULTRAFILTRACIÓN

Define la propiedad de ciertos materiales (adsorbentes) de fijar en su superficie moléculas orgánicas extraídas de la fase líquida en la que se encuentran. El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido (Ceballos Freire, 2020).

Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie

del mismo. Se utiliza para eliminar fenoles, hidrocarburos aromáticos nitrados, derivados clorados, etc., así como para eliminar olor, color y sabor. El adsorbente más utilizado en el tratamiento de aguas es el carbón activo (Daza-Castro *et al.*, 2022).

4.4.2 INTERCAMBIO IÓNICO

Es una operación en la que se utiliza un material, habitualmente denominado resinas de intercambio iónico, que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie, y los cede frente a una disolución con un fuerte regenerante. La aplicación habitual de estos sistemas, es por ejemplo, la eliminación de sales cuando se encuentran en bajas concentraciones (Carrillo-Barahona *et al.*, 2021).

4.4.3 DESINFECCIÓN

Este proceso es el paso final antes de distribuir las aguas residuales ya tratadas al ambiente, y es para matar microorganismos que pueden representar un peligro para la salud. Este proceso, llamado desinfección puede ser alcanzado agregando cloro, exponiendo el agua residual a rayos ultravioletas o mediante la ozonización (Ceballos Freire, 2020).

4.4.4 MEDIANTE SISTEMA DE CLORACIÓN

Se trata de mantener el agua depurada en un depósito final de distribución con un contenido adecuado de cloro libre para evitar la proliferación de microorganismos con el objetivo de hacerla apta para su reutilización. Existen varias formas de cloración del depósito que pueden pasar por un sistema automático de medición y control de la dosificación de cloro libre en el depósito mediante sonda de cloro libre o de redox o dosificación de cloro proporcional al caudal de agua depurada mediante la instalación de un contador emisor de impulsos (Montañez *et al.*, 2019).

La cloración del agua residual es el sistema más sencillo y económico para un tratamiento terciario de reutilización de agua para riego de jardines y plantas. Como desventaja cabe destacar el hecho de que requiere el empleo y

manipulación de un producto químico como el hipoclorito de sodio. Además, ciertas plantas ornamentales, hortalizas o cultivos frutícolas pueden ser susceptibles a ser dañadas a partir de ciertos niveles de cloro libre (Vidal-Álvarez, 2018).

También cabe destacar que este sistema supone siempre el empleo de un depósito exclusivo para realizar la cloración ya que siempre es necesario un tiempo de contacto adecuado del agua clorada para asegurar la desinfección (Orduz *et al.*, 2017).

4.4.5 ÓSMOSIS INVERSA

Consiste en aplicarle a la disolución concentrada una presión superior a la osmótica, produciéndose el paso de disolvente (agua) desde la disolución más concentrada a la más diluida hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Usando esta técnica, se elimina la mayor parte del contenido en sales del agua (Milla *et al.*, 2019).

4.4.6 MEDIANTE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (LUZ ULTRAVIOLETA)

En este caso la desinfección se realiza mediante un equipo UV que proporciona una desinfección inmediata y más efectiva que la cloración. Otra ventaja añadida es que no requiere de depósitos de contacto ya que la desinfección se realiza de forma instantánea mediante el paso de agua por el equipo de tratamiento ultravioleta lo que favorece este tipo de tratamiento terciario cuando no se disponga de espacio suficiente para un tratamiento con cloro o con ozono (Rincón-Silva, 2017).

Para asegurar el buen funcionamiento del equipo ultravioleta es necesario un correcto sistema de filtración para eliminar turbidez y asegurar una transmisión adecuada de la radiación ultravioleta en el flujo de agua a tratar (Chávez-Ortiz *et al.*, 2016).

4.4.7 OZONIZACIÓN

El ozono es un poderoso oxidante y desinfectante con una velocidad de esterilización superior a la de un tratamiento convencional de cloro aumentando su eficacia. Esto permite tratamientos con ozono con tanques de contacto muy

reducidos ya que únicamente son necesarios unos tres minutos de tiempo de contacto para asegurar la desinfección. Además, para el tratamiento de agua residual para su reutilización en riego y agricultura, el ozono aporta una mayor oxigenación a la raíz de la planta a la vez que le transmite su carácter desinfectante. Los resultados son cultivos con un crecimiento más rápido con mayor productividad y evitando plagas y enfermedades (Arada-Pérez *et al.*, 2021).

4.5 REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA

La definición de reusó de aguas se basa en el aprovechamiento en actividades diferentes a las cuales fueron originadas. Se hace necesario de un tratamiento eficiente de las aguas residuales, un estricto cumplimiento de las normas establecidas por los organismos nacionales e internacionales para su reuso en riego agrícola, así como un adecuado nivel de información técnico sanitaria de todos los factores que intervienen en el uso productivo de estas aguas, permitiría el aprovechamiento seguro de un gran volumen de agua con gran valor agronómico (García Moreno *et al.*, 2017).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación. La Sede de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad-Laguna se ubica en Periférico Raúl López Sánchez, Valle Verde, 27054 Torreón.

