

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**

TESIS

**REMOCIÓN DE COLIFORMES
TOTALES EN AGUA UTILIZANDO
BIXA ORELANA L. COMO
FOTOSENSIBILIZADOR**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:

PEDRO MENDOZA CRUZ

DIRECTORES:

**DR. CARLOS MANUEL GARCÍA LARA
ING. FLOR DE MAGALY GONZÁLEZ HILERIO**

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

JUNIO 2023





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA GENERAL
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
Fecha: 19 de junio de 2023

C. Pedro Mendoza Cruz

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería ambiental

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:
Remoción de coliformes totales en agua utilizando *Bixa Orellana* L. como fotosensibilizador

En la modalidad de: Tesis

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Dr. Carlos Manuel García Lara

Firmas:

Ccp. Expediente

DEDICATORIA

Dedico este trabajo al Dr. Carlos Manuel García Lara, por permitirme trabajar en su proyecto de investigación para desarrollar esta tesis con el objetivo de adquirir nuevos conocimientos y terminar mi formación académica y profesional.

Dedico también este proyecto a la memoria del Sr. Rafael Aguilar Tovilla (†) y de la Sra. Hilda Cruz Martínez (†), quienes dejaron esta vida mientras se realizaba este trabajo, dejándome sus enseñanzas de tener siempre la iniciativa para realizar las cosas y ser constantemente paciente mientras llega nuestro momento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por no dejarme solo en mi caminar y por ser mi fuente de luz espiritualmente.

Agradezco a mis padres, Luis Antonio Mendoza Rodríguez y María del Carmen Cruz Álvarez por todo el apoyo y los consejos que me han brindado para aprender y mejorar como persona.

Agradezco a mis hermanos, Nadxheli Mendoza Cruz y Luis Antonio Mendoza Cruz por estar pendiente de mí y de su constante interés en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a mis abuelos, Luis Mendoza Cabrera, Elena Rodríguez Clemente, Anabella Álvarez Villalobos y Pedro Cruz Martínez (†), quienes son base primordial de mi vida, y quienes me guían a través de sus experiencias y me llenan de felicidad al estar con ellos.

Agradezco al resto de mi familia paternal y maternal por siempre creer en mí.

Agradezco a mis amigos, Ángel Fernando Macías Guzmán, María Angela Pérez Gordillo y Diego Alexis López Villegas quienes me acompañaron en dicho trabajo.

Agradezco al Programa Educativo de Ingeniería Ambiental por todo el apoyo realizado en mi formación profesional.

Agradezco a los doctores, Hugo Alejandro Nájera Aguilar y Rubén Alejandro Vázquez Sánchez por su contribución en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco al doctor Carlos Manuel García Lara, por aceptarme en su investigación, por el tiempo, la paciencia y su conocimiento brindado, así como también por darme el impulso de seguir adelante.

Y, por último, pero no menos importante, un AGRADECIMIENTO ESPECIAL a la Ing. Flor de Magaly González Hilerio que desde el principio del desarrollo de la tesis estuvo apoyándome, por todas las recomendaciones y conocimientos aportados en mi proyecto y sobre todo por dirigirme en este trabajo.

RESUMEN

Chiapas es el estado con mayor disponibilidad de agua en México con dos de los ríos más caudalosos; la calidad del agua que tiene el estado ha ido en descenso por los contaminantes que se generan como lo son; la contaminación agropecuaria, el mal manejo de los residuos sólidos, las aguas residuales y domésticas sin tratar, entre otros factores. Como consecuencia, provoca daños a la salud en la población; siendo las más afectadas las zonas marginadas quienes no cuentan con agua potable.

Se construyó un tren de tratamiento para la desinfección de una muestra de agua que contenía altas concentraciones de coliformes totales, se sometió al tratamiento de fotosensibilización utilizando 6 concentraciones diferentes de *Bixa orellana* L. (3, 6, 9, 12, 15 y 21 mg/L), siendo las de menor concentración las que presentaron una remoción del 90 por ciento, obteniendo que la concentración de 12 mg /L fue la más óptima con una remoción del 99.9 %.

Este método facilita la desinfección microbiológica del agua, sin generar gastos excesivos en su manipulación, siendo un método de potabilización del agua accesible para zonas marginadas, lo que contribuye a prevenir problemas de salud.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xi
LISTADO DE ABREVIATURAS.....	xii
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xiii
NORMATIVIDAD APLICABLE.....	xv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación	5
CAPÍTULO II	8
Marco Teórico	8
2.1. El agua en la sociedad.....	8
2.2. Los microorganismos y las enfermedades del agua.....	11
2.2.1. Bacterias.....	11
2.2.2. Virus	12
2.2.3. Parásitos	12
2.3. Radiación Solar	13
2.3.1. Ondas Electromagnéticas.....	13
2.3.2. Espectro Electromagnético.....	13
2.4. Colorantes	14
2.4.1. Colorantes artificiales.....	14
2.4.2. Colorantes naturales	15
2.4.2.1. Achiote	15
2.5. Métodos de desinfección	16
2.5.1. Cloro.....	16
2.5.2. Ozono	17
2.5.3. Luz Ultravioleta.....	17
2.5.4. Fotosensibilización.....	17
2.5.4.1. Excitación de moléculas.....	17

2.5.4.2.	Formación del Oxígeno Singlete	19
2.5.4.3.	Fotosensibilizadores	20
2.6.	Antecedentes	21
CAPÍTULO III.....	23
3.1.	Objetivos	23
3.1.1.	Objetivo General.....	23
3.1.2.	Objetivos específicos.....	23
3.2.	Hipótesis	24
CAPÍTULO IV	25
4.1.	Metodología	25
4.1.1.	Diseño y construcción del tren de tratamiento	25
4.1.2	Caracterización de los parámetros físicos del tren de tratamiento.....	27
4.1.3	Caracterización del grado de fotosensibilización del colorante	29
4.1.3.1.	Bixa orellana L.....	29
4.1.3.2	Extracción del colorante	29
4.1.3.3	Medición de la semilla de Bixa orellana L.	31
4.1.4.	Selección de la muestra	31
4.1.5.	Toma de muestra.....	32
4.1.6.	Análisis microbiológico.....	33
4.1.6.1	Cálculo de la densidad de coliformes.....	34
4.1.7	Pruebas de fotosensibilización	35
4.1.8.	Efecto de la radiación solar en la degradación de la semilla	37
4.1.9	Medición de absorbancia	37
CAPÍTULO V.....	39
5.1.	Resultados.....	39
5.1.1	Grado de fotosensibilización del colorante natural <i>Bixa orellana</i> L.	39
5.1.2.	Medición de semillas de <i>Bixa orellana</i> L.	40
5.1.3.	Medición de absorbancia	41
5.1.4.	Efecto de la radiación solar en la degradación de la semilla.....	41
5.1.5	Conteo de Unidades Formadoras de Colonias	43
5.1.6.	Análisis microbiológico.....	44
CAPÍTULO VI	47
6.1.	Conclusiones	47

Referencias	48
Anexos	54
Anexo 1. Seguridad hídrica y carencias por servicios básicos	54
Anexo 2. Morbilidad y Mortalidad por Infecciones Intestinales en Chiapas.....	56
Anexo 3. Disponibilidad de agua en México.....	57
Anexo 4. Sitios de calidad de agua en Chiapas	58
Anexo 5. Costos totales	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Materiales y función de los mismos en el tren de tratamiento.....	25
Cuadro 2. Remoción total del colorante achiote de 10 grupos de 10 semillas.....	30
Cuadro 3. Remoción total del colorante achiote de 10 semillas.....	30
Cuadro 4. Volúmenes de muestra sugeridos para la prueba de coliformes totales	33
Cuadro 5. Número de colonias en el rango ideal por determinaciones cuantitativas	34
Cuadro 6. Diluciones empleadas para el análisis microbiológico.....	34
Cuadro 7. Valores de la radiación solar en el horario de 11:00 a 15:00	36
Cuadro 8. Concentraciones del colorante.....	36
Cuadro 9. Normatividad Mexicana aplicables al color verdadero del agua.....	38
Cuadro 10. Resultados de análisis microbiológicos del 13 de octubre de 2022.....	45
Cuadro 11. Resultados de análisis microbiológicos del 11 de noviembre de 2022	45
Cuadro 12. Incidencia y número de personas en los componentes del indicador carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda en Chiapas, 2008-2018	55
Cuadro 13. Morbilidad de Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas en el estado de Chiapas.....	56
Cuadro 14. Mortalidad de Infecciones intestinales en el estado de Chiapas	56
Cuadro 15. Costos de las semillas <i>Bixa orellana</i> L. y cantidad usada.	59
Cuadro 16. Costos de materiales del tren de tratamiento	59
Cuadro 17. Costos por análisis microbiológico (influyente).....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Temas clave de la agenda global. Agua, Problema mundial. Fuente: Foro Económico Mundial (2018) citado de (Arreguín-Cortés et al., 2020).....	8
Figura 2. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua superficial, según categoría de DBO ₅ , 2017. Fuente: Conagua, 2017 citado de (SEMARNAT, 2018)	9
Figura 3. Distribución porcentual de sitios de monitoreo de calidad del agua superficial, según categoría de DQO, 2017. Fuente: Conagua, 2017 citado de (SEMARNAT, 2018).....	9
Figura 4. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua superficial, según categoría de SST, 2017. Fuente: Conagua, 2017 citado de (SEMARNAT, 2018)	10
Figura 5. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua superficial, según categoría de CF, 2017. Fuente: Conagua, 2017 citado de (SEMARNAT, 2018)	10
Figura 6. Sitios Superficiales y Subterráneos ubicados en el Estado de Chiapas. Fuente: (CONAGUA, 2021)	11
Figura 7. Características principales de una onda. Elaboración propia inspirado en la imagen de ChemWiki de UC Davis (Universidad de California en Davis). Fuente: (Khan Academy, 2023).....	13
Figura 8. Espectro electromagnético. Fuente: Shutterstock	14
Figura 9. Estructura química de la bixina y norbixina. Fuente: (Mariani, 2020)	16
Figura 10. Proceso de fotosensibilización para la fotogeneración de oxígeno singlete (¹ O ₂). Fuente: (García-Fresnadillo, 2005)	20
Figura 11. Vista general de la planta piloto. Fuente: (A. Acher et. al. 1990)	22
Figura 12. Tren de tratamiento. Archivo propio	27
Figura 13. Materiales para formar una canaleta. Elaboración propia	27
Figura 14. Perforación del tubo. Elaboración propia	28
Figura 15. Canaletas. Elaboración propia.....	28
Figura 16. Cuarta canaleta. Elaboración propia.....	28
Figura 17. Base del tren. Elaboración propia.....	29
Figura 18. Calibración del microscopio digital. Archivo propio	31
Figura 19. Regla de calibración. Archivo propio	31
Figura 20. Ubicación del área de estudio para la toma de muestras. Elaboración propia.....	31
Figura 21. Pozo entubado a la vertiente. Archivo propio	32
Figura 22. Vertiente. Archivo propio.....	32
Figura 23. Desarrollo del método de filtración por membrana. Archivo propio.....	33

Figura 24. Trenes de tratamiento. Archivo propio	35
Figura 25. Portamuestras BCH100A. Archivo propio	37
Figura 26. Espectrómetro Ocean Optics Inc. USB4000. Archivo propio	37
Figura 27. Prueba de factibilidad del achiote. Archivo propio.....	39
Figura 28. Medición de la semilla. Archivo propio	40
Figura 29. Resultado de la remoción de la semilla de achiote. Archivo propio	40
Figura 30. Entrada al 0.5% de dilución. Nov. Archivo propio	44
Figura 31. Entrada al 10% de dilución. Sept. Archivo propio	44
Figura 32. Conteo de una cuarta parte de UFC. Archivo propio	44
Figura 33. Índice de seguridad hídrica en la república mexicana. Fuente: Rodríguez et al. (2017) citado de (Arreguín-Cortés et al., 2020)	54
Figura 34. Cuencas de México y su disponibilidad. Fuente: Conagua (2018)	57
Figura 35. Acuíferos de México y su disponibilidad. Fuente: Conagua (2018)	57
Figura 36. Sitios de la calidad del agua superficial 2021 KMZ. Fuente: (CONAGUA, 2021) ...	58

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva de calibración de absorbancia. Elaboración propia	41
Gráfica 2. Absorción de la muestra en función a la dosis de <i>Bixa orellana</i> L. Elaboración propia.	42
Gráfica 3. Diagrama de cromaticidad del <i>Bixa orellana</i> L. Elaboración propia	43
Gráfica 4. Porcentaje de remoción de coliformes totales con línea de simulación.	46
Gráfica 5. Tasa de Mortalidad por Infecciones Intestinales en el estado de Chiapas en el periodo 2018-2020.	56

LISTADO DE ABREVIATURAS

AM: Azul de metileno

ARG: Bacterias resistentes a los antibióticos

CF: Coliformes fecales

CEC: Contaminantes preocupantes emergentes

CIE: Clasificación Internacional de Enfermedades

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

DBP: Subproductos de desinfección

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días

DGE: Dirección General de Epidemiología

DQO: Demanda Química de Oxígeno

E. Coli: *Escherichia coli*

EDAS: Enfermedades Diarreicas Agudas

EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

ETDA: Entrada

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

OMS: Organización Mundial de la Salud

OPS: Organización Panamericana de la Salud

PAOs: Procesos Avanzados de Oxidación

SMAPA: Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado

SPD: Subproductos de desinfección

SST: Sólidos Suspendedos Totales

SUIVE: Sistema Único de Información para la Vigilancia Epidemiológica

THM: Trihalometanos

TTO: Tratamiento

UC: Unidades de color

UV: Radiación ultravioleta

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Agua potable: Aquella cuyo uso y consumo no causa efectos nocivos al ser humano.

***Bixa orellana* L:** Nombre científico que se le da al achiote.

Carotenoides: Pigmento natural que se encuentran en las plantas; dentro del carotenoide del achiote se extrae la bixina y norbixina.

Coliformes totales: Organismos aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35° C en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas en un período de 48 h.

Desinfección: Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

Espectro electromagnético: Intervalo de ondas electromagnéticas cuya frecuencia va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma.

Estado fundamental: Nivel de energía más bajo posible del átomo en cuestión.

Estado singlete y triplete: Multiplicidad de espín e indica el número de estados, diferentes, que tienen la misma energía, porque no depende del espín, pero que son degenerados por ello.

Filtración por membrana: Proceso que se utiliza para el tratamiento de aguas, en el cual se atrapan en la superficie de la membrana microorganismos de tamaño menor que el específico del poro pasan por la membrana o quedan retenidos en su interior, luego esta es llevada a un medio selectivo, quien a través de intercambio metabólico y una incubación, evidencian el crecimiento de microorganismos y unidades formadoras de colonias.

Fotodegradación: Alteración de materiales por efecto de la luz.

Fotosensibilización: Proceso en el cual en el cual se transfiere la energía de excitación electrónica de una molécula a otra.

Límites máximos permisibles: Concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

Molécula excitada: Aquel en el que algún electrón salta de la órbita que ocupaba en estado fundamental a una órbita exterior, más alejada del núcleo.

Morbilidad: Cantidad de personas que enferman en un periodo de tiempo determinados en relación con el total de la población.

Mortandad: Cantidad de muertes causadas por una desgracia o enfermedad.

Onda Electromagnética: Onda portadora de energía emitida por una carga eléctrica vibratoria (frecuentemente electrones), formada por campos eléctricos y magnéticos que oscilan y se regeneran entre sí.

Oxígeno molecular singlete: El término oxígeno singlete se refiere habitualmente solo al estado Δ_g .

Sensibilizador/Fotosensibilizador: Colorante que en su estado excitado es capaz de ceder o transferir su exceso de energía a otra molécula presente en el medio circundante, obteniéndose un estado excitado de la misma.

Tren de tratamiento: Combinación particular de procesos unitarios o sistemas empleados para alcanzar un objetivo específico de tratamiento.

NORMATIVIDAD APLICABLE

En el desarrollo del presente estudio se tomaron como referencia las normas y métodos que se indican a continuación.

NORMA OFICIAL MEXICANA (NOM)

NOM-127-SSA1-994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

NORMA MEXICANA (NMX)

Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018, Calidad del agua – Enumeración de Escherichia Coli y Bacterias Coliformes. Método de filtración por membrana.

APHA, AWWA, & WEF. (2012). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (E. W. Rice, R. B. Baird, A. D. Eaton, & L. S. Clesceri (eds.); 22nd Edition). American Public Health Association.

NMX-AA-014-1980 Cuerpos receptores – Muestreo

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

El uso de la fotosensibilización en el agua es una técnica de desinfección que elimina a los microorganismos que se encuentran presentes en ella; en el proceso interviene los fotones o radiación solar, el sensibilizador o fotosensibilizador, el oxígeno y un colorante sensibilizador por medio del cual se remueven los coliformes presentes en el agua. El sensibilizador (S) *Bixa orellana* L., cumple con la función de absorber los fotones de luz dando lugar a uno o varios estados ricos en energía (estados singletes y estados tripletes) alterando químicamente la reacción de otra molécula (sustrato P) dentro del sistema. Una vez esté excitada la molécula sensibilizadora, puede reaccionar directamente con el oxígeno molecular $O_2(3\Sigma_g)$ dando normalmente el oxígeno molecular singlete $O_2(1\Delta_g)$ que a su vez reaccionan con el sustrato y, el estado triplete del carotenoide vuelve al estado básico con la liberación de calor. (Montenegro et al., 2004).

La *Bixa orellana* L. conocida como achiote, annatto o urucum, contiene pigmentos derivados de carotenoides (bixina y norbixina) cubriendo la semilla (Rios et al., 2007). El urucum contiene propiedades antimicrobianas de acuerdo a varios artículos, aprobado por el Departamento de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos de América (Rivera-Madrid, 2021) por ser un colorante orgánico que no afecta la salud.

En Chiapas, el incremento de la contaminación de los ríos ha causado preocupación en la sociedad, causando problemas gastrointestinales debido al exceso de coliformes totales que marca los límites máximos permisibles del Criterio Ecológico de la Calidad del Agua (Salcedo Garduño, 2019). De acuerdo al Anuario de Morbilidad, en el estado de Chiapas, las infecciones intestinales estuvieron en los primeros tres lugares de las 20 principales enfermedades en el año 2018-2021 afectando mayormente a niños menores de 10 años. Consecuentemente en el mismo periodo, el grupo más vulnerable por los casos de mortandad fueron los adultos mayores de 65 años en adelante al padecer infecciones intestinales. (Secretaría de Salud; DGIS, 2022).

Mencionado lo anterior, la aplicación de la técnica de fotosensibilización innovará en la desinfección de aguas en zonas con escasa disponibilidad de acceso al agua potable. Las comunidades tendrán la oportunidad de purificar su agua con este método simple y económico; que a su vez, dará paso a la disminución de problemas gastrointestinales sin perjudicar su salud, en la cual se administra dosis inadecuadas para limpiar el agua en comparación de la cloración, se administra las dosis inadecuadas para limpiar el agua y como consecuencia se produce trihalometanos, subproductos que aumentan la probabilidades de desarrollar cáncer (Saldaña Gonzales & Franco Avila, 2022).

Siguiendo lo descrito por (A. J. Acher et al., 1994), se diseñó y construyó un tren de tratamiento de aguas para la eliminación de los microorganismos implementando la técnica de fotosensibilización, utilizando concentraciones de 3 mg/L, 6 mg/L, 9 mg/L 12 mg/L, 15 mg/L y 21 mg/L de achiote, tratando 8 L., de agua muestra, obteniendo resultados favorables con la concentración de 12 mg/L., removiendo 99.9% de microorganismos, reduciendo de un promedio de 10,500 Unidades Formadoras de Colonias (UFC) a 10 UFC en un tiempo de 20 minutos.

1.2. Planteamiento del problema

En las últimas décadas, se ha reducido la disponibilidad del agua en México. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realiza estudios para los análisis de la seguridad hídrica municipal, que demuestran cuantos municipios se encuentran en riesgo de no contar con agua suficiente y con la calidad adecuada para satisfacer las necesidades de la población o por estar expuestos a daños de los fenómenos hidrometeorológicos (Fig. 33, Anexo 1) (Arreguín-Cortés et al., 2020).

En Chiapas, desde el año 2008 hasta el 2018, existió un incremento de 3.9 % por carencia de acceso a servicios básicos en el hogar. Ese mismo año, los niveles de carencia en el país fueron de 19.8%; Chiapas sobrepasó ese porcentaje con el 37.3 % ocupando el tercer lugar dentro de las 32 entidades federativas. Y en el apartado para acceder al agua, Chiapas disminuyó 11% en 2008 hasta el 2018 (Cuadro 11, Anexo 1) (CONEVAL, 2020).

