



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS
REGIÓN POZA RICA-TUXPAN

ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN E IMPACTO AMBIENTAL

“ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO DE
AGUAS DE DESCARGA AL RÍO TECOLUTLA EN LA ZONA
DE GUTIÉRREZ ZAMORA, VERACRUZ”

PROYECTO DE INTERVENCIÓN

Que para obtener el título de:
ESPECIALISTA EN GESTIÓN E IMPACTO AMBIENTAL

PRESENTA:

I.Q. Raúl Alejandro Limón Hernández

Directora:

Dra. María Rebeca Rojas Ronquillo

Co-Directora:

M.C.A. Verónica López Hernández

Tuxpan, Ver.

2019

El presente trabajo de intervención titulado: **“Electrocoagulación como tratamiento de aguas de descarga al río Tecolutla en la zona de Gutiérrez Zamora, Veracruz.”**, realizado por el ingeniero Raúl Alejandro Limón Hernández, bajo la dirección de la Dra. María Rebeca Rojas Ronquillo y codirección de la M.C.A Verónica López Hernández, ha sido revisado y aprobado como requisito para obtener el grado de:

ESPECIALISTA EN GESTIÓN E IMPACTO AMBIENTAL

Dra. María Rebeca Rojas Ronquillo
DIRECTORA


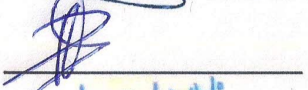
M.C.A. Verónica López Hernández
CO-DIRECTORA



UNIVERSIDAD VERACRUZANA
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN E IMPACTO AMBIENTAL

Revisión del Trabajo de Intervención del estudiante: I.Q. Raúl Alejandro Limón Hernández.

JURADO EXAMINADOR

NOMBRE	FECHA	DICTAMEN	FIRMA
<u>Dra. Laura Lucero Alvarez Molina</u>	<u>14/Enero/2019</u>	<u>Aprobado</u>	
<u>Dra. Rosa Idalia Hernández H</u>	<u>23/Enero/2019</u>	<u>Aprobado</u>	
<u>Mtra. Luz Nalleli Chavez Martinez</u>	<u>22/01/19</u>	<u>Aprobado</u>	<u>Luz Nalleli Chavez Martinez</u>

En la presente revisión se acordó que el Trabajo de Intervención denominado “ELECTROCOAGULACIÓN COMO TRATAMIENTO DE AGUAS DE DESCARGA AL RÍO TECOLUTLA EN LA ZONA DE GUTIÉRREZ ZAMORA, VERACRUZ”, que presenta el sustentante para obtener el Título de Especialista, está terminado por lo que puede proceder a su impresión.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo con la beca durante el periodo en que se realizaron los estudios de posgrado.

Al coordinador del posgrado, Dr. Juan Manuel Pech Canché por el asesoramiento y orientación. A mi tutora, Dra. Liliana Cuervo López por el seguimiento académico, consejos y apoyo en mi titulación de maestría.

A mi directora Dra. María Rebeca Rojas Ronquillo y co-directora M.C.A. Verónica López Hernández por su apoyo en la dirección de mi trabajo de intervención, por enseñarme nuevas técnicas analíticas y métodos de trabajo.

Al comité revisor ya que cada una de ustedes contribuyó a mi desarrollo académico y personal. Cada pregunta y comentario permitió mejorar mi trabajo.

A la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora (UTGZ) por el apoyo brindado en el año de la especialización y en la realización de los análisis en el laboratorio.

DEDICATORIAS

Mi madre y padre porque ellos me enseñaron a nunca conformarme y siempre trabajar duro para lograr mis metas. A mis hermanos quienes luego soportan mis llamadas de atención y a quienes les dejo el ejemplo de que las metas se pueden lograr y que nunca uno deja de aprender.

A mis suegros y cuñados quienes me han adoptado y apoyado en todo.

A mi esposa a quien adoro, gracias por permitirme hacer lo que más me gusta, por apoyarme siempre en mis metas y, sobre todo, por darme tu amor.

A mi futuro bebé ya que has cambiado mi vida y eso que aún falta que llegues, me has dado nuevas metas y prometo dar lo mejor de mí para cuando te recibamos tu mami y yo.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	ANTECEDENTES	4
III.	OBJETIVOS	8
IV.	ÁREA DE ESTUDIO	9
V.	MATERIAL Y MÉTODOS	11
5.1	Determinación de las descargas de agua residual sobre el río Tecolutla y los puntos de muestreo.....	11
5.2	Validación del dron acuático para toma de muestras.....	12
5.3	Muestreo de agua del río Tecolutla.....	12
5.4	Análisis fisicoquímico y bacteriológico de muestras de agua.....	12
5.5	Obtención de los índices de calidad de agua.....	16
5.6	Desarrollo de la técnica de electrocoagulación de agua residual.....	16
VI.	RESULTADOS	18
6.1	Puntos de descarga y puntos de muestreo	18
6.2	Validación del dron acuático.....	19
6.3	Análisis fisicoquímico y bacteriológico de muestras de agua.....	22
6.4	Cálculo del índice de la Calidad del Agua	29
6.5	Desarrollo de la propuesta	31
VII.	DISCUSIÓN.....	35
VIII.	CONCLUSIONES Y APLICACIÓN PRÁCTICA.....	42
IX.	BIBLIOGRAFÍA.....	44

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas y biológicas del agua residual	28
Cuadro 2. Parámetros y ponderaciones para el cálculo de los ICA.....	30
Cuadro 3. Resultados experimentales de optimización.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación territorial de la zona de Gutiérrez Zamora en el estado de Veracruz.9	Figura 2.
Puntos de muestreo en la zona de Gutiérrez Zamora.	11
Figura 3. Sistema de electrocoagulación para agua residual.....	17
Figura 4. Descargas de agua residual sobre el río Tecolutla. a) Arroyo a la entrada de la ciudad, b) Primera descarga municipal en el centro de Gutiérrez Zamora, c) Segunda descarga municipal en el centro de Gutiérrez Zamora, d) Descarga a la salida de Gutiérrez Zamora	18
Figura 5. Dron acuático para toma de muestras de agua.....	19
Figura 6. Comparación de TDS con muestreo tradicional y por dron.....	20
Figura 7. Comparación de acidez con muestreo tradicional y por dron.....	21
Figura 8. Comparación de fosfatos con muestreo tradicional y por dron.....	21
Figura 9. Comparativa de TDS en temporada de secas y lluvias.....	22
Figura 10. Comparativa de conductividad eléctrica en temporada de secas y lluvias	23
Figura 11. Comparativa de pH en temporada de secas y lluvias	23
Figura 12. Comparativa de fosfatos en temporada de secas y lluvias.....	24
Figura 13. Comparativa de CO ₂ en temporada de secas y lluvias	24
Figura 14. Comparativa de oxígeno disuelto en temporada de secas y lluvias	25
Figura 15. Comparativa de coliformes totales en temporada de secas y lluvias ...	26
Figura 16. Comparativa de DBO ₅ en temporada de secas y lluvia	26

Figura 17. Comparativa de DQO en temporada de secas y lluvias	27
Figura 18. Índices de Calidad del Agua en nueve puntos de muestreo del río Tecolutla.....	30
Figura 19. Celda de electrocoagulación en funcionamiento.....	31
Figura 20. Variación de pH antes y después de electrocoagular	33
Figura 21. Variación de SST antes y después de electrocoagular	33
Figura 22. Variación de fosfatos antes y después de electrocoagular.....	34
Figura 23. Variación de nitratos antes y después de electrocoagular	34
Figura 24. Propuesta de entubado para el proceso de electrocoagulación.....	43

RESUMEN

Gutiérrez Zamora es un municipio localizado en el estado Veracruz. La cabecera municipal del mismo nombre se sitúa a orilla del río Tecolutla, efluente de donde se toma el agua para consumo humano, sin embargo, debido a la ausencia de una planta de potabilización la calidad del agua suministrada es baja ya que depende de eventos climáticos como sequía o lluvias además de que a su vez el agua residual del municipio es descargada sin control sobre el río. La mala calidad del agua distribuida en Gutiérrez Zamora puede ocasionar riesgos a la salud provocados por los contaminantes o patógenos y presentarse en enfermedades gastrointestinales, acumulación de metales en el cuerpo o incluso la muerte. Por lo descrito anteriormente, se realizó un análisis fisicoquímico de las aguas residuales y un análisis del índice de calidad de agua (ICA) del río Tecolutla en el periodo de mayo-junio y agosto-septiembre del 2018 obteniendo que el río presenta dos zonas diferentes. La primera localizada en la rivera Zamoreña caracterizada como contaminada y la segunda zona localizada en el centro del río en conjunto de la rivera opuesta a la ciudad caracterizada como medianamente contaminada. La contaminación principalmente es debida a las descargas, aunque es de mencionar que los parámetros fisicoquímicos de las mismas cumplen los máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 exceptuando el factor biológico ya que los niveles de coliformes totales sobrepasan los estándares normativos. Finalmente se realizó un proceso de electrocoagulación para depurar el agua residual mediante una celda como reactor y un sistema fotovoltaico como fuente de poder logrando remover hasta un 86% los sólidos totales disueltos, 84% los niveles de fosfatos y 66.89% los nitratos por lo cual el agua final podría ser utilizada para actividades industriales y/o agrícolas.