PLANTA TRATADORA 1 (CERESO): Está ubicada en Valle Oriente, a espaldas del Cereso de Torreón. Valle Oriente. La Dalia Oriente, 27397 Torreón, Coahuila.

PLANTA TRATADORA 2 (CAMPESTRE): Está ubicada Las Fuentes 711, Ejido la Merced, 27290 Torreón, Coahuila.

PLANTA TRATADORA 3 (SIDEAPA): Está ubicada en Ejido Domicilio Conocido, Cd Lerdo, Durango. PTAR Ciudad Lerdo.

Metodología para determinar los metales pesados, equipo y reactivos

Materiales, equipos y reactivos

- Matraces Erlenmeyer de 125mL
- Soluciones buffer de pH 4 y 7
- Tubos de ensayo de 120 mm largo x 20 mm de ancho
- Pipetas volumétricas de 5 mL
- Buretas automáticas
- Vasos de precipitado de 50 mL
- Pipetas volumétricas de 10 mL
- Balanza analítica
- Un espectrofotómetro con celda circular marca MERCK.
- Placa de calentamiento (para evaporar el agua de 100 mL a 30 mL) espectrofotómetro de absorción atómica y vasos de precipitado de 100 mL.
- Negro de Eriocromo T y solución buffer
- Dietilditiocarbamato de sodio marca J.T Baker
- Hidróxido de Sodio 4N
- Murexida marca J.T Baker

- Cloruro de Bario dihidratado, cristal marca J.T Baker
- Una solución acondicionadora que contiene alcohol etílico y HCl
- Cloruro de amonio, marca J.T Baker
- Nitrato de plata (reactivo) Golden Bell
- Cromato de potasio marca MERCK
- Amonio hidróxido (reactivo) marca Jalmek
- Sodio hidróxido (escamas) reactivo analítico marca Jalmek
- Anaranjado de metilo para carbonatos

Para determinar el pH, se usaron soluciones buffer de pH 4 y 7 para calibrarlo. Tubo de ensayo de 120 mm largo x 20 mm de ancho.

Para determinar la conductividad eléctrica, se usó un tubo de ensayo de 120 mm largo x 20 mm de ancho, y solución de 12.9 ppm para calibrarlo.

Para Ca, Mg, CO₃, HCO₃ Y Cl, se usaron matraces Erlenmeyer de 125mL, pipetas volumétricas de 5 mL y buretas automáticas.

En estos análisis se usaron los siguientes indicadores:

Ca + Mg= Negro de Eriocromo T y solución buffer

Para puro Ca: Dietilditiocarbamato de sodio, hidróxido de Sodio 4N y Murexida

Para sulfatos: Matraces Erlenmeyer de 125 mL, cloruro de Bario dihidratado. Una solución acondicionadora que contiene alcohol etílico y HCl y un espectrofotómetro con celda circular marca MERCK.

Para metales pesados: Placa de calentamiento (para evaporar el agua de 100 mL a 30 mL). Para el agua cruda, se agregó un mL de HNO₃ concentrado. La lectura se realizó en el espectrofotómetro de absorción atómica y vasos de precipitado de 100 mL.

Para ST: Placa de calentamiento, vasos de precipitado de 50 mL, pipetas volumétricas de 10 mL y balanza analítica.

Todo el material de vidrio es de la marca Pyrex. Los reactivos son de las marcas principalmente J.T Baker y Golden Bell, y su pureza es del 99%.

Muestreo y conservación de muestras

Las muestras de aguas residuales se realizaron, durante el periodo del 2 de septiembre al 5 de noviembre del año 2021, de acuerdo con la metodología propuesta por (Aga *et al.*, 2019)

Se recolectó una muestra de agua cruda y una muestra de agua tratada de cada Planta. Para recolectar las muestras se utilizaron envases de vidrio ámbar de 1L de capacidad, lavados previamente con agua destilada.

Parámetros analizados y métodos empleados

Los parámetros determinados en las muestras fueron: pH, conductividad eléctrica calcio, magnesio, sodio, bicarbonato, sulfato de sodio, cloruros y para realizar esto, se utilizó el Manual de Procedimientos Analíticos para Análisis de Suelos y Plantas del Laboratorio de Fertilidad de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

En el cuadro 2 se resumen los métodos analíticos utilizados en la determinación de cada uno de los parámetros analizados en las muestras de agua.

Cuadro 2 Parámetros analizados y métodos empleados

Parámetros	Métodos Analíticos Empleados
pH	Conductímetro
Conductividad Eléctrica	Potenciómetro
Calcio	Análisis volumétrico
Magnesio	Análisis volumétrico
Sodio	Análisis volumétrico
Carbonatos	Análisis volumétrico
Bicarbonato	Análisis volumétrico
Sulfato de sodio	Análisis turbidimétrico
Cloruros	Análisis volumétrico
ST	Evaporación y diferencia de pesos
Cobre (Cu)	Absorción atómica
Plomo (Pb)	Absorción atómica
Cadmio (Cd)	Absorción atómica

3.1 Análisis estadístico de los datos

Se realizó un análisis de varianza para detectar diferencia entre medias para cada Planta Tratadora. El nivel de significancia en todas las pruebas fue de 0.05. Los análisis fueron realizados mediante el programa estadístico de Nuevo León.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuadro 3 Resultados correspondientes a los parámetros de contaminación ambiental en la caracterización físico-química