Chiapas cuenta con diversos ríos que concentran una contaminación leve hasta mala, algunos ejemplos son el río Usumacinta, que excede los límites máximos permisibles de nitrógeno y de coliformes totales dentro del Criterio Ecológico de la Calidad del Agua aumentado más en temporada de lluvias; representando un riesgo en el ambiente y para las comunidades que viven a las orillas del río. (Salcedo Garduño, 2019). Luego está el Río Suchiate, que se encuentra fuertemente contaminado por las aguas residuales sin tratamiento, y, los residuos que se vierten en él perjudican a quienes utilizan el agua de la cuenca para el riego de sus sembradíos, así como en la población (Kuromiya & Rojas-Pérez, 2021). Por último, hay estudios del río Grijalva donde la presencia de mercurio y arsénico es mayor en la época de sequías, en tanto que el contenido de Sólidos Suspendidos Totales y Demanda Química de Oxígeno, no tuvo diferencias entre épocas de muestreo y las concentraciones de coliformes totales y *E. coli*, superaron los valores permisibles en todos los puntos de muestreo en las dos épocas de muestreo (Musalem-Castillejos et al., 2018).

La mala calidad del agua genera enfermedades en la población debido a los microorganismos y a las múltiples sustancias que se liberan de las actividades humanas, enfermando gravemente a menores de 5 años causado por colera, hepatitis, fiebre tifoidea, diarrea, amibas y triquina. Por otra parte, los productos químicos son otro factor que llegan a perjudicar, conteniendo fósforo, nitrógeno, potasio entre otros sintéticos, alterando la flora y fauna acuática. Otros contaminantes son los metales pesados como el mercurio, el cadmio, el plomo, el arsénico, el cromo, etc. que provocan anomalías en la salud causando problemas cardiovasculares, pérdida de control de movimientos incluso hasta dar cáncer. (Guerrero Legarreta, 2010)

El Sistema Único de Información para la Vigilancia Epidemiológica (SUIVE), la Dirección General de Epidemiología (DGE) y la Secretaría de Salud cuentan con un anuario de morbilidad que maneja el gobierno de México desde 1984, año tras año se actualiza para diagnosticar las estadísticas de los padecimientos registrados. En dicha lista, se encuentra las “Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas” que, de acuerdo con la Clasificación Internacional de Enfermedades 10ª Revisión (CIE 10ª Revisión), los códigos que se ubican dentro de este apartado son las enfermedades infecciosas intestinales siendo: A04, Otras

infecciones intestinales bacterianas; A08, Infecciones intestinales debidas a virus y otros organismos especificados, a excepción de A08.0 Enteritis debida a rotavirus y por último A09, Diarrea y gastroenteritis de presunto origen infeccioso (Secretaría General de Salud Digital; Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud, 2022). De las 20 principales causas de enfermedad en Chiapas, por grupos de edad; el padecimiento de infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas ocupó el segundo y tercer puesto en los años 2018 al 2021. Los grupos más afectados son los niños menores de 10 años y jóvenes de 20 a 24 años, los grupos menos perjudicados son las personas mayores de 60 en adelante (Cuadro 12, Anexo 2)(Secretaria de Salud; DGE, 2022).

Se han realizado estudios sobre el padecimiento de enfermedades gastrointestinales en el municipio de Chiapa de Corzo, los Altos de Chiapas y la Selva Zoque. Chiapa de Corzo obtuvo varios casos dentro del 2015 al 2020; reportó más de 1500 padecimientos y donde no mantiene una buena calidad del agua entubada proveniente de la red (Alfaro Moreno, 2021). Por otra parte, los Altos de Chiapas y la Selva Zoque también padecen de esta morbilidad por lo que han tenido que acudir a las plantas medicinales de la zona para calmar los síntomas (Orantes-García et al., 2018) (Lara et al., 2019).

La tasa de mortalidad nacional de enfermedades diarreicas por cada 100 mil menores de 5 años de edad en el 2021 fue de 30.74% (SINA; COFEPRIS, 2022). De igual forma en el 2020, datos el INEGI revela que hubo 506 casos de EDAS (Enfermedades Diarreicas Agudas) en párvulos de preescolar, la causa principal de muerte fue clasificada como diarrea y gastroenteritis representando el 86.6%. Como segunda causa, fue las infecciones intestinales con 11.9% (INEGI, 2021). En Chiapas, la mortalidad por infecciones intestinales es baja a comparación de otras causas, pero no insignificantes. Del año 2018 al 2020, fallecieron 934 personas. Quienes son los grupos más vulnerables ante la causa, son los adultos mayores de 65 años en adelante y, ocupando el segundo lugar son los niños menores de un año. La otra agrupación menos endeble se encuentra entre los 15 a 24 años de edad y de 5 – 14 años (Cuadro 13, Anexo 2). (Secretaria de Salud; DGIS, 2022) En la página 57 se muestra la gráfica 5 el cuál se resume a lo largo del 2018-2020 los casos de defunciones totales de hombres y mujeres, así mismo, se muestra el total de ambos sexos.

Entre los métodos de desinfección del agua más conocidos están los compuestos derivados del cloro, cloraminas y el ozono. También se aplica la luz ultravioleta de baja frecuencia. (Borda Prada et al., 2021). El cloro es el desinfectante más usado por tener el precio más accesible en el mercado; pero, al entrar en contacto con el agua reacciona con la materia orgánica generando subproductos de desinfección conocidos como trihalometanos provocando cáncer que afectan a miles de personas (Mazhar et al., 2020). Por otra parte, aunque existan estudios cerciorando al ozono como el mejor método de eliminación de organismos protozoos, también cuenta con desventajas como los altos costos y la producción de bromato por sus altas exposiciones del mismo (Driedger et al., 2001). Del mismo modo, la luz ultravioleta maneja un alto valor en el mercado y es menos eficaz para inactivar virus, esporas y bacterias.(Gomes et al., 2019). Para evitar daños a la salud, la fotosensibilización es un método para el tratamiento de aguas aplicando *Bixa orellana* L. para inactivar los coliformes y prevenir que las comunidades asentadas en las orillas de los ríos y en zonas donde no cuentan con agua potable en Chiapas, reduzcan sus problemas gastrointestinales sin afectar economía.

1.3. Justificación

La OMS menciona que el agua potable y el saneamiento están reconocidos como derechos humanos fundamentales, siendo indispensable para asegurar el sustento saludable de los hogares garantizando los servicios de abastecimiento de agua, siguiendo una serie de condiciones previas: el agua debe estar disponible, el agua debe ser accesible, y el agua debe ser suficientemente tratada (WWAP, 2019).

La desinfección conlleva un proceso de oxidación que da paso a la eliminación e inactivación de parásitos, bacterias y virus entre organismos patógenos o no patógenos. La cloración es el método principal de desinfección en muchos países, seguido del ozono y la luz ultravioleta (UV). Existen otros métodos de desinfección del agua como el yodo, la radiación gamma, la plata, etc. (CONAGUA, 2010), comparando el empleo de distintos desinfectantes y los cambios en los parámetros del proceso como el pH o la temperatura (Ocampo-Rodríguez et al., 2022).

La desinfección por cloro es uno de los métodos de mayor manipulación en plantas potabilizadoras, asimismo, es el desinfectante más asequible y eficaz. El cloro residual que resulta del mismo reacciona con la materia orgánica y algunos metales, disminuyendo su potencial para desinfectar; lo demás es identificado como cloro total (la suma del cloro combinado) siendo un desinfectante débil, y, el cloro libre inactiva microorganismos patógenos. Esta reacción favorece la posible formación de subproductos de desinfección (SPD) que pone en riesgo el suministro de agua segura. Del mismo modo, algunas investigaciones epidemiológicas apuntan a efectos adversos sobre la salud humana, debido a su influencia de los trihalometanos sobre enfermedades como el cáncer (Mazhar et al., 2020; Borda et al., 2021; Borda Prada et al., 2021; Saldaña Gonzales & Franco Avila, 2022). Se han reconocido más de 600 DBP que se forman durante la cloración y cloraminación entre los cuales podemos mencionar: los trihalometanos (THM); ácidos haloacéticos (HAA), monobromamina (NH_2Br), bromocloramina (NHCIBr) y dibromamina (NHBr_2), clorito (ClO^2), clorato (ClO_3), clorofenoles, hidratos de carbono (HC), haloacetnitrilos (HAN) entre muchos otros (Domínguez Henao et al., 2018). Por otra parte, algunos patógenos como el *Cryptosporidium parvum*, son relativamente inmunes al cloro libre en las dosis que se suelen utilizar para la desinfección del agua (Gomes et al., 2019). La Organización Panamericana de la Salud (OPS) detalla que la concentración del cloro se pierde rápidamente por la temperatura, la luz y el material del tanque de almacenamiento (Doménech, 2004; CONAGUA, 2010; Ferro Mayhua & Ferró Gonzales, 2019).

(Surco & Llamojha, 2015 como se citó en Espinoza & Martines, 2022) definieron las causas y efectos que genera la aparición de los SPD del cloro; dando lugar a la aplicación del ozono y la UV en el tratamiento de agua potable siendo más eficiente y saludable. Sin embargo, otros autores contradicen lo postulado acerca de los dos últimos métodos de desinfección; las bacterias resistentes a los antibióticos (ARG, por sus siglas en inglés) pueden eliminarse totalmente mediante ozonización, aunque pueden persistir algunas ARG viables si se aplican dosis bajas de oxidante, anexando la presencia de otros contaminantes demandantes del ozono conduciendo a menores eficiencias de desinfección; y, si se administra una elevada dosis de ozono, se asocia a la posibilidad de producir subproductos peligrosos durante la oxidación parcial de los compuestos orgánicos disueltos tales como los bromatos, aldehídos, peróxidos, cetonas entre

otras sustancias tóxicas, conllevando a enfermedades cancerígenas (Driedger et al., 2001); Rodríguez et al., 2007; (Gomes et al., 2019); (Askar et al., 2023). En la investigación de Bahtaev et al, 2014) habla sobre las limitaciones del ozono, adjuntando a que actúa muy rápidamente de sólo 30-40 minutos. Cuando el agua se calienta a $t > 10$ °C el ozono se descompone completamente dentro 6 a 10 minutos; al igual por ser un fuerte reactivo oxidante, el ozono transforma elementos orgánicos complejos en simples (Askar et al., 2023). La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) señala lo difícil que es esta tecnología que no posee la cloración y la luz ultravioleta; al ser reactivo y corrosivo, requiere de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable sin olvidar que el costo del tratamiento puede ser relativamente alto en cuanto a la inversión de capital y la demanda de energía eléctrica.

La operatividad de desinfección con luz UV depende del tipo de microorganismo considerado. Los virus y las esporas bacterianas son los más resistentes a la inactivación por radiación UV, seguidos por los protozoos intestinales como *Cryptosporidium* y *Giardia*, y por último las bacterias.(Gomes et al., 2019). La UV convencional funciona con lámparas halógenas de mercurio emitiendo luz germicida a 254 nanómetros (nm). El mercurio utilizado para la generación de luz en las lámparas es tóxico y las lámparas funcionan con una eficiencia energética máxima de 30% a 35% enfrentando una elevada demanda de energía. La disminución de la eficacia de la desinfección UV se debe a los problemas de suciedad tanto orgánica e inorgánica de las fundas que protegen al cuarzo que están en las lámparas provocado por las altas temperaturas del funcionamiento de estas. (Li et al., 2019)(Macisaac et al., 2023). Además, las lámparas UV de mercurio están envasadas de vidrio, haciéndolo muy frágil causando fácilmente vertidos de mercurio en el ambiente exterior, liberando vapores nocivos en el aire durante semanas o años (Li et al., 2019). Otro método son los diodos emisores de luz UV (UV-LED) que presentan inconvenientes: el chip UV-LED es propenso a defectos de red, difícil de desarrollar, presenta una baja eficiencia lumínica interna, envejecimiento UV, fallo de interconexión interna, desprendimiento de la interfaz, fallo de unión de los cables y el fallo de descomposición de la luz (Li et al., 2019), la aplicación a gran escala se ha visto limitada por los elevados costos y la escasa potencia de salida. (Jarvis et al., 2019). La fotólisis UV-C no es capaz de eliminar los contaminantes preocupantes emergentes (CEC, por sus siglas en inglés), algunos compuestos persistentes o lograr su total mineralización. Para ello se utiliza los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), el cual usan los radicales de hidroxilo, por ejemplo: UV/H₂O₂ y UV/NaOCl. A pesar de que los PAOs podrían mejorar la cinética de la fotólisis, podrían conducir a sistemas ineficientes y no sostenibles en términos económicos y medioambientales debido al uso de reactivos caros y al elevado consumo de energía (Pelayo et al., 2023). Por último, la desinfección ultravioleta daña el ADN de los microorganismos pero hay ciertos microbios capaces de repararlo mediante fotorreactivación lo que permite a los microorganismos inactivados volver a contaminar el agua, el mismo proceso pasa con los virus, como los adenovirus humanos y los poliomavirus .(EPA, 1999a); (Gomes et al., 2019)

Una alternativa ideal para la desinfección microbiológica de aguas es la fotosensibilización, la cual genera moléculas en estado excitado (con exceso de energía) denominado oxígeno singlete o singlete, con el uso de colorantes naturales o artificiales llamados sensibilizadores o fotosensibilizadores, para la desinfección de aguas mediante la exposición a la radiación solar.

Para llegar a un estado de excitación, éstas absorben energía en forma de luz volviéndose más energéticas que su estado fundamental. Si dos moléculas están juntas, presenta un estado energético singlete (este estado, tiene mayor energía que el triplete); si dos moléculas se encuentran separadas, su estado energético es triplete. Su configuración electrónica posee un tiempo de vida limitado regresando a su estado fundamental. El oxígeno singlete trabaja junto con la absorción de la luz solar y el fotosensibilizador para que pueda generarse. La molécula del fotosensibilizador atrae un fotón de luz visible procreando al instante el oxígeno singlete. Dicho estado evoluciona rápidamente hasta un estado excitado triplete que es más estable, con un tiempo de vida más largo; el cual, choca con una molécula de oxígeno en estado fundamental, y al colisionar se transfiere energía por intercambio electrónico creando un nuevo fotosensibilizador en estado fundamental y oxígeno singlete (Figura 10, Pág. 21). Todo el proceso ocurre muy rápido, en una millonésima de segundo; llevándose a cabo en medios líquidos y gaseosos siempre que haya un sensibilizador, luz y oxígeno presentes en el medio. El exceso de energía del oxígeno singlete respecto a su estado fundamental desarrolla una importante reactividad química como agente oxidante durante su tiempo de vida, el cual tiene un intervalo de 4 μ s a 60 ms en fase líquida por lo que es posible aplicarse en la desinfección de aguas. Así pues, la desinfección mediante oxígeno singlete reúne cuatro características esenciales: economía, seguridad, respeto al medio ambiente y autonomía. (García-Fresnadillo, 2005)

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1. El agua en la sociedad

El agua es uno de los temas de mayor importancia en la sociedad, tiene una conexión indispensable entre las comunidades rurales y urbanas enlazándose directamente de los escurrimientos superficiales y su calidad es relevante para determinar su uso en el consumo humano (Musalem-Castillejos et al., 2018). Esto preverá de enfermedades para lo cual se establecen los límites permisibles en base a las normas correspondientes junto a las características bacteriológicas y el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales (Secretaría de Hacienda del Estado de Chiapas, 2020).

En el informe del Foro Económico Mundial, “Riesgos Mundiales 2019” (World Economic Forum, 2019) (Figura 1), indaga que el agua tiene uno de los retos de mayor presión económica, social y política alrededor del mundo. Al no distinguir los recursos naturales y a la población como un solo nexo, generan un sinfín de problemas ambientales como es la demanda y contaminación de masas de agua, el cambio climático que altera el desglose entre oferta y demanda en los sectores doméstico, agrícola e industrial, dañando fuertemente al medio ambiente (Arreguín-Cortés et al., 2020).

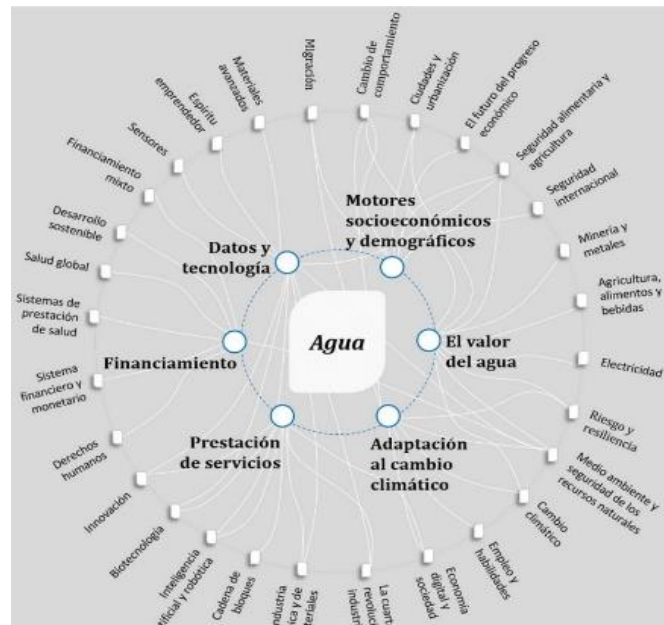


Figura 1.Temas clave de la agenda global. Agua, Problema mundial. Fuente: Foro Económico Mundial (2018) citado de (Arreguín-Cortés et al., 2020)

La distribución de aguas superficiales en México comprendida en 757 cuencas, 649 cuentan con disponibilidad de agua (Fig. 34, Anexo 3). En aguas subterráneas, 653 unidades hidrogeológicas y 408 se encuentran en su disponibilidad. (Fig. 35, Anexo 3) (Arreguín-Cortés et al., 2020). En el Atlas de Agua en México, la Red de monitoreo de la calidad del agua contaba en 2017 con 5028 sitios dentro del país, siendo estos los que operan los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los tipos de indicadores los que determinan su calidad son, Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Fecales (CF).

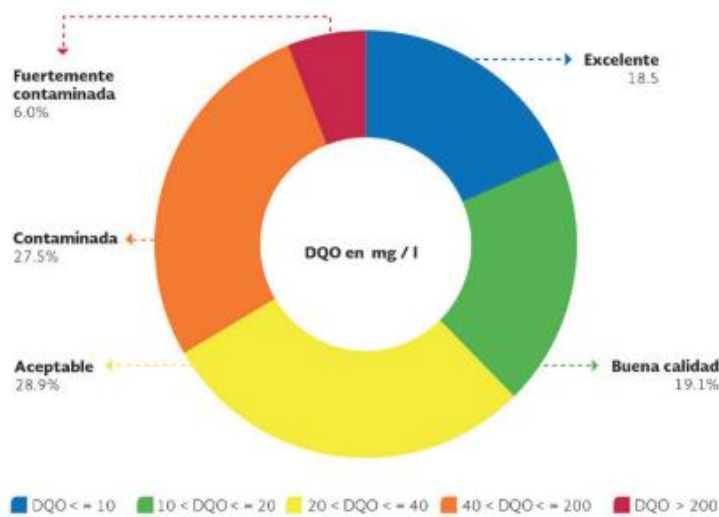
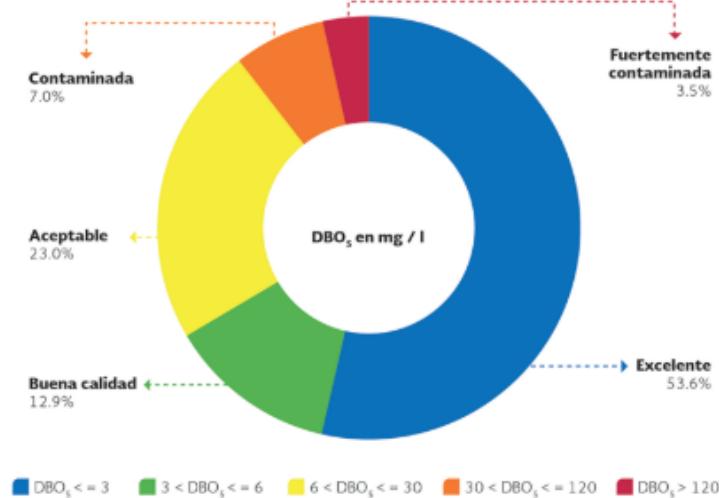


Figura 2. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua superficial, según categoría de DBO_5 , 2017. Fuente: Conagua, 2017 citado de (SEMARNAT, 2018)



La determinación de DBO_5 y DQO indican el nivel de contaminación presente en los cuerpos de agua de materia orgánica, provenientes principalmente de las descargas de aguas residuales municipales y no municipales (Figuras 2 y 3). Cada una de ellas cumple con una función diferente, la DBO denota la suma de materia orgánica biodegradable, provocando afectaciones a los ecosistemas acuáticos; resultado de la disminución de oxígeno disuelto por su alta concentración. Mientras la DQO observa la cantidad total de materia orgánica oxidable químicamente y, sus altos valores provienen de descargas no municipales. (CONAGUA & SEMARNAT, 2018)

Figura 3. Distribución porcentual de sitios de monitoreo de calidad del agua superficial, según categoría de DQO, 2017. Fuente: Conagua, 2017 citado de (SEMARNAT, 2018)

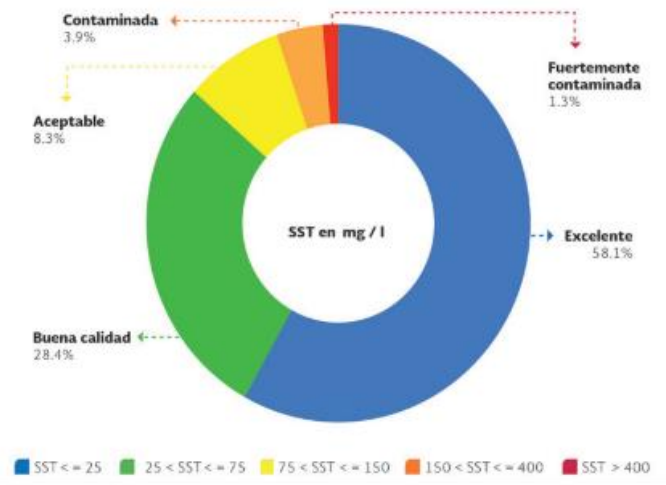


Figura 4. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua superficial, según categoría de SST, 2017. Fuente: Conagua, 2017 citado de (SEMARNAT, 2018)

De lado de los SST se relaciona con la materia orgánica suspendida procedentes de la degradación del suelo y de las aguas residuales (Figura 4). Como consecuencia de esto, se pierde la diversidad en la vida acuática. Para eso se debe analizar si se encuentran en buenas condiciones y/o sin actividad antropogénica u otras actividades como las áreas de deforestación severa y las descargas de aguas residuales municipales y no municipales.