Palabras clave: Calidad, descargas, electrocoagulación, ICA, río

I. INTRODUCCIÓN

El agua es el componente químico más abundante en la biósfera y sin lugar a duda uno de los más importantes entre los recursos naturales. Ha estado presente en la civilización humana desde sus orígenes, debido a su uso en la irrigación, el abastecimiento público y actualmente su demanda se ha incrementado debido al sector industrial (Mazabel y Rodríguez, 2011).

Debido a sus propiedades químicas, el agua líquida no se encuentra en la naturaleza de manera pura ya que contiene diversas sustancias químicas y físicas, disueltas o suspendidas en ella. Además, puede contener organismos vivos que pueden ser patógenos para los seres vivos que la consumen (Leyva, 2013). Las características que debe tener el agua para su uso dependen de la finalidad para la que será empleada, de esta manera si es de consumo humano debe cumplir con ciertos criterios de calidad, que son muy diferentes a las que debe tener para fines industriales (Glyn y Heinke, 1999).

La calidad del agua es un parámetro medido para conocer si es apta para el consumo humano. Si no cumple con las características apropiadas puede ser perjudicial para el hombre. Los contaminantes del agua pueden ser naturales o antrópicos. Estos contaminantes afectan sus características, pudiéndole otorgar color, olor e incluso pueden ser observables como sólidos suspendidos.

Algunos de los principales métodos utilizados para medir la calidad del agua es la obtención de índices de calidad del agua (ICA) utilizando parámetros fisicoquímicos tales como: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), oxígeno disuelto, coliformes, conductividad eléctrica, fosfatos totales, grasas y aceites, nitrógeno amoniacal, nitratos, alcalinidad, dureza, sólidos totales disueltos (TDS), sólidos totales suspendidos (SST), cloruros y turbiedad (SEMARNAT, 2015) y otro es mediante las escalas individuales de parámetros como: DBO, demanda química de oxígeno (DQO), TDS, coliformes fecales y toxicidad (CONAGUA, 2014).

En aguas superficiales, concretamente en ríos la calidad del agua es afectada principalmente en que las descargas de agua residual de los asentamientos humanos situados a orillas del río son vertidas directamente en él o indirectamente por medio de arroyos y canales que desembocan en el efluente (Arriaga *et al.*, 2009). El río Tecolutla no es la excepción, ya que, a lo largo de su cauce por municipios como Espinal, Papantla, Gutiérrez Zamora y Tecolutla, pueden observarse vertimientos de drenajes, arroyos tributarios contaminados e incluso descargas orgánicas del rastro municipal.

Gutiérrez Zamora es un municipio cuya cabecera toma directamente el agua del río para abastecer a su población. Esta agua se distribuye a través de la red de agua municipal propiciando que la calidad del agua suministrada varíe de acuerdo con eventos climáticos ya que en lluvias el agua es turbia y en sequía puede incluso tener malas condiciones organolépticas debido a que se acrecentan los efectos de las descargas de agua residual, causando que el agua distribuida presente agentes externos como cabellos, larvas de dípteros u otros que incluso provocan un olor desagradable.

En Gutiérrez Zamora, la contaminación del agua causada por los contaminantes o patógenos puede ocasionar riesgos a la salud de sus habitantes, como enfermedades gastrointestinales, acumulación de metales en el cuerpo o incluso la muerte (OMS, 2007). Es relevante señalar que el río Tecolutla además de proveer el agua para consumo humano, posee gran importancia para el desarrollo socioeconómico de la región, ya que la pesca, la agricultura y el turismo son actividades que sirven de sustento para la mayoría de los habitantes (INEGI, 2009).

Por lo descrito anteriormente, es de suma relevancia realizar estudios de caracterización de agua de ríos, y de agua residual municipal vertida cuyos objetivos sean centrados en identificar los principales contaminantes, sus rangos de concentración y proponer alternativas no convencionales de depuración de agua residual y evitar vertimientos de sobre cuerpos superficiales de agua.

El presente trabajo de investigación se divide en dos partes. La primera correspondiente en el análisis de la calidad del agua en el río Tecolutla mediante el uso de un índice de calidad de agua (ICA) tomando en cuenta el monitoreo de parámetros fisicoquímicos y biológicos cuyo objetivo es evaluar el grado de contaminación causado por las descargas de drenajes de la localidad de Gutiérrez Zamora en el efluente, lo que permitirá plantear estrategias de disminución de impactos ambientales. La segunda parte aborda una propuesta de tratamiento no convencional de agua residual de los drenajes que son vertidos sobre el río Tecolutla mediante un sistema de electrocoagulación, el cual es un método que conlleva un menor costo y genera menos residuos (Restrepo *et al.*, 2006), se logra separar a la materia orgánica entre otros contaminantes en espumas logrando una depuración del agua residual

La electrocoagulación basa su principio en inducir corriente directa a través de placas metálicas que funcionan a manera de sacrificio causando reacciones de óxido-reducción que desestabilizan las partículas contaminantes, produciendo que los sólidos precipiten y/o floten y sean más fáciles de separar por métodos secundarios. Esta técnica presenta importantes ventajas como lo son los equipos para el proceso de electrocoagulación dado que son más compactos a diferencia de los utilizados en la coagulación, además de que conllevan un menor costo y generan una menor cantidad de sales y residuos.

II. ANTECEDENTES

El agua es el recurso natural más utilizado por el hombre y su principal fuente proviene de cuerpos superficiales como ríos, lagos y lagunas y de aguas subterráneas. La afectación antrópica a los ríos ha causado preocupación debido a que los métodos tradicionales de potabilización en ocasiones no eliminan las impurezas del vital líquido (Ramos, 2017). Por lo anterior, alrededor del mundo, incluyendo a México, se han llevado a cabo proyectos de valoración de la calidad de agua en ríos, con la finalidad de conocer su nivel de contaminación y proponer alternativas para su preservación y depuración como los que se citan a continuación (Carmona y Caro, 2017).

A nivel internacional, se cuenta con estudios realizados en Brasil donde los parámetros fisicoquímicos de tres ríos en la zona Amazónica fueron analizados durante dos meses reportando variaciones de pH, conductividad, TDS y acidez, concluyendo que dichos valores afectan negativamente a las especies endémicas de la región (Paxiúba y Narciso, 2010). En Argentina se evaluó el impacto antrópico sobre la calidad del agua en el arroyo Las Piedras, en la capital Buenos Aires. Dicho estudio resaltó que el arroyo se encontraba contaminado de materia fecal, ya que el agua residual de la localidad de Quilmes es vertida sin tratamiento previo, por lo que se catalogó al agua con la etiqueta de calidad mala (Elordi *et al.*, 2016).