Tratamiento	pH	CE	Ca ⁺⁺ meq/lto	Mg ⁺⁺ meq/lto	Na ⁺ meq/lto	CO ₃ ⁼ meq/lto	HCO ₃ meq/lto	SO ₄ ⁼ meq/lto	Cl ⁻ meq/lto	ST ppm	RAS
1= Cruda Planta Simas	7.2 0	1.3 0	3.44	2.72	6.84	0	11.40	0.85	9.0	1090	3.90
1= Tratada Planta Simas	7.8 1	1.3 0	3.44	2.88	6.68	0	11.32	1.14	3.32	810	3.76
2= Cruda Planta Campe stre	7.4 0	1.8 0	2.56	5.20	10.24	0	10.12	2.26	11	1630	5.20
2= Tratada Planta Campe stre	7.7 1	1.8 0	6.0	4.0	8.0	0	7.52	2.98	4.84	1245	3.60
3= Cruda Planta SIDEAP A	7.3 8	1.1 0	2.80	2.56	5.64	0	9.32	0.39	0.6	871	3.44
3= Tratada Planta SIDEAP A	7.0 4	1.2 0	3.44	1.60	6.96	0	5.04	0.19	2.08	509	4.38

Para determinar el Sodio (Na), se utilizó la siguiente fórmula:

$$Na = 10 \times CE - (Ca + Mg)$$

Dónde:

Na= Sodio

CE= Conductividad eléctrica

Ca= Concentración de calcio en el agua (me/L)

Mg= Concentración de magnesio en el agua (me/L)

1= Cruda Planta Simas, sustituir los valores de Ca (Calcio) y Magnesio (Mg)

$$Na = 10 \times 1.30 - (3.44 + 2.72) = 6.84 \text{ meq/lto}$$

1= Tratada Planta Simas, sustituir los valores de Ca (Calcio) y Magnesio (Mg)

$$Na = 10 \times 1.30 - (3.44 + 2.88) = 6.68 \text{ meq/lto}$$

2= Cruda Planta Campestre, sustituir los valores de Ca (Calcio) y Magnesio (Mg)

$$Na = 10 \times 1.80 - (2.56 + 5.20) = 10.24 \text{ meq/lto}$$

2= Cruda Planta Campestre, sustituir los valores de Ca (Calcio) y Magnesio (Mg)

$$Na = 10 \times 1.80 - (6.0 + 4.0) = 8.0 \text{ meq/lto}$$

3= Cruda Planta SIDEAPA, sustituir los valores de Ca (Calcio) y Magnesio (Mg)

$$Na = 10 \times 1.10 - (2.80 + 2.56) = 5.64 \text{ meq/lto}$$

3= Cruda Planta SIDEAPA, sustituir los valores de Ca (Calcio) y Magnesio (Mg)

$$Na = 10 \times 1.20 - (3.44 + 1.60) = 6.96 \text{ meq/lto}$$

Para determinar la Relación Absorción de Sodio (RAS) se utilizó la siguiente fórmula=

$$RAS = Na \sqrt{(Ca + Mg) 2}$$

Dónde:

RAS= Relación de adsorción de sodio (adimensional);

Ca= Concentración de calcio en el agua (me/L)

Mg= Concentración de sodio en el agua (me/L)

1= Cruda Planta Simas, sustituir los valores de Sodio (Na), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

$$RAS = 6.84 \sqrt{(3.44 + 2.72)}^2 = 6.84/1.75 = 3.90$$

1= Tratada Planta Simas, sustituir los valores de Sodio (Na), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

$$RAS = 6.68 \sqrt{(3.44 + 2.88)}^2 = 6.68/1.77 = 3.77$$

2= Cruda Planta Campestre, sustituir los valores de Sodio (Na), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

$$RAS = 10.24 \sqrt{(2.56 + 5.20)}^2 = 10.24/1.96 = 5.22$$

2= Tratada Planta Campestre, sustituir los valores de Sodio (Na), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

$$RAS = 8.0 \sqrt{(6.0 + 4.0)}^2 = 8.0/2.23 = 3.58$$

3= Cruda Planta SIDEAPA, sustituir los valores de Sodio (Na), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

$$RAS = 5.64 \sqrt{(2.80 + 2.56)}^2 = 5.64/1.63 = 3.46$$

3= Tratada Planta SIDEAPA, sustituir los valores de Sodio (Na), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

$$RAS = 6.96 \sqrt{(3.44 + 1.60)}^2 = 6.96/1.58 = 4.40$$

Cuadro 4 Promedio de las concentraciones Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd)

TRATAMIENTO	Cu ppm	Pb ppm	Cd ppm
1= Cruda Planta Simas	0.0026	0.33	0.05
1= Tratada Planta Simas	0.092	0.36	0.046
2= Cruda Planta Campestre	0.19	0.48	0.155
2= Tratada Planta Campestre	0.0087	0.33	0.046
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.060	0.044	0.053
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.071	0.053	0.052

ppm: partes por millón

Cuadro 5 Concentración del Cobre (Cu) de las Plantas tratadoras en sus cuatro repeticiones