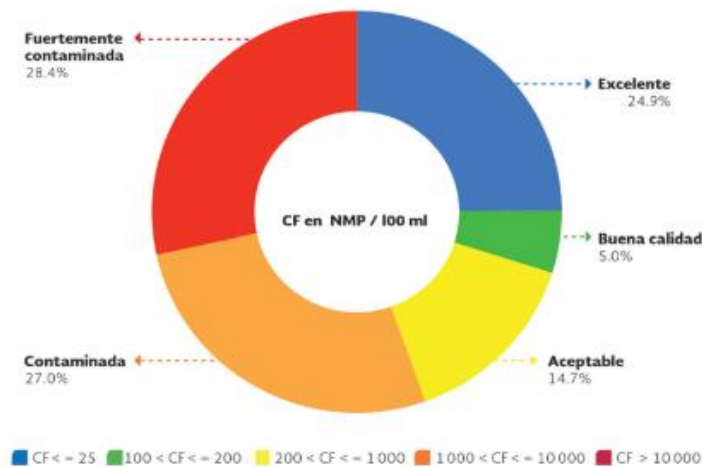


Figura 5. Distribución porcentual de los sitios de monitoreo de calidad del agua superficial, según categoría de CF, 2017. Fuente: Conagua, 2017 citado de (SEMARNAT, 2018)

Los CF están presentes en los intestinos de organismos de sangre caliente (incluido el ser humano) y son excretados en sus heces fecales (Figura 5). Se distinguen por ser bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gram negativas, no esporuladas, de forma de bacilo corto, que fermentan la lactosa con producción de gas en 48 horas a 35°C. Por asociación son indicadores de la presencia de aguas residuales. Este parámetro se utiliza internacionalmente partiendo de la premisa de que su ausencia en el agua es un indicador de que otros organismos patógenos al hombre también están ausentes. (CONAGUA & SEMARNAT, 2018)

Chiapas es uno de los estados con mayor riqueza hídrica del país, con dos de los ríos más caudalosos que ofrecen enormes ventajas por los distintos usos que tienen. Los ríos Usumacinta y el Grijalva, generan más de 42% de la energía hidroeléctrica que se consume en el país, junto con su sistema de lagunas, sirven como fuentes de abastecimiento de agua para el aprovechamiento agrícola y el consumo humano.



Figura 6. Sitios Superficiales y Subterráneos ubicados en el Estado de Chiapas.
Fuente: (CONAGUA, 2021)

Desde el 2021 existe en Chiapas 247 sitios de monitoreo de agua (Figura 6). Durante el periodo 2012-2021 se tiene registro de estos sitios en parámetros como: clorofila A, coliformes fecales, coliformes totales, carbono orgánico total, nitrógeno y los ya mencionados DBO₅, DQO, SST (CONAGUA, 2021). Cabe mencionar, que a pesar de que existen muchos sitios, no significa que todos ellos cumplieron con lo establecido de acuerdo a CONAGUA. (Fig. 36, Anexo 4)

2.2. Los microorganismos y las enfermedades del agua

En la investigación de (Ríos Tobón et al., 2017) presenta que los microorganismos y enfermedades que contrae el agua, es debido al incremento de la población en la tierra que trae consigo cambios a nuestro entorno como lo son la pobreza, expansión territorial de ciudades y comunidades, disminución de los recursos hídricos entre otras actividades antropogénicas; los cuales ocasionan el aumento de bacterias, virus, parásitos y hongos anteponiendo enfermedades ante la sociedad.

2.2.1. Bacterias

En el grupo de las bacterias, la mayoría son entéricas; habitan en el intestino de las personas y animales en el tracto gastrointestinal y son más conocidas como bacterias fecales. Las Gram negativas se enlistan dentro de los contaminantes del agua especialmente al género *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Gallionella*, *Aeromonas*, *Vibrio*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Bordetella*, *Neisseria*, *Moraxella* y *Acinetobacter*. El grupo de las enterobacterias cumplen como bioindicador en al agua y dentro de ellas están los géneros *Shigella* y *Salmonella*, causantes de disentería bacilar; *Salmonella typhi* y *Salmonella typhimurium*; desarrolladoras de gastroenteritis y fiebre tifoidea. Otro grupo presente son bacilos flagelados, curvados y anaeróbicos facultativos del género *Vibrio*; la causante de la diarrea aguda, acuosa y profusa, generando epidemias de cólera dejando altas tasas de mortalidad por medio de la especie *V. cholerae*, que emerge de aguas contaminadas al consumirla.

Algunos otros géneros gram negativos implicados en las enfermedades de transmisión hídrica son *Aeromonas*, *Neisseria*, *Moraxella* y *Acinetobacter*. Los géneros *Micrococcus*, *Staphylococcus* y *Enterococcus*. *E. faecalis* dañan los intestinos de las personas; aun siendo bacterias gran positivas y son de las pocas que se manifiestan como indicador de contaminación fecal.

El género *Pseudomonas* posee una densa capa de polisacáridos que actúa como barrera fisicoquímica capaz de protegerla del efecto del cloro residual teniendo una resistencia mayor que otros microorganismos dentro del agua. La inhibición de estos microorganismos da la probabilidad de obtener índice de coliformes cero en el medio. Estas especies de los géneros *Pseudomonas*, *Sarcina*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Proteus*, *Bacillus*, *Actinomyces* y algunas levaduras, influyen en la detección del grupo coliforme, realizando una acción inhibitoria. Se considera por tanto que, aun cuando las aguas tratadas muestren estar libres de coliformes no se puede asegurar su potabilidad.

2.2.2. Virus

Los virus juegan un papel importante en la transmisión de enfermedades hídricas pues son la principal causa de morbilidad y mortandad por los padecimientos de Hepatitis, Adenovirus y Rotavirus. No están categorizados dentro de la flora normal del tracto gastrointestinal de seres humanos y animales. Los principales virus son: los *Enterovirus*, los *Virus de la hepatitis*, los *Rotavirus* y los *Calicivirus*.

Los *Enterovirus* constituyen tres grupos importantes: el poliovirus, virus ARN causantes de poliomielitis, los coxsackievirus autor de la faringitis febril, herpangina, pleurodinia epidémica, algunos casos de meningitis aséptica y miocarditis; y, los echovirus responsable de infecciones asintomáticas, pericarditis y erupciones cutáneas.

Dentro de los virus de las *hepatitis* se encuentran virus de la hepatitis A, B, C, D, E, F, G. Siendo destacados la hepatitis A y la E por su transmisión por medio de aguas contaminadas. El *Rotavirus* tiene siete grupos, pero solo se destacan los grupos A, B y C, causantes de diarrea acuosa y vómito especialmente en los infantes. Y el *Calicivirus* son los principales causantes de gastroenteritis en humanos y animales a nivel mundial.

2.2.3. Parásitos

Dentro de los parásitos patógenos se encuentran dos grupos: protozoos y helmintos. Los Protozoos conllevan a enfermedades graves e incluso la muerte en niños, ancianos y pacientes inmunocomprometidos además de causar diarrea. Los más encontrados en aguas contaminadas son: *Giardia intestinalis*, *Entamoeba histolytica*, *Balantidium coli*, *Toxoplasma gondii*, *Blastocystis pp.*, *Enterocytozoon bienersi*, *Encephalitozoon intestinalis*, *Cryptosporidium spp.* y algunas otras especies como *Cystoisospora belli* y *Cyclospora cayatanensis*. En el caso de los helmintos resisten los cambios del pH, temperatura y humedad. En caso de que una persona consuma agua contaminada se expone a diversas enfermedades. A lo largo de los años, los avances científicos han clasificados a los microorganismos emergentes producidas por el mal manejo de las disposiciones de agua; a este grupo pertenecen las cianobacterias, mejor conocidas como algas verdes-azules; su patología entérica lo provocan las toxinas que se genera, afectando el sistema nervioso y hepático. Otro de los microorganismos ubicados en esta clasificación es el género *Campylobacter*, bacteria causante de gastroenteritis aguda.

Las enfermedades transmitidas por el agua perjudican a nivel mundial, tanto a países desarrollados como a países que están en vías de desarrollo. La OMS estableció requisitos muy estrictos donde no se permite una elevada cantidad de bacterias por el límite aceptable incluyendo que deben ser eliminados los patógenos que existen en ella. Además, que la legislación impartida por la OMS exige la protección y el control de calidad exhaustivo del proceso del agua.

2.3. Radiación Solar

2.3.1. Ondas Electromagnéticas

La radiación de ondas electromagnéticas es producida por la oscilación, aceleración o vibración de cargas eléctricas generadas por la atracción y repulsión entre electrones y protones. Esta mantiene dos ondas que oscilan perpendicularmente la una de la otra: un campo magnético que oscila y un campo eléctrico que oscila. Una onda está formada por crestas (punto más alto) y valles (punto más bajo); dentro de ellas se localiza la amplitud (asociado directamente con el brillo e intensidad de la onda), es decir, la distancia entre el punto más alto de la cresta o valle hacia el eje central de la onda. De la misma manera cuando dos crestas o valles se encuentran consecutivamente se denomina: longitud de onda (Figura 7) (Khan Academy, 2023).

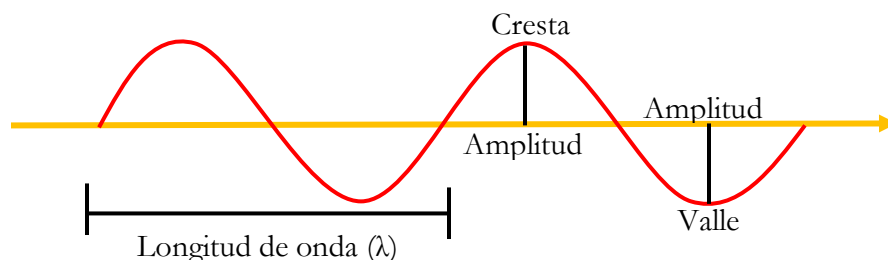


Figura 7. Características principales de una onda. Elaboración propia inspirado en la imagen de ChemWiki de UC Davis (Universidad de California en Davis). Fuente: (Khan Academy, 2023)

2.3.2. Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de longitudes de onda de las radiaciones electromagnéticas. La más importante es la luz visible (400-700 nm.), la cual es perceptible ante el ojo; lo que nos ayuda a mirar con certeza los colores de nuestro entorno. Las ondas infrarrojas, las microondas y los radios no producen daño en el planeta tierra por su tipo de frecuencia que es muy bajo en comparación con los rayos ultravioletas (UV), los rayos X y los rayos gamma; el cual, su exceso de energía produce daños en la piel y para evitarlos se recurre a las cremas bloqueadores del sol a excepción de los rayos gamma, pues estos son absorbidos por la atmósfera (Figura 8) (Khan Academy, 2023).

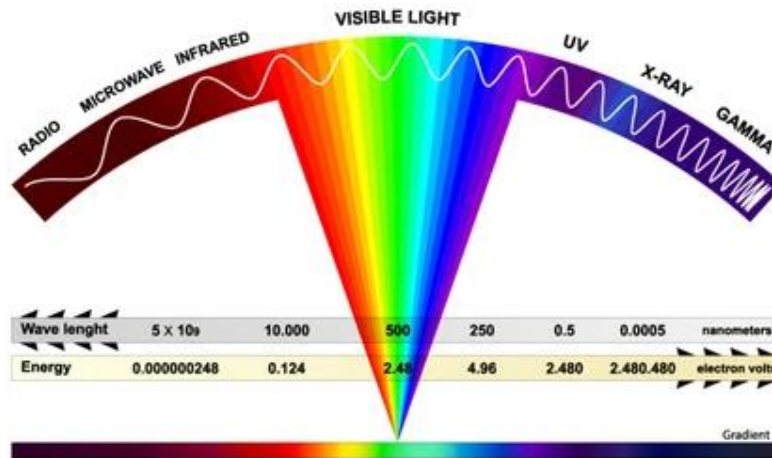


Figura 8. Espectro electromagnético. Fuente: Shutterstock

A la hora de ver el color, la percepción del estímulo lumínico de cada persona capta los fotones de luz visible y difieren los receptores unos de otros. Estos receptores operan de dos formas diferentes: los conos y los bastoncillos. Los conos son células sensoriales especializadas de la retina del ojo que nos permiten ver cuando disponemos de suficiente luz percibiendo claramente los colores. Los bastoncillos son más abundantes que los conos, funcionan mejor con luz de baja intensidad y son responsables de la visión en entornos con poca luz (Marcano, 2018).

2.4. Colorantes

Los colorantes son compuestos químicos utilizados por su propiedad de tinción, su popularidad ha ido en aumento para darle vida a los colores de productos alimenticios, cosméticos, textiles y farmacéuticos. Su aplicación puede ser natural o artificial. Aunque existen organizaciones como la FAO que están frenando el uso de colorantes artificiales porque producen alergias, hiperactividad y cáncer (Villota García et al., 2019). En un trabajo de investigación realizado en Ecuador, hace la comparativa de los colorantes artificiales y naturales de las ventajas y desventajas, las características que posee cada uno, así como los impactos positivos y negativos a la salud (Hidalgo Olmedo, 2022).

2.4.1. Colorantes artificiales

Los colorantes artificiales son compuestos químicos obtenidos por síntesis en productos de origen vegetal, que confieren, intensifican o restauran el color de un alimento. Solubles en agua por los grupos de ácido sulfónico que se presentan en ellos, fáciles de utilizar por sus diferentes formas en sales sódicas, líquidas y de materiales pastosas. Además, resisten a los tratamientos térmicos, pH extremos, luz entre otras características (Sánchez Juan, 2013).

Un ejemplo es el azul de metileno (AM) o cloruro de metiltioninio, es una tiazida coloreada, para tratar múltiples patologías. La Organización Mundial de la Salud (OMS) lo considera como un medicamento esencial. Heinrich Caro, químico alemán, fue quién lo sintetizó por primera vez, en 1876. Para 1886 el médico Paul Ehrlich estudiaba el efecto del AM sobre la malaria; posteriormente tuvo éxito utilizándolo como remedio contra el paludismo (Carbonell Tatay et al., 2018). Con el paso de los años se fue desarrollando nuevas innovaciones como tal es el caso de los Mecanismos de Oxidación Fotosensibilizadas publicado en 1968 por Christopher S. Foote y años más tarde en 1977, A. J. Acher aplicaba el AM para la remoción de coliformes en aguas residuales.

2.4.2. Colorantes naturales

Los colorantes naturales son obtenidos de fuentes vegetales, animales o minerales y no cuentan con restricciones sanitarias para su empleo en alimentos, drogas y cosméticos adquiriendo popularidad por su inocuidad. Actualmente se aceptan los colorantes sintéticos y derivados de químicos como colorantes naturales cuestionando la aceptación sin restricciones de estos colorantes. Existen varios grupos químicos de colorantes naturales: carotenoides, antocianinas, betalainas, porfirinas, quinonas, guanina y otros grupos que incluyen poliolefinas, azúcares del color caramelo, fenoles, riboflavina, indigoides, etc. (Marcano, 2018)

2.4.2.1. Achiote

El achiote (*Bixa orellana* L.) es un arbusto perenne originario de la América Tropical, la planta del achiote tiene propiedades antimicrobianas. Es de rápido crecimiento, alcanzando de 4 a 6 m. de altura, tiene un aspecto robusto, con flores vistosas y de color blancas o rosadas según la variedad; el fruto es una cápsula de color pardo rojizo que contiene de 30 a 45 semillas, cubiertas por una delgada capa o arilo que por su contenido de Bixina es de color rojo anaranjado (Devia & Saldarriaga, 2003) (Lim, 2012).

El uso inicial del achiote fue para pintura y tatuaje del cuerpo (Devia & Saldarriaga, 2003); hoy en día, su comercialización se destina principalmente para su uso en la industria de alimentos, farmacia, textil y cosmética. Expandiendo su fama como uno de los principales colorantes en la industria y siendo aprobado sin restricciones por el Departamento de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos de América (FDA, por sus siglas en inglés) (Mariani, 2020) (Rivera-Madrid, 2021)

La *Bixa orellana* L. es el colorante de un tono rojo oscuro extraído de la semilla, representa más del 80% de los pigmentos (Bixina y Norbixina), facilitando su extracción. La bixina es dispersable en aceite, su composición química y nutricional es muy variada presentándose en forma de ácido carotenóico de fórmula empírica $C_{25}H_{30}O_4$ que se presenta como isómero geométrico del tipo cis, pero que puede convertirse a su forma trans, más estable. Por otro lado, la Norbixina es soluble en agua, su estructura química es ácido dibásico norbixina $C_{24}H_{28}O_4$ (Ver figura 9) (Devia & Saldarriaga, 2003). Un dato interesante de los carotenoides es que son eficientes amortiguadores tanto de los estados tripletes excitados como del $O_2(1\Delta g)$, transfiriendo energía a la especie precursora y el estado triplete del carotenoide (Montenegro et al., 2004). Para conseguir el colorante, se hierve agua para dejar caer las semillas por un tiempo de 10 minutos. Se deja en reposo unos días bajo la radiación y luego se cuele el líquido, siendo el asiento el colorante (Lim, 2012).