En México se han desarrollado diversos estudios en el ámbito del análisis de agua de ríos, de acuerdo con los lineamientos de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-127-SSA1-1994. Destaca el análisis de la calidad de agua y sedimentos del río Grande ubicado en Morelia, Michoacán debido a la metodología empleada y al análisis estadístico. Se midieron parámetros como pH, oxígeno disuelto, DQO y metales como Fe, Zn, Cu, As y Cd. En este trabajo se reportó que el río presentaba un alto nivel de contaminación ya que, aunque los metales estaban dentro de los límites normativos, el arsénico superaba los estándares

internacionales, aunado a lo anterior se presentó una elevada carga orgánica (Díaz, 2013).

La zona metropolitana de la Ciudad de México cuenta con la evaluación de parámetros hidromorfológicos, fisicoquímicos y biológicos en 10 ríos de montaña de la cuenca de México en el periodo comprendido de marzo 2012 a junio 2015. La evaluación tuvo como finalidad conocer la calidad ecológica de la región en la época de lluvias (junio-noviembre), la época de sequía (diciembre-febrero) y en la época de calor (marzo-abril). Se reportó que la afectación que más impacta sobre los ríos es la disminución del caudal, lo que ocasiona afectaciones en las riberas, la estructura y la función de los ríos (Carmona *et al.*, 2017).

En el estado de Veracruz, las investigaciones del río Coatzacoalcos demuestran que es uno de los ríos más contaminados de México. En este río se reportó un alto índice de plomo y cadmio con un 45% de afectación que representa un incremento de 20 unidades en los últimos 20 años, lo que está por encima de los límites normativos (Vázquez *et al.*, 2002). Por otro lado, en la cuenca baja del río Coatzacoalcos se han valorado las concentraciones de contaminantes orgánicos provocadas por las descargas de agua residual, y altos niveles de arsénico y plomo. Además, en los sedimentos se encontraron sustancias tóxicas provenientes de plaguicidas, fertilizantes, aceites y fármacos (Espinosa *et al.*, 2013).

En la zona de Orizaba se evaluó el río Seco para conocer los impactos ambientales negativos por asentamientos humanos. Los análisis fueron realizados de manera mensual, durante seis meses, en la temporada de lluvias. En este estudio se reportó que, de acuerdo con el DQO, la calidad del agua se consideró contaminada y fuertemente contaminada. Además, se catalogó como eutrofizado debido a las altas concentraciones de nitrógeno (Torres *et al.*, 2013).

En Ixhuacán de los Reyes, se realizó la evaluación fisicoquímica y bacteriológica del arroyo Coyopolan, debido a que dicho efluente es la fuente principal de agua

del municipio y del cual existen reportes de contaminación (Ramírez, 2011). En dicho estudio se monitorearon 10 sitios a lo largo del arroyo durante los meses de abril a julio del 2014 y se realizaron en total 21 análisis diferentes. La conclusión de los autores fue que el agua se encontró moderadamente contaminada, ya que los parámetros fisicoquímicos están por debajo de los límites normativos y visualmente se encuentra cristalina. Se resaltó que el único factor a considerar son los coliformes fecales que sobrepasan en un 20% los límites máximos de la NOM-127-SSA1-1994, que establece los máximos permisibles para agua de consumo humano (Hernández, 2015).

En Xalapa se utilizó el índice de calidad del agua tomado de National Sanitation Foundation (NSF) de los E.U. y se modificó para su uso en el análisis del río Sordo. Con los resultados de los parámetros de coliformes fecales, DBO, oxígeno disuelto, pH, TDS nitratos y fosfatos, se pudo concluir que el río cuenta con dos zonas denominadas como contaminadas y altamente contaminadas debido a descargas de agua residual (Olguín *et al.*, 2010).

En el río Cazones se han llevado a cabo algunos trabajos que han determinado la calidad de su agua y nivel de contaminación. Un reporte señala la utilización de parámetros fisicoquímicos y biológicos en muestras del agua del río a la altura de la localidad Reforma Escolín. Los autores concluyeron que los niveles de microorganismos se encuentran dentro de los límites normativos y que sólo en ocasiones de sequía rebasan a los mismos. Sin embargo, los niveles de sedimentos, grasas y aceites se encuentran por encima de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-004-SEMARNAT-2002. La primera norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes para descarga de agua residual en aguas y bienes nacionales y la segunda se refiere a los límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (Galindo *et al.*, 2005).

En otro estudio del río Cazones se midieron los parámetros de temperatura, pH, nitratos, fosfatos, DBO, oxígeno disuelto, TDS, turbiedad y coliformes fecales, y se

evaluó el índice de calidad en la zona de Coatzintla Veracruz reportando un valor promedio del 63.94% correspondiente a una calidad media (Chávez, 2015).

El río Pantepec fue estudiado en los municipios de Álamo, Temapache y Tuxpan. Se tomaron los registros de una base de datos de calidad de agua del periodo comprendido entre el 2000 y 2014 y a su vez se determinaron los parámetros DQO, DBO, así como SST dictaminándose al agua como contaminada de acuerdo con los lineamientos de CONAGUA y por lo tanto no óptima para consumo humano, pesca, ni alguna otra actividad (Ramos, 2017).

En relación con el río Tecolutla, su calidad ha sido evaluada por instituciones como la Brigham Young University, la Universidad Veracruzana y la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, las cuales han desarrollado proyectos, entre los que destaca la simulación del comportamiento del río mediante la herramienta QUAL2K obteniendo modelos para determinar las condiciones del río y los puntos críticos de contaminación (James *et al.*, 2010) y la medición de la calidad del agua del río Tecolutla, desde Coyutla hasta Gutiérrez Zamora, por medio de parámetros fisicoquímicos y biológicos con un índice de calidad del agua catalogado como regular (Arriaga *et al.*, 2009).

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar el método de electrocuagulación como tratamiento de aguas residuales descargadas al río Tecolutla en Gutiérrez Zamora, Veracruz.

3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la eficiencia de la técnica de muestreo por medio de un dron acuático.
- Determinar la calidad de agua del río Tecolutla en nueve zonas durante los periodos comprendidos de mayo-junio y agosto-septiembre del 2018.
- Establecer las condiciones óptimas de operación de la celda de electrocoagulación para el agua residual.

IV. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrológica Tecolutla cuenta con 7,966.8 km² y se localiza en los estados de Tlaxcala, Hidalgo, Puebla y Veracruz. Su volumen de salida es de 6,025.6 millones m³ y está conformado por las subcuencas de: río Necaxa, río Laxaxalpan, río Tecuantepec, río Apulco, río Joloapan y río Tecolutla (Morales, 2016).

El presente estudio se centra en el río Tecolutla, en la zona de Gutiérrez Zamora (Figura 1), la parte baja de la subcuenca perteneciente a la región hidrológica número 27 Tuxpan-Nautla. El río cuenta con una longitud de 375 km y una superficie de 7, 903 km². Nace en el estado de Puebla y atraviesa la zona norte de Veracruz, por lo que a lo largo de su trayectoria arrastra partículas de suelo, contaminantes y nutrientes (CONAGUA, 2015).