Cobre (Cu)	R1	R2	R3	R4
1= Cruda Planta Simas	0.0025	0.0028	0.0032	0.0022
1= Tratada Planta Simas	0.089	0.098	0.089	0.095
2= Cruda Planta Campestre	0.17	0.23	0.24	0.15
2= Tratada Planta Campestre	0.0092	0.0086	0.0085	0.0085
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.060	0.065	0.058	0.060
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.071	0.078	0.075	0.062

R= Repetición

Cuadro 6 Concentración del Plomo (Pb) de las Plantas tratadoras en sus cuatro repeticiones

Plomo (Pb)	R1	R2	R3	R4
1= Cruda Planta Simas	0.36	0.32	0.36	0.30
1= Tratada Planta Simas	0.36	0.35	0.40	0.34
2= Cruda Planta Campestre	0.45	0.49	0.51	0.47
2= Tratada Planta Campestre	0.36	0.32	0.36	0.30
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.044	0.042	0.048	0.040
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.063	0.050	0.056	0.042

R= Repetición

Cuadro 7 Concentración del Cadmio (Cd) de las Plantas tratadoras en sus cuatro repeticiones

Cadmio (Cd)	R1	R2	R3	R4
1= Cruda Planta Simas	0.04	0.05	0.02	0.09
1= Tratada Planta Simas	0.048	0.046	0.45	0.048
2= Cruda Planta Campestre	0.155	0.165	0.154	0.148
2= Tratada Planta Campestre	0.043	0.038	0.56	0.36
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.051	0.058	0.054	0.052
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.052	0.056	0.052	0.048

R= Repetición

Cuadro 8 Análisis de varianza Cobre (Cu)

Tratamiento	Media
1= Cruda Planta Simas	0.003
1= Tratada Planta Simas	0.093
2= Cruda Planta Campestre	0.198
2= Tratada Planta Campestre	0.009
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.061
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.072

Media aritmética o promedio

Cuadro 9 Análisis de varianza Plomo (Pb)

Tratamiento	Media
1= Cruda Planta Simas	0.335
1= Tratada Planta Simas	0.363
2= Cruda Planta Campestre	0.480
2= Tratada Planta Campestre	0.335
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.044
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.053

Media aritmética o promedio

Cuadro 10 Análisis de varianza Cadmio (Cd)

Tratamiento	Media
1= Cruda Planta Simas	0.050
1= Tratada Planta Simas	0.047
2= Cruda Planta Campestre	0.156
2= Tratada Planta Campestre	0.043
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.054
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.052

Media aritmética o promedio

Cuadro 11 Resultados del Cobre (Cu) de Pruebas de medias α al 0.05 nivel de significancia

Tratamiento	Media	Nivel de significancia 0.05
2= Cruda Planta Campestre	0.198	a
1= Tratada Planta Simas	0.093	b
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.072	bc
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.061	c
2= Tratada Planta Campestre	0.009	d
1= Cruda Planta Simas	0.003	d

Los promedios acompañados de la misma letra, son iguales entre sí

Cuadro 12 Resultados del Plomo (Pb) de Pruebas de medias α al 0.05 nivel de significancia

Tratamiento	Media	Nivel de significancia 0.05
2= Cruda Planta Campestre	0.480	a
1= Tratada Planta Simas	0.363	b
1= Cruda Planta Simas	0.335	b
2= Tratada Planta Campestre	0.335	b
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.053	c
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.044	c

Los promedios acompañados de la misma letra, son iguales entre sí

Cuadro 13 Resultados del Cadmio (Cd) de Pruebas de medias α al 0.05 nivel de significancia

Tratamiento	Media	Nivel de significancia 0.05
2= Cruda Planta Campestre	0.156	a
3= Cruda Planta SIDEAPA	0.054	b
3= Tratada Planta SIDEAPA	0.052	b
1= Cruda Planta Simas	0.050	b
1= Tratada Planta Simas	0.047	b
2= Tratada Planta Campestre	0.043	b

Los promedios acompañados de la misma letra, son iguales entre sí

El pH más alto fue en la Cruda Planta de Simas, con un 7.8, el límite máximo permisible oscila entre 6.5 y 8.5, mientras que el más bajo fue en la Tratada Planta SIDEAPA. La conductividad eléctrica más alta fue en la Cruda Planta Campestre y Tratada Planta Simas, y el bajo fue en la Cruda Planta SIDEAPA.

El HCO_3 fue más alto de concentración en 1= Tratada Planta Simas con 11.40 y más baja en la 3= Tratada Planta SIDEAPA con 5.04

El sodio fue alto en la Cruda Planta Campestre con un 10.24 y el más bajo fue en Cruda Planta SIDEAPA con 5.64.

Las mayores concentraciones de Cobre (Cu) se obtuvieron en 2= Cruda Planta Campestre con un 0.198, 1= Tratada Planta Simas con 0.093, mientras que la menor concentración fue en 1= Cruda Planta Simas con 0.003, y los cuales presentaron diferencias estadísticamente significativos entre sí. Cabe destacar que, ninguna de las plantas sobrepasa los límites máximos permisibles, ya que la NOM-002-SEMARNAT-1996 menciona que 15 es el límite máximo.

