



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE OAXACA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE OAXACA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

TESIS PROFESIONAL

**ADAPTACIÓN DE TÉCNICAS NORMATIVAS
PARA CUANTIFICAR LA CONTAMINACIÓN
MICROBIOLÓGICA Y FISICOQUÍMICA DEL
RÍO ATOYAC EN OAXACA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTAN:

ALEXIA ESPERANZA CRUZ ARANJO

JOSÉ SEBASTIÁN GÓMEZ LÓPEZ

ASESOR:

DR. LUIS JAVIER TOLEDO FLORES

COMISIÓN REVISORA:

DR. MARCO ANTONIO SÁNCHEZ MEDINA

MTRA. MINERVA DONAJÍ MÉNDEZ LÓPEZ

MTRO. ENRIQUE MÉNDEZ SUMANO

OAXACA DE JUÁREZ, OAXACA

MAYO 2021

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme permitido llegar hasta donde estoy ahora, por ser mi apoyo, mi luz y mi camino.

A mis padres Jorge y Leiva, por haber confiado en mí, por el apoyo incondicional, por no haber desistido, por sus sacrificios, por sus sabios consejos, por siempre darme ánimos, los amo inmensamente.

A mis hermanitos Brian y Aldo por ser mi impulso a ser un buen ejemplo, por su cariño y comprensión.

A mis abuelos; mamá Chin y papá Cheo por brindarme siempre su apoyo incondicional, por sus consejos, por preocuparse por mí y aunque papá Cheo ya no está físicamente en este mundo, siempre vivirá en mi corazón. ¡Papá Cheo, lo logré, ya soy ingeniera!

A todos mis tíos, gracias por sus palabras de aliento, por su apoyo incondicional.

A mis primas, por sus consejos, su compañía, por su tiempo, gracias por ser mis hermanas mayores.

A mis amigos por haber estado conmigo en tiempos difíciles, por acompañarme y secarme las lágrimas y algunas de ellas a la distancia.

A mis profesores de la carrera por todas sus enseñanzas, por hacer que reafirmara el amor por esta hermosa carrera.

Y, por último, pero no menos importante, al Doctor Toledo por brindarme la oportunidad de trabajar con él, brindándome el apoyo incondicional, gracias por todas sus enseñanzas

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	2
CONTENIDO	3
INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVOS	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos.....	8
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	9
1.1 Río Atoyac	9
1.1.1 Historia	10
1.1.2 Situación actual.....	10
1.2 Contaminación Ambiental	11
1.2.1 Contaminación Atmosférica	12
1.2.2 Contaminación de Suelos	18
1.2.3 Contaminación del Agua	22
1.3 Aguas Residuales	26
1.3.2 Composición de las Aguas Residuales	28
1.4 Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales	35
1.4.1 Tratamiento Primario.....	36
1.4.2 Tratamiento Secundario	37
1.4.3 Tratamiento Terciario	39
1.5 Descargas de Aguas Residuales	39
1.5.1 Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.....	40
1.5.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)	41
1.5.3 Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de descarga de aguas residuales.....	42
CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	48
2.1 Muestreo.....	48
2.2 Determinaciones Microbiológicas y Parasitológica	49
2.2.1 Organismos Coliformes Fecales y Totales.....	50
2.2.2 Huevos de helminto.....	50
2.3 Determinación de Parámetros Fisicoquímicos.....	51
2.3.1 Temperatura.....	51
2.3.2 Materia flotante	52
2.3.3 Caudal.....	52
2.3.4 Oxígeno disuelto (OD).....	52
2.3.5 Dureza.....	53
2.3.6 Sólidos disueltos totales	53
2.3.7 pH.....	53
2.3.8 Turbiedad	54
2.3.9 Sólidos sedimentables	54

2.3.10 Sólidos suspendidos	55
2.3.11 Grasas y aceites	55
2.3.12 Nitrógeno.....	56
2.4 Determinación de Metales	56
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
3.1 Febrero 2019	58
3.2 Abril 2019.....	62
3.3 Junio 2019	66
3.4 Agosto 2019.....	70
3.5 Septiembre 2019.....	73
3.6 Octubre 2019	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS.....	82

INTRODUCCIÓN

En Oaxaca, específicamente en la región de los Valles Centrales, se encuentra el río Atoyac, uno de los principales cuerpos de agua el cual presenta niveles de contaminación sumamente altos por las descargas de aguas residuales de la ciudad y de los municipios ubicados a orillas de su cauce, por ello han surgido diversas alternativas para tratar de reducir el dilema en cuestión. En épocas anteriores el río había sido utilizado como fuente principal de suministro de agua de los pobladores y tenía un cauce mucho mayor al que actualmente posee. Hoy en día el agua es usada en algunos terrenos de cultivo como agua de riego a pesar de los riesgos que puedan presentarse por el uso de un agua tan contaminada.

Las autoridades han hecho caso omiso de esta problemática y sólo las organizaciones civiles son las que han tomado cartas en el asunto, como Litigio Estratégico Indígena A.C., presidido por Carlos Morales Sánchez, quienes consiguieron un amparo para el cuidado de los ríos Atoyac y Salado ante el Poder Judicial de la Federación (PJF), en el cual se dictaminan las acciones que deberán cumplir las autoridades competentes (Matías, 2018). Además de esto, se han sumado a la iniciativa universidades públicas como la Universidad de Chapingo, la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO) y el Instituto Tecnológico de Oaxaca con el propósito de apoyar a la causa, realizando los distintos análisis dentro de sus intermediaciones.

El agua es un recurso no renovable y conforme avanzan los años se ha podido observar como las fuentes que proveen este líquido se han visto amenazadas por la sobre explotación y la contaminación generada por las mismas personas. Aunado a todo esto, la región de los Valles Centrales enfrenta un gran problema de escasez de agua y, de acuerdo a un artículo publicado en el periódico La Jornada (Rivas, 2017), desde 1967 se decretó veda de agua subterránea para evitar el despilfarro y mal uso de este recurso.

Debido a lo mencionado anteriormente, activistas han demandado a los tres niveles de Gobierno la planeación y ejecución de proyectos y acciones para la recuperación integral del río. Por tal motivo se inició un proyecto que lleva por título: “Evaluación de la contaminación microbiológica y fisicoquímica del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca” autorizado por el Tecnológico Nacional de México en la convocatoria 2019 con clave: ITI6A521.

Se sabe que la contaminación es una problemática que afecta la calidad de vida y es necesario tomar acciones, cambiar y sensibilizar a la población respecto al tema. En los últimos años se ha visto un incremento significativo de la contaminación en el río Atoyac, debido al aumento de la densidad poblacional. El Organismo de Cuenca Pacífico Sur de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), menciona que el problema de contaminación que existe en el Río Atoyac se debe a las descargas de aguas residuales sin previo tratamiento, las cuales cruzan las zonas urbanas de la ciudad de Oaxaca de Juárez y municipios conurbados. Esto ha provocado que las concentraciones de microorganismos patógenos sean muy altas, así como malos olores, materia flotante presente, presencia de grasas y aceites, entre otros factores.

La presente investigación se enfocó en cuantificar los niveles de contaminación del río Atoyac, que al atravesar la ciudad de Oaxaca de Juárez genera una mala imagen para las personas que año tras año visitan la ciudad para disfrutar de sus atractivos turísticos. Personas con viviendas cercanas a los cauces del río, reclaman que durante las noches los olores tan fuertes provenientes del Atoyac son imposibles de soportar. Además, señalan que es posible observar como las personas durante el día arrojan sus desechos a las orillas del río e incluso, dentro de él. Por ello se realizó este trabajo y con el propósito de concientizar a las personas y autoridades sobre el gran impacto ambiental que estas actividades provocan a los recursos naturales, que en este caso se trata del río Atoyac.

Con base en lo anterior, se realizó el montaje y adaptación de las técnicas normativas para la cuantificación de los niveles de contaminación del río Atoyac en base al equipamiento y materiales con que se cuentan en el Instituto Tecnológico de Oaxaca. Asimismo, se buscó la optimización de los tiempos y costos en la ejecución de los análisis y la reducción de los riesgos que conlleva el trabajo en los laboratorios de microbiología y química.

OBJETIVOS

Objetivo General

Adaptar las técnicas microbiológicas y fisicoquímicas de la normatividad oficial mexicana para cuantificar los niveles de contaminación microbiológica y fisicoquímica del río Atoyac con la finalidad de optimizar los tiempos de análisis y los recursos materiales disponibles.

Objetivos Específicos

- a) Adecuar las técnicas microbiológicas y fisicoquímicas incluidas en la NOM-001-SEMARNAT-1996, para cuantificar los niveles de contaminación del río Atoyac en Oaxaca.
- b) Proponer alternativas para los materiales y reactivos utilizados en las técnicas anteriores, que sean de menor costo, menor riesgo y mayor disponibilidad.
- c) Sugerir las técnicas más apropiadas para la cuantificación de los contaminantes microbiológicos y fisicoquímicos en aguas residuales.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Río Atoyac

El Río Atoyac, considerado como uno de los cinco afluentes más importantes de la entidad oaxaqueña, nace entre las montañas de las regiones de la Mixteca y Valles Centrales, a escasos 60 kilómetros de la Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO). Los escurrimientos de los mantos acuíferos que provienen de las zonas boscosas de los municipios de Santiago Huatlilla, San Jerónimo Sosola, Santa Catarina Tlaxila, Santiago Nacaltepec y Santiago Tenango, dan origen a la formación de este río considerado por los especialistas como la arteria aorta de la entidad. En los parajes conocidos como Cañada Las Sedas y Cañada Ocotal, en el municipio de San Francisco Telixtlahuaca, se forman las primeras corrientes cristalinas que bajan por la periferia del municipio hasta el paraje denominado La Joya (Pineda, 2019a).

A 1.5 kilómetros aguas abajo de la estación hidrométrica Oaxaca, se le incorpora otro Río que lleva el mismo nombre y que nace al Sur del Municipio de Villa Díaz Ordaz, Estado de Oaxaca, donde toma el nombre de Arroyo Grande, a una elevación aproximada de 2,600 metros sobre el nivel medio del mar; en su trayecto también recibe varios nombres hasta su confluencia con el río del mismo nombre, en general mantiene una dirección hacia el Oeste, con una longitud acumulada de 66 kilómetros. El Río Atoyac continúa su dirección hacia el Sur del estado cruzando Zimatlán, Tlapacoya, Amatengo y Coatlán hasta la estación hidrométrica Paso Ancho, a 16 kilómetros aguas debajo de esa estación, y a una elevación aproximada de 1,300 metros sobre el nivel medio del mar, cambia de dirección hacia el Oeste hasta el Municipio de Santa Cruz Zenzontepec e Ixtayutla donde recibe las aportaciones del Río Yolotepec o Verde (SEMARNAT, 2017).

1.1.1 Historia

El río Atoyac fue uno de los recursos más importantes con que contó Monte Albán durante su época de mayor esplendor, fue la principal fuente de agua con la que satisfacían sus necesidades básicas como beber, cocinar, lavar, bañarse, además de su uso en la elaboración de adobes y mezclar mortero y estuco. Ahora el río Atoyac no es más que un arroyo menor comparado con el gran río que cruzaba el valle cuando Monte Albán estuvo habitada. En esa época no había presas, desviaciones, bombas con motor o grandes pueblos y asentamientos que redujeran el flujo del río Atoyac.

Los zapotecos ancianos tienen recuerdos vívidos de los altos bosques que existían a lo largo del río Atoyac. Dicen que el río estaba bordeado por enormes tules o sabinos (*Taxodium mucronatum*), árboles gigantescos que vivían miles de años. Sabemos que había sabinos junto al río porque sus troncos se usaron como columnas en algunos de los templos de Monte Albán Época II (100 a.C.-200 d.C.). Tristemente estos sabios magníficos prácticamente han desaparecido de las riberas: fueron talados para usar la madera en construcción o como leña. Sólo siguen creciendo sabinos en ciertos lugares sobre el río Atoyac y sus tributarios (Marcus, 2008).

1.1.2 Situación actual

El crecimiento urbano es un problema que afecta significativamente a la contaminación del río Atoyac ya que cada vez existe una mayor generación de residuos, que en la mayoría de las ocasiones termina en los cauces del río a través del sistema de drenaje de la ciudad, aunado a esto existe un cambio en el uso de los suelos que, junto con la generación de residuos, desemboca en la pérdida de la vegetación original y que la calidad del agua sea gravemente afectada ocasionando una alerta ambiental considerable.

Para el Instituto de la Naturaleza y la Sociedad de Oaxaca (INSO), no se exagera al afirmar que la situación es de emergencia en cuanto a la contaminación de sus mantos acuíferos, dado que las aguas negras de la mayoría de las comunidades de la sierra y la propia ciudad de Oaxaca no reciben tratamiento alguno antes de alcanzar los ríos y arroyos. Los severos impactos de salud, ambientales y económicos pueden admitirse fácilmente si se sabe que el río Atoyac es considerado uno de los ríos más contaminados del país, expone la organización civil (Hernández, 2019).

Existe un problema más que agrava fuertemente la situación del río: la extracción de material pétreo. Esto causa que la recuperación del mismo sea más difícil, puesto que interfiere en el proceso natural de filtración del agua. Esta situación es visible en el trayecto hacia el puente de Soledad, Etla, uno de los sitios de estudio del presente proyecto, en donde es posible observar las grandes cantidades de grava y arena extraídas del afluente a sus orillas y siendo transportadas por los camiones para ser comercializada.

Diversos grupos ambientalistas y activistas han demandado el saneamiento del río Atoyac, alertan que la disminución en la calidad del agua en éste repercute en posibles afectaciones a la salud de la población, por lo que es necesario realizar las investigaciones correspondientes y así poder contar con un diagnóstico oportuno que proyecte una línea de trabajo que contribuya a la limpieza del afluente y aumente el reúso e intercambio de agua tratada por agua de primer uso (Pineda, 2019b).

1.2 Contaminación Ambiental

Se entiende por contaminación a la presencia o incorporación al ambiente de sustancias o elementos tóxicos que son perjudiciales para el hombre o los ecosistemas. La contaminación del aire, agua y suelo están muy relacionadas entre

sí y no se pueden separar de un medio a otro. Los contaminantes son emitidos por fuentes que pueden ser naturales o artificiales. Las fuentes artificiales pueden ser estacionarias o móviles. Una vez emitida al ambiente, los contaminantes sufren una serie de procesos, no solo de transporte y dispersión, sino también reacciones químicas, los cuales son contaminantes secundarios. La concentración de un contaminante después de ser dispersado es el nivel de inmisión y tiene unidades de masa por unidad del volumen. Los contaminantes alcanzan los receptores a través de diversos mecanismos provocando diferentes efectos en ellos (Encinas, 2011).

1.2.1 Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica es la presencia de sólidos, líquidos, o gases en concentraciones nocivas para los seres vivos (personas, animales, la vegetación) que interfiere con la calidad de vida (Velásques, 1985). Existen diferentes tipos de contaminación, visibles e invisibles, que contribuyen al calentamiento global. El dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero, es el contaminante que está causando en mayor medida el calentamiento en la Tierra, este contaminante está asociado con coches, aviones, centrales eléctricas y otras actividades humanas que requieren combustibles fósiles. Durante los últimos 150 años, la cantidad de dióxido de carbono ha sido suficiente para aumentar de manera significativa los niveles de éste en la atmósfera (National Geographic, 2010).

Existen dos tipos de contaminantes principales: primario y secundarios. Un contaminante primario se agrega directamente al aire y se presenta en una concentración nociva; puede ser un componente natural del aire que sobrepasa la concentración normal como el dióxido de carbono, o puede ser otro que no se encuentra normalmente en el aire, como los componentes de plomo. Un contaminante secundario es una sustancia nociva que se forma en la atmósfera a través de una reacción química entre los componentes del aire. Los problemas serios o agudos de contaminación del aire se presentan generalmente sobre una

ciudad o alguna otra área que emita niveles altos de contaminantes durante un periodo de calma del aire (Velásques, 1985).

Fuentes de contaminación atmosférica. Las fuentes antropogénicas de contaminación atmosférica (o fuentes emisoras) son básicamente de dos tipos.