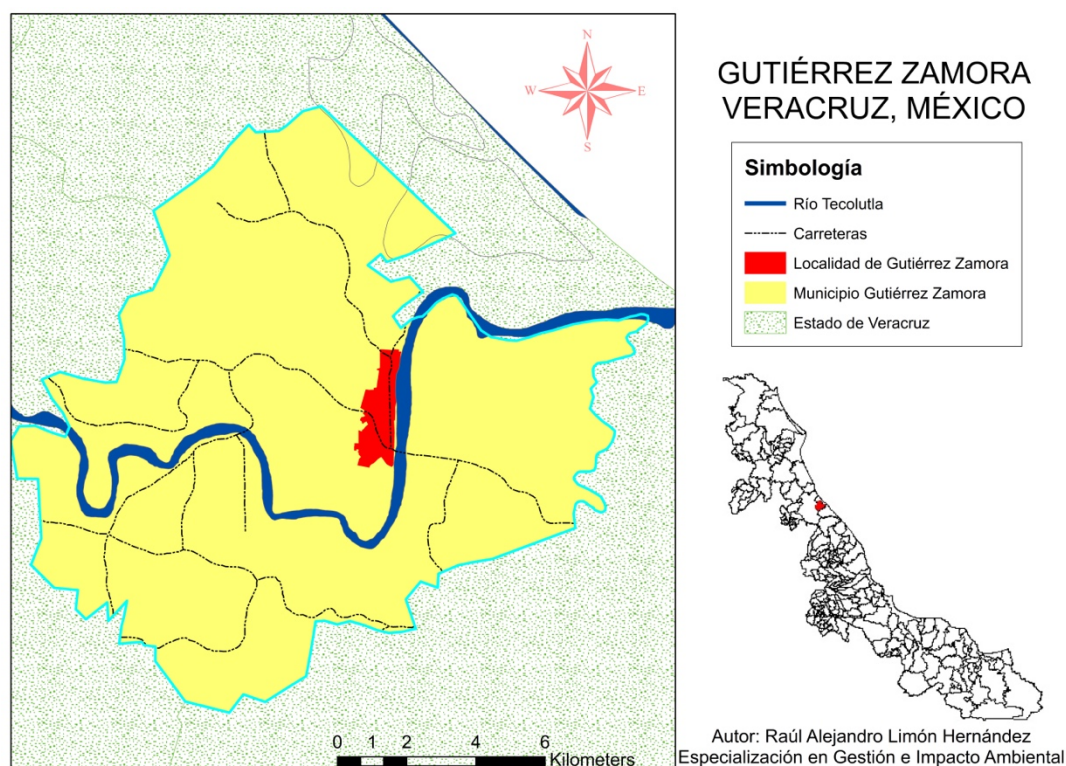


Figura 1. Ubicación territorial de la zona de Gutiérrez Zamora en el estado de Veracruz.

La localidad de Gutiérrez Zamora se sitúa entre los paralelos 20° 22' y 20° 32' de latitud norte y los meridianos 97° 01' y 97° 12' de longitud oeste, con una altitud entre 10 y 200 msnm y le correspondiente aproximadamente 3.1 km de Riviera del río Tecolutla. Cuenta con clima cálido subhúmedo con una temperatura media anual de 14-16°C y precipitación anual de 1200-1400 mm (INEGI, 2009).

El tipo de vegetación en la zona de estudio (riberas y manglares) corresponde a selva mediana subperennifolia. Su flora característica consiste en especies de: *Brosimum alicastrum*, *Bursera simaruba*, *Cedrela odorata*, *Coccoloba barbadensis*, *Croton punctatus*, *Diphysa robinoides*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Ipomoea imperati*, *Palafoxia lindenii*, *Panicum repens*, *Sesuvium portulacastrum*, *Sporobolus virginicus*.

Por otro lado, la fauna característica de peces en el río Tecolutla corresponde principalmente a especies de: *Astyanax fasciatus*, *Cathorops aguadulce*, *Gambusia rachowi*, *Gobiomorus dormitor*, *Ictiobus bubalus*. En los manglares y zonas rivereñas habitan especies de aves como: *Ajaia ajaja*, *Eudocimus albus*, *Casmerodius albus*, *Mycteria americana* y *Egretta thula* (CONABIO, 2017).

V. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 Determinación de las descargas de agua residual sobre el río Tecolutla y los puntos de muestreo

Se realizó un recorrido en lancha por la zona de estudio y se determinó la ubicación de las descargas de agua residual. Posteriormente, se tomaron tres zonas denominadas 1 (entrada de la ciudad), 2 (zona centro) y 3 (salida de la ciudad) y a la vez se dividió a cada zona en 3 puntos de muestreo: A para el lado de la ribera de la ciudad, B en el centro del río y C para los puntos de la ribera del lado opuesto a la ciudad.

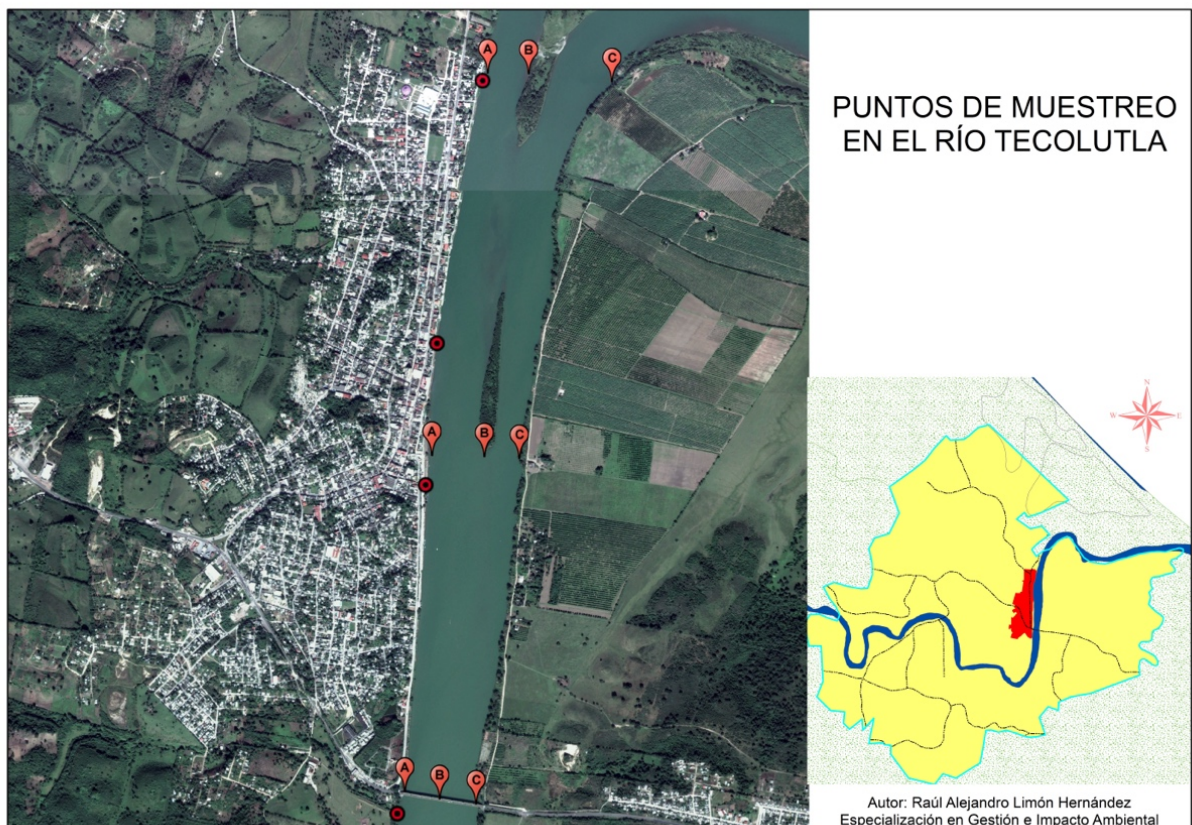


Figura 2. Puntos de muestreo en la zona de Gutiérrez Zamora.

En la figura dos se puede apreciar la distribución de los puntos de muestreo a lo largo del cauce del río Tecolutla a la altura de la ciudad. Los puntos rojos localizados en la ribera corresponden a puntos de descarga y las viñetas A, B y C

corresponden a las zonas del río marcadas en el cuadro 1, la numeración 1,2 y 3 se realiza de la parte inferior a la superior de la imagen.

5.2 Validación del dron acuático para toma de muestras

Para la validación del dron, se tomaron por triplicado muestras de agua en los nueve puntos de muestreo en dos formas, mediante el uso de un dron acuático proporcionado por el departamento de innovación de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora (UTGZ) y mediante el método tradicional marcado por la NOM-014-SSA1-1993. Posteriormente, se realizaron análisis por triplicado a todas las muestras de TDS, acidez y fosfatos. En las pruebas estadísticas se realizó la prueba de hipótesis mediante el software SPSS tomando como hipótesis nula que la distribución de los parámetros medidos era la misma entre las categorías de muestreo (dron y tradicional).

5.3 Muestreo de agua

Con respecto al periodo del muestreo, se realizó de manera mensual en dos periodos, el primero para evaluar al agua en la temporada de sequía en los meses de mayo-junio y el segundo para evaluar la temporada de lluvias en los meses de agosto-septiembre del 2018 (INEGI, 2009).