Las mayores concentraciones de Plomo (Pb) se obtuvieron en 2= Cruda Planta Campestre con 0.480, después 1= Tratada Planta Simas con 0.363, de ahí 1= Cruda Planta Simas con 0.335 y la de menor concentración fue 3= Cruda Planta SIDEAPA. Las concentraciones del Plomo (Pb) no sobrepasan los LMP establecidos por la NOM- 002-SEMARNAT-1996.

Las mayores concentraciones de Cadmio (Cd) se obtuvo en la 2= Cruda Planta Campestre con 0.156, después la plantas 3= Cruda Planta SIDEAPA con 0.054, y la de menor concentración fue 2= Tratada Planta Campestre con 0.043. Ninguna de las plantas sobrepasa los límites máximos permisibles, debido a que la NOM-002-SEMARNAT menciona que 0.75 es el límite máximo permisible.

Esto quiere decir que ninguno de los metales pesados, sobrepasa el límite en ninguna de las tres plantas de tratamiento. Por otro lado, la 2= Cruda Planta Campestre fue, el primer lugar en tener mayor concentración de metales.

Se observa que el 90 % de las muestras presentaron un pH entre 6.9 y 9, el rango de límites permisibles está entre 5 y 10 unidades para este parámetro, mientras que la conductividad eléctrica mostró, en el 85 % de las muestras, valores menores a $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$, lo que indica que el agua analizada, bajo el criterio de estos dos parámetros y desde el punto de vista agrícola, es recomendable de acuerdo con, con algunas restricciones para el 15 % de las muestras que presentaron elevados valores de CE, debido a que proceden de agua influenciada por agua marina y agua subterránea salina (Mancilla-Villa *et al.*, 2012).

La concentración de metales pesados que se determinó en este trabajo está influenciada por las condiciones de pH, debido a que dichos valores se encuentran entre 7;2 y 7;8 estos metales están menos disponibles. De acuerdo con lo que encontraron, en condiciones de alcalinidad en el agua, algunos metales se precipitan como hidróxidos insolubles y carbonatos. El pH es uno de los factores que afecta la acumulación y disponibilidad de los metales pesados, la mayoría está más disponible cuando el agua tiene pH ácido, mientras que, si este es alcalino, se precipitan. Por esta razón, la concentración de metales pesados en el agua fueron bajos, no obstante, la aplicación prolongada de esta agua al riego de cultivos agrícolas ocasiona la acumulación de metales en los suelos (Hernández-Torres *et al.*, 2016).

Se observa una correlación positiva entre 7 variables (ST, SST, CE, P, HCO_3 , Cl y K). El fósforo en el efluente puede estar de manera orgánica, presente en la materia orgánica y relacionarse con los sólidos totales. La presencia del potasio y el cloro en forma de sales puede formar el compuesto cloruro de potasio que es una sal y también correlacionarse con la cantidad de sólidos totales y además las sales disueltas influirían de forma importante con la CE, al igual que el HCO_3 . Este grupo explica el 12% de la varianza, el pH tiene una fuerte relación con el N, pues al haber fluctuaciones en el pH la actividad microbiana disminuye y por ende la disponibilidad del nitrógeno. Los carbonatos están relacionados con los sólidos disueltos totales. El componente 4. Está

conformado por grasas/aceites y RAS (relación de adsorción de sodio), aunque este último influye de manera negativa. Sólidos totales volátiles (STV), Zinc y Pb, son las variables que conforman el componente número 5, donde el Pb se relaciona de manera negativa. Y finalmente el componente 6, que explica 6% de la varianza, las variables se agrupan con sodio de manera negativa (Cueto-Wong *et al.*, 2020).

V. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, bajo las condiciones en que se llevó a cabo la presente investigación, se concluye que la concentración de metales pesados fue baja y cumple con los valores establecidos en la NOM-002 SEMARNAT-1996, sin embargo, la aplicación de esta agua al riego agrícola puede ocasionar la acumulación de metales pesados en el suelo a largo plazo y no se recomienda por su riesgo de salinidad.

El Cadmio (Cd) presentó las concentraciones y dispersiones de los datos más bajos, mientras que las más altas fueron el Plomo (Pb).

Finalmente, aunque el uso de esta agua en la agricultura es restringido, se recomienda evaluar su calidad microbiológica y realizar estudios en el punto de uso y producto final que tenga contacto con estas aguas, de esta manera, evaluar directamente el efecto en los cuerpos receptores.

El carbonato, se obtuvo considerando la acidez y la alcalinidad, según el pH de cada sitio, dado que en la mayoría de los sitios el pH rebasó valores mayores de 8.