Estáticas: pueden subdividirse en fuentes zonales (producción agrícola, minas, canteras y zonas industriales), fuentes localizadas y zonales (fábricas de productos químicos, productos minerales no metálicos, industrias básicas de metales, centrales de generación de energía) y fuentes municipales (p. ej. Calefacción de viviendas y edificios, incineradoras, servicios de lavanderías y plantas de depuración).

Móviles: como los vehículos de motor de combustión (p. ej., vehículos ligeros con motor de gasolina, vehículos pesados y ligeros con motor Diesel, motocicletas, aviones incluyendo fuentes lineales con emisión de gases y partículas del conjunto del tráfico de vehículos). También existen fuentes naturales de contaminación (p. ej., zonas erosionadas, volcanes, ciertas plantas que liberan grandes cantidades de polen, focos bacteriológicos, esporas o virus) (Stellman J. J., 1998).

Tipos de contaminantes

Contaminantes primarios: son vertidos directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como chimeneas, automóviles, entre otros. Algunos contaminantes que forman parte de este grupo son:

Óxidos de azufre (SO_x). Se forman por la combustión del azufre presente en el carbón y el petróleo. Los SO_x forman con la humedad ambiente aerosoles, incrementando el poder corrosivo de la atmosfera, disminuyendo la visibilidad y provocando lluvia ácida.

Monóxido de carbono (CO). Es el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera. Se produce por la combustión incompleta de compuestos de carbono. Alrededor del 70 por ciento del CO provienen de los vehículos.

Óxidos de nitrógeno (NO_x). Se producen en la combustión de productos fósiles, destacando los vehículos, carbón y quemas de madera. La producción de fertilizantes y explosivos, tabaco y calderas generan emisiones importantes de NO_x. El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) requiere de especial atención.

Partículas. Es materia respirable presente en la atmósfera en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento, polen, entre otras). De acuerdo a su tamaño se pueden dividir en dos grupos principales: las de diámetro aerodinámico igual o inferior a los 10 µm (PM₁₀) y las de fracción más pequeña (PM_{2.5}).

Hidrocarburos. Las emisiones de HC están asociadas a la mala combustión de derivados del petróleo. Las fuentes más importantes de emisión son el transporte por carretera, los disolventes, pinturas, vertederos y la producción de energía. Los de mayor interés son los compuestos orgánicos volátiles (COV), dioxinas, furanos, bifenilos policlorados (PCB) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH).

Contaminantes secundarios. Son contaminantes originados en el aire como consecuencias de la transformación y de reacciones químicas. Algunos de ellos son:

Ozono (O₃). Como se mencionó anteriormente el O₃ forma parte de la composición de la atmósfera, sin embargo, a baja altura (O₃ troposférico) resulta perjudicial por

su carácter oxidante, reactivo, corrosivo y tóxico, por lo que reacciona con rapidez generando compuestos secundarios.

Lluvia ácida. Es el término que se ha usado para describir el proceso por el cual ciertos ácidos se forman en la atmósfera a partir de contaminantes y luego se precipitan a la tierra. El pH de la lluvia es de alrededor de 6 mientras que la lluvia ácida presenta un pH menor a 5.

Contaminación fotoquímica. La constituyen la luz solar y sustancias susceptibles de ser oxidadas. El smog fotoquímico es una mezcla de contaminantes que se forman por reacciones producidas por la luz solar al incidir sobre los contaminantes primarios (SEMARNAT, 2013).

La contaminación del aire representa un importante riesgo ambiental para la salud de los países desarrollados o en los países en desarrollo. Se estima que la contaminación del aire fue causa de 4.2 millones de muertes prematuras anualmente en todo el mundo (WHO, 2018). La mayoría de las muertes atribuidas a la contaminación atmosférica en la población general están relacionadas con enfermedades no transmitibles. El 36% de las muertes por cáncer de pulmón, el 35% de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (COPD), el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 27% de las cardiopatías isquémicas son atribuidas a la contaminación atmosférica (OPS, s.f.).

Consecuencias de la contaminación del aire

Lluvia ácida: debido a la acumulación de vapores y gases tóxicos; el aire se contamina de forma directa con una gran proporción de ácidos que van cayendo en el agua de las lluvias; permitiendo dañar desde las tierras; hasta los cultivos. La lluvia ácida erosiona los suelos; así como las esculturas, edificaciones y monumentos, dando origen a daños ambientales y humanos. Este tipo de lluvia

recorre grandes distancias con ayuda de la velocidad de los vientos antes de precipitar.

Efecto invernadero: este fenómeno se caracteriza por la inclusión de varios tipos de gases dentro de la capa atmosférica, esto hace que el calor que emana de la Tierra quede retenido. La temperatura de la Tierra se mantiene más cálida, rebotando sobre la superficie terrestre y quedando atrapado por mucho tiempo.

Salud respiratoria: con el paso de los años se ha podido determinar que el aire contaminado influye de manera directa en el funcionamiento del sistema respiratorio; siendo un factor que influye en los ataques cardíacos, cáncer pulmonar, enfermedad pulmonar obstructiva crónica. La constante exposición a la contaminación del aire no solo deteriora la salud física sino también la salud mental, reduciendo la memoria y genera problemas de coordinación y bajo rendimiento físico.

Lesiones en la piel: debido al contacto directo de la piel con los gases contaminantes se incrementa desmesuradamente el riesgo a la aparición de cáncer de piel. Y no solo se trata del contacto directo con los gases contaminantes, sino también la exposición de la piel a los rayos solares.

Efecto smog: también es llamado efecto boina, el cual se origina como consecuencia de una combinación de sustancias contaminantes en el aire y situaciones anticiclónicas, que involucra que las capas más bajas de aire (Ilustración 1.2.1) y las más pesadas y más densas queden estancadas y que la niebla, cargada de polución, no se disipe en un largo tiempo (Cumbre Pueblos, 2017).



Ilustración 1.2.1 Contaminación del aire en Oaxaca de Juárez, Oaxaca.
Fuente: Martínez, 2019.

Contaminación intradomiciliaria

Los compuestos que forman parte de la contaminación atmosférica pueden también contaminar el aire ambiental intradomiciliario. Las principales fuentes de contaminación del aire intradomiciliario son el tabaquismo, la quema inadecuada de combustibles, el hacinamiento, la convivencia y cohabitación con animales domésticos. Las personas más afectadas por la contaminación intradomiciliaria son los niños menores de dos años de edad, los ancianos, los enfermos y las mujeres y sus hijos que utilizan estufas tradicionales de biomasa para cocinar y calentarse. La calidad del aire en espacios cerrados es multifactorial dependiendo de los hábitos de los moradores, de su nivel socioeconómico, del intercambio de aire con el exterior y de la remoción de los contaminantes (Oyarzún G., 2010) (OPS, s.f.).

Los contaminantes intradomiciliarios (tabla 1.2.1), pueden diferenciarse según su origen en productos derivados de la combustión, agentes biológicos y subproductos, y misceláneos.

Tabla 1.2.1 Contaminantes intradomiciliarios

Derivados de la combustión	Agentes biológicos y subproductos
Humo de tabaco	Virus, bacterias, hongos y protozoos
Humo de leña	Mascotas: perros y gatos
Dióxido de nitrógeno	Insectos, ácaros, pólenes
Monóxido de carbono	Misceláneos
Dióxido de carbono	Compuestos orgánicos volátiles (COV) y radón

Fuente: G., 2010.

1.2.2 Contaminación de Suelos

El suelo es un componente esencial del ambiente en el que se desarrolla la vida; es vulnerable, de difícil y larga recuperación, está compuesto por minerales, materia orgánica, microorganismos, vegetales, animales (Silva Arroyave & Correa Restrepo, 2009). El suelo actúa como amortiguador natural que controla el transporte de elementos y sustancias químicas de la atmósfera, la hidrosfera y la biota. La “Carta Europea de Suelos” define el suelo como uno de los más preciados activos de la humanidad sobre el que viven seres vivos, es calificado como recurso limitado que se destruye con facilidad y que debe ser protegido de la erosión, contaminación, el daño que puede causar el desarrollo humano, las prácticas agrícolas y silvícolas (Marín Solano, 2005).

El suelo contaminado es aquel cuya calidad ha sido alterada como consecuencia del vertido directo e indirecto de residuos o productos tóxicos y peligrosos. Los

compuestos utilizados en la agricultura son los principales causantes de la contaminación del suelo, tales como insecticidas, herbicidas, abonos nitrogenados. Los lixiviados resultantes de la mala gestión de los vertederos y de la descarga incontrolada de desechos procedentes de los hogares, las plantas industriales y la minería pueden contener metales pesados como mercurio y arsénico, oligometales, compuestos orgánicos y productos farmacéuticos como antibióticos y microorganismos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2017).

Todas aquellas actividades realizadas por humanos, como el crecimiento demográfico, la migración hacia áreas urbanas y suburbanas generan presión constante en los suelos, causando la reducción de la capacidad para sostener ecosistemas naturales o modificados, para mantener o restablecer la calidad del aire y del agua para así mejorar la calidad de vida para los humanos.

Existen tres tipos de contaminación que han sido clasificadas debido a las modificaciones de la acción humana:

Contaminación física, con variaciones en parámetros como temperatura y radiactividad.

Contaminación biológica, al inducir la proliferación de especies o cepas patógenas o ajenas a los microorganismos presentes en el suelo de forma natural.

Contaminación química: por adición de elementos o compuestos en concentraciones que alteren la composición original del suelo, este tipo de contaminación es la predominante (Ruda de Schenquer, Mongiello, & Acosta, 2004).

A continuación, se presenta la clasificación de los contaminantes del suelo.

Metales pesados: la presencia natural de los metales en el suelo es en cantidades traza como productos de la propia geoquímica de los materiales de los que

proceden, siendo muchos de ellos elementos esenciales para la vegetación y la fauna. El riesgo potencial que su presencia provoca se produce cuando se acumulan en grandes cantidades en el suelo.

Contaminantes inorgánicos: los contaminantes inorgánicos presentes en los suelos de forma natural están en concentraciones reguladas por los ciclos biológicos asociados a cada suelo. Cuando se presenta una sobresaturación de alguno de ellos hace que se alcancen concentraciones consideradas como contaminantes, alterando los ciclos de regulación.

Contaminantes orgánicos: los contaminantes orgánicos constituyen un grupo formado por un elevadísimo número de sustancias, con gran diversidad estructural y efectos diferentes en el medio, siendo muchas de ellas altamente tóxicas. Entre otros, pueden destacarse los compuestos aromáticos, hidrocarburos policíclicos, hidrocarburos clorados, pesticidas, etc.

Residuos: el suelo es el vertedero por excelencia de los residuos producidos por el hombre. A medida que la sociedad fue creciendo industrialmente, los residuos generados son mayores a la par que más peligrosos. Se consideran focos potenciales de contaminación por el tiempo que necesitan para su degradación, se pueden clasificar según sus características:

Residuos inertes: no presentan riesgos para el medio ambiente. Se pueden utilizar como relleno de tierras.

Residuos urbanos: se consideran que son residuos fermentables (materia orgánica) y combustibles (papel, cartón, madera, gomas, cueros y trapos, etc.).

Residuos especiales: son los residuos tóxicos y peligrosos, radiactivos o biosanitarios especiales. Por sus características, suponen un grave riesgo para la salud humana y el medio ambiente, requiriendo un tratamiento particular y

específico, así como un mayor control en su transporte y eliminación (Ruda de Schenquer, y otros, 2004).

Los suelos son complejos y variados. Una buena observación de un perfil de suelo permite identificar propiedades como el color, olor, textura, estructura, entre otras. En seguida se presentan las propiedades físicas del suelo:

Estructura del suelo. Las partículas textuales del suelo como arena, limo y arcilla se asocian para formar agregados y unidades de mayor tamaño nombrados por peds. Los peds se separan unos de otros a lo largo de zonas de debilidad, creando huecos (poros) que son importantes para la retención de agua y drenaje. La estructura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión.

La textura del suelo. Se refiere a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla. La textura es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades. Todas las partículas menores a 2 mm de diámetro, aproximadamente hasta arenas muy gruesas, se consideran parte del suelo.

Color del suelo. El color del suelo depende de sus componentes y varía con el contenido de humedad materia orgánica presente y grado de oxidación de minerales presentes. Se usa para distinguir las secuencias del suelo, determinar el origen de materia parental, presencia de materia orgánica, estado de drenaje y la presencia de sales y carbono. Entre las diferentes tonalidades se pueden encontrar desde coloraciones amarillentas a rojizas (de suelos con alto contenido ferroso y férrico), los suelos negros ricos en materia orgánica, o los colores pálidos y blanquecidos de suelos con silicatos y óxidos de aluminio (Lenoir & Tornari, 2004) (FAO, s.f.).

1.2.3 Contaminación del Agua

El concepto de contaminación del agua indica un estado cualitativo de impureza o suciedad de las aguas hidrológicas de una cierta región, tal como cuenca hidrográfica. Esto es consecuencia de una situación o un proceso que reduce la utilidad de las aguas de nuestro planeta, especialmente por sus efectos en la salud humana y el medio ambiente. El proceso de contaminación conlleva una pérdida de pureza como consecuencia de la intrusión o el contacto de una fuente externa. El ensuciamiento es una de las consecuencias de la contaminación y sugiere violación y profanación (Stellman J. M., 1998).

Hay cuatro focos principales de contaminación antropogénica: la industria, los vertidos urbanos, la navegación, la agricultura y ganadería. Estos focos de contaminación alteran algunas propiedades del agua, tanto propiedades físicas, químicas como biológicas. Y esos parámetros (Tabla 1.2.3), son los que se miden para determinar la calidad del agua.

Tabla 1.2.3 Parámetros del agua que pueden ser alterados por un contaminante.

FÍSICOS	QUÍMICOS	BIOLÓGICOS
Color	pH	
Olor y sabor	O ₂ disuelto (OD)	
Conductividad	DBO ₅ , DQO, COT	Bacterias coliformes
Temperatura	Nitrógeno total	Virus
Materias en suspensión	Fósforo total	Microorganismos
Radiactividad	Aniones: Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , S ²⁻ , CN ⁻ , F ⁻	Animales
Espumas	Cationes: Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺	Plantas
	Metales pesados	
	Compuestos orgánicos	

Fuente: (Encinas , 2011).

El agua se contamina cuando se descargan residuos que perjudican el equilibrio ecológico natural. Los contaminantes pueden ser organismos patógenos, materia

orgánica, sustancias inorgánicas, disueltas o en partículas sólidas, nutrientes, sustancias tóxicas, color, calor y materiales radiactivos.

Patógenos. Surgen usualmente por efecto directo o indirecto de cambios en el medio ambiente y en la población tales como urbanización no controlada, crecimiento industrial, pobreza, ocupación de regiones antes deshabitadas, y la disposición inadecuada de excretas humanas y animales (Ríos Tobón, Agudelo Cadavid, & Gutiérrez Builes, 2017).

Materia orgánica (DBO). Cuando mayor es la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) mayor es la cantidad de materia orgánica que puede ser biodegradada por las bacterias, que necesitan oxígeno para realizar ese trabajo. Esta situación hace descender el OD (oxígeno disuelto) del agua y puede llevarlo a valores tan críticos que provoque la mortandad de los peces. Si el OD sigue bajando, se pueden producir olores por la actividad microbiana anaeróbica.

Sólidos. Las partículas de materia orgánica e inorgánica pueden ser sólidos sedimentables, flotantes y en suspensión capaz de formar depósitos de variadas características, pero generalmente con color y olor desagradable, mientras que el particulado en suspensión reduce la penetración de la luz solar en el agua, afectando procesos biológicos que dependen de ella.

Nutrientes. Los nitratos y fosfatos que proceden de aguas cloacales son nutrientes inorgánicos que favorecen el crecimiento de plantas y algas. Además de su efecto antiestético por su color y aspecto, las algas pueden ser tóxicas, perjudicar el sabor del agua, obstruir los filtros y aumentar las necesidades químicas en el tratamiento del agua.

Sustancias tóxicas y peligrosas. Pequeñas concentraciones de ácidos, cianuros, arsénicos, metales pesados y numerosas sustancias químicas son tóxicas para los organismos incluyendo a los humanos, y por supuesto a la población bacteriana que se utiliza en el tratamiento de líquidos residuales. Los materiales radiactivos son

dañinos para la vida biológica y son bioacumulativos, pero como estos materiales son empleados con muchas normas de seguridad, es muy raro encontrarlos en el agua (Orellana, 2015).