Las muestras de agua del río se recolectaron mediante el uso del dron acuático el cual tomó la muestra en recipientes de polietileno de alta densidad de cinco litros. Para el muestreo de agua residual en los drenajes se utilizó el método convencional de toma de muestras debido a las características de los sitios que impedían el acceso del dron.

5.4 Análisis fisicoquímico y bacteriológico de muestras de agua

Las muestras de agua del río fueron analizadas mediante estudios fisicoquímicos y biológicos de acuerdo a los requerimientos para el cálculo del índice de calidad (ICA): TDS, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), temperatura, conductividad eléctrica, pH, coliformes totales, nitratos y fosfatos. Cabe señalar que, aunque no era necesario, se optó

por cuantificar la presencia de cobre como indicador de presencia de metales, así como los niveles de dióxido de carbono para conocer si existía eutrofización además de observar los niveles de oxígeno. Por otro lado, para el agua residual se tomaron los parámetros: pH, conductividad, temperatura, TDS, SST, nitratos, fosfatos, oxígeno disuelto, DBO₅, DQO y coliformes. Las metodologías de cada análisis se muestran a continuación.

5.4.1 Análisis de cobre

Se utilizó el Test Kit del modelo HI 3847 con rango de 0 a 2.5 ppm y que consta de 100 sobres estandarizados con el reactivo (bicinconinato) y un tubo comparador de color. Para realizar la prueba, se tomó el recipiente medidor del kit y se le añadieron 5 mL de la muestra de agua, se le agregó el contenido de un sobre reactivo y se agitó por 45 segundos hasta homogenizar para finalmente contrastar el color de la muestra mediante un comparador para determinar los mg/L de cobre.

5.4.2 Determinación de pH, conductividad, TDS y temperatura

Se empleó un potenciómetro portátil modelo HI 98129 calibrado previamente con soluciones patrón de 20 mL (modelo HI 70031) de pH de 4.1 y 7.1 y conductividad de 1413 mS/cm. Cabe señalar que las unidades arrojadas fueron: para TDS ppm, para temperatura °C, para conductividad eléctrica mS/cm y resaltar que el pH es adimensional y se maneja en escala de 1 a 14.

5.4.3 Análisis de nitratos

Se determinó la concentración de nitratos por medio de un kit modelo HI 3874 con rango de 0 a 500 ppm conformado por 50 sobres de reactivo (cadmio), un comparador de color y una cubeta de cristal de 10 mL con tapa. Para el ensayo se tomaron 10 mL de una muestra de agua y se colocó en una cubeta de cristal, se agregó un sobre reactivo, se tapó y agitó vigorosamente por un minuto. Se esperó por cuatro minutos hasta que la tonalidad naranja se presentó y finalmente se contrastó con un comparador para obtener un valor que, de acuerdo con las

especificaciones del manual, se debe multiplicar por un factor de 4.43 para así determinar los mg/L de nitrato-nitrógeno presentes.

5.4.4 Análisis de fosfatos

El test modelo HI 3833 con rango de 0 a 5 ppm contiene un vaso porta muestra de 20 mL, un cubo comparador de color y 50 sobres reactivos (molibdato de amonio/tartrato de antimonio). Para el análisis, en un vaso de plástico se vertieron 10 mL de agua, se añadió el reactivo, se tapó y agitó hasta que los sólidos se disolvieron. Posteriormente, se esperó un minuto hasta el vire y finalmente se determinó directamente la concentración de PO_4 en mg/L mediante un comparador.

5.4.5 Análisis de dióxido de carbono

Se empleó el kit modelo HI 3818 con rango de 0 a 100 ppm que contiene dos frascos dosificadores, el primero de 10 mL con el reactivo 1 (fenolftaleína alcohólica) y el segundo de 120 mL con el reactivo 2 (solución de titulación de CO_2), dos vasos graduados (10 y 50 mL) y una jeringa graduada. Para la determinación, se tomaron 5 mL de agua en el vaso graduado, se agregó una gota del reactivo 1 y se mezcló agitando en pequeños círculos, si la solución se colorea rojo equivale a 0 ppm de CO_2 . Si la solución no cambia de color, se prosigue con una titulación gota a gota del reactivo 2 hasta que se note un vire a rosa. El cálculo se realiza tomando los mL gastados de titulante y se multiplica por un factor de 100 para obtener mgCO_2/L .

5.4.6 Análisis de oxígeno disuelto

Se empleó el kit HI 3810 con rango de 0 a 10 ppm que consta de un frasco con tapón, un vaso graduado, una jeringa calibrada, cinco frascos con gotero, el primero de 30 mL de reactivo 1 (sulfato de manganeso), el segundo de 30 mL de reactivo 2 (alcali yoduro azida), el tercero de 60 mL de reactivo 3 (solución de hidróxido de sodio), el cuarto de 10 mL de reactivo 4 (ácido sulfúrico) y el quinto de 120 mL de reactivo 5 (solución de titulación de O_2 disuelto).

El procedimiento comenzó enjuagando tres veces el frasco de análisis con agua muestra y se llenó completamente, se añadieron cinco gotas de reactivo 1 y cinco de reactivo 2, se tapó y agitó cuidadosamente. Después se dejó en reposo por un minuto y se añadieron 10 gotas de reactivo 3, se tapó y agitó con fuerza hasta disolver la materia suspendida y la solución viró a amarillo. Se extrajeron 5 mL de muestra del frasco y se colocaron en el vaso, posteriormente, se siguió añadiendo una gota de reactivo 4 y se agitó en círculos lentamente hasta que cambió la solución a color azul. Finalmente se tituló gota a gota empleando la jeringa con reactivo 5 hasta que la muestra cambió de azul a incoloro. El cálculo se realiza tomando la escala marcada en la jeringa y se multiplicará por el factor 10 para obtener mg/L.

5.4.7 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La DBO se obtuvo siguiendo los lineamientos de la NMX-AA-028-SCFI-2001 mediante la incubación en 5 días de la muestra de agua enriquecida con sales nutrientes, para lo cual se utilizó una dilución 1:30 (FD=0.033) de la muestra a analizar, después se añadió por cada litro 1 mL de cada una de las siguientes soluciones: tampón fosfato, MgSO₄, CaCl₂, y FeCl₃. Se enriqueció el agua con oxígeno por 1 hora para saturarla de oxígeno disuelto y se cuantificó (OD_o). Se envasó el agua en frascos Winkler y se sellaron con parafilm. Finalmente se incubaron a 20°C por 5 días. Al terminar el periodo se midió el oxígeno disuelto presente (OD_f). El DBO₅ en mg/L se calcula con la ecuación (CONAGUA, 2014):

$$DBO_5 = \frac{OD_o - OD_f}{FD}$$

5.4.8 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se utilizó un método fotocolorimétrico estandarizado por el equipo Hach que consistió en introducir 2 mL de la muestra de agua en un vial que contiene una solución oxidante, se incubó por 2 horas en un reactor a temperatura constante

preestablecida y después se dejó enfriar a temperatura ambiente. Finalmente, las muestras se leyeron en el espectrofotómetro con el software 8000, el cual arrojó el valor de la DBQ en mg/L.

5.4.9 Coliformes totales

Para la cuantificación de coliformes totales se siguió la metodología planteada por la NOM-113-SSA1-1994 para lo que se utilizó agar lactosa-bilis rojo violeta, un matraz Erlenmeyer de 250 mL y 54 tubos de ensayo 16x150 con tapón. El procedimiento comenzó pesando 10 g de muestra de agua y se realizaron las diluciones decimales y se depositó 1 mL de cada dilución en cajas Petri estériles por duplicado. Se agregó de 15 a 20 mL de agar bilis rojo violeta fundido y enfriado a 45° C en cada placa. Posteriormente, se incubaron en posición invertida durante 24 horas a 37° C para finalmente realizar el conteo de las colonias y se reportó el resultado como UFC/mL.

5.5 Obtención de los índices de calidad de agua

Se utilizó la metodología propuesta por Olgún *et al.*, (2010) para el cálculo de un ICA modificado de la fórmula de Brown (1970). Cabe señalar que se obtuvieron comparaciones por cada punto de muestreo de las nueve zonas del río y que esto permitió comparar cada zona y visualizar la degradación de la calidad del agua en la ribera de la ciudad a medida que el río fluye.