VI. REFERENCIAS

- Afanador-Rico, O., J. Devia-González, H. E. González-Fragozo, Y. Moya-Salinas y C. Zabaleta-Solano 2020. "Efecto del riego con agua residual tratada sobre la calidad microbiológica del suelo y pasto King Grass." *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica* 23.
- Aga, D. S., L. F. Angelesa, D. M. Butryna, E. Garnerb, J. W. Metchb, R. R. Singh y P. J. Vikeslandb 2019. "Towards a harmonized method for the global reconnaissance of multi-class antimicrobials and other pharmaceuticals in wastewater and receiving surface waters." *Environment International* 124: 361-369.
- Alcantara, F., A. M. Aveiga Ortiz, A. De la Cruz, F. Peñarrieta y P. Noles 2019. "Variaciones físico-químicas de la calidad del agua del río Carrizal en Manabí." *Enfoque UTE* 10: 30-41.
- Alcorta-García, M. A., F. Cortés-Martínez, A. T. Espinoza-Fraire, J. G. Lozoya-Velez, J. A. Sáenz-Esqueda y A. Treviño-Cansino 2018. "Reglas para predecir el cumplimiento de la calidad del agua residual en una planta tratadora con minera de datos." *Inteligencia Artificial* 21: 13-24.
- Alvarez, B., o. Japa, N. Jaramillo y P. Méndez 2021. "Diversidad espacio-temporal de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua del Río Yuquipa." 1.
- Álvarez, C. I., S. E. Chicaiza-Ramírez, A. D. Ramos-López y L. J. Ramírez-Cando 2019. "Detección de antibióticos betalactámicos, tetraciclinas y sulfamidas como contaminantes emergentes en los Ríos San Pedro y Pita del Cantón Rumiñahui." *La Granja* 30: 88-102.
- Amabilis-Sosa, L. E., V. González-Huitrón, K. Ramírez, B. Ramírez-Pereda, M. A. Reyes-Prado, A. E. Rodríguez-Mata y P. M. Uriarte-Aceves 2022. "Recuperación de nutrientes y degradación de materia orgánica de agua residual agrícola por medio de un sistema UV/H2O2 optimizado." *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 38: 235-248.
- Angelaccio, C., M. Cipponeri, L. Gianuzzi y M. Monteverde 2013. "Origen y calidad del agua para consumo humano: salud de la población residente en el área de la cuenca Matanza-Riachuelo del Gran Buenos Aires." *SALUD COLECTIVA* 9.
- Arada-Pérez, M. d. I. A., C. Chibinda y N. Pérez-Pompa 2017. "Caracterización por métodos físico-químicos y evaluación del impacto cuantitativo de las aguas del Pozo la Calera." *Revista cubana de química* 29: 303-321.
- Arada-Pérez, M. d. I. Á., Arce-Castro, J., Benítez-Fernández, D., Rodríguez-de la Rosa, H., & Vilasó-Cadre, J. E. (2021). Método voltamperométrico para el análisis de cadmio en aguas residuales. *Revista cubana de química*, 33(3), 415-436.
- Barahona-Castillo, Y. M., J. A. Luna-Fontalvo y I. M. Romero-Borja 2018. "Calidad bacteriológica del agua de los ríos Manaure y Casacará, departamento del Cesar, Colombia." *Revista Luna Azul (On Line)*: 106-124.
- Barceló Quintal, I. D., J. C. Beltrán Rocha, J. García Albortante, M. García Martínez, L. J. Osornio Berthet y H. E. Solís Correa 2020. "Curvas de evolución del sistema CO₂ (ac)-HCO₃⁻-CO₃²⁻ en aguas del río Lerma y de la presa José Antonio Alzate." *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química* 2020.
- Bejarano-Ayala, S. A., N. Hernández-Medina, F. Machuca-Martínez y N. Mena-Guerrero 2019. "Tratamiento de aguas residuales provenientes de estaciones de gasolina mediante ozonización catalítica." *Ingeniería y competitividad* 21: 23-34.
- Belizario-Quispe, G., Calatayud-Mendoza, A. P., Chui-Betancur, H. N., Huaquisto-Cáceres, S., Quispe-Yana, R. F., & Yábar-Miranda, P. S. (2019). Concentración de metales pesados: Cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 36(2), 83-90.