El grado de contaminación se puede medir física, química y biológicamente, los cuales se describen a continuación.

Físicos. Estos parámetros dan una información clara de determinadas características del agua, como son el pH, los sólidos en suspensión, color, olor, sabor, temperatura, turbidez, conductividad, etc.

Químicos. Estos pueden ser de origen orgánico e inorgánico. La contaminación inorgánica abarca todos los cationes, aniones, metales traza, determinados índices de contaminación, etc. Pueden encontrarse de diversas formas, como macroconstituyentes, elementos traza o incluso de manera esporádica, como consecuencia de la contaminación. La contaminación orgánica es el grupo más amplio y complejo, abarcando por un lado indicadores del contenido orgánico en general, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno, Carbono Orgánico Total, o bien otros como aceites y grasas, plaguicidas, etc. (Félez, 2009).

Microbiológicos. Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis, diversas hepatitis, etc. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños. Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua (Barba Ho, 2002).

Contaminación del agua atmosférica. El agua atmosférica puede estar en forma de vapor de agua, como líquido suspendido en las nubes, cayendo en forma de

lluvia, nieve o granizo. El agua que se precipita es casi pura, pero a medida que se desplaza por la atmósfera, absorbe gases presentes en la misma, generalmente oxígeno y anhídrido carbónico, también arrastra partículas de polvo, humo, bacterias, esporas y otros contaminantes en suspensión atmosférica. Es por eso que en los lugares en donde la contaminación atmosférica es muy grande, la precipitación de una lluvia, limpia la atmosfera, pero contamina el agua de lluvia y a través de los desagües a las aguas superficiales. Un caso muy conocido es la lluvia ácida que se produce cuando las precipitaciones pluviales arrastran los contaminantes en suspensión en especial azufres que producen ácidos.

Contaminación del agua superficial. Las aguas de lluvia, nieve o granizo por escorrentía o escurrimiento terminan su recorrido en aguas subterráneas y una gran mayoría en las aguas superficiales. Las aguas superficiales, comprendidas por arroyos, ríos, lagos, mares y océanos. Estas son las aguas más utilizadas por los hombres y los animales, por lo que son más fáciles de contaminar. Esta agua se contamina principalmente por acciones antrópicas, ya sean industriales, agrícolas ganaderas o residenciales. Los volcados de efluentes de las industrias y los desagües cloacales a las aguas superficiales, pueden derivar que las mismas sean contaminadas de tal manera que las vuelvan inapropiadas para ser reutilizables y en algunos casos totalmente nocivas. También se le atribuye a la actividad agrícola, debido al uso de fertilizantes industriales y agroquímicos o pesticidas, que se deposita en el suelo, estos pueden ser arrastrados por la lluvia a las aguas superficiales, por lo que las características de las aguas, varía de acuerdo a la composición de los suelos que los rodean, están presentes entonces: calcio, magnesio, sulfatos, nitratos, sodio y potasio como los elementos más comunes.

Contaminación de aguas subterráneas. El agua de las precipitaciones, nieve y granizo, como también la de cursos (ríos) y masas acumuladas (lagos y embalses) penetran a través del suelo conformando las aguas subterráneas. El agua subterránea se desplaza por las porosidades del terreno y por gravedad va descendiendo hasta encontrar estratos impermeables y a partir de allí, si estos

estratos tienen pendiente se desplazan en ese sentido. Esta es también la ruta que siguen los contaminantes que se encuentran en el suelo o sedimentados en los cursos o masas de agua. Los contaminantes pueden ser tanto orgánicos (sustancias y bacterias) como inorgánicos y siempre las aguas más afectadas son las que están más cerca de la superficie dado que el elemento que transporta los contaminantes es el agua y esta no pasa por los estratos impermeables. Esto parece proteger y preservar los acuíferos confinados y en realidad es así siempre y cuando no existan perforaciones para extraer esa agua confinada, ya que es en estos puntos por donde puede ingresar la contaminación a un acuífero confinado (Orellana, 2015).

1.3 Aguas Residuales

Se denomina agua al líquido transparente, incoloro, inodoro e insípido en estado puro, cuyas moléculas están formadas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, y que constituye el componente más abundante de la superficie terrestre y el mayoritario de todos los organismos vivos. Fórmula: H_2O (RAE, 2018).

Las aguas residuales son aquellos líquidos procedentes de las actividades desarrollados por el ser humano, caracterizadas por presentar una fracción de agua y un elevado porcentaje de residuos contaminantes (Pino & Calderón, 2015).

Definido por la FAO, como: agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar. Las aguas de refrigeración no se consideran aguas residuales (FAO, 2019).

Y según la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, se denomina agua residual a 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 (SEMARNAT, 1997).

Aguas residuales urbanas. Aquellas aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial (García, y otros, 2006). La composición de las aguas residuales urbanas es muy variable y depende de muchos factores. Se componen fundamentalmente de aguas residuales domésticas, que tienen una contaminación predominantemente orgánica. Ello hace que las aguas residuales urbanas sean biodegradables, es decir, que pueden ser depuradas mediante tratamientos biológicos (Vilanova, Santín, & Pedret, 2017).

Aguas residuales domésticas. Las aguas domésticas son aguas provenientes de las lavadoras, regaderas, tinas y lavabos. Son aguas residuales que tuvieron un uso ligero, que pueden contener jabón, cabello, suciedad o bacterias, pero que están suficientemente limpias para regar las plantas (Allen, 2015).

Aguas residuales industriales. Las aguas residuales industriales son todas aquellas aguas residuales vertidas desde locales, utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial (García, y otros, 2006).

Aguas residuales pluviales. Son aguas procedentes de escorrentía de las precipitaciones caídas en la zona objeto de estudio por las distintas superficies: techos, calles, jardines, parques, etc. Las precipitaciones pueden ser en forma sólida (nieve y granizo) o líquida (lluvias). Su composición se caracteriza por la presencia de: hollín, polvo de ladrillo y cemento, esporas, polvo orgánico e inorgánico, restos de animales y vegetales, partículas sólidas e hidrocarburos. Los componentes de estas aguas se caracterizan por su alta toxicidad en los primeros 15 min. El componente más tóxico son los hidrocarburos procedentes de los combustibles de los automóviles. La composición del agua residual pluvial variará

en función del uso del suelo, pues arrastrará un tipo diferente de partículas. Si las precipitaciones son abundantes se favorecerá la dilución de los contaminantes que arrastra (Pino y otros, 2015).

1.3.2 Composición de las Aguas Residuales

La composición de las aguas residuales puede ser muy variables, pues dependen de muchos factores que son importantes para identificar el tipo de tratamiento que se debe empelar. Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. Muchos de los parámetros tienen relación entre sí, por ejemplo, una propiedad física como la temperatura afecta a la actividad biológica (Metcalf y otros, 1995).

1.3.2.1 Propiedades Fisicoquímicas.

Las características físicas más importantes de agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba a la materia en suspensión, la materia sedimentable y la materia disuelta. Otras características importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad.

Sólidos. Se define sólidos a la materia que permanece como residuo después de evaporación y secado a 103°C. Incluye toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos. En ingeniería sanitaria es necesario medir la cantidad de material sólido contenido en una gran variedad de sustancias líquidas y semilíquidas que van desde aguas potables hasta aguas contaminadas, aguas residuales, residuos industriales y lodos producidos en los procesos de tratamientos.

Sólidos totales. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto (sólidos suspendidos). Para su determinación, la muestra se evapora en una cápsula previamente pesada, preferiblemente de platino o porcelana, sobre un baño

de María y luego se seca a 103 – 105 °C, el incremento de peso, sobre el peso inicial, representa el contenido de sólidos totales o residuo total.

Sólidos disueltos (o residuo filtrable). Son determinados directamente o por diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos. Si la determinación es directa se filtra una muestra a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio en un crisol Gooch; el filtrado se evapora en una cápsula de peso conocido sobre un baño de María y el residuo de la evaporación a 103 - 105 °C. el incremento de peso sobre la cápsula vacía representa los sólidos disueltos o residuos filtrables.

Sólidos suspendidos (residuo no filtrable o material no disuelto). Son determinados por filtración a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol Gooch previamente pesado. El crisol con su contenido se seca a 103 - 105 °C; el incremento de peso, sobre el peso inicial, representa el contenido de sólidos suspendidos o residuo no filtrable.

Sólidos volátiles y sólidos fijos. En aguas residuales y lodos, se acostumbra a hacer una determinación con el fin de obtener una medida de la cantidad de materia orgánica presente. La determinación de sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles es importante para evaluar la concentración o “fuerza” de aguas residuales para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento biológico secundario.

Sólidos sedimentables. La denominación se aplica a los sólidos en suspensión que sedimentarán, bajo condiciones tranquilas, por acción de la gravedad. La determinación de sólidos sedimentables es básica para establecer la necesidad del diseño de tanques de sedimentación como unidades de tratamiento y para controlar su eficiencia (Rojas, 1999).

Turbiedad. La turbiedad en el agua es causada por materia suspendida, como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, compuestos orgánicos coloreados, plancton y otros microorganismos. Turbiedad es una

expresión de la propiedad óptica que hace que la luz se disperse y se absorba en lugar de transmitirla en línea recta a través de la muestra. La correlación de la turbiedad con la concentración en peso de materia suspendida es difícil porque el tamaño, forma e índice de refracción de las partículas también afectan a las propiedades de dispersión de la luz (S. Clesceri, y otros, 1989).

La determinación de la turbiedad es de gran importancia en aguas para consumo humano, los valores de turbiedad sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y, consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación y filtración, así como para determinar la potabilidad del agua (Cruz, 2008).

pH. Medida de la concentración de ion hidrógeno en el agua, expresada como el logaritmo negativo de la concentración molar de ion hidrógeno. Aguas residuales en concentración adversa del ion hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras y eventualmente son fatales para los microorganismos. Aguas con pH menor de seis, en tratamiento biológico, favorece el crecimiento de hongos sobre las bacterias. A pH bajo el poder bactericida del cloro es mayor porque predomina el HOCl; a pH alto la forma predominante del nitrógeno amoniacal es la forma gaseosa no iónica (NH_3), la cual es tóxica, pero también removible mediante arrastre con aire, especialmente a pH de 10.5 a 11.5 el valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6.5 a 8.5. En las aguas residuales duras, cuando el pH aumenta, puede predominar la alcalinidad por carbonatos e hidróxidos y producirse la precipitación del carbonato de calcio, lo cual impide que el pH siga aumentando (Rojas, 1999).

Temperatura. La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dado que el

calor específico del agua es mucho mayor que el del aire durante la mayor parte del año, y solo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano. En función de la situación geográfica, la temperatura media anual del agua residual entre 10 y 21 °C la temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles. Por otro lado, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y los 35 °C (Metcalf, y otros, 1995).

Grasas y aceites. Son los compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como de hidrocarburos del petróleo que son extraídos de la muestra utilizando hexano (o éter de petróleo) como solvente (SCFI, 2014).

El contenido de grasas y aceites en los residuos domésticos, en algunos residuos industriales y en los lodos se debe de considerar para su manipulación y tratamiento hasta su disposición final. Al aceite y la grasa se les concede especial atención por su escasa solubilidad en el agua y su tendencia a separarse de la fase acuosa. A pesar de que esas características son una ventaja para facilitar la separación del aceite y la grasa mediante el uso de sistemas de flotación, su presencia complica el transporte de los residuos por las tuberías, su eliminación en unidades de tratamiento biológico y su disposición en las aguas receptoras (Barba Ho, 2002).

Oxígeno disuelto. El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que esta disuelta en el agua y que es esencial para los riachuelos y lagos saludables. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuan contaminada está el agua y cuan bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiados bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir.

Además, la cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua (OD) depende de la temperatura también. El agua fría puede guardar más oxígeno que el agua caliente. Una diferencia en los niveles de OD también puede ser aparente a diferentes profundidades del agua si hay un cambio significativo en la temperatura del agua (Peña Pulla, 2007).

Dureza. Como parámetro de medida de ciertos cationes importantes presentes en muestras de agua, los químicos analíticos utilizan a menudo el índice de dureza, el cual mide la concentración total de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , que son las dos especies principales de la dureza del agua de suministro. Experimentalmente la dureza puede determinarse valorando una muestra de agua con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), que es una sustancia que forma complejos muy fuertes con iones metálicos, excepto con los metales alcalinos. Tradicionalmente, la dureza se expresaba, no en concentración molar de iones, sino como la masa en miligramos (por litro) de carbonato de calcio que contiene el mismo número de iones disociados (+2). La dureza es una característica importante de las aguas, ya que los iones de calcio y el magnesio forman sales insolubles con los aniones de los jabones, formando una “espuma” en el agua de lavado. Un agua se denomina “dura” si contiene concentraciones significativas de iones calcio y/o magnesio; por lo tanto, según esto un agua calcárea es “dura” (Baird, 2004).

1.3.2.2 Metales Pesados

Arsénico. Un severo envenenamiento puede surgir de la ingestión de tan solo 100 mg de arsénico; los efectos crónicos pueden aparecer de su acumulación en el cuerpo a bajos niveles de consumo. Propiedades carcinógenas también se le han atribuido al arsénico. La concentración de arsénico de la mayoría de las aguas potables raramente excede 10 $\mu\text{g/L}$, a pesar de que han sido reportados valores tan altos como 100 $\mu\text{g/L}$. El arsénico puede aparecer en el agua como resultado de una

disolución mineral, descargas industriales, o la aplicación de insecticidas (S. Clesceri, y otros, 1989).

Cadmio. El cadmio es altamente tóxico y ha sido implicado en algunos casos de envenenamiento a través de la ingesta en la comida. Se sospecha de que cantidades mínimas de cadmio son responsables de cambios adversos en arterias de riñones humanos, el cadmio también causa cáncer en algunos animales de laboratorio y ha sido vinculado epidemiológicamente con ciertos cánceres humanos. Una concentración de cadmio de 200 µg/L es tóxico para ciertos peces, el cadmio puede ingresar al agua como resultado de descargas industriales o el deterioro de tuberías galvanizadas.

Cobre. Las sales de cobre son usadas en sistema de suministro de agua para controlar el crecimiento biológico en reservorios y tuberías de distribución y para catalizar la oxidación de manganeso. La corrosión de las aleaciones que contienen cobre en las tuberías puede producir cantidades medibles de cobre en el agua de un sistema de tuberías. El cobre es esencial para los humanos, el requerimiento diario en adultos ha sido estimado en 2.0 mg.

Cromo. La concentración del cromo hexavalente del agua para el consumo humano en los Estados Unidos ha sido reportada en un rango de 3 a 40 µg/L con una media de 3.2 µg/L. Las sales de cromo son usadas extensivamente en procesos industriales y pueden entrar a suministros de agua a través de la descarga de desechos. Los componentes cromados frecuentemente son agregados al agua de enfriamiento para el control de la corrosión, el cromo puede existir en suministros en ambos estados, el hexavalente y el trivalente, a pesar de que la forma trivalente raramente se encuentra en el agua potable.

Plomo. El plomo es un veneno serio que se acumula en el cuerpo, las aguas naturales raramente contienen más de 5 µg/L, a pesar de que han sido reportados valores muy altos. El plomo en suministros de agua puede venir de descargas

industriales, mineras y hornos de fundición o de la disolución de plomerías viejas de plomo. Las aguas del grifo que son suaves, ácidas y no tratadas adecuadamente pueden contener plomo resultado de un ataque a las tuberías de servicio de plomo (S. Clesceri, y otros, 1989).

1.3.2.3 Biológica

Coliformes. Los organismos patógenos que pueden existir en las aguas residuales son, generalmente, pocos y difíciles de aislar e identificar. Por esta razón se prefiere utilizar a los coliformes como organismo indicador de contaminación o, en otras palabras, como indicador de la existencia de organismos productores de enfermedad. El hombre arroja diariamente, en sus excrementos, entre 10^9 y 4×10^{11} coliformes; por tanto, su presencia puede detectarse con facilidad y utilizarse como norma de control sanitario. Las bacterias coliformes son bacilos gram-negativos, aerobios y facultativos anaerobios, no formadores de esporas, que fermentan la lactosa con producción de gas en 48 ± 3 h a 35 o 37°C. El grupo de coliformes totales, grupo coli-aerogenes, incluye los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*. En general, se considera el género *Escherichia*, especie *E. coli*, como la población de bacterias coliformes más representativa de contaminación fecal (Rojas, 1999).