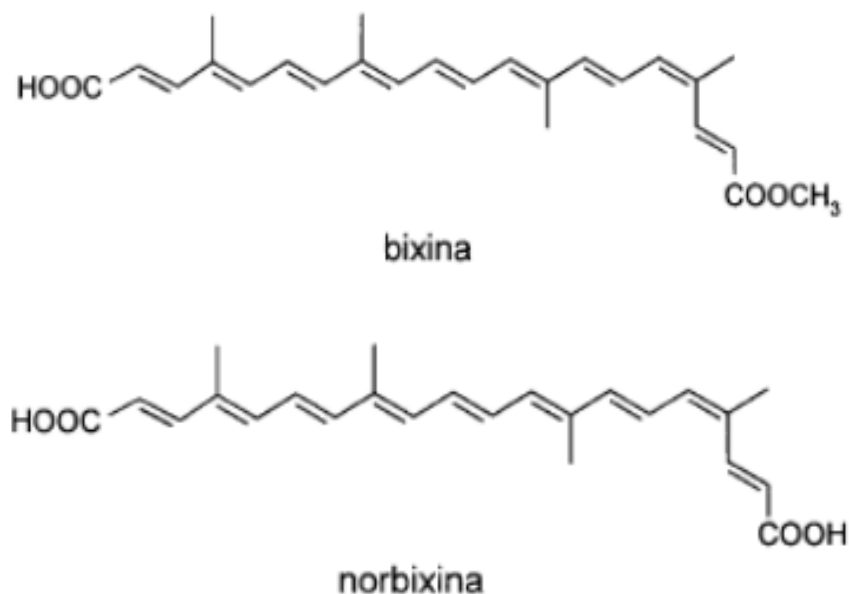


Figura 9. Estructura química de la bixina y norbixina.
Fuente: (Mariani, 2020)

2.5. Métodos de desinfección

El proceso de desinfección del agua tiene el objetivo de eliminar los microorganismos patógenos presentes en él. Debe cumplir con las normativas correspondientes que garanticen su uso sin riesgo sanitario y por definición debe ser incoloro, inodora e insípida. Este proceso asegura la buena calidad microbiológica del agua, protege la salud pública y el ambiente. La Organización Mundial de la Salud ha realizado esfuerzos por explicar y difundir los procedimientos mínimos y valores de referencia que se requieren para garantizar la inocuidad del agua; se han creado los marcos legales necesarios para ejercer control sobre la prestación y la calidad de este recurso ecosistémico. Esto permite comparar el empleo de distintos desinfectantes o el efecto de los cambios en los parámetros del proceso como el pH o la temperatura, y, permitiendo que el agua residual (AR) se reúse para el riego en áreas públicas, cultivos o recarga de acuíferos. (Borda et al., 2021)(Saldaña Gonzales & Franco Avila, 2022) (Ocampo-Rodríguez et al., 2022)

2.5.1. Cloro

La fabricación del cloro es por procesos electrolíticos separando al elemento de la solución de agua saturada con NaCl (sal). En condiciones ambientales de presión y temperatura, es un gas amarillo verdoso con un olor característicamente desagradable. No es inflamable en ninguno de sus estados, sin embargo, el cloro gas puede soportar la combustión de ciertos materiales bajo determinadas condiciones. Este método convencional es muy activo químicamente, por lo que no se encuentra en su estado libre pero sí con otros elementos combinados como el sodio. Causa daño en las células afectando la integridad de la membrana y su permeabilidad e inicia

alteraciones celulares dañando enzimas y ácidos nucleicos. En un sistema de abastecimiento de agua, la cloración se realiza al final del tratamiento, después de la etapa de filtración denominándose poscloración. Al entrar en contacto con el agua, reacciona con la materia orgánica presente en ella, reduciendo a ion cloro. Una vez alcanzando el punto de quiebre, la adición de cloro resulta en un incremento proporcional del cloro residual libre (CONAGUA, 2010). La norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un límite permisible de cloro residual libre de 0.2-1.50 mg/l.

2.5.2. Ozono

La producción del ozono se desarrolla cuando las moléculas de oxígeno se separan por una fuente de energía produciendo átomos de oxígeno, compactando con otra molécula de oxígeno para formar el ozono (un gas inestable), que se utiliza en la desinfección de aguas (EPA, 1999b). El proceso consiste en dos fases, suministrar suficiente ozono mezclándolo con aire para tratar el agua. Y la otra se deriva de la oxidación por medio del contacto del ozono y los compuestos orgánicos e inorgánicos. Al ser muy oxidante elimina los microorganismos, pero su principal limitación es la inestabilidad del agua (CONAGUA, 2010). Al aplicar una baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas o quistes (EPA, 1999b).

2.5.3. Luz Ultravioleta

La incorporación de la luz ultravioleta como medio de desinfección, le llevó varios años entrar a los tratamientos de agua potable. Este funciona con lámparas halógenas de mercurio emitiendo luz germicida a 254 nm (Macisaac et al., 2023). Su radiación electromagnética está presente en el espectro natural de la luz solar con una longitud de onda menor a 400 nm y mayor a 100 nm, dividiéndose en cuatro subregiones: UV de vacío, UV-C (200-280 nm), UV-B (280-315 nm) y UV-A (315-400 nm) (CONAGUA, 2010). Cuanto menor sea su longitud, mayor es la energía contenida para garantizar una buena desinfección; dependiendo de las características del agua, la intensidad de la radiación, la exposición a la radiación a microorganismos, la configuración del reactor y de las concentraciones de las partículas dentro del agua en las plantas de tratamiento (EPA, 1999a).

2.5.4 Fotosensibilización

Destinada de la fotoquímica, la fotosensibilización permite aplicarse en la desinfección de aguas por la formación de oxígeno singlete, por medio de energía solar originando moléculas excitadas o activadas por el adherimiento del fotosensibilizador. Anteriormente los artículos de investigación utilizaban el término: Terapia fotodinámica, como sinónimo de la fotosensibilización, aunque existen pocos autores que aún asemejan estos conceptos por su significado; lo cierto es que uno es aplicado a la medicina para tratar problemas de la piel y la otra se deriva de la fotoquímica aplicado en la desinfección de aguas para eliminar microorganismos.

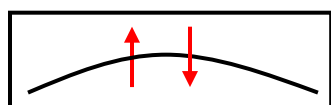
2.5.4.1. Excitación de moléculas

De acuerdo a las investigaciones de (García, 2005) los estados fundamentales de las moléculas se deben a su configuración o distribución electrónica; estas absorben energía por la luz visible teniendo cada molécula diferente configuración y siendo más activas que en su estado fundamental. Pasando un lapso de tiempo sus configuraciones electrónicas son muy limitadas,

regresando al estado fundamental con una mínima energía; también, su tiempo de vida depende igual de cada estado excitado y del medio donde se encuentre.

La regla de Hund para la configuración electrónica establece que el estado fundamental de un átomo será el que tenga la mayor multiplicidad. Esta se relaciona con el número de electrones no apareados y se encuentran mediante la expresión $(2s + 1)$ (Gamboa & Leidinger, 1987).

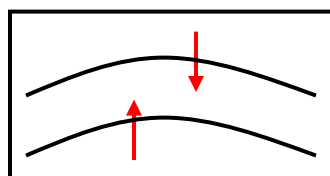
Dónde: $S =$ al spin orbital. $S = \sum m$ $e = \frac{1}{2}$



Estado Fundamental S_0

Espin total
 $S = \sum m$
 $S = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$
Multiplicidad del spin
 $= 2(S) + 1$
 $= 2(0) + 1$
 $= 1$ dando un Estado Singlete

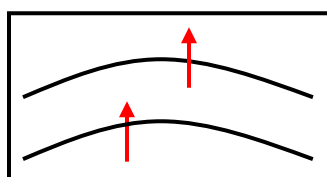
Los estados fundamentales de las moléculas se encuentran casi siempre en estados singletes; en este estado la molécula no tiene espines de electrones no apareados sin que se produzca un cambio en su espín (García-Fresnadillo, 2005).



Estado Excitado S_1

Espin total
 $S = \sum ms$
 $S = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$
Multiplicidad del spin
 $= 2(S) + 1$
 $= 2(0) + 1$
 $= 1$ dando un Estado Singlete

Para llegar a un estado excitado singlete se deben de tener dos electrones retirados del núcleo y a la vez apareados. Al absorber energía, el electrón da un salto energético de un nivel energético inferior a un nivel energético superior, es decir, pasará de un estado fundamental a un estado excitado resultando el estado singlete (García-Fresnadillo, 2005).



Estado Excitado T_1

Espin total
 $S = \sum ms$
 $S = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$
Multiplicidad del spin
 $= 2(S) + 1$
 $= 2(1) + 1$
 $= 3$ dando un Estado Triplete

Asimismo, un electrón brincar  del estado fundamental al estado excitado por absorber la energía de la luz visible pero dicho electrón cambia su spin paralelamente, lo que significa que tienen números cuánticos de spin iguales obteniendo un estado triplete (García-Fresnadillo, 2005).

Nota: Los símbolos ($\uparrow\downarrow$) ($\uparrow\uparrow$) representan pares de electrones opuestos y paralelos. Su punta indica el spin del electrón.

Pasar de un estado fundamental a un estado excitado triplete no es posible debido a que el estado excitado singlete posee mayor energía para que tengan spines antiparalelos. Sin la ayuda de la fotosensibilización sería imposible alcanzar el estado excitado, esto por las reglas que establece la mecánica cuántica puesto que la absorción de un fotón para excitar las moléculas sería muy bajas o nulas (García-Fresnadillo, 2005).

2.5.4.2. Formación del Oxigeno Singlete

La fotosensibilización es el método principal para la fotogeneración del oxígeno singlete sin él, no habría absorción de radiación solar con el átomo de oxígeno. Gracias a la fotosensibilización, sus costos son económicamente muy bajos, puede aplicarse a diferentes escalas, requieren de luz solar y dependiendo del fotosensibilizador, se puede acceder fácilmente a ellos, consiguiendo los colorantes en tiendas comerciales o incluso se pueden preparar.

Como se mencion  antes, una molécula del fotosensibilizador absorbe la radiación para conseguir el estado excitado singlete. Éste evoluciona instantáneamente hasta llegar al estado excitado triplete el cual tiene más tiempo de vida y se encuentra estable. Al tener estas características, puede chocar con una molécula de oxígeno en estado fundamental. Cuando se produce la colisión, pasa la energía restante por medio del intercambio electrónico generando un fotosensibilizador nuevo en su estado fundamental y el oxígeno singlete. Para ser precisos, todo el exceso de energía que contiene el colorante termina en la molécula de oxígeno presente en el agua, provocando un choque energético hasta que termine el tiempo de vida del estado excitado del fotosensibilizador, finalizando con la generación del oxígeno singlete (Figura 10).

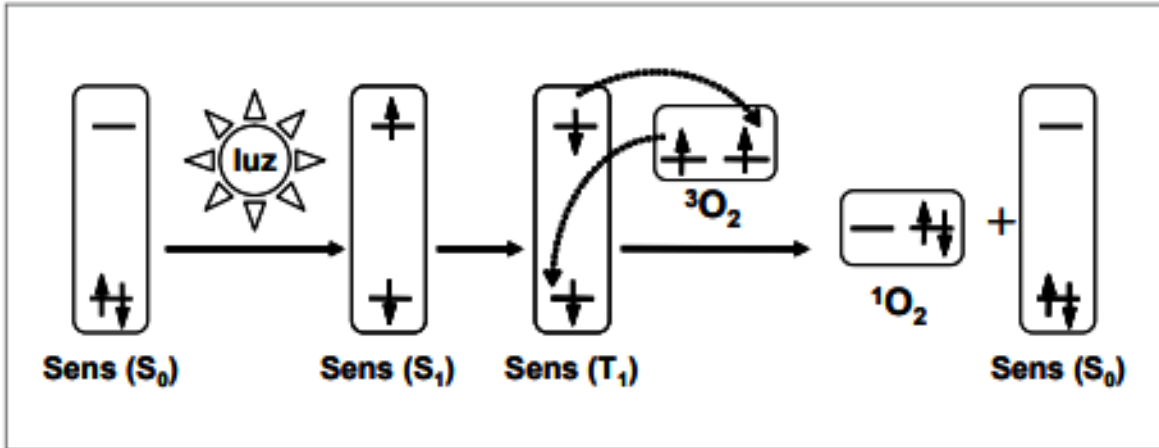


Figura 10.Proceso de fotosensibilización para la fotogeneración de oxígeno singlete (1O_2).
Fuente: (García-Fresnadillo, 2005)

2.5.4.3. Fotosensibilizadores

Los fotosensibilizadores son esenciales para el estado singlete, estos pueden utilizarse de forma natural o artificial a la vez que se consiguen fácilmente. (García-Fresnadillo, 2005) detalla los requisitos que presentó Braun et. al., (1991) para que el fotosensibilizador deba cumplir para la producción de oxígeno singlete:

- Intensa absorción de luz
- Poseer una elevada eficiencia de paso del estado excitado singlete (S_1) al estado excitado triplete (T_1) del fotosensibilizador.
- Tener una energía del estado triplete (T_1) del fotosensibilizador superior a la del oxígeno singlete.
- Largos tiempos de vida del estado excitado para la colisión de moléculas.
- Alto rendimiento cuántico de producción de oxígeno singlete (Φ_Δ).
- Buena estabilidad térmica y fotoquímica evitando la descomposición de la molécula del fotosensibilizador.
- Capacidad de ser inmovilizados en soportes poliméricos de modo asequible, de cara a facilitar el desarrollo de aplicaciones.

Es cierto que no todos los colorantes fotosensibilizadores cumplen con estos requisitos mencionados, siempre se busca que traspase la luz para que reaccione la molécula de oxígeno con el fotosensibilizador. De los colorantes más usados para generar el oxígeno singlete son la fenalenona, AM, rosa de bengala, entre otros (García-Fresnadillo, 2005). Por otro lado, las porfirinas, las clorofilas, las riboflavinas o la bilirrubina son ejemplos de sensibilizadores endógenos del sistema biológico (Toledo De Oliveira et al., 2004).

2.6. Antecedentes

De acuerdo con (Christopher S. Foote, 1968), Raab habría descubierto la forma de eliminar los microorganismos por medio de la luz solar y el uso de colorantes sensibilizantes. Derivado de esto, se avanzó para comprender las oxidaciones fotosensibilizadas demostrando que no existe una vía sino varias. De ahí (Fung & Miller, 1973) revelan que los primeros en ver los efectos inhibidores de los colorantes sobre las bacterias fueron Churchman con el colorante violeta de genciana y Kline con el Brilliant Green; ambos en cultivos bacterianos. Así se fueron innovando las investigaciones para el aislamiento y diferenciación de microorganismos como lo describió Endo quien aplicó fucsina básica decolorada con sulfito sódico para aislar los organismos coliformes.

Las investigaciones de Acher son un punto clave para la técnica de fotosensibilización, es uno de los investigadores que experimentó con este tema. Inició en 1977 con el trabajo: Destruction of coliforms in water and sewage water by dye-sensitized photooxidation. Describiéndolo como un nuevo método de desinfección para aguas residuales, destruyendo a los microorganismos por medio de la fotosensibilización para evitar el uso del cloro como desinfectante. En su investigación se inoculó la *Escherichia coli* para su tratamiento añadiendo AM y rosa de bengala donde tenía una aireación continua para el agua potable y aguas residuales. Sus resultados fueron similares para ambos efluentes. (A. J. Acher & Juven, 1977)

Su segunda investigación: Dye-sensitized-photo-oxidation—a new approach to the treatment of organic matter in sewage effluents; se enfoca en el transcurso de la materia orgánica en aguas residuales expuesto a una lámpara UV y a la radiación solar con los colorantes AM y rosa de bengala. Al final se obtuvo los resultados esperados, hubo disminución de coliformes fecales por la evaluación DQO y el AM. (A. J. Acher & Rosenthal, 1977)

Su tercer estudio consistió en los efectos de la radiación, experimentó con bromacil y terbacil; dos herbicidas cubriéndolos con capas gruesas de hielo sensibilizadas con los colorantes AM, rosa de bengala y riboflavina a diferentes pH, se expusieron al sol y se comenzó a descomponer a las 2 horas. Su objetivo fue comprobar la estabilidad fotooxidativa de los herbicidas siendo parte de un estudio que pretendía desarrollar un nuevo enfoque para la oxidación de contaminantes orgánicos. (A. J. Acher, 1982)

Acher continuó con sus trabajos para garantizar una buena desinfección en los tratamientos de aguas, siendo reutilizadas en cultivos en zonas áridas. Se expuso el efluente en cilindros de vidrio graduados de 250 ml. Los mejores resultados se obtuvieron a una concentración de 12 mg MB L. Con esta concentración y 6 h de irradiación, los valores iniciales de DQO se redujeron en más del 70 y 90 %. Incluso se comienza a mostrar la implementación de una planta piloto con una escala de 2.5 m³ (A. J. Acher, 1985).

Finalmente, para 1990 crea una planta piloto con la experiencia adquirida a través de sus investigaciones de laboratorio y campo para ver la viabilidad del método químico (Figura 11).

(A. Acher et al., 1990) diseñó su planta piloto a partir de la experiencia adquirida de sus trabajos experimentales anteriores de laboratorio y de campo; el método es sencillo, eficaz y fiable, no produce compuestos tóxicos y es muy económico. A su planta piloto se le implementó 6 reactores iguales de cuatro placas soldadas de acero galvanizado con una sección transversal trapezoidal, una longitud de 488 cm, un volumen de hasta 2.4 m³ con un tiempo medio de residencia del efluente de máximo 5 h. a 48 minutos como mínimo; utilizando azul de metileno de 0.8 - 0.9 g m³ de concentración. Los resultados mejores y reproducibles se obtuvieron cuando la demanda de oxígeno se mantuvo por encima de 2 mgL, MB (<1 g mg m³) añadido en porciones, el pH corregido a 8.7-8.9 con Ca (OH)₂ y el porcentaje del tiempo de residencia relativo (RT, por sus siglas en inglés) del efluente fluyente por encima de 50. Y resultando una disminución del recuento de microorganismos en logs de las poblaciones bacteriales (UFC) y virales (UFP): coliformes, 3.0 ± 0.5; coliformes fecales, 3.1 ± 0.4; enterococos 3.76 ± 0.4; y poliovirus, 1.8 ± 0.4 (Figura 11) (A. Acher et al., 1990). La segunda la planta piloto la construyó con 10 reactores en una pendiente del 2%. La profundidad de los reactores varía entre los 18 cm a 23 cm, logrando una longitud de 610 cm y tratando 50 m³/h. El total de colorante para el efluente fue de unos 0.7 ± 0.1 g m³, tratando 100 m³ en un tiempo de 23 min a 75 min (A. J. Acher et al., 1994).



Figura 11. Vista general de la planta piloto. Fuente: (A. Acher et. al. 1990)

CAPÍTULO III

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo General

Evaluar la remoción de Coliformes Totales presentes en una muestra de agua con la técnica de fotosensibilización utilizando *Bixa orellana* L. como agente fotosensibilizador.

3.1.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir un tren de tratamiento físico de agua.
- Caracterizar los parámetros físicos del tren de tratamiento.
- Caracterizar el grado de fotosensibilización del colorante natural *Bixa orellana* L.
- Determinar el porcentaje de eliminación de coliformes totales a diferentes concentraciones y tiempos de retención hidráulica

3.2. Hipótesis

El empleo del colorante *Bixa orellana* L. como fotosensibilizador, en bajas concentraciones del orden de mg/L y la radiación solar como fuente de iluminación, serán efectivos en la remoción de Coliformes totales presentes en agua.

CAPÍTULO IV



4.1. Metodología

4.1.1. Diseño y construcción del tren de tratamiento

De acuerdo con los artículos “Photochemical disinfection of effluents--pilot plant studies” y “Sunlight disinfection of domestic effluents for agricultural use” de A. J. Acher y E. Fischer realizados en 1990 y 1994, respectivamente, los cuales tuvieron como objetivo analizar la factibilidad del método fotoquímico a través de una planta piloto experimental hecha de acero galvanizado.

Siguiendo la investigación de A. Acher y otros investigadores, se propuso el diseño de un tren de tratamiento fotoquímico del agua, utilizando los materiales que se describen en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Materiales y función de los mismos en el tren de tratamiento

Material	Descripción	Imagen
Base de Fierro en forma de escalera	La estructura se construyó de un material resistente y se diseñó de modo que se tuviera una parte alta para que el agua a tratar fluya por gravedad. De acuerdo a la imagen, en la parte alta se coloca el efluente. Seguido de zonas para colocar las canaletas en forma de semicírculo, con una diferencia de 10 cm de altura por cada sección	
Contenedor de 20 L. con tapa y llave	Se utilizó un recipiente con la capacidad suficiente para contener el efluente total a tratar. Que lo mantenga en óptimas condiciones y que no influya en sus propiedades.	
Tubo PVC de 6 in	Se utilizaron piezas de tubos de PVC de 50 cm de largo, cortadas perpendicularmente para obtener una canaleta.	