- Benítez, R., Gallo, J., Pabón, S., & Sarria, R. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.
- Bergues-Garrido, P. S., A. d. I. C. Morell-Bayard y E. R. Portuondo-Ferrer 2015. "Valoración de los parámetros físico-químicos de las aguas del río San Juan en los períodos húmedo y seco de 2014." *Ciencia en su PC*: 1-12.
- Bolong, N., A. Ismailaseñor-Salimb y T. Matsuura 2019. "Una revisión de los efectos de los contaminantes emergentes en las aguas residuales y las opciones para su eliminación." *ELSEVIER* 239: 229-246.
- Cadme, M., J. García-González, M. Osorio-Ortega y R. Saquicela-Rojas 2021. "Water quality index determination in rivers of Santo Domingo de los Tsachilas, Ecuador." *Ingeniería del agua* 25: 115-126.
- Calderón Huamaní, D. F., J. J. Díaz Rodríguez y P. P. Huarancca Contreras 2019. "Tratamiento Aguas Residuales Mediante Tecnología de Microorganismos Eficientes-Substanjalla, Ica-Perú." *Revista de Investigación Científica* 1.
- Camacho-Ballesteros, A., Á. Can-Chulim, H. M. Ortega-Escobar y E. I. Sánchez-Bernal 2020. "Indicadores de calidad físico-química de las aguas residuales del estado de Oaxaca, México." *Terra Latinoamericana* 38: 361-375.
- Can-Chulim, Á., E. Cruz-Crespo, A. Madueño-Molina, M. I. Ortiz-Vega y C. A. Romero-Bañuelos 2019a. "Calidad del agua para uso agrícola del río Mololoa, México." *Terra Latinoamericana* 37: 185-195.
- Can-Chulim, Á., H. Flores-Magdaleno, O. R. Mancilla-Villa, H. M. Ortega-Escobar, J. P. Pérez-Díaz, C. Ramírez-Ayala y E. I. Sánchez-Bernal 2019b. "Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo." *Acta universitaria* 29.
- Cáñez-Cota, A. 2022. "Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México: diagnóstico y desafíos de política pública." *Tecnología y ciencias del agua* 13: 184-245.
- Carreño-Ortiz, J., Y. M. Díaz-Cárdenas, K. Y. Espinosa-Balta, J. S. Fernández-Sarmiento y S. P. Olano-Delgado 2019. "Evaluación fisicoquímica y microbiológica del agua del Caño Córdoba del Municipio de Arauca." *Revista Competitividad e Innovación* 1: 33-40.
- Carrillo-Barahona, W. E., X. A. Loor-Lalvay, J. H. Negrete-Costales, M. A. Osorio-Rivera y E. J. Riera-Guachichulca 2021. "La calidad de las aguas residuales domésticas." *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional* 6: 228-245.
- Castañeda-Villanueva, A. A. y H. E. Flores-López 2014. "Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México." *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad* 4: 33.
- Castañeda Casas, M. A., L. C. Corrales Ramírez, D. A. Luccioli Peña y Y. N. Santamaria Mosquera 2021. "Evaluación de la calidad del agua de la vereda Río Suárez de Puente Nacional, Santander." *Nova* 19: 79-98.
- Castellanos Onorio, O. P., M. d. R. Castañeda Chávez, F. Lango Reynoso, M. Á. López Ramírez, J. Montoya Mendoza, B. Ortiz Muñiz y C. A. Sosa Villalobos 2021. "Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión." *Enfoque UTE* 12: 76-87.
- Castro-Pastrana, L., M. Cerro-López, L. Gómez-Oliván, M. Saldívar-Santiago y M. Toledo-Wall 2021. "Análisis de fármacos en aguas residuales de tres hospitales de la ciudad de Puebla, México." *Ingeniería del agua* 25: 59-73.

- Caviedes-Rubio, D. I., D. R. Delgado y A. Olaya-Amaya 2017. "Normatividad ambiental dirigida a regular la presencia de los productos farmacéuticos residuales en ambientes acuáticos." *Revista Jurídica Piélagus* 16: 121-130.
- Ceballos Freire, Á. J. 2020. "Evaluación de eficiencia del sistema domiciliario para abastecimiento de agua segura, corregimiento San Fernando, Nariño." *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 11: 95-115.
- Cervantes Gallegos, M., L. Flores Ramos, A. Oscanoa Huaynate y A. Ruiz Soto 2021. "Evaluación del potencial de *Desmodesmus asymmetricus* y *Chlorella vulgaris* para la remoción de nitratos y fosfatos de aguas residuales." *Revista peruana de biología* 28.
- Concha, M. C. y E. P. Sosa 2021. "Efecto del vertimiento de las aguas residuales del Riachuelo Torococha en la calidad del agua del Río Coata en periodo de Avenidas Ciudad de Juliaca 2018." *Revista Científica Investigación Andina* 21.
- Chávez-Ortiz, J., F. Corroto y D. Leiva-Tafur 2016. "Caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas residuales en la ciudad de Chachapoyas, Región Amazonas." *Ciencia Amazónica:(Iquitos)* 6: 16-27.
- Chávez, C., V. García-Sánchez, N. Morales-Durán y A. d. I. Torre-González 2018. "Estudio de la calidad bacteriológica y parámetros fisicoquímicos del agua del Distrito de Riego 023." *Tecnología y ciencias del agua* 9: 53-67.
- Cueto-Wong, J. A., F. V. Galindo Pardo, J. L. García Hernández, M. d. R. Jacobo-Salcedo, D. G. Reta Sánchez y C. Vázquez-Vázquez 2020. "Caracterización de aguas residuales tratadas de la comarca lagunera y su viabilidad en el riego agrícola." *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 11: 189-201.
- Daza-Castro, E. A., J. M. Pérez-Royero y L. M. Nier-Contreras 2022. "Diseño de un sistema de depuración con algas verdes como alternativa de tratamiento de aguas residuales en el Río Chiriaimo." *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.
- Deago, E., Y. Melgar y N. Tejedor 2021. "Diagnóstico de acueductos rurales abastecidos de fuentes subterráneas: caso de estudio El Calabacito, Provincia de Herrera, Panamá." *I+D Tecnológico* 17.
- Duque-Sarango, P., C. Heras-Naranjo, D. Lojano-Criollo y T. Vilorio 2018. "Modelamiento del tratamiento biológico de aguas residuales; estudio en planta piloto de contactores biológicos rotatorios." *Revista ciencia UNEMI* 11: 88-96.
- Fernández-Rodríguez, M. y R. M. Guardado-Lacaba 2021. "Evaluación del Índice de Calidad del Agua (ICASup) en el río Cabaña, Moa-Cuba." *Minería y Geología* 37: 105-119.
- Galvín, R. M. 2014. "Control de calidad en las aguas residuales y regeneradas: parámetros a controlar en función de las normativas aplicables y nuevas tendencias." *Tecnoaqua* 5: 50-63.
- García-Ubaque, C. A., J. Pardo-Pinzón y J. P. Rodríguez-Miranda 2015. "Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales." *Tecnura* 19: 149-164.
- García Moreno, M. E., L. Huallpara Lliully y M. Ormachea Muñoz 2017. "Evaluación de la calidad de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de las aguas residuales de la ciudad de la paz, Bolivia." *Revista Boliviana de Química* 34: 104-111.
- Gemini, V., S. Korol, A. Magdaleno, J. Moretton, H. Muzio, M. Paz y S. Rossi 2004. "Aguas residuales de un Centro Hospitalario de Buenos Aires, Argentina: Características químicas, biológicas y toxicológicas." *Hig. Sanid. Ambient* 4: 83-88.