Huevos de helminto. Diversos autores a nivel mundial han evaluado el uso de los huevos de helmintos como indicadores de contaminación fecal. Estos se han detectado en diferentes matrices ambientales relacionadas con la reutilización del agua residual o con la disposición de biosólidos provenientes de las depuradoras, por lo que el contacto de los agricultores o los consumidores puede resultar en su infección con agentes patógenos. El riesgo se genera por el contacto directo con el agua residual contaminada, los biosólidos y los alimentos regados con dicha agua o cultivados en suelos donde se han utilizado biosólidos como enmienda orgánica. Los huevos de helmintos se encuentran en el ambiente y son de gran importancia en salud pública, debido a su mínima dosis infectiva y a su alta resistencia a diversas

condiciones ambientales, como la temperatura, el pH y la humedad, así como a la desinfección con cloro. Se les utiliza, asimismo, como indicadores de la presencia de parásitos por contaminación fecal en aguas residuales tratadas, y en lodos y biosólidos generados por sistemas de tratamiento. Los géneros más predominantes son *Ascaris*, *Trichuris*, *Ancylostoma* e *Hymenolepis* (Campos, y otros , 2018).

1.4 Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento de las aguas residuales es una práctica que, si bien se lleva realizando desde la antigüedad, hoy por hoy resulta algo fundamental para mantener nuestra calidad de vida. Son muchas las técnicas de tratamiento con larga tradición y, evidentemente, se ha mejorado mucho en el conocimiento y diseño de las mismas a lo largo de los años. Pero no por eso han dejado de ser técnicas imprescindibles a la hora de tratar aguas industriales, y son las que, de una forma rápida.

A la hora de revisar los tratamientos unitarios más convencionales no resulta fácil establecer una clasificación universal. Una de las formas más utilizadas es en función de los contaminantes presentes en el agua residual, o también en función del fundamento del tratamiento (químico, físico o biológico). Una forma de intentar aunar ambas formas de clasificación puede ser considerar que los contaminantes en el agua pueden estar como materia en suspensión, materia coloidal o materia disuelta (Fernández-Alba, y otros, 2006).

La selección de los procesos de tratamientos de aguas residuales o la serie de procesos de tratamiento depende de un cierto número de factores, entre los que se incluyen:

- a) Características del agua residual: DBO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- b) Calidad del efluente de salida requerido.

- c) Coste y disponibilidad de terrenos; p. ej., ciertos tratamientos biológicos (lagunaje, estanques de estabilización) son económicamente viables únicamente en el caso de que se disponga de terrenos de bajo coste.
- d) Consideración de las futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estrictos, que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro.

Coste local del agua; p. ej. ciertos tratamientos sofisticados (p. ej. ósmosis inversa) podrían justificarse en determinadas regiones en que el coste del agua es elevado, y estarían fuera de lugar en regiones de bajo coste del agua (Ramalho, 2003).

1.4.1 Tratamiento Primario

El tratamiento primario del agua residual consiste en la eliminación de la materia insoluble como arenas, grasas y espumas del agua. El primer paso en el tratamiento primario normalmente es la tamización o cribado. En él se eliminan los sólidos grandes que entran en el sistema de alcantarillado. Estos materiales, con excepción de las arenas y materiales similares, se interceptan en tamices y se recogen para la posterior evacuación y disposición controlada. La mayoría de los tamices se limpian con rastrillos mecánicos. Los dispositivos trituradores desmenuzan y muelen los sólidos presentes en las aguas residuales. El tamaño de las partículas puede reducirse a tal extremo que éstas puedan devolverse al flujo de las aguas residuales.

Las arenas y otras partículas sólidas en las aguas residuales que no se biodegradan bien, generalmente tiene una alta velocidad de sedimentación. Su eliminación se realiza para prevenir su acumulación en otras partes del sistema de tratamiento, reducir la obstrucción de cañerías y de otras partes para proteger las partes móviles de la abrasión y el desgaste. La arenisca normalmente se deja sedimentar en un

tanque bajo condiciones de baja velocidad de flujo y se elimina mecánicamente del fondo del tanque (Manahan, 2007).

1.4.2 Tratamiento Secundario

Una vez eliminados de un 40 a un 60% de los sólidos en suspensión y reducida de un 20 a un 40% la DBO₅ por medios físicos en el tratamiento primario, el tratamiento secundario reduce la cantidad de materia orgánica en el agua. Por lo general, los procesos microbianos empleados son aeróbicos, es decir, los microorganismos actúan en presencia de oxígeno disuelto. El tratamiento secundario supone, de hecho, emplear y acelerar los procesos naturales de eliminación de los residuos. En presencia de oxígeno, las bacterias aeróbicas convierten la materia orgánica en formas estables, como dióxido de carbono, agua, nitratos y fosfatos, así como de otros materiales orgánicos. La producción de materia orgánica nueva es un resultado indirecto de los procesos de tratamiento biológico, y esta materia debe eliminarse antes de descargar el agua en el cauce receptor (Soledad, 2009).

El tratamiento biológico de aguas residuales se lleva a cabo mediante una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre los que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes solubles en el agua. Estos procesos aprovechan la capacidad de los microorganismos de asimilar la materia orgánica y los nutrientes (nitrógeno y fósforo) disueltos en el agua residual para su propio crecimiento. Cuando se reproducen, se agregan entre ellos y forman unos flóculos macroscópicos con suficiente masa crítica como para decantar en un tiempo razonable (Tuset, 2019).

La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen nitrógeno y fósforo. Es uno de los tratamientos más habituales, no

solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales, por su sencillez y su bajo coste económico de operación (Tuset, 2019).

El tratamiento secundario puede llevarse a cabo por distintos procedimientos, siendo los más usuales los procesos aerobios y los anaerobios.

Los procesos aerobios se realizan en presencia de oxígeno por lo que es necesario introducirlo en los tanques donde están las aguas residuales. En esta etapa ocurre parte de la degradación de la materia orgánica, de la que se desprende agua y CO_2 , y también la eliminación de los productos nitrogenados. El amonio, derivado del nitrógeno muy tóxico, se transforma en nitrato en una reacción llamada nitrificación. Ahora bien, el nitrato, aunque ya no es tóxico es una forma asimilable del nitrógeno y, por tanto, podría provocar una proliferación de algas y el enriquecimiento en nutrientes de las aguas en el medio receptor (eutrofización), por lo que mediante la desnitrificación este se convierte en nitrógeno y se libera a la atmósfera (García-Astillero, 2018).

Los procesos anaerobios son un proceso de transformación y no de destrucción de la materia orgánica, como no hay presencia de un oxidante en el proceso, la capacidad de transferencia de electrones de la materia orgánica permanece intacta en el metano producido. En vista de que no hay oxidación, se tiene que la DQO teórica del metano equivale a la mayor parte de la DQO de la materia orgánica digerida (90 a 97%), una mínima parte de la DQO es convertida en lodo (3 a 10%). En las reacciones bioquímicas que ocurren en la digestión anaerobia, solo una pequeña parte de la energía libre es liberada, mientras que la mayor parte de esa energía permanece como energía química en el metano producido (Rodríguez V., sf).

1.4.3 Tratamiento Terciario

El efluente de un tratamiento secundario puede estar todavía insuficientemente depurado para determinados usos, siendo precisa una serie de procesos que se agrupan bajo el nombre de tratamiento terciario. Este se lleva a cabo para eliminar fundamentalmente la materia orgánica que no ha sido retenida en el tratamiento biológico, o bien, que no es biodegradable, y las sales inorgánicas disueltas, entre las que destacan el nitrógeno y el fósforo, que son dos de los máximos responsables de la eutrofización de los cursos y depósitos de agua. (Pérez, s.f)

El tratamiento terciario (al que se conoce también como «tratamiento avanzado») es la serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario descrito previamente. Existen los siguientes tipos de tratamiento terciario: separación de sólidos en suspensión, adsorción en carbón activo (separación de compuestos orgánicos), intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, oxidación química (cloración y ozonación), métodos de eliminación de nutrientes (eliminación de nitrógeno y fósforo), y proceso «Sonozone» para la purificación de aguas residuales. Muchos de estos procesos, actualmente no se emplean normalmente en el tratamiento de las aguas residuales, pero su empleo a mayor escala está previsto conforme las exigencias de calidad de los efluentes se hagan más estrictas en el futuro (Ramalho, 2003).

1.5 Descargas de Aguas Residuales

La descarga consiste en verter, inyectar, depositar o infiltrar aguas residuales a un cuerpo receptor, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-14-1980, se consideran cuerpos receptores de competencia federal a todo río, cuenca, vaso o depósito de agua que sea objetivo, directo o indirecto de descarga de aguas residuales. El vertido de aguas residuales sin tratamiento a cualquier cuerpo

receptor puede llegar a constituir una amenaza latente al medio ambiente si no se administran de forma adecuada (Domos Agua, 2018).

La legislación en materia de descarga de aguas residuales en México está dada por la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, así como las Normas Oficiales Mexicanas en materia de descarga de aguas residuales como son: NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-001-SEMARNAT-1996.

1.5.1 Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento

Esta ley publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 1° de diciembre de 1992 en su artículo 88 indica que las personas físicas y morales requieren de un permiso emitido por “la Autoridad del Agua” para verter de manera permanente o intermitente aguas residuales en cuerpos receptores que sean aguas nacionales o demás bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como cuando se infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos cuando puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos (CONAGUA, 1992).

El control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y al alcantarillado es competencia de los municipios con participación de los estados si fuese necesario y lo determinen las leyes.

Además, en su artículo 88 Bis dictamina los puntos que deberán cumplir las personas físicas o morales que descarguen aguas residuales a los cuerpos receptores, se muestran a continuación algunos de los puntos mencionados en dicho artículo:

- I. Contar con el permiso de descarga de aguas residuales mencionado en el Artículo anterior;

- II. Tratar las aguas residuales previamente a su vertido a los cuerpos receptores, cuando sea necesario para cumplir con lo dispuesto en el permiso de descarga correspondiente y en las Normas Oficiales Mexicanas;
- III. Cubrir, cuando proceda, el derecho federal por el uso o aprovechamiento de bienes de propiedad nacional como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales;
- IV. Instalar y mantener en buen estado, los aparatos medidores y los accesos para el muestreo necesario en la determinación de las concentraciones de los parámetros previstos en los permisos de descarga;
- V. Hacer del conocimiento de “la Autoridad del Agua” los contaminantes presentes en las aguas residuales que generen por causa del proceso industrial o del servicio que vienen operando, y que no estuvieran considerados en las condiciones particulares de descarga fijadas (CONAGUA, 1992).

1.5.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

La LGEEPA publicada el 28 de enero de 1988 en el DOF, es el eje rector del sistema jurídico ambiental de México cuya inspección y fiscalización recaen en la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), excepto lo relacionado con el agua. En los artículos del 117 al 133 correspondientes al Capítulo III: Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos, establece los criterios que deberán cumplirse en materia de prevención y control de la contaminación de los cuerpos acuáticos de competencia federal, las obligaciones de las personas físicas y morales con respecto a las descargas de aguas residuales a los cuerpos colectores (Presidencia de la República, 1988).

1.5.3 Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de descarga de aguas residuales

Este apartado consta de tres normas principales que establecen los límites máximos permisibles en cuanto a la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores, las cuales son: la NOM-001-SEMARNAT-1996, la NOM-002-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Esta NOM establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales (SEMARNAT, 1997).

Los límites máximos permisibles para descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, no deben ser superiores a los indicados en las tablas 1.5.3., 1.5.3.1. y 1.5.3.2, las cuales se presentan a continuación.

Tabla 1.5.3 Límites máximos permisibles de contaminantes patógenos y parasitarios

Coliformes fecales (NMP/100 ml)				Huevos de helminto (h/l)	
AGUAS Y BIENES NACIONALES		SUELOS		SUELOS	
P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	R.R.	R.N.R
1000	2000	1000	2000	1	5

P.D.= Promedio Diario, P.M.= Promedio Mensual

R.R.= Riego Restringido, R.N.R= Riego No Restringido

Tabla 1.5.3.1 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos.

PARÁMETROS		RÍOS				EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES						AGUAS COSTERAS						SUELOS			
(miligramo por litro, excepto cuando se especifique)	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (C)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)		
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	NA	40	NA	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	NA	NA	40	40	
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia flotante (3)	ausente	Ausente	ausente	Ausente	Ausente	ausente	ausente	Ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	150	200	75	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(*) Medidos de manera total.

P.D.= Promedio Diario, P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos

Fuente: SEMARNAT, 1997.

Tabla 1.5.3.2 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros.

PARÁMETROS (miligramo por litro, excepto cuando se especifique)	RÍOS				EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES						AGUAS COSTERAS						SUELOS			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (C)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	120	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.

P.D.= Promedio Diario, P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos

Fuente: SEMARNAT, 1997.

NOM-002-SEMARNAT-1996. Esta norma 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 (SEMARNAT, 1998).

Los límites máximos permisibles para la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no deben exceder los valores indicados en la Tabla 1.5.3.2.

Tabla 1.5.3.3 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos.

PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	PROMEDIO MENSUAL	PROMEDIO DIARIO	INSTANTÁNEO
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Fuente: SEMARNAT, 1998.

Los valores máximos mostrados 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.

Las violaciones que se generen a esta norma serán sancionadas en términos de la LGEEPA y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

NOM-003-SEMARNAT-1997. Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso.

En el caso de que el servicio al público sea realizado por terceros, éstos serán responsables del cumplimiento de la presente norma, desde la producción del agua tratada hasta su reúso o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma (SEMARNAT, 1998).

Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la Tabla 1.5.3.3.

Tabla 1.5.3.4 Límites máximos permisibles de contaminantes.

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≥1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤5	15	30	30

Fuente: SEMARNAT, 1998.

CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Muestreo

Con la finalidad de conocer el grado de contaminación microbiana, parasitaria, fisicoquímica y de metales pesados, se diseñó una estrategia de muestreo de acuerdo a la norma NMX-AA-003-1980 Aguas Residuales- Muestreo.

Las muestras fueron obtenidas de cuatro puntos de muestreo que cubren desde el extremo norte hasta el extremo sur de la ciudad de Oaxaca de Juárez, en un tramo de 38 km. (Ilustración 2.1). A lo largo de esta trayectoria se definieron los cuatro puntos de muestreo siguientes (Ilustración 2.2):

1. Puente de Soledad, Etlá
2. Puente del Instituto Tecnológico de Oaxaca
3. Puente del Aeropuerto Internacional de Oaxaca de Juárez
4. Puente de Zaachila



Ilustración 2.1 Mapa del río Atoyac en el que se muestran los sitios de muestreo del proyecto.

Las muestras se obtuvieron entre las 9 y las 13:00 horas, se recopilaban *in situ* los datos de campo como temperatura del agua y caudal, y se transportaron al laboratorio para el inicio de los estudios correspondientes, especialmente la cuantificación de microorganismos.



Ilustración 2.2 Vista desde los puentes de los cuatro puntos de muestreo

2.2 Determinaciones Microbiológicas y Parasitológica

Tras la recolección de las muestras, éstas fueron transportadas al Laboratorio de Microbiología de Alimentos del Instituto Tecnológico de Oaxaca para llevar a cabo las determinaciones correspondientes. Dichas determinaciones son las siguientes: microbiológicas y parasitológicas.

En las primeras se identificaron Organismos Coliformes Totales (OCT) y Organismos Coliformes Fecales (OCF), éstos nos sirven como indicadores de contaminación, o, en otras palabras, como indicadores de la existencia de organismos productores de enfermedades. Respecto a los análisis parasitológicos, se utilizaron a los huevos de helminto como indicadores de contaminación fecal y fueron determinados de acuerdo a la norma NMX-AA-113-SCFI-2013.

2.2.1 Organismos Coliformes Fecales y Totales

Prueba presuntiva. Siguiendo lo descrito por la norma NOM-210-SSA1-2014 (SSA, 2015), se prepararon diez tubos de ensaye roscados por cada muestra de agua residual para la prueba presuntiva; cada uno de tubos contenía 10 mL de caldo lactosado con concentración doble, previamente preparado. Se procedió a realizar una dilución de 1 mL de muestra en 99 mL de agua destilada, de la cual se tomó 0.1 mL para sembrar en cada uno de los tubos, ya que la carga microbiana era demasiado alta, y se dejaron incubar en una estufa a $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Transcurrido el lapso de tiempo se observaron los tubos, aquellos que presentaron turbidez y generación de gas (CO_2) se consideraron positivos y aptos para la segunda fase de la prueba. De manera paralela, en dos cajas Petri (por cada muestra) con medio agar cuenta estándar (ACS) y agar cromogénico de coliformes (ACC) se sembró 1 mL de muestra y se dejaron incubar por 24 horas a $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, la prueba se realizó por duplicado.