<p>4 Tapas sanitarias de inserción PVC de 6 in.</p>	<p>Se cortaron por la mitad y se utilizaron para contener el agua en las canaletas, tal como se observa en la imagen</p>	
<p>4 Coples PVC de 6 in</p>	<p>Por medio de los coples se unió las tapas y el tubo.</p>	
<p>Tubo CPVC de 1/2 in.</p>	<p>Se utilizaron piezas de tubos de 55 cm, 15 cm y 12 cm, por triplicado; y piezas de 2 cm para conectar las llaves de paso de agua de una canaleta a otra.</p>	
<p>9 Codos de 90° de CPVC de 1/2 in</p>	<p>Para conectar los tubos de 1/2 y darle dirección al agua.</p>	
<p>4 Válvulas esferas de CPVC de 3/4 in.</p>	<p>Para controlar el caudal durante el tratamiento</p>	
<p>Botellas de plástico transparente de 5 L., con tapa rosca.</p>	<p>Se utilizaron para captar el influente y para su traslado al laboratorio.</p>	

Elaboración propia

El tren de tratamiento elaborado fue de dimensiones más pequeñas en comparación al trabajo de Achar y en la figura 12 se observa la propuesta terminada. Se realizaron pruebas para obtener el tiempo óptimo de retención hidráulica, para verificar el llenado adecuado de canaletas, fugas o derrames y limpieza del material utilizado.



Figura 12. Tren de tratamiento. Archivo propio

4.1.2 Caracterización de los parámetros físicos del tren de tratamiento

Las canaletas o reactores del tren de tratamiento tienen una longitud de 50 cm x 15 cm de ancho con una capacidad aproximada de 4 litros y aunque no menciona Acher el porqué del diseño trapezoidal, lo cierto es que las canaletas manejan una forma cilíndrica para evitar que las bacterias se queden estancadas en las orillas (Figura 13).

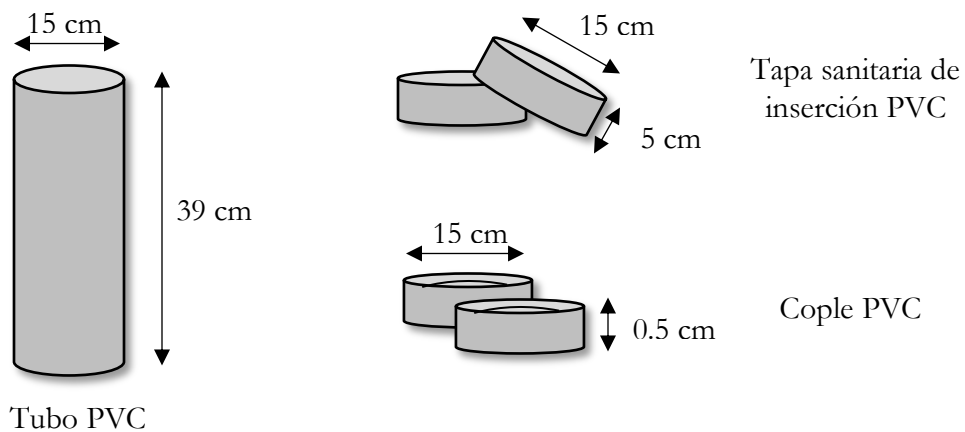


Figura 13. Materiales para formar una canaleta. Elaboración propia

Al ajustar el volumen de la muestra a las canaletas, se controla el volumen total del efluente a tratar. La fórmula matemática utilizada para sacar el volumen del cilindro es:

$$V = \pi r^2 h$$

Esta fórmula se aplicó para el tubo de PVC, las tapas sanitarias y los coples. En el caso de los coples, su función es unir al tubo con las tapas para contener el agua, dejando 0.5 cm para el tope de estos.

<p>Volumen del tubo</p> $V = \pi r^2 h$ $V = (\pi ((7.5)^2) (39))$ <p>V = 6891 ml</p>	<p>Volumen de las tapas</p> $V = \pi r^2 h$ $V = (\pi ((7.5)^2) (5))$ $V = 883 \times 2 \text{ tapas}$ <p>V = 1766 ml</p>	<p>Volumen de los coples</p> $V = \pi r^2 h$ $V = (\pi ((7.5)^2) (0.5))$ $V = 88 \times 2 \text{ coples}$ <p>V = 176 ml</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Resultando un volumen de 8,833 ml u 8.8 L de muestra, la suma de la altura de los tres da 50 cm., de acuerdo a los resultados de la siguiente fórmula: $V = (\pi ((7.5)^2) (50)) = 8835 \text{ ml}$ u 8.8 L., para este estudio, se ajustó el resultado a 8 L de agua a tratar (Figura 15).

Posteriormente se perforó un lado de las canaletas para instalar los tubos y las válvulas para orientar el flujo de agua al siguiente reactor, a los cuatro tubos más largos se le realizaron orificios en la parte de en medio como salida de agua para su oxigenación (Figura 14). Por último, la cuarta canaleta (Figura 16) drenará el agua hacia un recipiente receptor para su análisis.



Figura 15. Canaletas. Elaboración propia



Figura 16. Cuarta canaleta. Elaboración propia

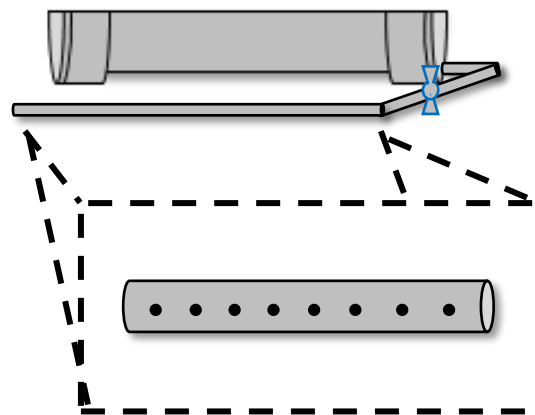


Figura 14. Perforación del tubo. Elaboración propia

Para evitar incidentes durante el tratamiento, la base de hierro se construyó desmontable, para ir ajustando según se requiera y para facilitar su traslado. Respetando el trabajo de Acher, se dejaron los mismos 10 cm de diferencia de altura entre cada canaleta (Figura 17).

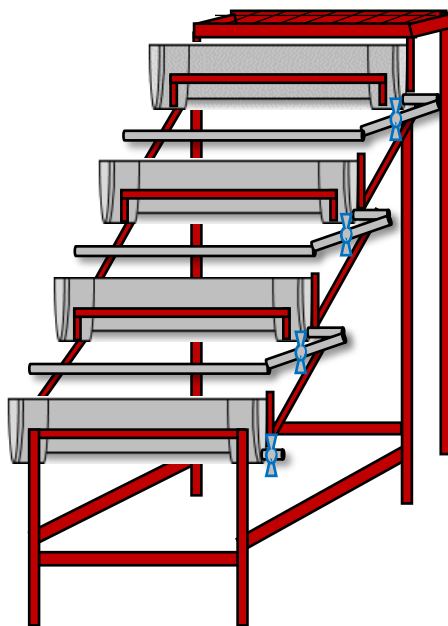


Figura 17. Base del tren. Elaboración propia

4.1.3 Caracterización del grado de fotosensibilización del colorante

4.1.3.1. *Bixa orellana* L.

Debido a la disponibilidad, se obtuvieron semillas de achiote con la señora Teodora López Santos en la localidad de San Pedro Tapanatepec, en el estado de Oaxaca. Las semillas son cosechadas para su comercialización local y debido a su abundancia y técnica manual de cosecha, pueden ser utilizadas en este estudio.

4.1.3.2 Extracción del colorante

Se partió de un peso de 60.4 gr. de semillas para ser colocadas en un litro de agua y se llevó a calentamiento por 15 minutos. Una vez tibia el agua, con la ayuda de un guante de latex se removió con la mano para liberar el colorante. Por último, se filtró para separar las semillas y el líquido se dejó reposar a la intemperie por dos semanas para que el colorante precipitara (Lim, 2012). Del mismo modo, el agua se fue evaporando a temperatura ambiente y una vez seco, se obtuvo el colorante en forma de polvo. Se obtuvo un aproximado de 800 mg.

Por otro lado, se realizó una extracción controlada del colorante; se trabajó con 10 grupos de 10 semillas para observar cuánto colorante se obtiene en promedio. Se comenzó con las semillas individuales, se pesaron una por una anotando su peso, luego se colocó una semilla en un vaso de precipitado de 100 ml con 50 ml de agua en una parrilla a 100 °C por 10 minutos agitando con una varilla de vidrio, pasado el tiempo se determinó por una hora el tiempo de secado aplicando la NOM-116-SSA1-1994 Bienes y servicios. Determinación de humedad en alimentos

por tratamiento térmico. Método por arena o gasa. En los cuadros 2 y 3, se presentan la masa de una simiente y la totalidad de remoción de las semillas de achiote comparando entre los grupos como de las semillas propias.

Cuadro 2. Remoción total del colorante achiote de 10 grupos de 10 semillas

Grupo	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Remoción (mg)
1	231.6	222.3	9.3
2	232.5	215.2	17.3
3	248	243.3	4.7
4	251.4	240.3	11.1
5	251	242.1	8.9
6	242	235.6	6.4
7	259.8	247.9	11.9
8	253.7	254.4	-0.7
9	244.4	238.2	6.2
10	236.4	224.7	11.7
MEDIA		13 mg	
MODA		11 mg	

Como se observa en el cuadro 2, de 100 semillas en total se removi6 en promedio 13 mg con una moda de 11 mg y una desviaci6n estandar de 4.89 mg.

Cuadro 3. Remoci6n total del colorante achiote de 10 semillas

Semilla	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Remoci6n (mg)
1	23.5	20.7	2.8
2	26.4	22.9	3.5
3	20.8	18.3	2.5
4	28.4	26.8	1.6
5	28.4	26.2	2.2
6	23.1	21.7	1.4
7	24	22.9	1.1
8	7	5.9	1.1
9	28.5	25.5	3
10	22.6	21.4	1.2
MEDIA			1.28 mg
MODA			1 mg

Elaboraci6n propia

Del mismo modo, la media de 10 semillas es de 1.28 mg, la moda de 1 mg y una desviaci6n estandar de 0.88 mg.

4.1.3.3 Medición de la semilla de *Bixa orellana* L.

También se midieron las semillas para seleccionar un tamaño específico y controlar la masa. Se utilizó un microscopio digital USB 50x a 1000x para calcular la longitud y ancho de las semillas. Para poder medir la semilla, primero se usó una regla de calibración (Figura 19), se colocó debajo del microscopio para ajustar la línea de medición a 1 milímetro (mm) (Figura 18), y una vez calibrado se colocó la semilla para su medición.

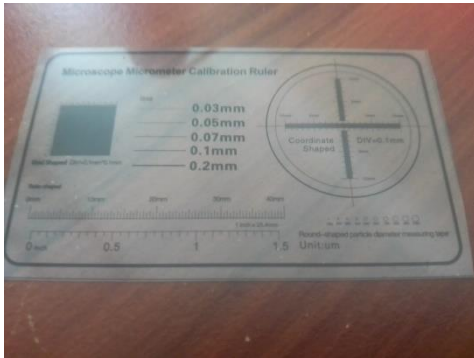


Figura 19. Regla de calibración. Archivo propio



Figura 18. Calibración del microscopio digital. Archivo propio

4.1.4. Selección de la muestra

Se requería una muestra de agua que asegurara la presencia de coliformes totales por lo que se buscó una fuente de agua que tuviera contacto con alguna descarga de agua residual o alguna otra fuente de contaminación. La muestra de agua se obtuvo de una vertiente natural, nace en temporada de lluvias, no se le da uso, corre libremente a la intemperie y debido a su ubicación dentro de una zona urbana, se consideró apta para este estudio (Figura 20).

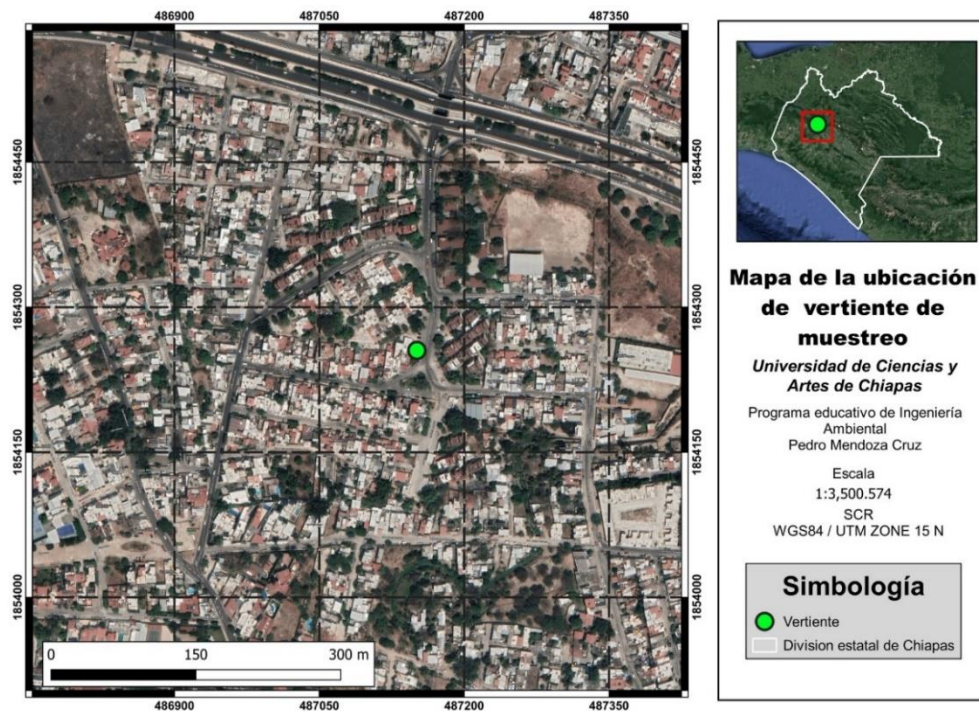


Figura 20. Ubicación del área de estudio para la toma de muestras. Elaboración propia

La vertiente se localiza en la calle Del Universo Norte con bifurcación en Y Del Universo Norte y Galaxias Sur, Colonia Paraíso Fovissste, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, con latitud 16°46'16.55"N y longitud 93° 7'14.04"O.

Esta vertiente es muy conocida por los colonos, el cual, existe comentarios divididos acerca de su origen; pues unos aseguran que viene de un pozo que se encuentra en medio del fraccionamiento y fue dirigido con tuberías hasta dar a la calle y otros aseguran que se debe a un nacimiento de agua (Figuras 21 y 22).

El Ing. Alejandro del Mazo, trabajador en el área de saneamiento en la Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SMAPA), de esta ciudad, proporcionó información sobre la vertiente del área de estudio, confirmando que no presenta ningún uso.

4.1.5. Toma de muestra.

Para el muestreo, se siguieron las indicaciones señaladas en el Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018, Calidad del agua - Enumeración de *Escherichia coli* y bacterias coliformes - Método de filtración por membrana, en el apartado de muestreo, este es un proyecto finalizado y en Declaratoria de Vigencia en 2020 y contiene información actualizada con respecto a la misma norma, emitida en el año 2006.

Para la muestra a tratar fotoquímicamente en este estudio, se utilizó un contenedor de 20 litros, limpio y contapa rosca. Se llenó con otro recipiente pequeño para facilitar la captación directa del agua y no modificar las propiedades originales, tal como se observa en la siguiente imagen.



Figura 22. Vertiente. Archivo propio



Figura 21. Pozo entubado a la vertiente. Archivo propio

La recolección de la muestra para realizar los análisis microbiológicos del efluente, fue de un volumen de 1000 ml, en bolsa microbiológica estéril, para evitar su contaminación. Su traslado y preservación fue a una temperatura de $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.1.6. Análisis microbiológico.

El análisis microbiológico de las muestras tanto del efluente como de los influentes se realizaron de acuerdo a lo señalado en el Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018, que consiste en filtrar la muestra a través de la técnica de filtración de membrana, reteniendo los microorganismos en el filtro e incubado en una caja Petri por 24 horas.

Para la selección del volumen a emplear, se referenció de acuerdo al libro de Standard Methods, 9222 Membrane Filter Technique for Members of the Coliform Group; en el apartado 9222 B. Standard Total Coliform Membrane Filter Procedure. En el caso de la vertiente, se consideró como agua de río para realizarle las disoluciones correspondientes. Se implementaron con volúmenes de 0.1; 0.5; 5 y 10%. El cuadro 4 muestra los volúmenes a filtrar de diferentes fuentes de agua para pruebas de coliformes totales.

Cuadro 4. Volúmenes de muestra sugeridos para la prueba de coliformes totales

Fuente de agua	Volumen (X) a filtrar mL							
	100	50	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001
Agua Potable	X							
Piscinas	X							
Pozos, Manantiales	X	X	X					
Lagos, embalses	X	X	X					
Toma de agua			X	X	X			
Bathing beaches			X	X	X			
Agua del Río				X	X	X	X	
Aguas residuales cloradas				X	X			
Aguas residuales sin tratar					X	X	X	X

Fuente: (APHA et al., 2012)

A fin de tener resultados confiables, en el Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018 nos indica que se debe de homogeneizar la muestra para distribuir uniformemente las bacterias, usando un filtro de membrana y succionando con una bomba de vacío; la membrana se coloca sobre el medio procurando no formar burbujas (Figura 23). Una vez acabado el proceso, se invierten las cajas Petri y se incuban a $36\text{ }^{\circ}\text{C}$



Figura 23. Desarrollo del método de filtración por membrana. Archivo propio

± 2 °C durante 21 h ± 3 h. Después de pasar el tiempo de incubación, se examina y se hace conteo de las colonias que dan positivas a la reacción β -D-galactosidasa.

El número máximo de colonias de coliformes totales de acuerdo con el libro de Standard Methods se muestra en el Cuadro 5, con un límite de 200 colonias de todos los tipos (típicas, atípicas y colonias de fondo no coliformes).

Cuadro 5. Número de colonias en el rango ideal por determinaciones cuantitativas

Prueba	Rango de conteo de colonias	
	Mínimo	Máximo
Coliforme total	20	80
Coliforme fecal	20	60
Estreptococos fecales	20	100
<i>Enterococo</i>	20	60
<i>E. coli</i>	20	60

Fuente: (APHA et al., 2012)

Los análisis microbiológicos de los influentes se realizaron del modo ya descrito, tanto en técnica como en el uso de las diluciones.

4.1.6.1 Cálculo de la densidad de coliformes

Los cálculos que se realizan para conocer la densidad de los grupos de coliformes totales es una estimación aproximada de la población real debido a una distribución no uniforme cuando se muestrea (APHA et al., 2012).

$$\text{Número de Coliformes Totales. /100 mL.} = \frac{\text{Numero de colonias de coliformes contadas}}{\text{ml. de muestra filtrada}}$$

En el siguiente cuadro se muestran las diluciones utilizadas en el análisis microbiológico.

Cuadro 6. Diluciones empleadas para el análisis microbiológico

Diluciones (%)				
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Efluente	100%, 50%, 10%	10%, 5%	0.1%	0.5 %
Influente 1		0.1%, 0.5%		
Infuente 2				
Muestras totales analizadas	19	13	15	9

Elaboración propia

Las diluciones utilizadas fueron con base al libro de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. De acuerdo a cada investigación se aplican diferentes métodos; tal es el caso del investigador Silva et al., (2020) quién investigó la absorción de los espectros, la citotoxicidad de los fibroblastos dérmicos humanos y la microestructura del colágeno del gel Papacarie™ que sirve para la eliminación quimiomecánica de lesiones cariosas, compuesto de papaína y cloramina, implementando Urucum puro o mejor conocido como achiote, Láser Papacarie Duo™, y PapaUrucum™ la combinación del gel con annatto y determinar si es factible su uso clínico. Según su investigación la dilución del Urucum fue de 3 ml de H₂O añadidos a 1,88 g de Urucum con una concentración total del 10%. Las soluciones madre se prepararon en 100 μM y luego se diluyeron en diferentes concentraciones en 1 ml de H₂O. Para el PapaUrucum™ tuvo una concentración del 20 - 40 % en un ensayo MTT donde las células se incubaron durante 4 h con 10 μL de reactivo con una dilución al 10% del reactivo añadida a 100 μL de medio DMEM. En otro artículo usaron las semillas y las hojas de la *Bixa orellana* L. a una dilución en serie de 1000 μg - 1,906 μg en medio de caldo nutritivo estéril; una vez seco se disolvió en 0,25% de dimetilsulfóxido (DM) hasta una concentración de 100 mg/ ml y la concentración de trabajo, de 1mg/ ml (Tamil Selvi et al., 2011).

4.1.7 Pruebas de fotosensibilización

Se realizaron 4 pruebas de fotosensibilización, para ello se construyó un tren de tratamiento piloto, su estructura y funcionamiento fue similar al diseño en estudio, se utilizó como objeto de comparación. Las pruebas de tratamiento se iniciaron entre agosto y noviembre, la primera fue el 2 de agosto de 2022, seguido del 12 de septiembre de 2022, aproximadamente un mes después se efectuó el tercer experimento el 13 de octubre de 2022 y por último el 11 de noviembre de 2022 terminamos con la prueba final. Todo el trabajo se realizó dentro del Programa Educativo de Ingeniería Ambiental (Figura 24). Para ello se controló la concentración de colorante, el volumen de agua a tratar, el tiempo de exposición (20 minutos), cuidando que la radiación solar fuese mayor a 500 W/m². Por ejemplo, para los tratamientos del día 13 de octubre y 11 de noviembre siendo estos los más importantes, el cuadro 6 muestra la radiación existente.