5.6 Desarrollo de la técnica de electrocoagulación de agua residual

Como última etapa del proyecto, se planteó una estrategia que permita disminuir el nivel de contaminación del río Tecolutla, la cual consistió en la construcción y validación de una celda de electrocoagulación.

Para la experimentación, se tomaron muestras de agua residual proveniente de los puntos de descarga municipales, se excluyó el del rastro y el arroyo debido a que su carga orgánica es diferente a la de un agua residual común. Se trabajó con un diseño experimental de 3x3 tomando como variables al pH y a la intensidad de corriente empleada siendo la variable de respuesta el porcentaje de remoción de

sólidos (SST). Por último, se contrastaron los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua residual antes y después de la electrocoagulación y se analizaron estadísticamente.

El proceso de electrocoagulación propuesto constó de un sistema compuesto por la celda de electrocoagulación y un sistema fotovoltaico para poder brindar la energía requerida tal y como se observa en la figura 3. El sistema fotovoltaico está formado por un panel solar, un banco de baterías, un regulador de voltaje y un bypass eléctrico. El bypass puede suministrar corriente eléctrica directa de CFE si es que el panel solar no abastece o en caso de que el día no cuente con tanta radiación solar.

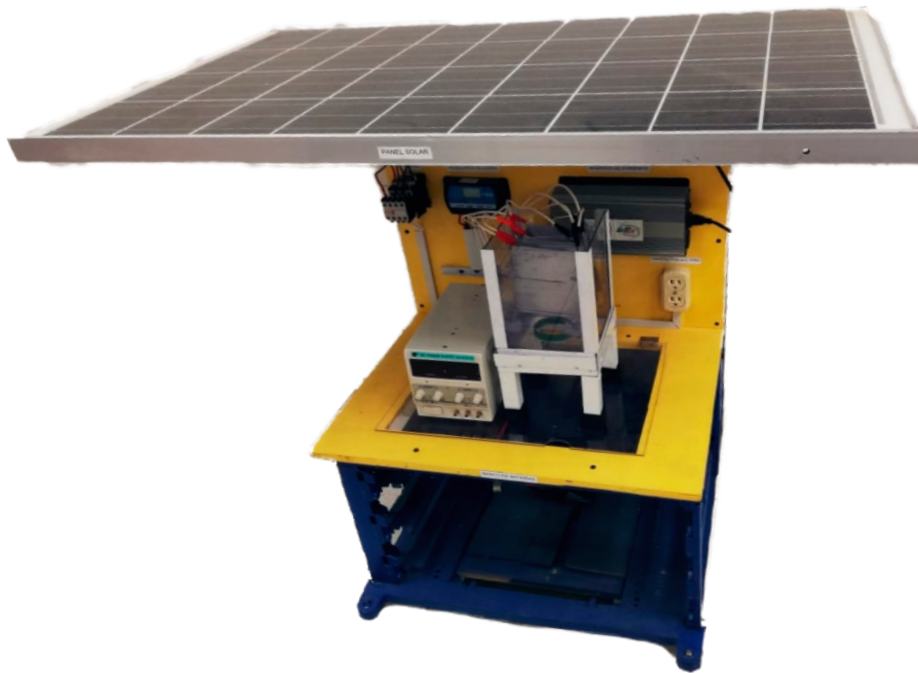


Figura 3. Sistema de electrocoagulación para agua residual

VI. RESULTADOS

6.1 Puntos de descarga y puntos de muestreo

A lo largo de la ribera del río Tecolutla se encontraron 30 puntos de descarga de los cuales 5 corresponde a descargas residuales municipales ya que son ductos de entre 2 y 4 m de ancho y los 25 restantes son descargas de hogares y negocios particulares que no están conectados al drenaje municipal y colocaron su propio tubo de descarga siendo regularmente tuberías de PVC de entre 2 y 4 pulgadas de diámetro. De los cinco puntos municipales, solo tres se tomaron en cuenta para el análisis, el primero el arroyo a la entrada de la ciudad debido a que no es un drenaje y el quinto corresponde al drenaje del rastro municipal ya que el flujo de descarga es intermitente (Figura 4).



Figura 4. Descargas de agua residual sobre el río Tecolutla. a) Arroyo a la entrada de la ciudad, b) Primera descarga municipal en el centro de Gutiérrez Zamora, c) Segunda descarga municipal en el centro de Gutiérrez Zamora, d) Descarga a la salida de Gutiérrez Zamora

6.2 Validación del dron acuático

El dron utilizado para la toma de muestras fue diseñado y construido en la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora y se puede apreciar en la figura 5 donde se visualizan sus partes. Dentro del circuito electrónico se encuentra una batería de corriente directa, la cual administra la energía para que funciona el motor de la propela y la bomba de succión.



Figura 5. Dron acuático para toma de muestras de agua

Entre las fortalezas del dron se tiene primeramente sus dimensiones que son 1.7m x 0.6 m x 0.4m, su rango de operación es de 800 m de radio, el tiempo de succión es de 2 minutos por lo que el tiempo de muestreo es de solo 15 minutos por sección del río, además que soporta hasta 5 litros de muestra de agua.

En la validación, al comparar los valores de TDS los resultados no fueron muy diferentes. El análisis estadístico arrojó que no existía una variación significativa ($p=0.671$). La diferencia más notable se encontró en el punto 2C cuando de manera tradicional se encontró un valor de 129.33 ppm y por medio del dron se obtuvo 124.33 ppm (Figura 6).

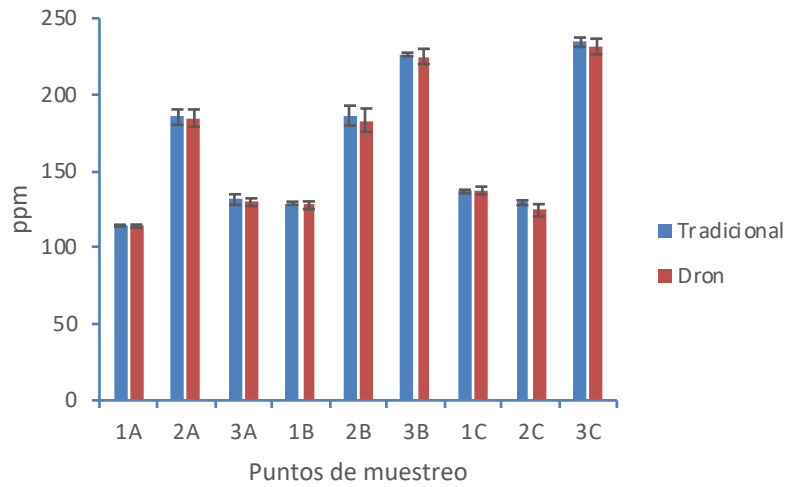


Figura 6. Comparación de TDS con muestreo tradicional y por dron.

En relación con la acidez titulable no existió variación estadística ($p=0.88$), la variación máxima identificada fue de 62.33 mg/L del punto 1A tomado de manera tradicional contra los 60.66 mg/L reportados con el agua del dron. Sin embargo, para fines de análisis de agua es una variación mínima y que no repercute en análisis de calidad (Figura 7).

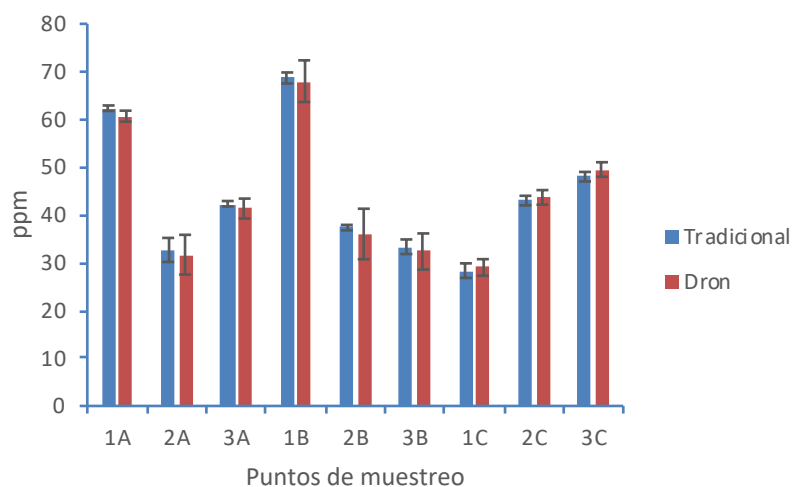


Figura 7. Comparación de acidez con muestreo tradicional y por dron.