- Gómez-Torres, L., L. Salazar-Larrota, L. Uribe-García y C. Zafra-Mejía 2019. "Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales." *Dyna* 86: 319-326.
- González-Pérez, E., H. Ortega-Escobar, A. Rodríguez-Guillen y M. Yáñez-Morales 2019. "Diagnóstico de indicadores de calidad físico-química del agua en afluentes del río Atoyac." *Tecnología y ciencias del agua* 10: 30-51.
- Guzmán-González, C. A., A. E. Madrigal-Olveira, V. H. Romero-Arellano y B. C. Sulbarán-Rangel 2019. "Nanomateriales celulósicos para la adsorción de contaminantes emergentes." *Tecnura* 23: 13-20.
- Hernández-Morales, I., J. Marrugo-Negrete y R. Paternina-Urbe 2020. "Contenido de metales pesados en sedimentos y peces provenientes de las ciénagas Marimonda y El Salado en Antioquia, Colombia." *Gestión y Ambiente* 23.
- Hernández-Torres, I. M., López-Cervantes, R., Peña-Cervantes, E., & Pérez-Díaz, J. P. (2016). Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada. *Idesia (Arica)*, 34(1), 19-25.
- Iriarte, M. M. 2019. "Indicadores de calidad del agua residual doméstica descargada en la franja litoral de la Laguna de Punta de Piedras, Isla de Margarita, Venezuela." *Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales* 77: 51-63.
- Jacobo-Marín, D. y G. De León-Santacruz 2021. "Contaminantes emergentes en el agua: Regulación en México, principio precautorio y perspectiva comparada." *Revista de Derecho Ambiental* 1: 51-75.
- Jaimes-Urbina, J. A. y J. A. Vera-Solano 2020. "Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización." *Informador Técnico* 84: 249-263.
- Ledezma-Elizondo, M. T., L. A. Ramírez-Barragán y N. L. Rivera-Herrera 2018. "Exclusión social y vulnerabilidad por riesgo en el abastecimiento del agua en Nayarit, México." *Realidades Revista de la Facultad de Trabajo Social y Desarrollo Humano* 8: 19-44.
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., RAMOS-BELLO, R., REYES-ORTIGOZA, A. L., & USCANGA-MORTERA, E. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 39-48.
- Mateo-Pérez, V., J. M. Mesa-Fernández, M. Terrados-Cristos y J. Villanueva-Balsera 2021. "Mejora del pretratamiento de una EDAR mediante la predicción de parámetros del agua de entrada."
- Milla, M., E. Morales, L. Quiñones y J. Reyes 2019. "Efecto del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en la depuración del agua residual del colector Santa Lucía-Chachapoyas." *Revista Ciencia y Tecnología* 15: 19-25.
- Montañez, M. N., A. P. Patiño, E. Z. Ríos y J. Rodríguez 2019. "Caracterización fisicoquímica del agua de la quebrada La Toma, de la ciudad de Neiva, Huila, Colombia." *Teknos revista científica* 19: 27-36.
- Muñoz-Navarro, S. F., C. A. Quiroga, H. I. Quintero-Pérez, C. A. Torres-Camacho y Á. Villar-García 2022. "Potenciales impactos de HPAM residual de un proceso de inyección de polímero en el comportamiento de los fluidos de producción." *Dyna* 89: 203-209.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. (2022). from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. (2008). from <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf>

Orduz, S., C. J. Pedroza-Padilla y M. Romero-Tabarez 2017. "Actividad lipolítica de microorganismos aislados de aguas residuales contaminadas con grasas." *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial* 15: 36-44.

Rincón-Silva, N. G. 2017. "Evaluación de parámetros físico-químicos del agua en el proceso de potabilización del río Subachoque." *Revista Tecnogestión* 13.

Sánchez-Barboza, L. 2015. "Control borroso para la valoración del impacto ambiental generado por contaminantes emergentes en aguas residuales hospitalarias." *Revista Gestión y Ambiente* 18: 81-93.

Vidal-Álvarez, M. 2018. "Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables." *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable* 3: 41-58.