Figura 24. Trenes de tratamiento. Archivo propio

Cuadro 7. Valores de la radiación solar en el horario de 11:00 a 15:00

Fecha	Horario				
	11 am	12 pm	13 pm	14 pm	15 pm
13-Oct-2022	516 W/m ²	693 W/m ²	122 W/m ²	310 W/m ²	963 W/m ²
11-Nov-2022	749 W/m ²	874 W/m ²	452 W/m ²	616 W/m ²	457 W/m ²

Elaboración propia

Las concentraciones que se utilizaron en las diferentes pruebas se muestran en el cuadro 7, todas con un margen de error de ± 3 mg/L. En el primer apartado se muestran las concentraciones de referencia, mismas que nos llevaron a obtener las concentraciones resultantes y se muestran en el segundo apartado. Se realizaron dos tratamientos por cada prueba para encontrar el de mayor remoción de coliformes totales.

Cuadro 8. Concentraciones del colorante

Propuesta de Concentración (mg/L)				
1 L	3	9	15	21
8 L	24	72	120	168
Concentraciones Resultantes para Análisis de Muestra				
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Tratamiento 1.				
8 L	121.1 mg/L	119.9 mg/L	23.3 mg/L	47.2 mg/L
Tratamiento 2				
8 L	171 mg/L	167.5 mg/L	72.8 mg/L	97.1 mg/L

Elaboración propia

Las concentraciones utilizadas fueron en base a las propuestas por Acher; el tratamiento 1 es considerado de baja concentración y el tratamiento 2 de alta.

Posterior al tratamiento fotoquímico, se trasladaron las muestras del efluente y de los influentes al laboratorio del programa educativo de ingeniería ambiental para su análisis microbiológico, por la técnica de filtración por membrana.

Del mismo modo, se empleó el servicio de un laboratorio externo de análisis de aguas para corroborar los resultados de las muestras 3 y 4. Posteriormente se analizaron otras concentraciones (6 mg/L y 9 mg/L) para obtener un estudio completo de concentraciones.

4.1.8. Efecto de la radiación solar en la degradación de la semilla

En un artículo publicado en la revista ChemistrySelect engloba el tema del efecto de la radiación solar y artificial en la elaidinización y degradación de z-bixina extraída de las semillas de *Bixa orellana* L. La cubierta de la bixina se compone mayormente de la Z-bixina, y al realizar su extracción mantiene un rendimiento del 12 % del peso de la semilla conteniendo el 87 % de la Z-bixina con una pureza del 94% ejecutado por análisis en Cromatografía Líquida de Ultra Alta Resolución (UHPLC, por sus siglas en inglés). Para degradar la semilla, debe haber corrientes de aire para formar productos de oxidación y en la fotodegradación, se utilizaron lámparas de 15 W con emisión de 365 y 410 nm, así mismo la irradiación solar obtuvo de 500 a 580 nm con una disminución intensa; todo el proceso fue monitoreado por medio de la espectroscopía ultravioleta visible (UV-VIS) donde la relación de estructura fina espectral caracteriza los carotenoides calculados como ecuación.

Durante la irradiación, menciona que no aparecieron nuevas señales con el decaimiento de la Z-bixina y el fotoproducto, lo que implica que el compuesto se degradó; el tiempo de degradación dependía de la fuente de irradiación, por el cual la luz solar mostró una reacción más rápida con sólo 2 horas para la desaparición total de la bixina, en comparación con la irradiación artificial que necesitó 20 horas. Por si fuera poco, señalan el análisis de muestras con pérdida total de color (característica de la bixina) estableció la presencia de CO_2 , CO_3 , H_2CO y HCl observando el peso molecular y los fragmentos característicos declinando que la descomposición oxidativa ocurre en forma de reacción en cadena hasta la degradación completa de la bixina a CO , CO_2 , H_2CO , y HCl (Eliecer Cárdenas et al., 2022). Esto conlleva a entender el proceso de absorción, por el cual, se realizaron 10 diluciones de una muestra de 500 μg /ml de colorante para observar cuanto absorbe conforme se irradia.

4.1.9 Medición de absorbancia

La medición de absorbancia se realizó utilizando el espectrómetro Ocean Optics Inc. USB4000, el portamuestras BCH100A y como fuente de luz un LED emitiendo en todo el espectro visible, los dos primeros se representan en las figuras 25 y 26; se analizó la cantidad de luz que la muestra transmite en todo el espectro visible teniendo en cuenta la Ley de Beer-Lambert que define la relación entre la absorbancia a una longitud de onda dada y la concentración de la solución.



Figura 26. Espectrómetro Ocean Optics Inc. USB4000. Archivo propio

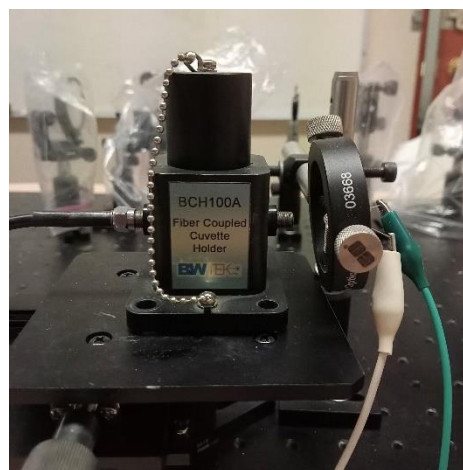


Figura 25. Portamuestras BCH100A. Archivo propio

Una vez que se registra la absorbancia del colorante, se determina con el diagrama de cromaticidad la tonalidad registrada para examinar cuanto se degradó el achiote. Y de acuerdo a la normatividad (Cuadro 8), analizar el color verdadero para un siguiente trabajo donde la muestra de salida del tren de tratamiento sea apta para el público sin rebasar los límites establecidos de color verdadero.

Cuadro 9. Normatividad Mexicana aplicables al color verdadero del agua

Número	Normatividad
1	Norma Mexicana NMX-AA-017-SCFI-2021 , Análisis de Agua – Medición de Color Verdadero en Aguas Naturales, Residuales, Residuales Tratadas y Marinas – Mediante Coeficientes de Absorción Espectral - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-017-1980).
2	NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 , Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

En la primera Norma, presenta la medición de color verdadero en agua, a través de coeficientes de absorción por espectrofotometría para aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas; en un intervalo visible del espectro a 436 nm, 525 nm y 620 nm. Al final se ejecutan los cálculos para conocer el resultado del coeficiente de absorción espectral.

Una vez se conozca el resultado del color del agua, se analizará si la muestra de agua excede el límite permisible en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, donde el máximo permisible es de 20 unidades de color (UC) para consumo humano en la escala platino-cobalto.

Estas técnicas de medición determinan el color aparente del agua y el color verdadero del agua respectivamente, por lo que su aplicación proporciona características diferentes del agua analizada.

Para el método por espectrofotometría, se filtra la muestra a través de una membrana filtrante y medir su pH posteriormente situando el equipo a una longitud de onda de 436 nm. Ajustando a cero el espectrofotómetro y empleando primero el blanco; ya por último leer la absorbancia por triplicado y repetir el procedimiento con las longitudes de onda a 525 y 620 nm anotando su unidad de medida en metros los promedios de cada longitud de onda.

En cambio, con el procedimiento de platino-cobalto se debe de preparar una disolución madre de cloroplatinato y a partir de la disolución estándar, preparar las disoluciones intermedias para verificar su valor con la escala de vidrios de coloridos; midiendo su pH para el color aparente o removiendo la turbiedad para el color verdadero reportando los resultados con su unidad de medida en mililitros como lo indica la norma, sin olvidar las medidas de seguridad que esta maneja.

CAPÍTULO V

5.1. Resultados

5.1.1 Grado de fotosensibilización del colorante natural *Bixa orellana* L.

Como complemento, se realizó una prueba de factibilidad del colorante natural para verificar si sus propiedades antimicrobianas seguían activas, dicho proceso se realizó a una tortilla con moho que de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-187-SSA1/SCFI-2002 rige las especificaciones sanitarias que deben cumplir la masa y las tortillas, así como las tostadas y harinas a la hora de su elaboración y los establecimientos donde se procesan. Para evitar que las tortillas produzcan moho, establece que la humedad de las harinas para elaborar las tortillas no debe de sobrepasar el 15%, el límite máximo de coliformes totales es a < 30 UFC/g y las aflatoxinas no debe de ser mayor a $12 \mu\text{g}/\text{kg}$ para evitar problemas a la salud. De lo contrario, se producirán los mohos después de 48 h a temperatura ambiente junto con la humedad que genera el vapor.



Figura 27. Prueba de factibilidad del achiote. Archivo propio

Como se observa en la figura 27, se colocó el achiote en polvo sobre la tortilla enmohecida para ver si eliminaba el moho, pero este no tuvo ningún efecto; sin embargo, al diluir con 30 ml de agua el colorante y agregarlo a la tortilla, los hongos consumieron la *Bixa orellana* L. en un periodo de 15 a 20 minutos con exposición directa al sol, disminuyeron significativamente en proporción, demostrando que el achiote disuelto en agua, más la radiación del sol, causa efectos importantes en los hongos.

5.1.2. Medición de semillas de *Bixa orellana* L.

De las 10 semillas de achiote que se midieron antes y después del proceso de extracción del colorante, para conocer la longitud y ancho de cada una (Figura 28), se observó que tienen diferentes tamaños y debido a que no es mucha la diferencia entre ellas, se optó por no separarlas en grupos, tal como se planteó en la metodología.



Figura 28. Medición de la semilla. Archivo propio

Después de remover el pigmento, la semilla quedó aún con restos de bixina, la Figura 29, presenta las semillas después de este proceso de extracción sin necesidad de usar químicos, únicamente agua; con la finalidad de evitar cambios estructurales en la cadena del achiote, cambios fisicoquímicos del agua y para no perjudicar la salud de las personas; dejando ver la segunda capa del achiote llamada sarcotesta y una tercera capa denominada endospermo (la zona de color café) encargado de cubrir el embrión. En los cuadros 2 y 3 presentados anteriormente se demuestra un promedio de extracción de colorante de 11 mg de 10 grupos de 10 semillas y una moda de 1 mg de 10 semillas.

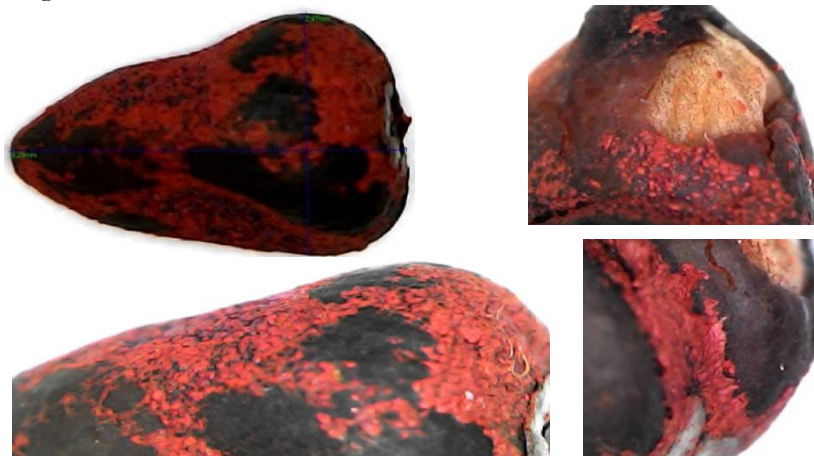
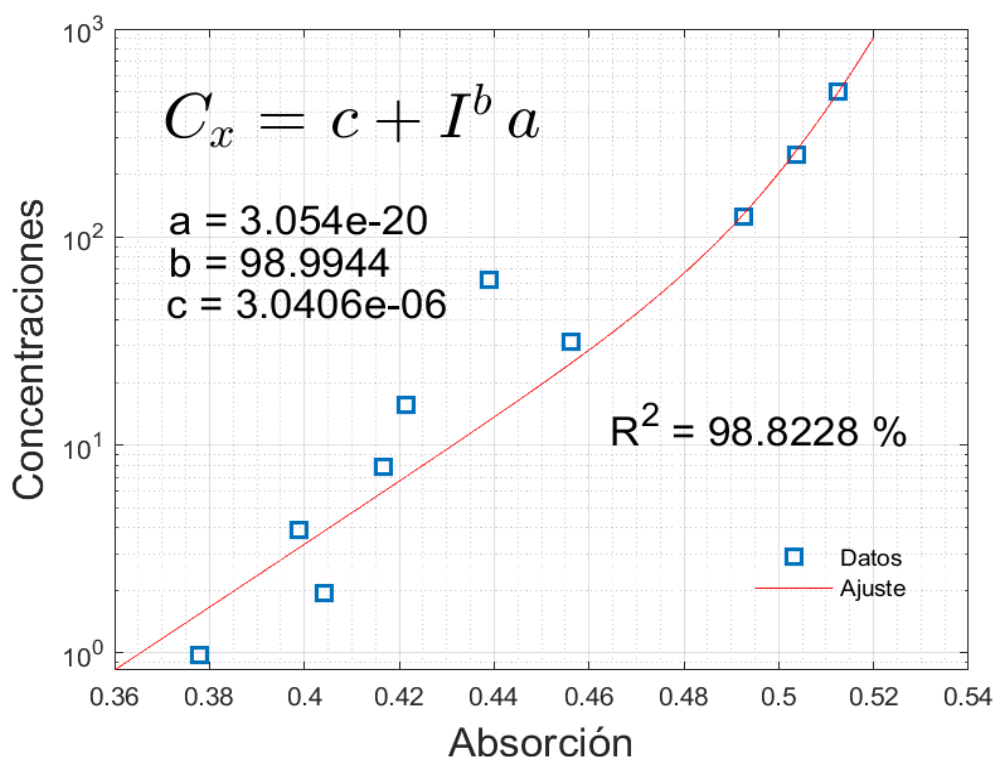


Figura 29. Resultado de la remoción de la semilla de achiote. Archivo

5.1.3. Medición de absorbancia

A partir del espectro obtenido, se determinó una curva de ajuste de concentraciones de colorante utilizando una concentración inicial de 500 $\mu\text{g/ml}$, la cual se fue diluyendo al 50 % a partir de la primera muestra, hasta obtener 10 diluciones. Se determinó un modelo matemático de tipo potencial para determinar la concentración del achiote a una longitud de onda de 595 nm, lo anterior utilizando Matlab R2021a, donde C_x es la concentración del achiote, I es la absorción de la muestra y a , b y c son coeficientes de la ecuación. En el cual, si se desea determinar una concentración desconocida, se obtiene el valor de absorción de la muestra a una longitud de onda específica de 595 nm (I) y se ejecuta la ecuación para conocer su valor.



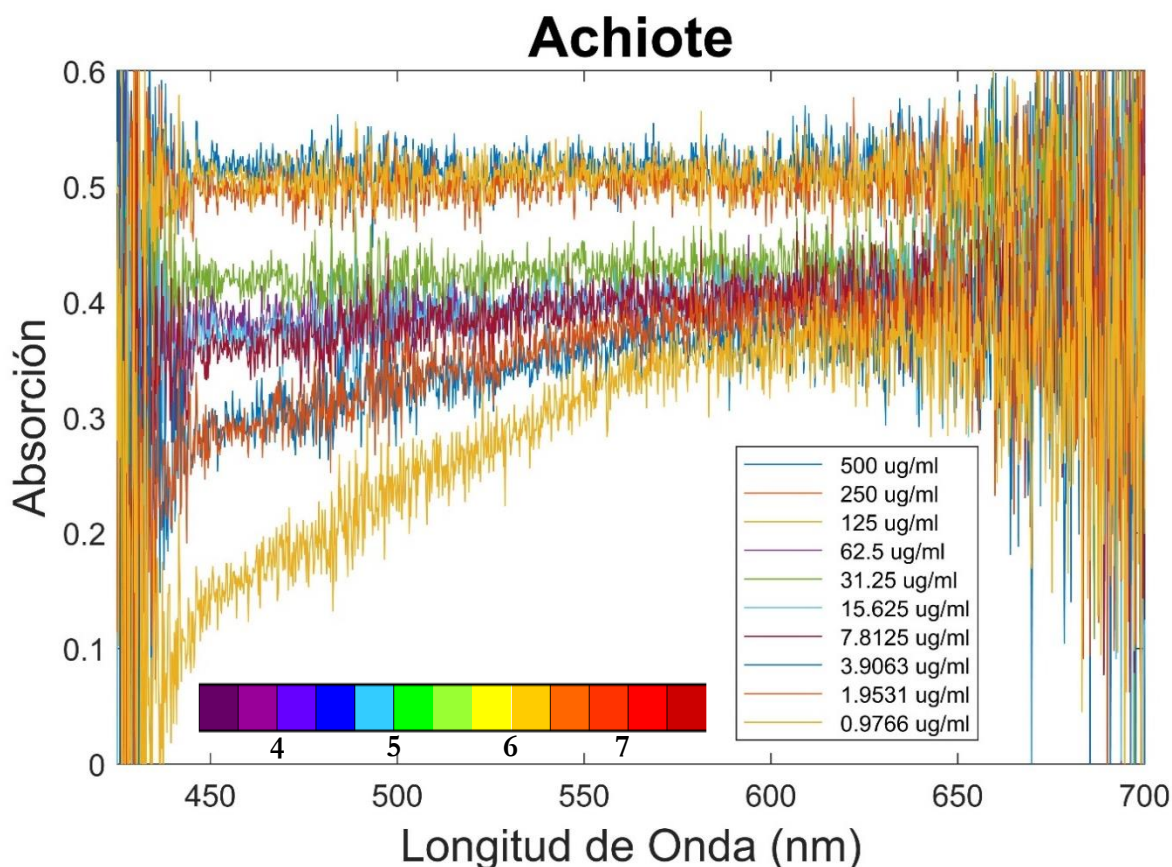
Gráfica 1. Curva de calibración de absorbancia. Elaboración propia

Por lo tanto, en la gráfica 1, se muestra que entre mayor sea la concentración, mayor es la absorción, el modelo matemático presenta una precisión del 98.82 % de absorbancia con 1.2% de margen de error, siendo muy insignificante. Una vez determinada la concentración del colorante a la salida del sistema del tren de tratamiento se podrá evaluar el método más eficiente para la eliminación del color en el agua y así pueda ser aceptado por la población objetivo para su consumo.

5.1.4. Efecto de la radiación solar en la degradación de la semilla

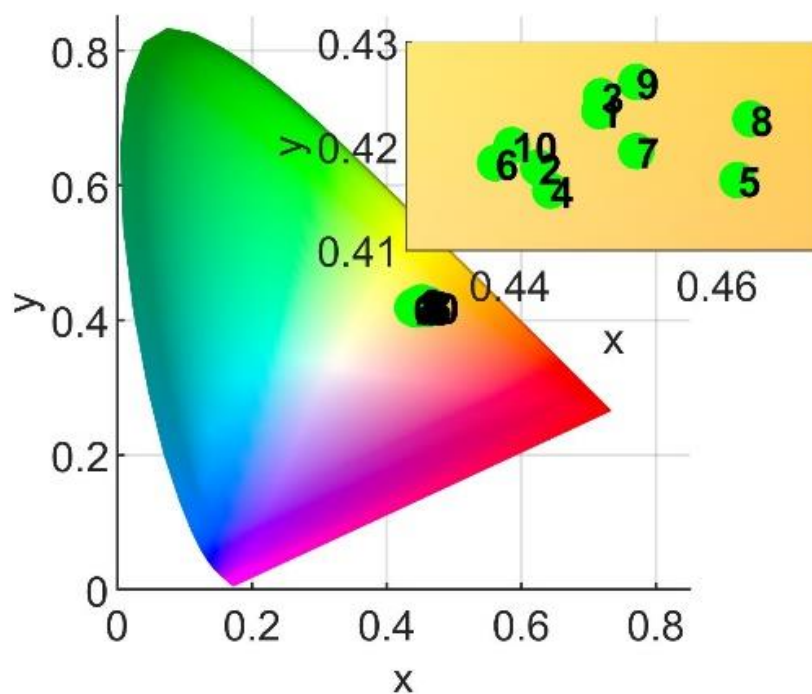
En la gráfica 2, se presenta la absorción de la *Bixa orellana* L. desde los 450 nm a los 600 nm de longitud de onda, la absorción de la bixina se presenta en el rango colores que van del verde al

violeta. Esta absorción se da, debido a que son contrarios al color rojizo propio de la bixina lo cual servirá como promotor de la fotoinactivación de bacterias, ya que promueve la formación del oxígeno singlete pues de acuerdo a (Leal Gonçalves et al., 2020) entre más sea la cantidad de concentración de achiote, mayor es la producción de oxígeno singlete y triplete, sin embargo, esto es comprobado hasta cierta concentración límite.