En los fosfatos, aunque la dispersión se notó, los resultados promedios no se diferencian mucho estadísticamente ($p=0.971$). La variación máxima identificada fue de 3.33 mg/L del punto 3B tomado de manera tradicional contra los 3 mg/L reportados con el agua del dron (Figura 8). También se debe resaltar que el método es colorimétrico por lo que puede existir una variación al reportar los resultados.

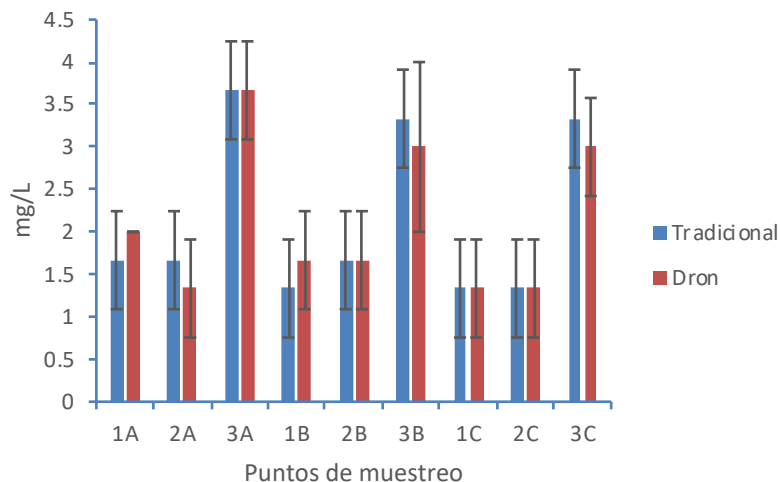


Figura 8. Comparación de fosfatos con muestreo tradicional y por dron.

6.3 Análisis fisicoquímico y bacteriológico de muestras de agua

Los parámetros evaluados de las muestras provenientes de los 9 puntos de monitoreo se encuentran descritas a continuación donde se comparan los valores promedio por punto de muestreo con respecto a la estación de lluvias y secas.

Al realizar los análisis de varianza de un factor para cada parámetro, se encontró que en la mayoría existe variación de acuerdo con el ancho y largo del río a excepción de la temperatura que no muestra variaciones significativas a lo ancho del río, pero sí a lo largo del mismo.

En relación con los TDS, se encontraron variaciones a lo largo del río en temporada se secas ($p=0.001$). A lo largo del río se encontraron mayores niveles de sólidos disueltos en los puntos de muestreo C, que corresponde a los puntos del lado opuesto a la ciudad. En temporada de lluvias no existe variación estadística ($p=0.206$) (Figura 9).

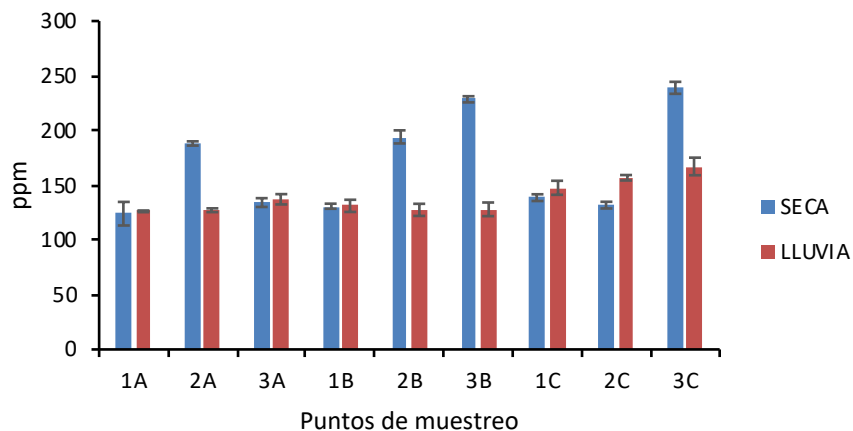


Figura 9. Comparativa de TDS en temporada de secas y lluvias

La gráfica de conductividad eléctrica muestra que el comportamiento de los niveles en los puntos de muestreo es claramente semejante a los niveles de TDS tanto en secas ($p=0.001$) como lluvias ($p=0.804$). Esto puede ser explicado a que los niveles de TDS corresponden a sales las cuales indican más que nada a sólidos inorgánicos (sales, ácidos minerales o contaminantes) (Figura 10).

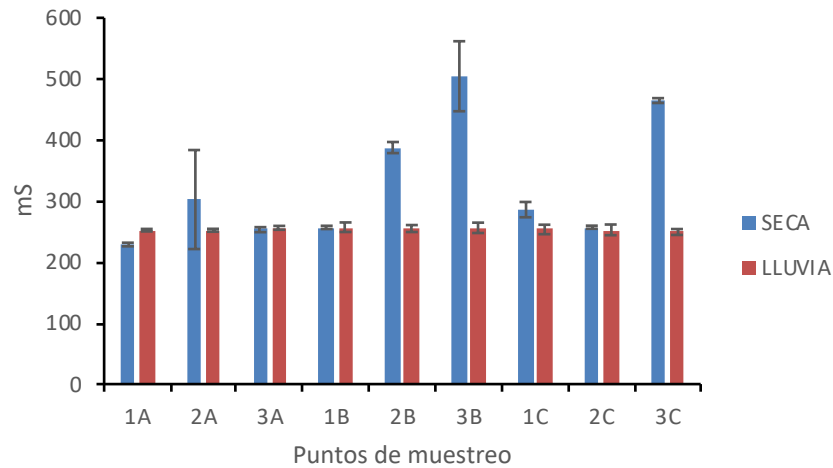


Figura 10. Comparativa de conductividad eléctrica en temporada de secas y lluvias

El pH es un parámetro que afecta a la calidad del agua y tanto en temporada de secas ($p=0.113$) y lluvia ($p=0.099$) no presentó variaciones ya que se mantuvo en un intervalo estrecho. Los resultados indican que el agua es ligeramente alcalina ya que todos los puntos mostraron un pH superior a 7 (Figura 11).

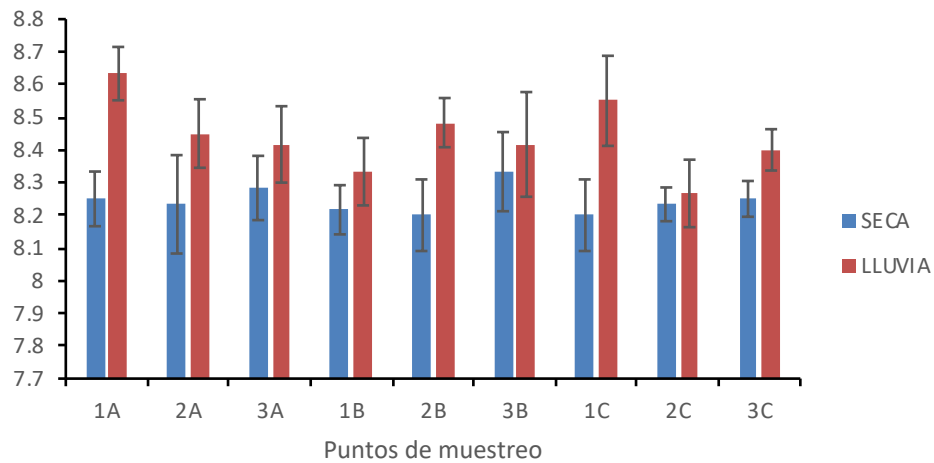


Figura 11. Comparativa de pH en temporada de secas y lluvias

Por su parte, los fosfatos variaron a lo largo del río en temporada de secas ($p=0.001$) y lluvias ($p=0.0$). En la gráfica de fosfatos se aprecia que se comportaron constantes en los puntos 1 y 2 pero se dispararon drásticamente en

el punto 3 en todas las zonas A, B y C lo que hace suponer que existen descargas de agua residual en ambas partes de la ribera ya que los fosfatos provienen principalmente de detergentes (Figura 12).