Prueba confirmativa. Siguiendo el procedimiento de la norma NOM-210-SSA1-2014 (SSA, 2015), por cada tubo positivo de la prueba presuntiva se tomaron dos asadas y se sembraron en dos tubos con caldo EC para la prueba confirmativa, posteriormente se dejaron incubar la mitad de los tubos a $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ para la determinación de coliformes totales y la otra mitad se dejó incubar a $45^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ para la determinación de coliformes fecales, después de 24 horas se observaron los tubos, en caso de presentar turbidez y/o generación de gas, se consideran positivos. Para calcular el NMP/100 mL se consulta la Tabla H.8.4.4 contenida en dicha norma.

2.2.2 Huevos de helminto

La norma NMX-AA-113-SCFI-2013 (SCFI, 2013) se tomó como guía, pero se le hicieron modificaciones a lo largo del procedimiento. Se tomó 1 L de la muestra

recolectada y se dejó sedimentar durante 3 horas en un matraz Erlenmeyer, posterior a esto se decantó el sobrenadante (tratando de no agitar el sedimento) y se eliminó, el sedimento se filtró en una malla de 149 μm recolectando el filtrado en un matraz, se enjuagó el primer matraz con agua destilada para arrastrar los huevos que pudieron haber quedado adheridos a las paredes del mismo y se pasó de nuevo a través de la malla, se dejó sedimentar 3 horas nuevamente. Se repitió el proceso anterior hasta alcanzar un volumen aproximado de 100 mL después del enjuague, el filtrado se colocó en 4 tubos de aproximadamente 25 mL cada uno y se centrifugó a 1540 rpm durante 3 minutos, se decantó el sobrenadante y el sedimento se resuspendió en 50 mL de ZnSO_4 con $\text{pH}=1.3$, el volumen final se distribuyó en 2 tubos y se centrifugó nuevamente bajo las condiciones anteriores.

Para la parte final de la prueba se utilizaron ambas partes, el sobrenadante y el sedimento, las cuales se llevaron al microscopio óptico para observar los huevos de helminto y realizar la cuenta correspondiente, en caso de hallarse en la muestra.

2.3 Determinación de Parámetros Fisicoquímicos

2.3.1 Temperatura

Para la determinación de temperatura se siguió lo establecido en la NMX-AA-007-SCFI-2013 (SCFI, 2014). La medición de la temperatura se realizó en el sitio de muestreo, se tomó una muestra de aproximadamente 1 L y se introdujo el termómetro en el recipiente de muestreo durante aproximadamente 1 minuto hasta dejar de observar variaciones en la medición de la temperatura. De igual forma se midió la temperatura del ambiente.

2.3.2 Materia flotante

De la norma NMX-AA-006-SCFI-2010 (SCFI, 2010) para la determinación de la presencia o ausencia de la materia flotante, se utilizó una malla con abertura de 2.8 a 3.3 mm. Se colocó directamente en el caudal del río durante un tiempo aproximado de 30 segundos, pasado el tiempo se retiró la malla y se observó presencia o ausencia de materia flotante, esta acción se adaptó a las condiciones del sitio de muestreo.

2.3.3 Caudal

Se utilizó el método del flotador para el cálculo del caudal. Se estimó la medida del ancho del río ya que no se contaba con un aparato de medición adecuado para realizar la acción; para medir la profundidad del río se utilizó un palo de escoba graduado, se sumergió y se aproximó la lectura indicada por la marca de agua. Continuando con las estimaciones, se lanzó un objeto ligero y pequeño (unicel), y se midió el tiempo que tardó en recorrer en 1 m, a partir de estos datos se obtuvo una estimación del caudal multiplicando el ancho por la profundidad y por la velocidad, obteniendo así unidades de caudal (m^3/s o L/s).

2.3.4 Oxígeno disuelto (OD)

De acuerdo a la norma NMX-AA-012-SCFI-2001 (SCFI, 2001) Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, en dos botellas tipo Winkler se adicionaron 300 y 150 mL de muestra, la primera se envolvió con papel de manera que no se expusiera a la luz y se resguardó por un lapso de 5 días para su posterior análisis. A la segunda botella se le adicionaron 2 mL de sulfato manganoso ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y 2 mL de yoduro-azida, se tapó la botella, se agitó vigorosamente y se dejó sedimentar el precipitado. Después se agregaron 2 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), se tapó la botella y se volvió a agitar hasta

desaparecer el precipitado. Si la muestra tomaba un color amarillento se procedía a titular con tiosulfato de sodio al 0.025 M una alícuota de 100 mL adicionándole almidón como indicador hasta la desaparición del color. Pasados los 5 días se realizó el mismo procedimiento con la botella de 300 mL.

2.3.5 Dureza

Para el análisis de la dureza se utilizó el kit de la marca HACH® modelo HA-71A para determinar la dureza total. Se llenó con muestra un tubo de plástico al ras y se vertió en un bote de vidrio, se le agregaron 3 gotas de solución buffer 1 de dureza y se agitó. Después se agregó una gota de indicador 2 de dureza, se agitó hasta observar un cambio de color, un color azul indicaría agua suave y el procedimiento se detendría, pero si se revela un color rojo se procede a titular con EDTA (solución titulante del kit) al 0.015 M, se agregó gota a gota hasta que el color de la solución cambió de rojo a azul, finalmente se procedió a calcular las partes por millón (ppm) utilizando un factor en el que cada gota equivale a 17.1 mg/L de CaCO_3 .

2.3.6 Sólidos disueltos totales

Para la determinación de los sólidos disueltos totales se utilizó un Medidor Digital TDS Portátil modelo YL-TDS2-A. Se tomó una muestra de aproximadamente 50 mL en un vaso de precipitados, se introdujo el electrodo en la muestra y se registró el dato mostrado en la pantalla del dispositivo.

2.3.7 pH

De acuerdo a la norma NMX-AA-008-SCFI-2016 para la determinación del pH, se utilizó un potenciómetro de la marca Hanna Instruments® modelo HI 98107. Éste fue calibrado con una solución buffer con pH de 7.0. Una vez realizado lo anterior,

se tomó una alícuota de aproximadamente 50 ml de muestra en un vaso de precipitados en el cual se introdujo el dispositivo, al dejar de observar variaciones en el valor se tomó la lectura correspondiente.

2.3.8 Turbiedad

En base a lo sugerido en la norma NMX-AA-038-SCFI-2001 (SCFI, 2002), para la determinación de la turbiedad se utilizó un turbidímetro de la marca LAMOTTE® modelo 2008, el cual fue calibrado con una disolución patrón incluida en el equipo. Enseguida se homogeneizó la muestra recolectada, de la cual se tomó una alícuota de 50 mL aproximadamente, con esa alícuota se llenó una celda hasta el cuello, cuidando en todo momento de no tocarla directamente con las manos ya que podría afectar en el análisis, se reemplazó la celda de la disolución patrón por la celda de la muestra, se cerró el compartimiento y se tomó la lectura indicada por el turbidímetro y se registró en unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

2.3.9 Sólidos sedimentables

Siguiendo la norma NMX-AA-004-SCFI-2013 (SCFI, 2013), se mezcló la muestra de manera que existiese una distribución homogénea de los sólidos suspendidos en todo el líquido (las muestras deben estar a temperatura ambiente).

En un cono Imhoff se vertió la muestra hasta llegar a la marca de 1000 mL, pasados 45 minutos, con un agitador, se desprendieron suavemente los sólidos adheridos a las paredes del cono. Se dejó reposar 15 minutos más y se registró el volumen de sólidos sedimentables en mL/L.

2.3.10 Sólidos suspendidos

De lo descrito en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (SCFI, 2016), se introdujeron las cápsulas al horno a una temperatura de $180^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora para mantenerlas a peso constante, después se pasaron al desecador hasta su enfriamiento. Se pesaron en la balanza analítica de la marca ADAM® modelo Nimbus, se registraron los valores en la bitácora del proyecto, se llenaron de muestra, nuevamente se registra el peso de la cápsula más la muestra. Continuando con el procedimiento se introdujeron en la estufa de desecación analógica marca LABOLAN® modelo IDL-AI-36 a 105°C durante 6 horas o en su defecto toda la noche, una vez completado el tiempo se introducen nuevamente al desecador hasta su total enfriamiento. Se procede a pesar en la balanza analítica y se registran los datos, éstos nos indican los sólidos totales de la muestra así que para obtener la cantidad de sólidos suspendidos totales se realizó una diferencia entre los sólidos totales y los sólidos disueltos totales previamente obtenidos.

2.3.11 Grasas y aceites

Para la determinación de grasas y aceites en aguas residuales, se consultó la norma NMX-AA-005-SCFI-2000 la cual se adaptó a los materiales existentes dentro del laboratorio. Se tomó un litro de muestra la cual se hizo pasar a través de un papel filtro en donde se retuvieron los aceites presentes en la muestra, una vez filtrada la muestra, se colocó el papel filtro dentro de la estufa de desecación analógica marca LABOLAN® modelo IDL-AI-36 a 100°C durante una hora para eliminar el agua retenida durante la filtración, pasado esto se colocó el papel filtro dentro de un desecador por 15 minutos para posteriormente pesarlo en la balanza analítica marca ADAM® modelo Nimbus, se registró su peso. Durante el tiempo de secado del papel filtro se montó el equipo de extracción Soxhlet, para esta operación se eligió como solvente al éter de petróleo por encima del hexano como viene estipulado en la norma, ya que al momento de ejecutar la operación se tuvieron problemas al

momento de realizar los reflujos con el solvente, se colocaron 250 mL aproximadamente del solvente dentro del matraz.

2.3.12 Nitrógeno

Siguiendo el procedimiento de la norma mexicana NMX-F-068-S-1980 (S, 1980), en una balanza analítica se pesó un gramo aproximadamente de muestra directamente en un matraz Kjeldahl, se añadió 2 g de sulfato de cobre, 10 g de sulfato de sodio anhidrido, 25 cm³ de ácido sulfúrico. El matraz se colocó en el digestor y se dejó calentar cuidadosamente hasta que el material se carbonizó. Se procedió a enfriar al matraz y se añadió 450 cm³ de agua para disolver completamente la muestra, se agregó 50 cm³ de hidróxido de sodio 1:1. Se colocó el matraz en el destilador, en el cual se puso un matraz Erlenmeyer con 500 cm³ con 50 cm³ de ácido bórico y unas gotas del reactivo Shiro Toshio como indicador. Se retiró el matraz receptor y se tituló el destilado con ácido clorhídrico 0.1 N.

2.4 Determinación de Metales

Para la determinación de metales, fue necesario llevar muestras al Servicio Geológico Mexicano (SGM), ubicado en la carretera a San Lorenzo Cacaotepec, San Pablo Etla. Para la determinación de 32 metales utilizan el método I.C.P. óptico MS (Plasma de Acoplamiento inductivo con espectrómetro de masas).

El plasma de acoplamiento inductivo (ICP), también conocido como ICP-AES (espectrometría de emisión atómica) o ICP-OES (espectrometría de emisión óptica), se utiliza para analizar simultáneamente muchos elementos y en niveles tan bajos como 1-10 partes por mil millones o ppb. Se utiliza en una gran variedad de mercados, incluidos el de alimentos y bebidas, el metálico, el farmacéutico, el geológico, el hidrológico y el del cemento.

El ICP funciona usando un plasma de argón en el que se inyecta una muestra líquida atomizada. La muestra se ioniza en el plasma y los iones emiten luz a diferentes

longitudes de onda características que posteriormente se miden. En el ICP con espectrómetro de masas o ICP-MS, los iones producidos en el plasma de argón se inyectan en el espectrómetro de masas, separando así los iones en función de su relación de masa y carga. Es ideal para análisis de metales en concentraciones de tan solo partes por billón. Las impurezas en el argón pueden provocar problemas graves con el ICP-MS debido a su alta sensibilidad (Carbueros Metálicos , s.f.).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los meses febrero, abril y junio se realizaron previamente y fueron retomados con la finalidad de tener una investigación más completa. Los sitios de muestreo fueron los siguientes:

Sitio 1: Puente de Soledad, Etlá.

Sitio 2: Puente del instituto Tecnológico de Oaxaca.

Sitio 3: Puente del Aeropuerto Internacional de Oaxaca

Sitio 4: Puente de Zaachila.

3.1 Febrero 2019

En la tabla 1 se muestran los datos obtenidos en el primer muestreo correspondientes a los análisis microbiológicos y parasitarios. Se presentan 3 columnas, dos de las cuales muestran las variables que son requeridas por las normas (coliformes fecales y huevos de helminto) y una extra (coliformes totales) que, si bien no es requerido por las normas, es un dato importante también relacionado con la contaminación biológica del agua.

TABLA 1. Contaminación microbiológica y parasitaria de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, febrero 2019.

Sitio de muestreo	Coliformes fecales (UFC/100 ml)	Huevos de helminto (Unidades/L)	Coliformes totales (UFC/100 ml)
1	ND	ND	ND
2	8.6×10^3	5	3.4×10^4
3	3.6×10^5	9	8.2×10^5
4	2.9×10^5	8	4.6×10^5
Límite Máximo Permisible	2,000*	RR: 1** RNR: 5	No requerido

*Promedio Diario, **RR: Riego restringido, RNR: Riego no restringido, ND: No determinado.

En el primer sitio de muestreo no pudieron evaluarse los parámetros presentados ya que no hubo agua para poder realizar los análisis necesarios a diferencia de los demás sitios. Un suceso extraño que muy posiblemente se debió a las descargas de aguas residuales a través del sistema de drenaje. Esto explicaría el elevado número de coliformes fecales y totales en las determinaciones de los demás sitios.

En la primera columna se muestran los datos de coliformes fecales los cuales exceden los límites máximos permisibles en los sitios de muestreo 2, 3 y 4. La siguiente columna corresponde a los huevos de helminto, el agua del sitio 2, correspondiente al tramo ubicado a orillas del Instituto Tecnológico de Oaxaca, podría ser utilizada para un riego no restringido ya que cumple con el límite máximo permisible, sin embargo los sitios 3 y 4 sobrepasan los límites establecidos, por lo que su uso como agua de riego queda estrictamente prohibido por la norma.

Un estudio semejante realizado en el estado de Aguascalientes reportó cuentas de OCF superiores a 3×10^6 NMP/100 ml, los cuales son al menos un orden de magnitud superior a los valores determinados en este estudio (Guzmán-Colis, y otros, 2011). Por otra parte, Morales Novelo y otros (2015), encontraron cuentas de OCT extremadamente superiores en las aguas del río Atoyac en la región Puebla-Tlaxcala, comparando con las cuentas registradas en la presente investigación.

Los datos de las determinaciones de trece parámetros fisicoquímicos se muestran en la tabla 2. Cuatro de estos no son requeridos por las Normas Oficiales Mexicanas, pero se decidió incluirlos en los análisis por considerarse de importancia para el estudio.

Como ya se mencionó, en el primer sitio no hubo presencia de agua para poder realizar los análisis. El primer parámetro evaluado fue la temperatura del agua, la cual no mostró cambios significativos desde el sitio 2 hasta el 4. De acuerdo a la tabla existen cinco parámetros más que se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles, los cuales son: pH, grasas y aceites, oxígeno disuelto,

nitrógeno total y fósforo total, esto significa que el agua en estos sitios se encuentra dentro de los valores normativos y, al menos por estos criterios, podría utilizarse para un uso público urbano.

TABLA 2. Cuantificación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, febrero 2019.