Gráfica 2. Absorción de la muestra en función a la dosis de *Bixa orellana* L. Elaboración propia.

Otra forma de comprobar este hecho, es con la ayuda del círculo cromático, pues se determina a través de los colores que se presenten en una gráfica de absorción. Los colores que presenta el achiote están en la gama roja e inicia su curva en el matiz verde siendo estos tonos opuestos entre sí.



Gráfica 3. Diagrama de cromaticidad del *Bixa orellana* L. Elaboración propia

En la gráfica 3, las diez diluciones del colorante que se utilizó en la absorción, por el cual se determinó con el diagrama de cromaticidad o espacio de color con el sistema CIE (por sus siglas en francés), estando todas las diluciones entre los valores 0.43 al 0.47 en el eje X y 0.41 hasta el 0.43 del eje Y; al diluir constantemente el colorante perdió la tonalidad roja hasta llegar en un tono amarillento. Donde el cuadro 8, presenta las normas aplicables al color verdadero del agua.

5.1.5 Conteo de Unidades Formadoras de Colonias

En la Figura 30 y 31, se refleja las dimensiones de las UFC en diluciones al 10% y 0.5% existiendo una gran diferencia de colonias incontables a contables debido al exceso de colonias.

Existen dos formas de conteo de las UFC, la primera es si no existen demasiadas colonias (como se muestra en la Figura 30) se cuenta el total de la caja Petri y la segunda si hubo un crecimiento predominante (como en el caso de la figura 31) se divide en 4 partes iguales la caja Petri y se cuentan las colonias existentes en una cuarta parte. Teniendo en cuenta que la tapa debe de estar completamente limpia para realizar el conteo. En dado caso que no se pueda contar a través de la tapa, se debe de destapar y contar una cuarta parte del total (observar la Figura 32).; una vez contado, se multiplica por 4 para conocer el total de UFC que hay en la caja Petri.



Figura 30. Entrada al 0.5% de dilución. Nov. Archivo propio

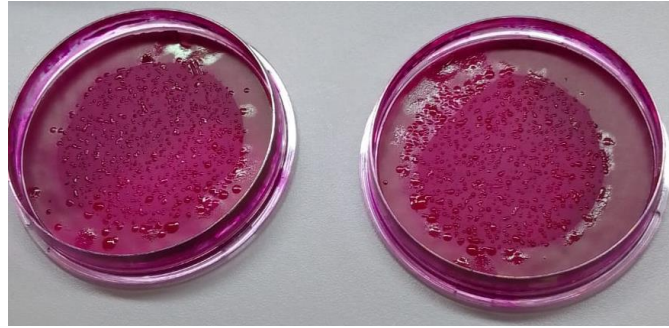


Figura 31. Entrada al 10% de dilución. Sept. Archivo propio

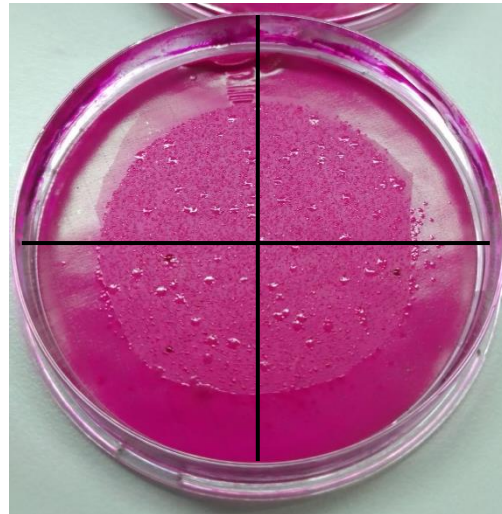
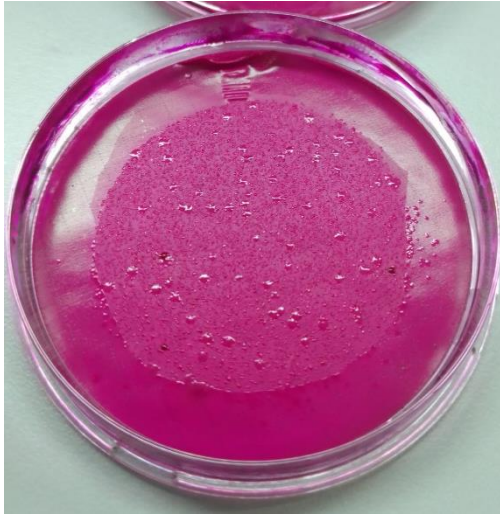


Figura 32. Conteo de una cuarta parte de UFC. Archivo propio

5.1.6. Análisis microbiológico

De los análisis microbiológicos de los 4 tratamientos realizados, los resultados de las pruebas 3 y 4 demostraron mayor remoción de coliformes totales. En el cuadro 9 se observa para el efluente un valor de 1.1×10^4 UFC/100 ml y para el influente un valor de 610 UFC/100 ml y 86 UFC/100 ml, con una eficiencia de remoción del 94.4 % y 97.9% respectivamente con una radiación promedio de 693 W/m^2 .

Cuadro 10. Resultados de análisis microbiológicos del 13 de octubre de 2022

Parámetro a analizar	Técnica de aplicación	Concentraciones	Tratamiento de desinfección	
			Entrada	Salida
Coliformes totales	Filtración por membrana	3 mg/L	1.1 x 10 ⁴ UFC/100 ml	610 UFC/100 ml
		9 mg/L		86 UFC/100 ml

Elaboración propia

A partir de estos resultados, se evaluaron dos nuevas concentraciones de annato, de 6 mg/L y 12 mg/L. Del mismo modo, se efectuó un tratamiento para 8 L. y se irradió a partir de las 12:25 pm hasta las 12:45 pm, con una radiación promedio de 874 W/m². El cuadro 10 presenta los resultados de las nuevas concentraciones; para la entrada se obtuvo un valor de 1.0 x 10⁴ UFC/100 ml y a la salida resultó con 210 UFC/100 ml y <10 UFC/100 ml siguiendo la línea de tendencia de remoción con un 99.2% y 99.9% de remoción de coliformes totales, respectivamente.

Cuadro 11. Resultados de análisis microbiológicos del 11 de noviembre de 2022

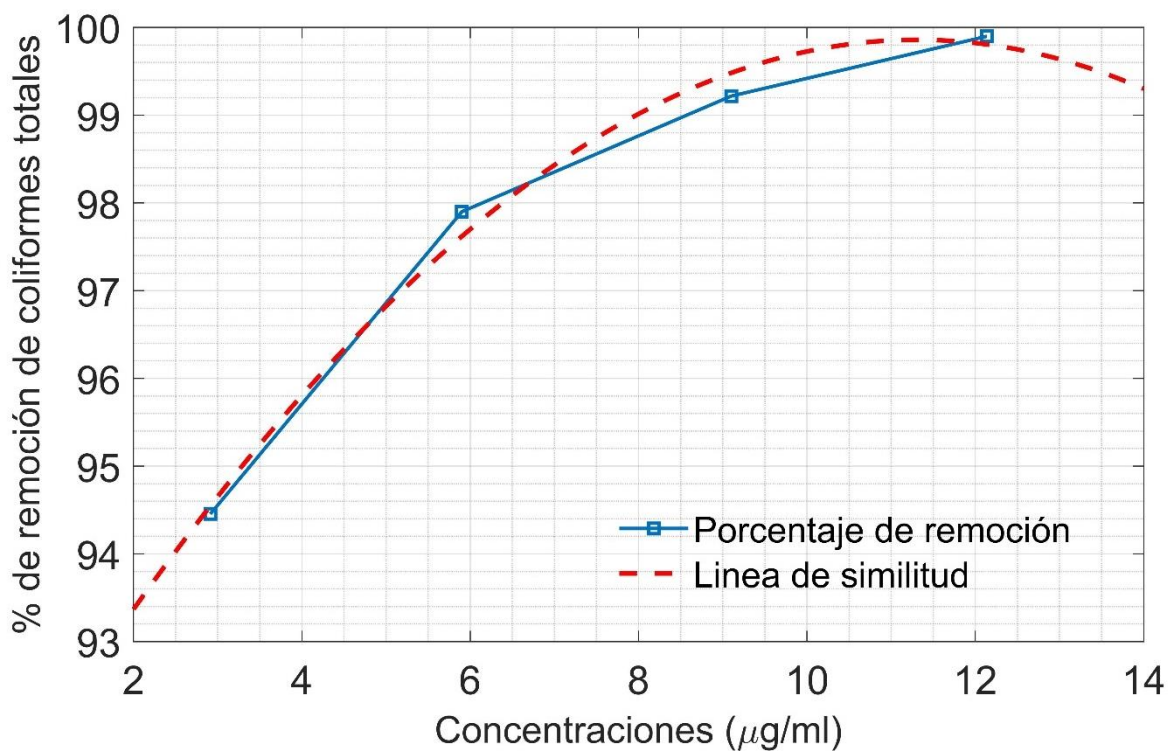
Parámetro a analizar	Técnica de aplicación	Concentraciones	Tratamiento de desinfección	
			Entrada	Salida
Coliformes totales	Filtración por membrana	6 mg/L	1.0 x 10 ⁴ UFC/100 ml	210 UFC/100 ml
		12 mg/L		< 10 UFC/100 ml

Elaboración propia

Por último, se presenta en la gráfica 4, los porcentajes de remoción de coliformes totales con las concentraciones de 3, 6, 9 y 12 mg/L, con remociones del 94.4%, 97.9%, 99.2% y 99.9% respectivamente, lo que representa remociones significativas de bacterias. Es decir, de tener en promedio 10,500 UFC a la entrada, se logró reducir hasta en 3 órdenes de magnitud las UFC.

En la gráfica 1, se presentó que mientras mayor sea la concentración de colorante, mayor será la remoción de UFC; pero como se observa en la gráfica 4, la línea de tendencia, presenta cambio de fase debido a que el incremento en la concentración del colorante, provocará una baja en la absorción de la luz, debido al exceso de *Bixa orellana* L.; por lo que la eficiencia en la remoción de UFC se verá disminuida.

De lo anterior se determinó que no se requiere de cantidad considerable de semillas para la producción del achiote para ser utilizado en fotosensibilización (Cuadro 14, Anexo 5) y que los costos del tratamiento utilizando esta técnica, son factibles (Cuadro 15, Anexo 5).



Gráfica 4. Porcentaje de remoción de coliformes totales con línea de simulación.

CAPÍTULO VI

6.1. Conclusiones

Se observó que el tren de tratamiento diseñado y construido fue eficiente para tratar el volumen de 8 litros de agua problema, utilizando la fotosensibilización. El sistema no acumuló residuos de colorante debido al diseño redondeado propuesto, sin esquinas. Por otro lado, el control del caudal mediante válvulas permitió un tiempo óptimo de exposición a la radiación solar y la oxigenación del agua.

La cantidad de coliformes totales que presentó la vertiente de agua en estudio fue de 1.0×10^4 UFC/ 100 ml, aproximadamente, su tratamiento dio como resultado remociones superiores al 90% usando como sensibilizador la *Bixa orellana* L., por sus propiedades antimicrobianas, siendo de 99.9 % el mejor resultado de remoción obtenido, la concentración óptima de colorante utilizado fue de 12 mg/L en el tratamiento de desinfección de 8 L, a un tiempo de 20 minutos de exposición y una radiación solar entre los 700 y 800 W/m²; así como una oxigenación en el tren de tratamiento que promovió la generación del oxígeno singlete y en consecuencia la eliminación de los coliformes totales.

Por lo tanto, el uso de la fotosensibilización en el tipo de tren de tratamiento utilizado, es recomendable para disminuir la cantidad de coliformes totales en aguas y disminuir el riesgo por infección a la población que hace uso de ella.

Para el diseño y construcción del tren de tratamiento y obtención del colorante, se cuantificó un costo total de \$2,400.00 pesos, lo que lo hace competitivo en comparación con el proceso de desinfección utilizando luz ultravioleta u ozono, que son tratamientos que utilizan dispositivos o reactivos muy costosos y de constante mantenimiento.

La fotosensibilización en el agua es un tratamiento de un proceso simple, en ninguna de las etapas se generaron residuos que dañen a la salud de la población; debido a que el achiote es utilizado como especia en la cocina y es de fácil adquisición, así como las dimensiones del tren de tratamiento fueron reducidos, permite que el método pueda ser implementado en una casa habitación, sumándole que se pueden construir trenes de tratamiento con materiales reciclados y debido a sus características, no requieren energía eléctrica. Por otro lado, de existir condiciones medioambientales que impidan el paso de la luz solar, su adecuación con sistemas de iluminación alternos (leds, láser, baterías o paneles solares), podría ser factible, aunque esto represente un gasto extra, no es significativo.

Referencias

- Acher, A., Fischer, E., Zellingher, R., & Manor, Y. (1990). Photochemical disinfection of effluents-pilot plant studies. *Water Research*, *24*(7), 837–843. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(90\)90133-Q](https://doi.org/10.1016/0043-1354(90)90133-Q)
- Acher, A. J. (1982). The fate of organic pollutants in frozen waters: sunlight photodecomposition of uracil herbicides in frozen aqueous solutions. *Water Research*, *16*(4), 405–410. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90163-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90163-4)
- Acher, A. J. (1985). Sunlight photooxidation of organic pollutants in wastewater. *Water Science and Technology*, *17*(4-5-5 pt 2), 623–632. <https://doi.org/10.2166/wst.1985.0165>
- Acher, A. J., Fischer, E., & Manor, Y. (1994). Sunlight disinfection of domestic effluents for agricultural use. *Water Research*, *28*(5), 1153–1160. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90202-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90202-X)
- Acher, A. J., & Juven, B. J. (1977). Destruction of coliforms in water and sewage water by dye sensitized photooxidation. *Applied and Environmental Microbiology*, *33*(5), 1019–1022. <https://doi.org/10.1128/aem.33.5.1019-1022.1977>
- Acher, A. J., & Rosenthal, I. (1977). Dye-sensitized-photo-oxidation—a new approach to the treatment of organic matter in sewage effluents. *Water Research*, *11*(7), 557–562. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354\(77\)90164-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354(77)90164-6)
- Alfaro Moreno, A. M. (2021). Diagnóstico de las enfermedades gastrointestinales por la calidad del agua en la ciudad de Chiapa de Corzo, Chiapas entre 2015 y 2020 [Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. In *Repositorio Unicach*. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4242>
- APHA, AWWA, & WEF. (2012). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (E. W. Rice, R. B. Baird, A. D. Eaton, & L. S. Clesceri (eds.); 22nd Editi). American Public Health Association.
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Water challenges in Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, *11*(2), 341–371. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-10>
- Askar, A., Sunggat, M., Maxat, M., Nunzhigit, S., Kanat, Z., Ainur, K., Arnay, A., & Asset, O. (2023). Investigation of the Efficiency of the Ozonator in the Process of Water Purification Based on the Corona Discharge. *Journal of Ecological Engineering*, *24*(2), 140–151. <https://doi.org/10.12911/22998993/156610>
- Borda, O., Guerrero Rodríguez, A. F., & Moreno Merchan, A. C. (2021). Caracterización De Los Niveles De Trihalometanos (THMs) En Muestras De Agua Potable, Provenientes De La Planta Regional Ubicada En El Municipio De Cogua - Zipaquirá, Colombia: Un Estudio De Las Causas Y Efectos. *Repositorio Institucional - Universidad La Gran Colombia*, *1*–5. <https://doi.org/10.18687/laccei2021.1.1.514>
- Borda Prada, O. L., Guerrero Rodríguez, Ariel Fabricio Moreno Merchán, A. C., & Ayala Rojas, L. E. (2021). Evaluación de la calidad del proceso de desinfección de agua potable

- basado en el uso de compuestos de cloro. *ACOFI*, 1–11.
<https://acofipapers.org/index.php/eici/article/view/1650/1691>
- Carbonell Tatay, F., Carreño Sáenz, O., Campos Máñez, J., Trallero Anoro, M., García Fadrique, A., Caballero Soto, M., Bueno Lledó, J., & Estevan Estevan, R. (2018). Utilidad del azul de metileno en la cirugía de la pared abdominal: 25 años de experiencia. *Revista Hispanoamericana De Hernia*, 6(3), 125. <https://doi.org/10.20960/rhh.139>
- Christopher S. Foote. (1968). Mechanisms of Photosensitized Oxidation. *Science*, 162(3857), 963–970. <https://doi.org/10.1126/science.162.3857.963>
- CONAGUA. (2010). Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento. Desinfección Para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento Comisión Nacional del Agua. In CONAGUA. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro23.pdf>
- CONAGUA. (2021). *Calidad del agua en México*. Portal Del Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2018). Atlas del agua en México 2018. In *SINA* (2018th ed.). http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- CONEVAL. (2020). Informe de Pobreza y Evaluación 2020. Chiapas. In *CONEVAL*. https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Documents/Informes_de_pobreza_a_y_evaluacion_2020_Documentos/Informe_Chiapas_2020.pdf
- Devia, J., & Saldarriaga, L. (2003). Planta piloto para obtener colorante de la semilla de achiote (Bixa orellana). *Revista Universidad EAFIT*, 39(131), 8–22.
- Doménech, J. (2004). Ozono frente a cloro: Desinfección y desinfectantes del agua para consumo humano. *Offarm - Elsevier*, 23, 120–126. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-ozono-frente-cloro-13061803>
- Domínguez Henao, L., Turolla, A., & Antonelli, M. (2018). Disinfection by-products formation and ecotoxicological effects of effluents treated with peracetic acid: A review. *Chemosphere*, 213, 25–40. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.005>
- Driedger, A., Staub, E., Pinkernell, U., Mariñas, B., Köster, W., & Gunten, U. Von. (2001). Inactivation of bacillus subtilis spores and formation of bromate during ozonation. *Water Research*, 35(12), 2950–2960. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00577-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00577-7)
- Elicer Cárdenas, O., Vega-Rodríguez, S., Cárdenas-Chaparro, A., De Leon-Rodríguez, A., & de Loera, D. (2022). Effect of Solar and Artificial Radiation on Elaidinization and Degradation of Z-Bixin Extracted from Bixa Orellana Seeds. *ChemistrySelect*, 7(27), 2365–6549. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/slct.202201336>
- EPA. (1999a). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con luz ultravioleta. *Epa*, 64, 9. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs-99-064.pdf>
- EPA. (1999b). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con ozono. *Epa*, 64, 9. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs-99-063.pdf>
- Espinoza, E., & Martines, P. (2022). Diseño y construcción de un prototipo automatizado para

- desinfectar agua superficial usando ozono y radiación ultravioleta en el aeropuerto de Jaén. *Revista Científica Pakamuros*, 10(1), 51–65. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v10i1.268>
- Ferro Mayhua, F., & Ferró Gonzales, P. F. (2019). Distribución temporal de las enfermedades diarreicas agudas, su relación con la temperatura y cloro residual del agua potable en la ciudad de Puno, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 21(1), 69–80. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.446>
- Fung, D. Y., & Miller, R. D. (1973). Effect of dyes on bacterial growth. *Applied Microbiology*, 25(5), 793–799. <https://doi.org/10.1128/aem.25.5.793-799.1973>
- Gamboa, N., & Leidinger, W. (1987). El oxígeno singulete. *Revista de Química*, 1(1), 43–47. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/16440>
- García-Fresnadillo, D. (2005). Fotosensibilización y el sensibilizador : síntesis , propiedades y limitaciones. *Solar Safe Water*, 227–242. https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/14_Capitulo_14.pdf
- Gomes, J., Matos, A., Gmurek, M., Quinta-Ferreira, R. M., & Martins, R. C. (2019). Ozone and photocatalytic processes for pathogens removal from water: A review. *Catalysts*, 9(1), 1–23. <https://doi.org/10.3390/catal9010046>
- Guerrero Legarreta, M. (2010). El agua. In *Elibro* (Primera ed). FCE - Fondo de Cultura Económica. <http://elibro.net.cuidvirtual.unicach.mx/es/lc/unicach/titulos/72081%0A>
- Hidalgo Olmedo, B. G. (2022). Uso de colorantes alimentarios (artificiales y naturales) y su impacto en la salud: revisión literaria. *Repositorio Digital UNACH*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/9714>
- INEGI. (2021). Características De Las Defunciones Registradas en México Durante 2020, Preliminar. *Comunicado de Prensa*, 402(21), 1–5. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSociodemo/DefuncionesRegistradas2020_Pre_07.pdf
- Jarvis, P., Autin, O., Goslan, E. H., & Hassard, F. (2019). Application of ultraviolet light-emitting diodes. *Water* 2019, 11, 1894; *Doi:10.3390/W11091894*, 15.
- Khan Academy. (2023). *La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones*. Khan Academy. <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- Kuromiya, A., & Rojas-Pérez, H. S. (2021). El agua en la frontera Chiapas-Guatemala. *Argumentos, Estudios Críticos de La Sociedad*, 34(95), 57–82. <https://argumentosojs.xoc.uam.mx/index.php/argumentos/article/view/1101/1185>
- Lara, E. A., Fernández, E., Valle, J. M. Z. del, Lara, D. J., Aguilarq, A., & Damme, P. Van. (2019). Etnomedicina en Los Altos de Chiapas, México. *Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 18(1), 42–57. <http://www.blacpma.ms-editions.cl/index.php/blacpma/article/view/67>
- Li, X., Cai, M., Wang, L., Niu, F., Yang, D., & Zhang, G. (2019). Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems. *Science of the Total*