Parámetro	Sitio de muestreo				LMP*
	1	2	3	4	
Temperatura (°C)	ND	25	25	26	40
pH (unidades)	ND	7.5	7.6	7.7	5-10
Grasas y aceites (mg/L)	ND	18.6	22.3	18.6	25
Materia flotante	ND	Presente	Presente	Presente	Ausente
Sólidos sedimentables (mL/L)	ND	3.8	3.2	2.6	2
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	ND	906	999	648	125
Sólidos disueltos totales (mg/L)	ND	566	592	558	N.R.**
Oxígeno disuelto (mg/L)	ND	0.4	0.0	0.0	N.R.
NTotal (mg/L)	ND	45	55	50	60
PTotal (mg/L)	ND	3,26	6,46	7.98	30
Caudal (L/s)	0	11	62	65	N.R.
Turbiedad (UTN)	ND	66.0	199.5	198.0	N.R.
Dureza (mg/L)	ND	408	445	462	N.R.

*Límite Máximo Permissible para Uso Público Urbano, promedio diario.

**N.R. No requerido por la norma, ND: No determinado.

Los parámetros que se encuentran por encima de los límites son: materia flotante, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales; éste último excede de manera considerable los límites permitidos en los sitios 2, 3 y 4, aunque en el sitio 4 el dato disminuye considerablemente, sigue siendo un valor muy alto de acuerdo a la norma. Los parámetros faltantes (caudal, turbiedad, dureza y sólidos disueltos totales), aunque no son requeridos por las normas, fueron estudiados pues aportan información valiosa para uso potencial del agua, ya sea recreativo, como riego restringido y sustentabilidad de la vida animal y vegetal.

En un trabajo de investigación Sandoval Villasana y otros (2009), reportaron datos de parámetros fisicoquímicos. Es importante mencionar que en esta zona existen

parques industriales que influyen en los valores de los parámetros. Obtuvieron un caudal máximo de 56,861 l/s mientras que el mínimo fue de 2,731 l/s, los cuales son muy superiores a los obtenidos en este proyecto. Mientras que el pH y las grasas y aceites, los valores en ambos estudios son similares (7-8 y 15-26 mg/l, respectivamente). En cuanto a los datos obtenidos de sólidos sedimentables, los valores durante el muestreo del mes de febrero son mayores a los presentados por Sandoval Villasana y otros (2009) en su estudio. Para el nitrógeno total los datos de las concentraciones fueron enormemente superiores a los que se obtuvieron en este primer muestreo, el dato más alto registrado por Sandoval Villasana y otros fueron de 26,551 mg/l.

La tabla 3 muestra los niveles de concentración de metales pesados durante el primer muestreo en el mes de febrero en el río Atoyac. En ella se logran apreciar 7 metales potencialmente dañinos para el ser humano y para la vida en general si se hallan en grandes cantidades. Los niveles de concentración de los metales están muy por debajo de la norma en cada uno de los sitios de muestreo. Esto podría atribuirse a que Oaxaca no es un estado industrializado por lo cual no se pueden registrar altos niveles de metales en las aguas del río Atoyac. Así que, probablemente, las concentraciones que se hallaron se deban al desgaste de las tuberías que conforman la red de agua potable y de alcantarillado de la ciudad.

TABLA 3. Contaminación por metales pesados de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, febrero 2019.

Parámetro (mg/L)	Sitio de muestreo				LMP* (mg/L)
	1	2	3	4	
Arsénico	ND	0.0122	0.0195	0.0277	0.2
Cadmio	ND	<0.00004	<0.00004	<0.00004	0.2
Cobre	ND	0.008	0.006	0.026	6.0
Cromo	ND	0.0012	0.0028	0.0009	1.0
Níquel	ND	0.015	0.020	0.012	4.0
Plomo	ND	0.0557	0.1240	0.0333	0.4
Zinc	ND	0.08	0.122	0.016	20

*Límite Máximo Permisible para Uso Público Urbano, promedio diario, ND: No determinado.

Graniel y Carrillo (2006) en su estudio sobre la calidad del río Zanatenco en Chiapas, reportaron concentraciones bajas de metales pesados, los cuales no superaron los LMP al igual que los presentados en esta investigación.

3.2 Abril 2019

Para el muestreo del mes de abril, en cuanto a parámetros microbiológicos y parasitarios se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4. Nuevamente el sitio 1, correspondiente a Soledad, Etla, presentó ausencia de agua para realizar todas las determinaciones que le corresponderían.

TABLA 4. Contaminación microbiológica y parasitaria de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, abril 2019.

Sitio de muestreo	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Huevos de helminto (Unidades/L)	Coliformes totales (NMP/100 ml)
1	ND	ND	ND
2	8.1×10^4	7	1.4×10^5
3	1.2×10^5	12	2.6×10^5
4	8.8×10^4	8	9.2×10^4
Límite Máximo Permisible	2,000*	RR: 1** RNR: 5	No requerido

*Promedio Diario, **RR: Riego restringido, RNR: Riego no restringido, ND: No determinado.

Se observa un aumento en el nivel de contaminación bacteriológica y parasitaria en comparación al primer muestreo (febrero). Como se muestra, la concentración de la contaminación va en aumento a partir del punto 2 (Instituto Tecnológico de Oaxaca) hasta el sitio 3 (Aeropuerto). Siendo éste, el sitio que posee la mayor concentración de contaminación como era de esperarse, ya que en su trayecto el río recibe las descargas de las aguas residuales de la zona urbana de la ciudad de

Oaxaca. En el sitio 4 (Zaachila) el nivel de contaminación baja, ya que antes de la zona de muestreo se encuentra la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Sandoval Villasana y otros (2009) en su trabajo sobre la contaminación del Río Atoyac en los estados de Puebla y Tlaxcala, hallaron cuentas de OCT superiores a 3×10^7 NMP/100 ml, siendo este valor superior por dos órdenes al registrado en el muestreo del mes de abril en el presente proyecto. Por otro lado, un estudio realizado en los Ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino en el Valle de México registraron valores máximos de OCT de 24×10^6 NMP/100 ml un orden superior al valor más alto obtenido en este muestreo. En el mismo estudio reportaron datos de huevos de helmintos siendo 30.80 h/l el valor más alto superando por 18 unidades al presentado en la investigación (Rivera-Vázquez, y otros, 2007).

En la tabla 5 se muestran los datos obtenidos de los parámetros fisicoquímicos del mes de abril. Debido a las fuertes olas de calor presentes en este periodo del año, en el primer sitio de muestreo (Soledad, Etla) no había presencia de agua en ese tramo del río, por ende, no se lograron realizar las determinaciones correspondientes.

La concentración de las grasas y aceites en el sitio 2 (puente del Instituto Tecnológico de Oaxaca) es menor en comparación al límite permitido. Conforme el estudio avanzó, en el sitio 3 (puente del Aeropuerto Internacional) se concentró la mayor cantidad de grasas y aceites superando el límite permitido por casi 2 mg/l. En cuanto a la concentración de los sólidos, tanto de los suspendidos como los sedimentables, ambos superan el límite máximo permitido por la NOM-001-SEMARNAT-1996. En cuanto a la concentración del nitrógeno total, los valores registrados superaron el LMP en los sitios 3 (puente del Aeropuerto Internacional) y 4 (Zaachila). Los parámetros que se mantuvieron debajo del límite máximo fueron: la temperatura, pH y el fósforo total.

El aumento de la concentración de las grasas y aceites durante el trayecto del río desde el sitio 2 (puente del Instituto Tecnológico de Oaxaca) hasta el sitio 3 (puente del Aeropuerto Internacional), probablemente se deba a las descargas de aguas residuales domésticas generadas en la zona conurbada de la ciudad. En el sitio 4 (Zaachila) se observó una disminución en la concentración del parámetro ya mencionado, en parte al trabajo realizado por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Un estudio realizado por Almazán-Juárez y otros (2016) sobre la calidad del agua del río Papagayo en el estado de Guerrero reportó datos sobre parámetros fisicoquímicos en épocas secas y de lluvias. Los valores de pH y temperatura registrados en dicho estudio se encuentran dentro de los LMP presentados en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 al igual que los reportados en nuestra investigación. El contenido de sólidos sedimentables y suspendidos totales tuvo valores fuera de la norma al igual que los presentados por Almazán-Juárez y otros (2016) y Jiménez y otros (2000).

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos de los análisis realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM). Los datos corresponden a la contaminación por metales pesados en las aguas del río Atoyac durante el mes de abril.

Se observó que los datos registrados se encuentran muy por debajo de los límites máximos permisibles, llegando a ser despreciables en todos los casos. Por ejemplo, los niveles de cadmio en cada una de las muestras no pudieron ser determinados con certeza, ya que se hallan debajo del rango mínimo detectable del equipo de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, el cual pertenece al Servicio Geológico Mexicano.

TABLA 5. Cuantificación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, abril 2019.

Parámetro	Sitio de muestreo				LMP*
	1	2	3	4	
Temperatura (°C)	ND	26	27	29	40
pH (unidades)	ND	7.7	7.2	6.5	5-10
Grasas y aceites (mg/L)	ND	15.9	26.8	22.8	25
Materia flotante	ND	Presente	Presente	Presente	Ausente
Sólidos sedimentables (mL/L)	ND	2.5	3.3	2.8	2
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	ND	1,191	1,378	658	125
Sólidos disueltos totales (mg/L)	ND	668	755	507	N.R. **
Oxígeno disuelto (mg/L)	ND	0.5	0.0	0.0	N.R.
NTotal (mg/L)	ND	58	74	64	60
PTotal (mg/L)	ND	6.67	8.89	8.34	30
Caudal (L/s)	0	8	62	65	N.R.
Turbiedad (UTN)	ND	66.0	199.5	198.0	N.R.
Dureza (mg/L)	ND	462	445	308	N.R.

*Límite Máximo Permissible para Uso Público Urbano, promedio diario.

**N.R. No requerido por la norma, ND: No determinado.

Los resultados señalados en la tabla 6 respecto al análisis realizado por el SGM indicaron que ninguno de los metales pesados rebasó el LMP. Esto se atribuye a que, como ya se ha mencionado el estado de Oaxaca no cuenta con muchas zonas industriales que descarguen componentes químicos. En una investigación sobre la calidad del agua del Río Conchos en la región de Ojinaga en el estado de Chihuahua, Holguín y otros (2006) reportaron valores similares durante el mes de abril. Analizando el trabajo realizado por Bravo Inclán y otros, (2015), se registró que el cromo y el plomo excedieron los LMP debido a que cerca de un punto de muestreo existen descargas de residuos industriales de giro textil y químico-farmacéutico.

TABLA 6. Contaminación por metales pesados de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, abril 2019.

Parámetro (mg/L)	Sitio de muestreo				LMP* (mg/L)
	1	2	3	4	
Arsénico	ND	0.0188	0.0237	0.0296	0.2
Cadmio	ND	<0.00004	<0.00004	<0.00004	0.2
Cobre	ND	0.015	0.016	0.055	6.0
Cromo	ND	0.0038	0.0057	0.0023	1.0
Níquel	ND	0.035	0.048	0.033	4.0
Plomo	ND	0.0766	0.1874	0.0456	0.4
Zinc	ND	0.17	0.248	0.0958	20

*Límite Máximo Permisible para Uso Público Urbano, promedio diario. ND: No determinado.

3.3 Junio 2019

En la tabla 7 se presentan los resultados referidos a los análisis microbiológicos y parasitarios. También los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

TABLA 7. Contaminación microbiológica y parasitaria de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, junio 2019.

Sitio de muestreo	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Huevos de helminto (Unidades/L)	Coliformes totales (NMP/100 ml)
1	2.3×10^4	4	6.8×10^4
2	6.3×10^4	4	1.3×10^5
3	6.8×10^4	8	1.4×10^5
4	4.5×10^4	6	1.6×10^5
Límite Máximo Permisible	2,000*	RR: 1** RNR: 5	No requerido

*Promedio Diario, **RR: Riego restringido, RNR: Riego no restringido.

La concentración de los coliformes fecales supera el límite máximo permisible en al menos un orden de magnitud en todos los sitios de muestreo. Los lugares con menor concentración son los puntos 1 y 4 (Soledad, Etla y el puente de Zaachila) mientras los puntos 2 y 3 (Tecnológico de Oaxaca y Aeropuerto) tienen concentraciones similares. Respecto a los huevos de helminto, los sitios 3 y 4 se hallan por encima del límite permitido tanto para un riego restringido como para un riego no restringido, sin embargo, los sitios 1 y 2 se encuentran dentro del límite para ser utilizados en riego no restringido.

En este nuevo muestreo, el sitio 1 (Soledad, Etla) ya contaba con presencia de agua para poder realizar las determinaciones correspondientes. Comparando los resultados de la Tabla 1 con los obtenidos en el mes de abril, respecto a la cuenta de OCF, los datos registrados en este mes disminuyeron al menos 1 un orden de magnitud. Las unidades de huevos de helminto por litro también disminuyeron, en al menos 4 unidades/L respecto al valor más alto de cada mes. Graniel y Carrillo (2006) en su trabajo sobre la calidad del agua del Río Zanatenco en Chiapas reportaron datos de cuentas de OCF mayores a 2.4×10^4 NMP/100 ml siendo ligeramente superior al valor más bajo (2.3×10^4 NMP/100 ml) reportado en nuestros resultados del mes de junio.

Los resultados correspondientes a los análisis fisicoquímicos del tercer muestreo se enlistan en la tabla 8. Comenzando el estudio en Soledad, Etla, continuando en el puente del Instituto Tecnológico de Oaxaca, posteriormente en el puente del Aeropuerto de la ciudad y finalizando el trayecto en el puente de la localidad de la Villa de Zaachila.

Podemos observar en la tabla 8 que en los cuatro puntos de muestreo los sólidos suspendidos totales exceden los LMP; mientras que la materia flotante se encontró en los tres primeros sitios de estudio. Por su parte las grasas y aceites y los sólidos sedimentables rebasaron los LMP en uno sólo de los sitios, en el tercer y cuarto

punto, respectivamente. La temperatura, el pH, oxígeno disuelto, el nitrógeno y fósforo totales se encontraron por debajo de los niveles permitidos.

El caudal en el sitio 1 fue demasiado bajo en comparación a los demás, lo que suponemos, puede deberse a las constantes descargas de aguas residuales de la red de alcantarillado de la ciudad. Los parámetros restantes (turbiedad, dureza y los sólidos disueltos totales, al igual que el caudal), a pesar de no ser requeridos por la norma, son de gran valor ya que aportan información sobre la calidad del agua que fluye a través del río. Además, no hay que olvidar que también la contaminación podría provenir de los domicilios, en Oaxaca uno de los productos mayormente consumido es el mole, fuente importante de grasas.

TABLA 8. Cuantificación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, junio 2019.

Parámetro	Sitio de muestreo				LMP*
	1	2	3	4	
Temperatura (°C)	21	22	26	26	40
pH (unidades)	7.7	7.5	7.7	7.5	5-10
Grasas y aceites (mg/L)	ND	15.9	26.8	22.8	25
Materia flotante	Presente	Presente	Presente	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables (mL/L)	0.0	0.0	0.0	7.5	2
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	687	901	970	694	125
Sólidos disueltos totales (mg/L)	564	703	840	646	N.R.**
Oxígeno disuelto (mg/L)	2.8	2.0	0.4	0.5	N.R.
NTotal (mg/L)	28	38	47	38	60
PTotal (mg/L)	2.1	1.5	4.4	6.6	30
Caudal (L/s)	3.0	125	750	680	N.R.
Turbiedad (UTN)	13.5	25.5	66.8	59.7	N.R.
Dureza (mg/L)	342	428	410	308	N.R.

*LMP: Límite Máximo Permisible para Uso Público Urbano, promedio diario.

**N.R. No requerido por la norma, ND: No determinado.

La concentración del nitrógeno total durante el mes de abril disminuyó en los sitios 2 (puente del Instituto Tecnológico de Oaxaca), 3 (puente del Aeropuerto Internacional) y 4 (puente de la Villa de Zaachila) de acuerdo con los resultados

obtenidos durante este muestreo. Por otro lado, los mg/l (ppm) de sólidos suspendidos totales descendieron en los sitios 2 y 3, pero aumentó 36 ppm en el sitio 4. Los valores de pH no tuvieron variaciones considerables, similares a las presentadas por Galindo y otros (2005) en su investigación sobre el Río Cazones en Veracruz. Además, entre los meses de marzo y junio reportaron datos sobre sólidos disueltos totales, con una concentración de 998 mg/L siendo mayor a los presentados en este muestreo.

Los resultados obtenidos del análisis de los metales pesados realizados por el SGM se presentan en la tabla 9. Se incluyen los metales que especifica la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

TABLA 9. Contaminación por metales pesados de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, junio 2019.

Parámetro (mg/L)	Sitio de muestreo				LMP* (mg/L)
	1	2	3	4	
Arsénico	0.0074	0.0042	0.0064	0.0096	0.2
Cadmio	<0.00004	<0.00004	<0.00004	<0.00004	0.2
Cobre	0.004	0.002	0.001	0.005	6.0
Cromo	0.0008	0.0001	0.0006	0.0001	1.0
Níquel	0.004	0.004	0.004	0.002	4.0
Plomo	0.0044	<0.0001	0.0358	<0.0001	0.4
Zinc	0.01	0.008	0.01	0.002	20

*LMP: Límite Máximo Permisible para Uso Público Urbano, promedio diario

Nuevamente las concentraciones de los metales pesados se encontraron por debajo de los LMP que autoriza la norma correspondiente, esto era de esperarse ya que, como se mencionó anteriormente, Oaxaca no es un estado que cuente con industrias que realicen actividades que puedan contaminar el cauce del río.

En la cuenca del río Moche en Perú durante el año de 1980 se registraron concentraciones muy altas de algunos metales pesados. El plomo (Pb) y el zinc (Zn) llegaron a superar las 200 ppm en la cuenca alta del río, sin embargo, dichas concentraciones disminuyeron considerablemente, tanto que en el año 2010 los

resultados obtenidos se encontrarían dentro de lo estipulado por las normas mexicanas, al igual que los presentados en este trabajo. Entre el mes de abril y junio de este trabajo no hubo cambios significativos en las determinaciones.

3.4 Agosto 2019

La tabla 10 presenta los resultados de los análisis correspondientes al muestreo del mes de agosto. Dichos datos pertenecen a los parámetros microbiológicos y parasitarios de las muestras recabadas en los 4 puntos de muestreo del estudio.

De acuerdo a la tabla 10, se observó que los valores en los tres parámetros presentados son muy altos y rebasan por mucho el límite máximo permisible establecido por la norma. En el caso de los OCF, los valores superaron el LMP por dos órdenes de magnitud respecto a lo establecido en la norma correspondiente. Para los huevos de helminto los análisis arrojaron resultados exageradamente altos en comparación al límite permitido.

Los valores en el sitio dos fueron los más altos en los tres rubros. Muy probablemente se deba a que, durante el transcurso del río, desde el punto 1 (Soledad, Etla) hasta el punto 2 (puente del Instituto Tecnológico de Oaxaca), se descarguen directamente las aguas provenientes de las zonas domiciliarias, ya que alrededor de esta zona se concentra gran parte de la población de Oaxaca de Juárez, por lo que es factible que dicha suposición explique los altos niveles de contaminación.

Romeu Álvarez y otros (2019) realizaron un estudio en el cual reportaron datos microbiológicos del río Luyanó, para coliformes fecales 5.7×10^5 UFC/100 mL, el cual tiene el mismo orden de magnitud que los datos que se presentan en esta investigación. Otro estudio similar realizado en Quito, por Campaña y otros (2017), también reporta valores similares, lo cual se debe a descargas de aguas residuales domésticas e industriales. Debido a la descarga de aguas de drenaje, los valores

de huevos de helminto encontrados rectifican la contaminación fecal que existe en el río.

TABLA 10. Contaminación microbiológica y parasitaria de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, agosto 2019.

Sitio de muestreo	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Huevos de helminto (Unidades/L)	Coliformes totales (NMP/100 ml)
1	1.0×10^5	2.9×10^4	3.8×10^5
2	2.1×10^5	5.5×10^4	4.2×10^5
3	1.9×10^5	2.5×10^4	3.9×10^5
4	1.8×10^5	3.4×10^4	3.6×10^5
Límite Máximo Permisible	2,000*	RR: 1** RNR: 5	No requerido

*Promedio Diario, **RR: Riego restringido, RNR: Riego no restringido

Los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos, se muestran a continuación en la tabla 11. Cabe mencionar que cuatro de los parámetros incluidos en esta tabla no son requeridos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

En la tabla 11 se presentaron los resultados de los análisis fisicoquímicos correspondientes al mes de agosto, de los trece parámetros presentados cuatro se encuentran dentro de la norma (temperatura, pH, nitrógeno y fósforo totales). Para las grasas y aceites solamente en el sitio uno se halló una gran concentración a diferencia de los tres sitios restantes, la materia flotante (que van desde larvas de moscos hasta pequeños residuos) estuvo presente en todos los sitios de muestreo. La concentración de los sólidos suspendidos totales superó el límite máximo permisible en los cuatro puntos, siendo el sitio cuatro el de mayor concentración. El volumen de los sólidos sedimentables en los sitios tres y cuatro superaron el límite establecido en la norma.

TABLA 11. Cuantificación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, agosto 2019.

Parámetro	Sitio de muestreo				LMP*
	1	2	3	4	
Temperatura (°C)	26.5	26	25	26	40
pH (unidades)	7.6	7.3	7.6	7.7	5-10
Grasas y aceites (mg/L)	95	19	22.3	18.6	25
Materia flotante	Presente	Presente	Presente	Presente	Ausente
Sólidos sedimentables (mL/L)	0	0	3.2	2.6	2
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	201	168	198	240	125
Sólidos disueltos totales (mg/L)	557	596	820	786	N.R.**
Oxígeno disuelto (mg/L)	1.8	1.6	0.0	0.0	N.R.
NTotal (mg/L)	ND	45	55	50	60
PTotal (mg/L)	ND	3,26	6,46	7.98	30
Caudal (L/s)	20	300	500	500	N.R.
Turbiedad (UTN)	34.3	19.9	85.5	77.3	N.R.
Dureza (mg/L)	291	325	342	308	N.R.

*Límite Máximo Permisible para Uso Público Urbano, promedio diario.

**N.R. No requerido por la norma, ND: No determinado.

Los parámetros faltantes (caudal, turbiedad, dureza y sólidos disueltos totales) como se ha mencionado no son requeridos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, sin embargo, es importante determinarlos ya que guardan relación entre sí y ayudan a sustentar los resultados de los demás parámetros. Por ejemplo, un gran caudal genera un gran arrastre de partículas, por lo que estaría asociado a la concentración de los sólidos suspendidos, la turbiedad y la dureza.

Comparando los datos de la tabla 11 con la tabla 5, se obtuvieron valores más altos en el mes de abril, ya que el caudal fue mayor en agosto y esto ayuda a que las partículas y microorganismos se diluyan. En la tabla 5 se observan valores superiores en los sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, turbiedad, dureza. Presentan valores similares en pH, grasas y aceites, con presencia de materia flotantes en ambos meses.

3.5 Septiembre 2019

Para el muestreo del mes de septiembre se obtuvieron los siguientes datos de los análisis microbiológicos y parasitarios. Dichos datos son presentados en la tabla 12, en la cual se muestran tres parámetros: organismos coliformes fecales, huevos de helminto y organismos coliformes totales, en ese orden.

TABLA 12. Contaminación microbiológica y parasitaria de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, septiembre 2019.

Sitio de muestreo	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Huevos de helminto (Unidades/L)	Coliformes totales (NMP/100 ml)
1	1.0×10^8	2.0×10^5	2.2×10^8
2	4.0×10^4	1.0×10^4	1.3×10^5
3	5.2×10^8	1.7×10^4	1.0×10^9
4	3.4×10^6	1.7×10^4	3.8×10^6
Límite Máximo Permisible	2,000*	RR: 1** RNR: 5	No requerido

*Promedio Diario, **RR: Riego restringido, RNR: Riego no restringido

La tabla 12 muestra los resultados del análisis microbiológico realizado en los cuatro sitios de muestreo. Se observa que los parámetros requeridos por la norma (coliformes fecales y huevos de helminto), rebasan los límites máximos permisibles en todos los sitios, estas cifras tan altas indican contaminación por descargas de aguas residuales.

Un estudio similar realizado por Sandoval Villasana, y otros (2009), reportaron datos de OCF de al menos un orden de magnitud inferior de acuerdo a los presentados en la tabla 12. Y comparando con los datos de OCF establecidos en la tabla 10, hubo una diferencia de al menos 3 ordenes de magnitud inferior. En cuanto a los OCT, un estudio realizado en Quito, por Campaña y otros (2017), reportó resultados entre 3 y 4×10^5 , que son muy bajos en comparación a los datos de este mes. Los

valores de huevos de helminto son extremadamente altos, comparandolos con los de la tabla 1, 4 y 7, pero son muy similares con los valores de la tabla 10.

La tabla 13 muestra los datos de las determinaciones de trece parámetros fisicoquímicos, de los cuales, cuatro (caudal, sólidos disueltos totales, turbiedad y dureza) no son requeridos por las Normas Oficiales Mexicanas, pero se decidieron incluir en el estudio por la información que logran aportar.

TABLA 13. Cuantificación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, septiembre 2019.

Parámetro	Sitio de muestreo				LMP*
	1	2	3	4	
Temperatura (°C)	21	24	30	26	40
pH (unidades)	7.5	7.2	7.4	7.2	5-10
Grasas y aceites (mg/L)	3.9	11	15.2	18.8	25
Materia flotante	Presente	Presente	Presente	Presente	Ausente
Sólidos sedimentables (mL/L)	0	0	0.25	0.6	2
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	262	319	185	165	125
Sólidos disueltos totales (mg/L)	819	460	840	840	N.R.**
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.8	1.6	0.0	0.0	N.R.
NTotal (mg/L)	ND**	ND	ND	ND	60
PTotal (mg/L)	ND	ND	ND	ND	30
Caudal (L/s)	8.5	200	400	450	N.R.
Turbiedad (UTN)	55.4	20.7	87.2	80.2	N.R.
Dureza (mg/L)	257	257	342	325	N.R.

*Límite Máximo Permissible para Uso Público Urbano, promedio diario.

**N.R. No requerido por la norma, ND: No determinado.

De los trece parámetros presentados en la tabla anterior, dos de ellos no cumplen con el límite establecido en la NOM-001, estos son: materia flotante y sólidos suspendidos totales. Los parámetros que cumplen con la norma son: temperatura, pH, grasas y aceites, sólidos sedimentables, nitrógeno y fósforo totales, por ejemplo, en el caso de los sólidos sedimentables no se halló presencia de ellos en los dos primeros sitios. Por su parte las grasas y aceites, a pesar de mantenerse debajo del LMP, presentaron valores relativamente altos en los sitios tres y cuatro (Aeropuerto y puente de Zaachila), lo que es entendible, ya que en el tramo del Tecnológico

hacia el Aeropuerto confluyen las descargas de aguas residuales de la zona conurbada de la ciudad.

Sandoval Villasana y otros ,(2009) reportaron datos similares a los de la tabla 13 en parámetros como pH, grasas y aceites, SST y en materia flotante. SEMARNAT, (2011), por su parte efectuó una investigación en la que registró valores extremadamente altos en los mismo parámetros. Comparando los resultados con la tabla 11, existe una disminución en grasas y aceites de 95 ppm que fue la maxima, disminuyó a 18.8 ppm. Sucedió lo contrario en los sólidos totales disueltos que hubo un ligero aumento. En cuanto a dureza los valores se mantuvieron en el mismo rango.

3.6 Octubre 2019

La tabla 14 presenta los resultados de la cuenta de microorganismos y parásitos. En la primera columna se muestran los OCF, en la segunda a los huevos de helminto y por último los Organismos Coliformes Totales (OCT), los cuales no son requeridos por la norma correspondiente.

En este último muestreo se registraron los valores correspondientes a las determinaciones microbiológicas y parasitarias. Para huevos de helmintos las cifras registradas superaron el límite máximo en todos los sitios. De ellos, el sitio 1 (Soledad, Etla) presentó el menor número de unidades por litro, sin embargo, conforme el estudio avanzó las unidades aumentaron en gran medida, haciendo incluso que el conteo en los sitios 3 (puente del Aeropuerto Internacional) y 4 (puente de la Villa de Zaachila) se dificultara. En el caso de los coliformes fecales las cuentas obtenidas exceden el límite establecido por la normatividad correspondiente en los 4 puntos de muestreo, siendo el sitio 3, el punto con la mayor cantidad de coliformes fecales por cada 100 ml.

TABLA 14. Contaminación microbiológica y parasitaria de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, octubre 2019.

Sitio de muestreo	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Huevos de helminto (Unidades/L)	Coliformes totales (NMP/100 ml)
1	4.0×10^4	120	1.7×10^5
2	4.4×10^5	1080	1.4×10^6
3	4.3×10^6	$<1 \times 10^6$	1.0×10^7
4	3.8×10^6	$<1 \times 10^6$	8.0×10^6
Límite Máximo Permisible	2,000*	RR: 1** RNR: 5	No requerido

*Promedio Diario, **RR: Riego restringido, RNR: Riego no restringido

Respecto al mes anterior el número de coliformes fecales registró una disminución considerable en el nivel de contaminación. Tomando el valor más alto registrado durante el mes de septiembre (5.2×10^8 NMP/100 ml) y el más alto durante este mes (4.3×10^6 NMP/100 ml) la cuenta de OCF presentó un descenso de 2 órdenes de magnitud. Graniel y Carrillo (2006) en su investigación sobre la calidad del río Zanatenco en Chiapas, presentaron valores sobre OCF, las cuentas obtenidas fueron mayores a 2.4×10^4 NMP/100 ml, pero las registradas en este trabajo superan esa cifra por dos órdenes de magnitud en los sitios 3 y 4.

Los datos sobre huevos de helminto durante el mes de septiembre fueron menores en comparación a los obtenidos durante octubre. El valor más alto en el mes anterior (septiembre) fue de 2.0×10^5 unidades por litro mientras que en este muestreo fue mayor a 1×10^6 unidades por litro.

Los resultados de las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos son mostrados en la tabla 15. Se incluyen 4 parámetros que no son requeridos por la norma correspondiente pero que son de gran ayuda en el proyecto, aportando información adicional.

Como normalmente ha ocurrido, los valores de pH y temperatura se mantienen dentro de lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996. Otros de los parámetros que permanecen dentro de los LMP son el fósforo total y los sólidos sedimentables. Por otra parte, se encuentran los que exceden los límites permitidos entre ellos se encuentran las grasas y aceites, los sólidos suspendidos totales y materia flotante. Las grasas y aceites excedieron el límite máximo en los sitios 2 (puente de Instituto Tecnológico de Oaxaca), 3 (puente del Aeropuerto Internacional) y 4 (puente de la Villa de Zaachila), mientras que la materia flotante se encontró presente en todos los puntos de estudio.

TABLA 15. Cuantificación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, octubre 2019.

Parámetro	Sitio de muestreo				LMP*
	1	2	3	4	
Temperatura (°C)	22	27	28	26	40
pH (unidades)	7.2	7.0	7.4	7.4	5-10
Grasas y aceites (mg/L)	19	27	32	75	25
Materia flotante	Presente	Presente	Presente	Presente	Ausente
Sólidos sedimentables (mL/L)	0	0	0.1	0.6	2
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	146	183	464	267	125
Sólidos disueltos totales (mg/L)	431	521	824	874	N.R.**
Oxígeno disuelto (mg/L)	2	3	0.0	0.0	N.R.
NTotal (mg/L)	ND**	ND	ND	ND	60
PTotal (mg/L)	0.73	0.88	6.14	5.49	30
Caudal (L/s)	130	400	350	600	N.R.
Turbiedad (UTN)	4.32	6.1	85	90.8	N.R.
Dureza (mg/L)	291	274	359	359	N.R.

*Límite Máximo Permisible para Uso Público Urbano, promedio diario.

**N.R. No requerido por la norma, ND: No determinado.

De acuerdo con un reportaje de Zavala (2019) publicado en El Universal, cada año se arrojan alrededor de 18 millones litros de aceite de lubricante a ríos, mantos acuíferos, subsuelo y suelos de Oaxaca. En base a lo anterior, se podría decir que la principal fuente de contaminación por grasas y aceites son los talleres mecánicos, quienes probablemente arrojen sus desechos de manera directa al río o a través del sistema de drenaje.

Los valores pertenecientes a grasas y aceites aumentaron este mes en comparación a los obtenidos en el mes de septiembre. Los sitios 2 (puente del Instituto Tecnológico de Oaxaca), 3 (puente del Aeropuerto Internacional) y 4 (puente de la Villa de Zaachila) durante octubre presentaron una mayor concentración, rebasando los límites máximos permitidos en la norma correspondiente. La presencia de materia flotante se mantuvo constante durante el pasado muestreo y el actual. Los niveles de sólidos sedimentables no excedieron los LMP en ninguno de los dos últimos muestreos, fueron similares.