- Environment*, 659, 1415–1427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.344>
- Lim, T. K. (2012). Bixa orellana. *Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants*, 1753, 515–526. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8661-7_69
- Macisaac, S. A., Rauch, K. D., Prest, T., Simons, R. M., & Gagnon, G. A. (2023). Improved disinfection performance for 280 nm LEDs over 254 nm low-pressure UV lamps in community wastewater. *Scientific-Reports*, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2448106/v1>
- Marcano, D. (2018). Introducción a la Química de los Colorantes. In *Colección Divulgación Científica y Tecnológica* (Segunda ed). [http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/19390/1/colorantes listo %20Bisbn.pdf](http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/19390/1/colorantes%20listo%20Bisbn.pdf)
- Mariani, J. F. (2020). Achiote. *The Encyclopedia of American Food and Drink*, 18. <https://doi.org/10.5040/9781635577068-0004>
- Mazhar, M. A., Khan, N. A., Ahmed, S., Khan, A. H., Hussain, A., Rahisuddin, Changani, F., Yousefi, M., Ahmadi, S., & Vambol, V. (2020). Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water – A review. *Journal of Cleaner Production*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123159>
- Montenegro, M. A., Rios, A. D. O., Mercadante, A. Z., Nazareno, M. A., & Borsarelli, C. D. (2004). Model Studies on the Photosensitized Isomerization of Bixin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(2), 367–373. <https://doi.org/10.1021/jf0349026>
- Musalem-Castillejos, K., Laino-Guanes, R., Bello-Mendoza, R., González-Espinoza, M., & Ramírez-Marcial, N. (2018). Water quality of the Grijalva river in the Chiapas and Tabasco border. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 55–64. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1334>
- Ocampo-Rodríguez, D. B., Vázquez-Rodríguez, G. A., Martínez-Hernández, S., Iturbe-Acosta, U., & Coronel-Olivares, C. (2022). Desinfección del agua: una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido peracético. *Ingeniería Del Agua*, 26(3), 185–204. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17651>
- Orantes-García, C., Moreno-Moreno, R. A., Caballero-Roque, A., & Farrera-Sarmiento, O. (2018). Plantas utilizadas en la medicina tradicional de comunidades campesinas e indígenas de la Selva Zoque, Chiapas, México. *Bol. Latinoam. Caribe Plantas Med. Aromát.*, 17(5), 503–521. <http://www.blacpma.ms-editions.cl/index.php/blacpma/article/view/134/129>
- Pelayo, D., Rivero, M. J., Santos, G., Gómez, P., & Ortiz, I. (2023). Techno-economic evaluation of UV light technologies in water remediation. *Science of the Total Environment*, 868(January), 161376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161376>
- Rios, A. de O., Mercadante, A. Z., & Borsarelli, C. D. (2007). Triplet state energy of the carotenoid bixin determined by photoacoustic calorimetry. *Dyes and Pigments*, 74(3), 561–565. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.03.018>
- Ríos Tobón, S., Agudelo Cadavid, R. M., & Gutiérrez Builes, L. A. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(2), 236–247. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08>

- Rivera-Madrid, R. (2021). La cadena de valor del achiote (bixa orellana) detrás del avance científico y tecnológico. *Conacyt*, 226, 222–226.
http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/
- Rodríguez, M. J., Rodríguez, G., Serodes, J., & Sadiq, R. (2007). Subproductos de la desinfección del agua potable: Formación, aspectos sanitarios y reglamentación. *Interciencia*, 32(11), 749–756.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007001100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Salcedo Garduño, M. G. (2019). Análisis de la calidad del agua de la cuenca baja del río Usumacinta, Tabasco, como resultado de las actividades antropicas [Colegio de posgraduados]. In *Colegio de Posgrados*.
http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/10521/4683/1/Salcedo_Garduno_MG_DC_Agroecosistemas_Tropicales_2019.pdf
- Saldaña Gonzales, I., & Franco Avila, H. (2022). Evaluación de la concentración de compuestos trihalometanos en el agua potable distribuida en la Ciudad David , Panamá y sus riesgos a la salud humana. *Revista de I+D Tecnológico*, 18(2), 65–76.
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/3554/4308>
- Sánchez Juan, R. (2013). La química de los colorantes en los alimentos. *Química Viva*, 12, 234–246. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86329278005>
- Secretaría de Hacienda del Estado de Chiapas. (2020). Eje 2. Bienestar Social. In *Segundo Informe, Gobierno de Chiapas* (Vol. 5, Issue 2, pp. 1–248).
<https://icti.chiapas.gob.mx/media/informe-anual-2020/2do-informe.pdf>
- Secretaria de Salud; DGE. (2022). *Anuario de Morbilidad 1984 - 2021*. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/anuarios-de-morbilidad-1984-a-2020>
- Secretaria de Salud; DGIS. (2022). *Causas de defunción*. Dirección General de Información En Salud, Gobierno de México. <http://sinaiscap.salud.gob.mx:8080/DGIS/>
- Secretaría General de Salud Digital; Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud. (2022). *Capítulo I Ciertas enfermedades infecciosas y parasitarias (A00 - B99)*. Ministerio de Sanidad, Gobierno de España.
https://eciemaps.mscbs.gob.es/ecieMaps/statics/es/accessible/cie10/tabular_list/tl_enf_01.html
- Silva, Z. S., França, C. M., Araújo Prates, R., Botta, S. B., Ferrari, R. A. M., Ana, P. A., Pavani, C., Fernandes, K. P. S., de Fátima Teixeira da Silva, D., Hamblin, M. R., & Bussadori, S. K. (2020). The effects of photodynamic therapy with blue light and papain-based gel associated with Urucum, on collagen and fibroblasts: a spectroscopic and cytotoxicity analysis. *Lasers in Medical Science*, 35(3), 767–775. <https://doi.org/10.1007/s10103-019-02857-7>
- SINA; COFEPRIS. (2022). *Agua y salud (nacional)*. SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN DEL AGUA.
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=aguaSalud&ver=reporte&o=1&n=nacional>

- Tamil Selvi, A., Dinesh, M. G., Satyan, R. S., Chandrasekaran, B., & Rose, C. (2011). Leaf and Seed extracts of *Bixa orellana* L. exert anti-microbial activity against bacterial pathogens. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 1(9), 116–120.
- Toledo De Oliveira, T., Nagem, T. J., Rocha Da Costa, M., Marciano Da Costa, L., Magalhães, N. M., Stringheta, P. C., Queiroga De Lima, E., Kling De Moraes, G. H., & Da Silva Vieira, H. (2004). Propiedades biológicas de los tintes naturales. *Ars Pharmaceutica*, 45(1), 5–20.
- Villota García, V. P., Bonilla Lucero, M. L., Segura Mestanza, J. H., Coba Carrera, R. L., & Brito Moína, H. L. (2019). Colorantes naturales para uso alimenticio. *Ciencia Digital*, 3(2.4), 88–98. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.4.510>
- WWAP. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. No dejar nadie atrás. In *UNESCO* (UNESCO). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>

Anexos

Anexo 1. Seguridad hídrica y carencias por servicios básicos

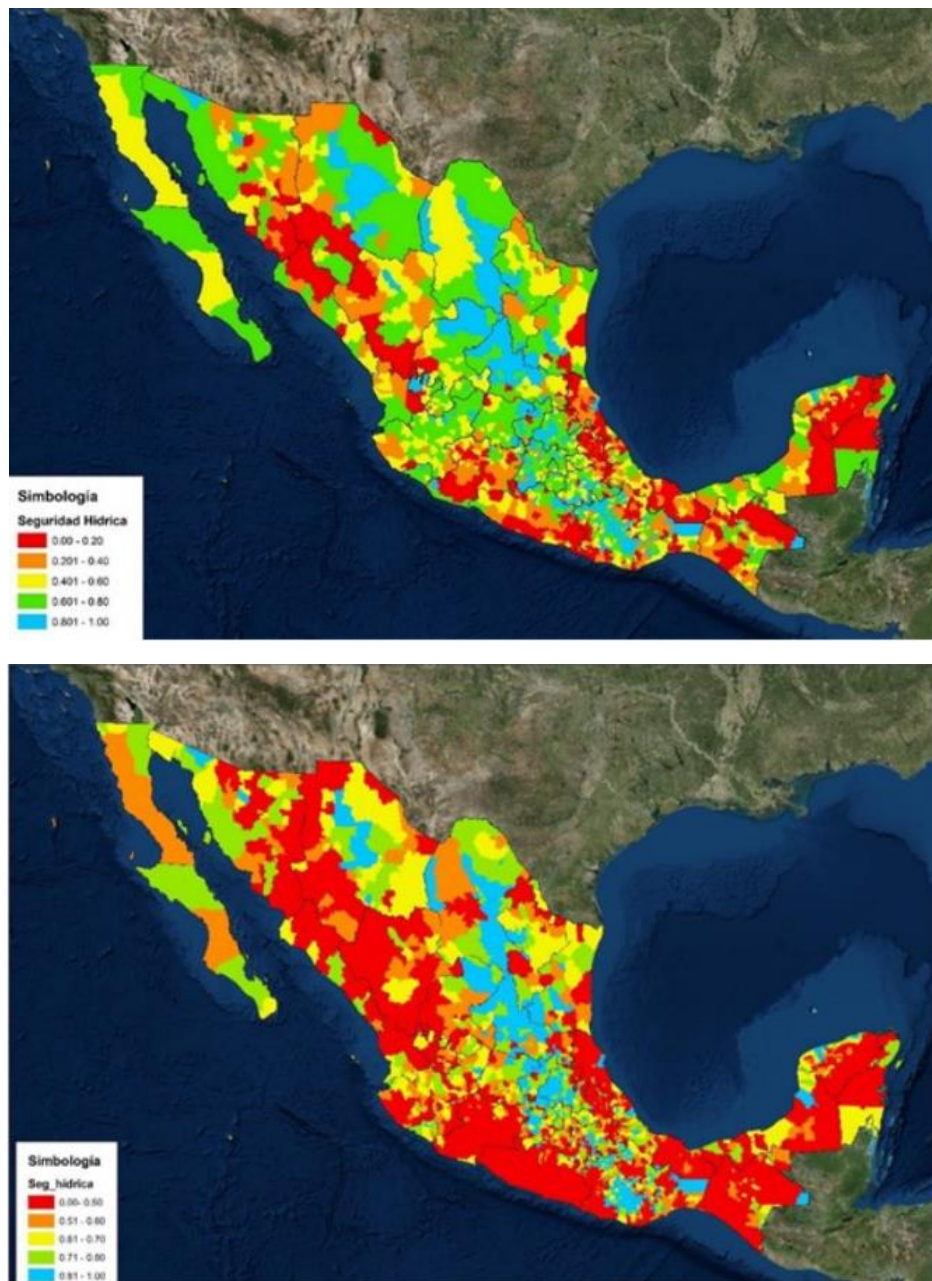


Figura 33. Índice de seguridad hídrica en la república mexicana. Fuente: Rodríguez et al. (2017) citado de (Arreguín-Cortés et al., 2020)

Cuadro 12. Incidencia y número de personas en los componentes del indicador carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda en Chiapas, 2008-2018

Componentes	Porcentaje						Miles de personas					
	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2008	2010	2012	2014	2016	2018
Población en viviendas sin acceso al agua	27.9	25.2	20.2	26.4	19.6	16.9	1,332.9	1,241.3	1,024.7	1,373.7	1,046.7	922.1
Población en viviendas sin drenaje	17.4	15.4	21.0	10.2	10.0	6.8	833.7	759.5	1,064.5	530.6	531.8	369.2
Población en viviendas sin electricidad	1.9	3.1	2.1	0.6	0.6	1.2	92.5	153.0	106.8	29.4	33.4	65.7
Población en viviendas sin chimenea cuando usan leña o carbón para cocinar	43.6	48.6	47.5	44.4	41.8	49.1	2,085.4	2,395.1	2,404.1	2,308.4	2,229.7	2,682.6

Fuente: Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2008, 2010, 2012, 2014 y el MEC del MCS-ENIGH 2016 y 2018 citado de (CONEVAL, 2020)

Anexo 2. Morbilidad y Mortalidad por Infecciones Intestinales en Chiapas

Cuadro 13. Morbilidad de Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas en el estado de Chiapas

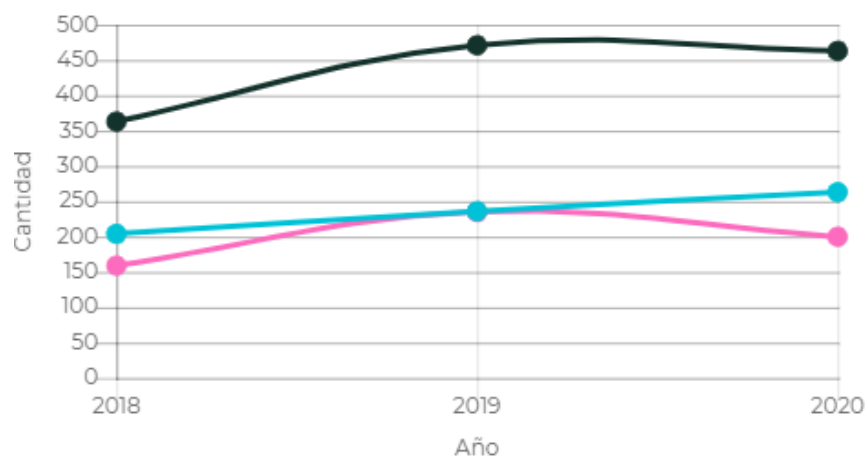
Grupos	Edades	2018	2019	2020	2021
Más afectados	1-4	32 343	32 993	18 448	21 960
	5-9	23 647	22 819	12 010	12 250
	20-24	18 499	17 422	12 010	9 821
Menos afectados	65 +	12 356	11 720	5 800	5 925
	60-64	9 160	8 733	4 431	4 562
Total de la Población		216 718	210 397	112 007	119518

Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaria de Salud, DGE, 2022

Cuadro 14. Mortalidad de Infecciones intestinales en el estado de Chiapas

Grupos	Edades	2018	2019	2020
Más vulnerables	65 +	112 (30.85%)	149 (31.63%)	179 (38.66%)
	< 1	61 (16.8%)	76 (16.14%)	78 (16.85%)
Menos vulnerables	15-24	37 (10.19%)	30 (6.17%)	20 (4.32%)
	5-14	29 (7.99%)	38 (8.07%)	16 (3.46%)

Fuente: Elaboración propia con datos del DGIS, 2020 Fuente: Secretaria de Salud; DGIS, 2020



Gráfica 5. Tasa de Mortalidad por Infecciones Intestinales en el estado de Chiapas en el periodo 2018-2020 Fuente: Secretaria de Salud; DGIS, 2020

Anexo 3. Disponibilidad de agua en México



Figura 34. Cuencas de México y su disponibilidad. Fuente: Conagua (2018)

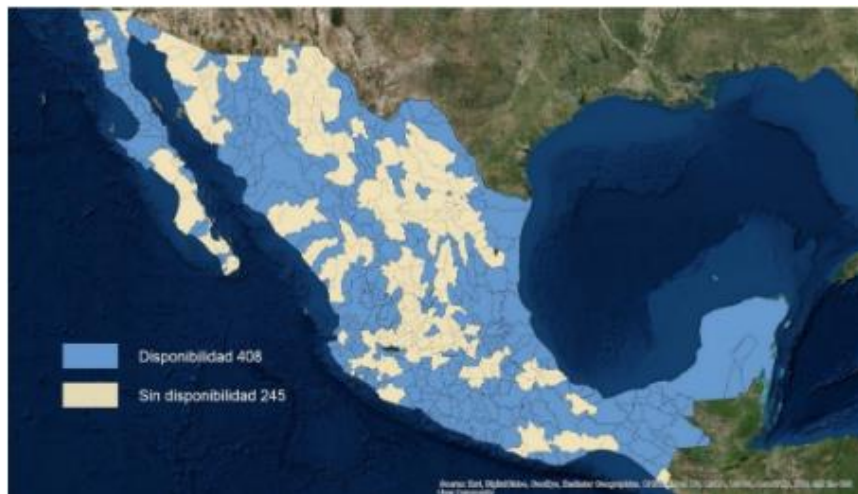


Figura 35. Acuíferos de México y su disponibilidad. Fuente: Conagua (2018)

Anexo 4. Sitios de calidad de agua en Chiapas

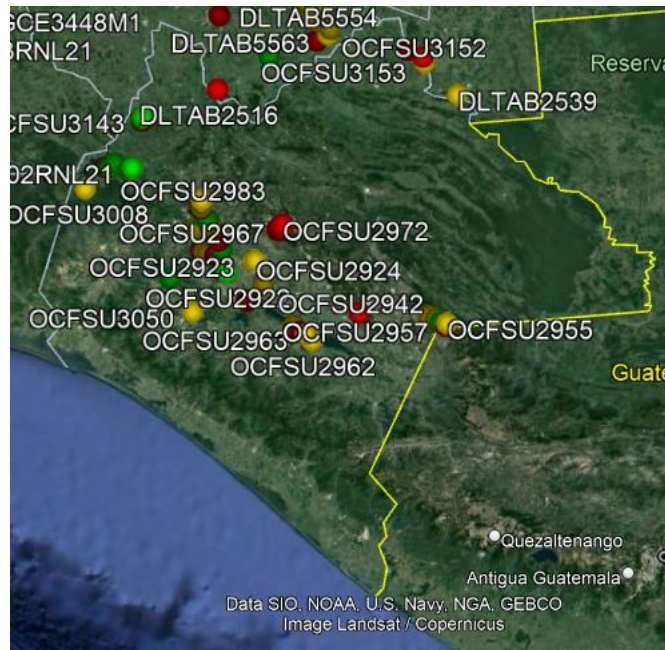


Figura 36. Sitios de la calidad del agua superficial 2021 KMZ. Fuente: (CONAGUA, 2021)

Anexo 5. Costos totales

Cuadro 15. Costos de las semillas *Bixa orellana* L. y cantidad usada.

	Cantidad	Costo	Uso total de Achiote	Núm. de semillas
Achiote	125 g	20 pesos	819.9 mg	29 semillas ¹

¹ Promedio estimado de las semillas de *Bixa orellana* L. de acuerdo al cuadro 7 que presenta una desviación estándar de 4.89 mg.

Cuadro 16. Costos de materiales del tren de tratamiento

Insumo	Capacidad	Unidad de medida	Cantidad	Precio unitario (\$ MXN)	Total (\$)
Base de fierro	-	-	1	1000	1000
Bidon	20	Litro	1	298	298
Tubo de PVC	6	Pulgada	2 m	125	250
Tapas de inserción PVC	6	Pulgada	4	61	244
Coples de PVC	6	Pulgada	4	47	188
Tubo de CPVC	1/2	Pulgada	2.5 m	16/m	40
Codos de 90° CPVC	1/2	Pulgada	9	5	45
Válvulas esferas CPVC	1/2	Pulgada	4	35	140
Botellas de plástico transparente	5	Litros	8	20	160
TOTAL					2,365

Cuadro 17. Costos por análisis microbiológico (influyente)

Insumo	Capacidad	Unidad de medida	Cantidad	Precio unitario (\$ MXN)	Total (\$)
Bolsa de medios de cultivo para Coliformes Totales	2	ml	50	-	1200
TOTAL					1200