La concentración de los metales pesados se muestra en la tabla 16. Las determinaciones se realizaron en el SGM, ya que dentro de la institución no se contaba con lo necesario para llevar a cabo dichas determinaciones.

La tabla 16 registra los resultados de los análisis realizados por el SGM. Se muestran 8 metales pesados, los cuales son los que la NOM-001-SEMARNAT-1996 necesita conocer para realizar una descarga de aguas residuales a un bien nacional. De ellos ninguno supera el LMP, incluso algunos de los potencialmente dañinos como el plomo y el cadmio, se hallaron por debajo del límite de detección del equipo utilizado.

TABLA 16. Contaminación por metales pesados de las aguas del río Atoyac en los Valles Centrales de Oaxaca, octubre 2019.

Parámetro (mg/L)	Sitio de muestreo				LMP* (mg/L)
	1	2	3	4	
Arsénico	0.003	0.003	0.005	0.005	0.2
Cadmio	<0.00004	<0.00004	<0.00004	<0.00004	0.2
Cobre	0.013	0.004	0.002	0.001	6.0
Cromo	<0.00006	<0.00006	0.002	0.001	1.0
Níquel	0.003	0.003	0.004	0.004	4.0
Plomo	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.4
Zinc	0.006	0.005	0.012	0.059	20

*LMP: Límite Máximo Permisible para Uso Público Urbano, promedio diario.

Todas las trazas halladas se podrían atribuir al desgaste de las tuberías que presentan con el tiempo, ya sean provenientes del sistema de alcantarillado de la ciudad o de las tuberías propias de cada vivienda. Oaxaca no cuenta con suficientes fábricas que puedan contribuir a la contaminación por metales pesados.

Los resultados obtenidos por Félix y otros (2012) en su investigación sobre la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Moche en Perú, demuestran que el río en cuestión presentó concentraciones no mayores a los límites que permite la NOM-001-SEMARNAT-1996 al igual que los datos reportados en este estudio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De manera eficaz lograron montar y adaptar las técnicas necesarias para la cuantificación de los niveles de contaminación del Río Atoyac conforme a la NOM-001-SEMARNAT-1996. Se obtuvieron resultados satisfactorios y confiables, los cuales evidenciaron el alto grado de contaminación que presenta el río a lo largo de 38 km recorridos, desde el primer sitio (Soledad, Etla) de estudio hasta el último punto analizado (puente de Zaachila).

Debido a la poca disponibilidad de materiales para poder realizar la determinación de organismos coliformes fecales mediante la técnica del Número Más Probable (NMP), la cuantificación se realizó mediante la siembra en medios de cultivo sólidos, en este caso en Agar Cromogénico para Coliformes (ACC), consiguiendo resultados comparativos a los obtenidos mediante el procedimiento de Número Más Probable basado en el cultivo líquido en caldo lactosado seguido por el caldo EC. La técnica correspondiente a huevos de helminto se sintetizó ante la gran cantidad de reactivos requeridos para llevar a cabo la técnica, además de acortar el tiempo de identificación de los parásitos. Los resultados del método modificado fueron semejantes a los obtenidos cuando se siguió el procedimiento completo descrito en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

La técnica de grasas y aceites mejoró en gran medida al cambiar de solvente de extracción. La norma NMX-AA-005-SCFI-2013 indica utilizar hexano; sin embargo, se optó por realizar la operación empleando como solvente éter de petróleo, con el cual se logró obtener mejores resultados para el estudio. El número de reflujos entre solventes presentó gran diferencia, durante las primeras horas del proceso el hexano realizó un par de reflujos mientras que el éter de petróleo, durante el mismo lapso, realizó al menos 10 reflujos. Con lo anterior se logró una mejor extracción de las grasas y aceites en el agua.

Para el análisis de grasas y aceites en aguas residuales se recomienda utilizar éter de petróleo en lugar de hexano como se propone en la norma mexicana NMX-AA-005-SCFI-2013. En cuanto a la determinación de OCF y OCT se sugiere la utilización de medios sólidos como el ACC para la reducción de tiempos en el análisis.

REFERENCIAS

- Allen, L. (2015). *Manual de diseño para manejo de aguas grises pra riego exterior* . California : Greywater Action.
- Almazán Juárez, M. T., Almazán Juárez, Á., Carreto Pérez, B. E., Castro Hernández, E., Damián Nava, A., & Almazán Núñez, R. C. (2016). Calidad de clasificación de usos del agua en la cuenca baja del río Papagayo, Guerrero, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 293-305.
- Baird, C. (2004). *Química ambiental*. España: Reverté .
- Barba Ho, L. E. (2002). *Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición* . Santiago de Calli: Universidad del Valle.
- Bravo Inclán, L. A., Sánhez Chávez, J. J., Izurleta Dávila, J. L., & Tomasini Ortiz, A. C. (Octubre de 2015). Evaluación toxicológica del Río Atoyac, Pue., y su relación con los parámetros fisicoquímicos. Puebla.
- Campaña, A., Gualoto, E., & Chiluisa Utreras, V. (2017). Evaluación físico-química y microbiológica de la calidad del agua de los ríos Machángara y Monjas de la red hídrica del distritos etropolitano de Quito. . *Bionatura*, 305-310 .
- Carburos Metálicos . (s.f.). *Carburos Metálicos. Grupo Air Products* . Obtenido de Sitio Web de Carburos Metálicos. Grupo Air Products : <https://www.carburos.com/Industries/Analytical-Laboratories/analytical-lab-applications/product-list/inductively-coupled-plasma-icp-analytical-laboratories.aspx?itemId=8E471387439C4B518218FC44F3748E3D>
- CONAGUA. (01 de Diciembre de 1992). Ley de Aguas Nacionales. *Diario Oficial de la Federación*.

- Cruz, A. M. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Hidalgo: Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Cumbre Pueblos. (23 de Octubre de 2017). *Cumbre Pueblos*. Obtenido de Sitio Web de Cumbre Pueblos: <https://cumbrepuebloscop20.org/medio-ambiente/contaminacion/aire/>
- Domos Agua. (08 de Junio de 2018). *Domos Agua*. Obtenido de Sitio Web de Domos Agua: <https://www.domosagua.com/blog/descargas-aguas-residuales>
- Encinas, M. M. (2011). *MEDIO AMBIENTE Y CONTAMINACIÓN. PRINCIPIOS BÁSICOS*.
- FAO. (21 de Agosto de 2019). *FAO*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/glossary/search.html?lang=es&keywords=Agua+residual&submit=Buscar&subjectId=-1&submitBtn=-1&_p=100&termId=-1
- FAO. (s.f.). *Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de Sitio Web de Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Félez, S. M. (2009). *Situación actual del estado de la depuración biológica. Explicación de los métodos y sus fundamentos (Proyecto Final de Carrera)*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Fernández-Alba, R. A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: Elecé Industria Gráfica.

- G., M. O. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 16-25.
- Galindo, J. Á., Vázquez-Castán, L., Cruz-Lucas, M. A., López-Ortega, M., & San Martín del Ángel, P. (2005). Contaminación del Río Cazonas, Veracruz, México durante el periodo octubre 2004-junio 2005. *Revista UDO Agrícola*, 74-80.
- García, I. M., Rodríguez, J. R., Rodríguez, J. J., Suárez, B. P., Bocardo, J. R., & Martín, N. S. (2006). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población*. Canarias: Daute Diseño, S.L.
- García-Astillero, A. (06 de Agosto de 2018). *Ecología verde*. Obtenido de Sitio Web de Ecología verde: <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-tratamiento-de-aguas-residuales-1448.html>
- Graniel, C. E., & Carrillo, C. M. (2006). Calidad del aguas del río Zanatenco en el estado de Chiapas. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 35-42.
- Guzmán-Colis, G., Ramírez-López, E., Thalasso, F., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A., & Avelar-González, F. (2011). Evaluation of pollutants in water and sediments of the San Pedro river in the state of Aguascalientes. *UNIVERSIDAD Y CIENCIA TRÓPICO HÚMEDO*, 17-32.
- Hernández, C. A. (03 de Febrero de 2019). Agoniza el río Atoyac en Oaxaca; señalan omisión de autoridades. *El Imparcial de Oaxaca*.
- Holguín, C., Rubio, H., Olave, M. E., Saucedo, R., Gutiérrez, M., & Bautista, R. (2006). Calidad del agua del Río Conchos en la región de Ojinaga, Chihuahua: parámetros fisicoquímicos, metales y metaloides. *Universidad y Ciencia*, 51-63.

- Huaranga Moreno, F., Méndez García, E., Quilcat León, V., & Huaranga Arévalo, F. (2012). Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980-2010, La Libertad-Perú. *Scientia Agropecuaria*, 235-247.
- Jiménez, V., Méndez, B., Alvarado, G., & Rivera, F. (2000). Diagnóstico ambiental de la cuenca del río Atoyac, Guerrero. *Revista Altamirano Segunda Época* 16, 14-21.
- Lenoir, C., & Tornari, G. (2004). Contaminación y tratamiento de suelos. 1-66.
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la química ambiental*. D.F.: Reverté.
- Marcus, J. (2008). *Monte Albán*. Ciudad de México: Fondo de cultura económica.
- Marín Solano, A. M. (2005). *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del zinc*. Murcia: Universidad de Murcia, Tesis de Doctorado.
- Martínez, C. A. (13 de Mayo de 2019). Oaxaca de Juárez, Oaxaca. Obtenido de <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=2048005708656071&set=pb.100003399862011.-2207520000.1570409561.&type=3&theater>
- Matías, P. (02 de Abril de 2018). El PJF otorga amparo para la protección de los ríos Salado y Atoyac: Litigio Estratégico Indígena. *Proceso*.
- Metcalf & Eddy, I. (1995). *Ingeniería de aguas residuales*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Morales Novelo, J. A., Rodríguez Tapia, L., & Torres Ayala, F. (2015). Modelo de contaminación del río Atoyac e incidencia de enfermedades en la región Puebla-Tlaxcala.
- National Geographic. (5 de Septiembre de 2010). *National Geographic*. Obtenido de Sitio Web de National Geographic:

<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/la-contaminacion-del-aire>

Oaxaca, I. T. (2013). *Eduardo Cruz Consultoria y Asesoría en Negocios*. Obtenido de Sitio Web de Eduardo Cruz Consultoria y Asesoría en Negocios:
<http://www.eduardocruz.org/instituto-tecnologico-de-oaxaca-libro.html>

OPS. (s.f.). *Organización Panamericana de la Salud*. Obtenido de Sitio Web de la Organización Panamericana de la Salud:
https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es

Orellana, J. A. (2015). *Universidad Tecnológica Nacional*. Obtenido de Sitio web de la Universidad Tecnológica Nacional:
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_02_Contaminacion.pdf

Oyarzún G., M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 16-25.

Peña Pulla, E. (2007). *Calidad del agua*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Pérez, C. M. (s.f). *Cosemar Ozono*. Obtenido de Sitio Web de Cosemar Ozono:
https://www.cosemarozono.es/pdf/noticia_22.pdf

Pineda, A. C. (06 de Agosto de 2019a). Comunidades de Oaxaca luchan por salvar el gigante contaminado. *El Imparcial de Oaxaca*.

Pineda, A. C. (19 de Agosto de 2019b). Río Atoyac y Salado, los más contaminados. *El Imparcial de Oaxaca*.

Pino, S. J., & Calderón, S. M. (2015). *Depuración de aguas residuales*. España : ELEARNING S.L.

- Presidencia de la República. (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2017). *Hacia un planeta sin contaminación*. Nairobi.
- RAE. (diciembre de 2018). *Diccionario de la lengua española* . Recuperado el 22 de agosto de 2019, de dle : <https://dle.rae.es/?id=1BKpQj3>
- Raffo Lecca, E., & Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industria Data*, 71-80.
- Ramalho, R. S. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Reverté.
- Ríos Tobón, S., Agudelo Cadavid, R. M., & Gutiérrez Builes, L. A. (2017). Patógeno e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 236-247.
- Rivas, G. L. (7 de Abril de 2017). La lucha por el agua en los valles centrales oaxaqueños. *La Jornada*.
- Rivera-Vázquez, R., Palacios-Vélez, Ó., Chávez Morales, J., A. Belmont, M., Nikolski-Gravilov, I., De la Isla de Bauer, M., . . . Carrillo-Gonzalez, R. (2007). Contaminación por coliformes y helmintos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 69-77.
- Rodríguez V., J. A. (sf). *Ingeniero ambiental*. Obtenido de Sitio web de Ingeniero ambiental: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. México: alfa omega.

- Romeu Álvarez , B., Larrea Murrell, J., Lugo Moya , D., Rojas Hernández , N., & Heydrich Pérez, M. (2019). Calidad microbiologica de las aguas del río Lúyano, La Habana, Cuba. *CENIC*.
- Ruda de Schenquer, E. E., Mongiello, A., & Acosta, A. (2004). *CONTAMINACIÓN Y SALUD DEL SUELO*. Santa Fe, República Argentina: UNL.
- S. (04 de Agosto de 1980). NMX- F-068-S-1980. Alimentos. Determinación de proteínas. Foods. Determination of proteins. *Diario Oficial de la Federación* .
- S. Clesceri, L., E. Greenberg, A., & Rhodes Trussel, R. (1989). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association.
- Salud, O. M. (2006). Guías para la calidad del agua potable. *Volumen 1*(Tercera Edición). Suiza. Recuperado el 19 de 09 de 2018, de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf
- Sandoval Villasana Ana María, P. F. (2009). Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Interciencia*, 880-887.
- SCFI. (2001). NMX-AA-012-SCFI-2001. Método para la determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales. *Diario oficial de la Federación*.
- SCFI. (2002). NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de turbiedad en aguas naturales. residuales y residuales tratadas. Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (30 de Septiembre de 2010). NMX-AA-006-SCFI-2010. Análisis de agua. Determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas. Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.

- SCFI. (13 de Noviembre de 2013). NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de agua. Medición de sólidos sedimentales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (2013). NMX-AA-113-SCFI-2012 Análisis de agua. Medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica. Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (11 de Abril de 2014). NMX-AA-005-SCFI-2013 Análisis de agua- Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-005-SCFI-2000). *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (2014). NMX-AA-007-SCFI-2013 Análisis de agua. Medición de la temperatura en aguas residuales y residuales tratadas. Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (18 de Abril de 2016). NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua. Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación*.
- SEMARNAT. (06 de Enero de 1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES. *Diario Oficial de la Federación*.
- SEMARNAT. (21 de Septiembre de 1998). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS

QUE SE REÚSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO. *Diario Oficial de la Federación*.

SEMARNAT. (03 de Junio de 1998). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL. *Diario Oficial de la Federación*.

SEMARNAT. (2013). *Biblioteca Digital*. Obtenido de Sitio Web del Gobierno de México:
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>

SEMARNAT. (04 de Septiembre de 2017). *SEMARNAT*. Obtenido de sinat.semarnat.gob.mx:
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/oax/estudios/2009/200A2009H0045.pdf>

Silva Arroyave, S. M., & Correa Restrepo, F. J. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de la regulación económica. *Semestre económico*, 13-39.

Soledad, R. B. (2009). *Aplicaciones en Venezuela del tratamiento de aguas residuales y su utilización*. Lulu.

SSA. (26 de Junio de 2015). NOM-210-SSA1-2014, Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos. *Diario Oficial de la Federación*.

Stellman, J. M. (1998). *ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO*. Madrid España: Chantal Dufresne, BA.

- Tuset, S. (09 de Abril de 2019). *Condorchem*. Obtenido de Sitio Web de Condorchem: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>
- Velásques, J. B. (1985). EL HOMBRE Y SU AMBIENTE. La problemática de contaminación y aportes para su solución. *Anales de la Facultad de Minas*, 104-126.
- Vilanova, R., Santín, I., & Pedret, C. (2017). Control y Operación de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Modelado y Simulación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 217-233.
- WHO. (2 de Mayo de 2018). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Sitio Web Mundial de la Organización Mundial de la Salud: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health#](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health#)
- Zavala, J. C. (15 de 01 de 2019). Se arrojan 18 millones de litros de aceites a ríos de Oaxaca. *El Universal*.