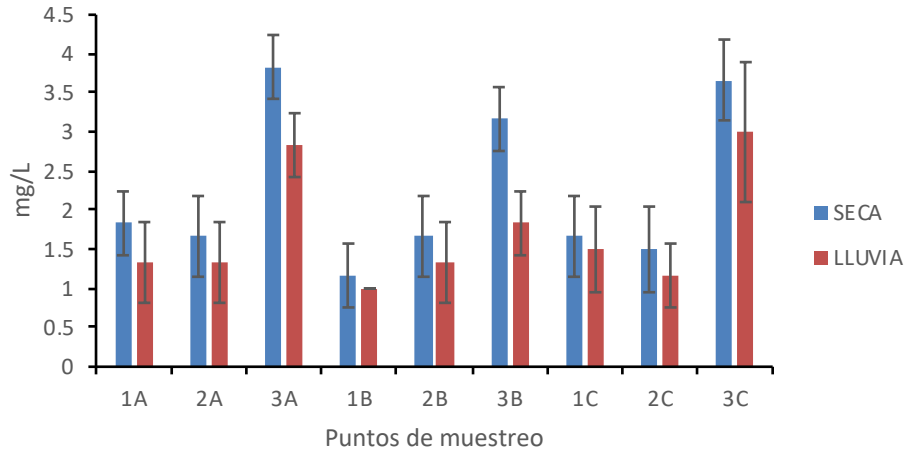


Figura 12. Comparativa de fosfatos en temporada de secas y lluvias

Además, al observar el comportamiento del CO₂, se puede inferir que los fosfatos están siendo aprovechados por microalgas ya que en los puntos con mayores concentraciones de fosfatos a su vez corresponden mayores concentraciones de dióxido de carbono. Cabe señalar que el CO₂ tuvo variaciones estadísticas a lo largo del río tanto en secas ($p=0.001$) como en lluvias ($p=0.00$) (Figura 13).

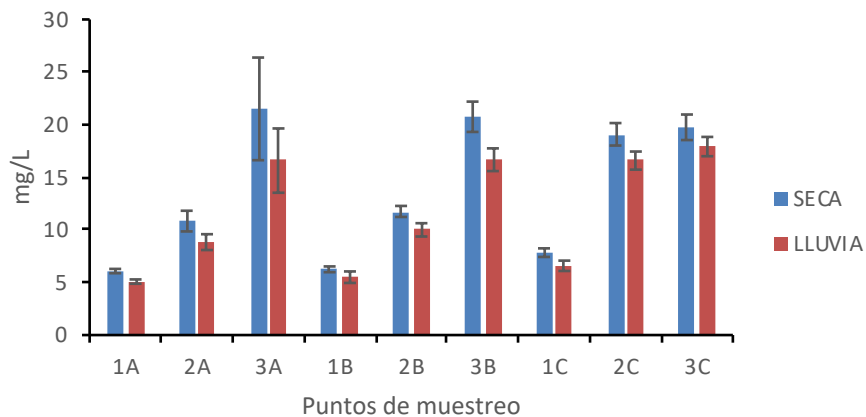


Figura 13. Comparativa de CO2 en temporada de secas y lluvias

En relación con el oxígeno disuelto, en temporada de secas existieron variaciones a lo largo del río ($p=0.00$) mientras que en lluvias fue constante ($p=0.620$). Se aprecia que la concentración disminuye en los mismos puntos donde aumenta el dióxido de carbono resaltando que los niveles son bajos para las especies acuáticas que viven en el agua del río al manejar intervalos de entre 2.21 y 5.58 mg/L (Figura 14).

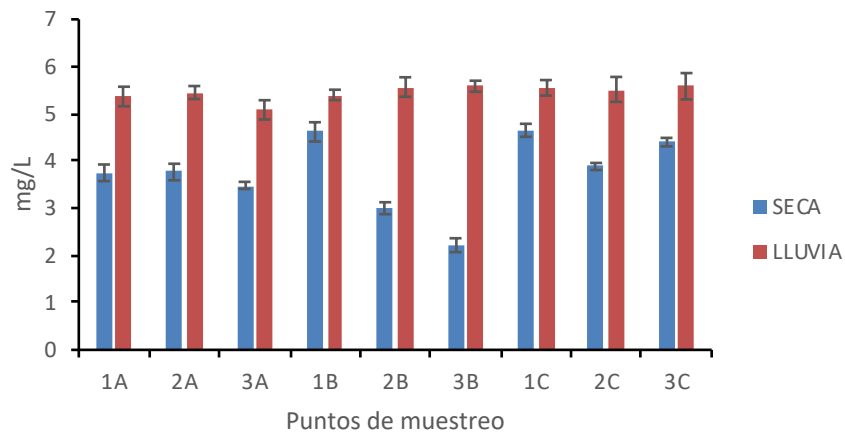


Figura 14. Comparativa de oxígeno disuelto en temporada de secas y lluvias

Un parámetro para resaltar es el biológico ya que los coliformes totales variaron a lo largo del río tanto en secas ($p=0.019$) como en lluvias ($p=0.022$). Fueron el parámetro más alto a pesar incluso que las muestras de agua tienen parámetros fisicoquímicos controlados.

En la figura 15 se aprecia claramente que la mayor cantidad en UFC/mL corresponden a temporada de secas y se localizan en la zona 1A, 2A y 3A lo cual es lógico debido a la gran cantidad de puntos de descarga de agua residual dando para la temporada de secas en el punto de salida (3A) una concentración de 1470 UFC/mL, superior a los 873.33 UFC/mL en el punto de entrada (1A).

Por otro lado, en el centro del río (1B, 2B y 3B) también se presentan coliformes en niveles altos (390-546 UFC/mL) y del lado de la ribera opuesta a la ciudad (1C, 2C y 3C) los niveles aumentan en relación al centro, lo cual puede confirmar que a

pesar de no existir casas en la ribera C, sí hay puntos de descarga de agua residual, ya que el perfil de concentración de coliformes así lo demuestra (683.33-723.33 UFC/mL).

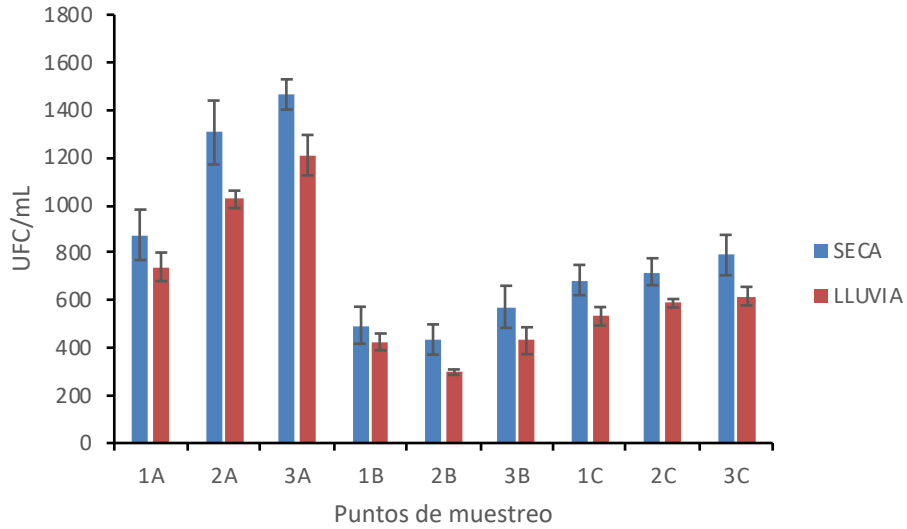


Figura 15. Comparativa de coliformes totales en temporada de secas y lluvias

La DBO5 varió en secas ($p=0.013$) y lluvias ($p=0.022$). Los resultados muestran que la mayor concentración se encuentra en la ribera de la ciudad (Figura 16).

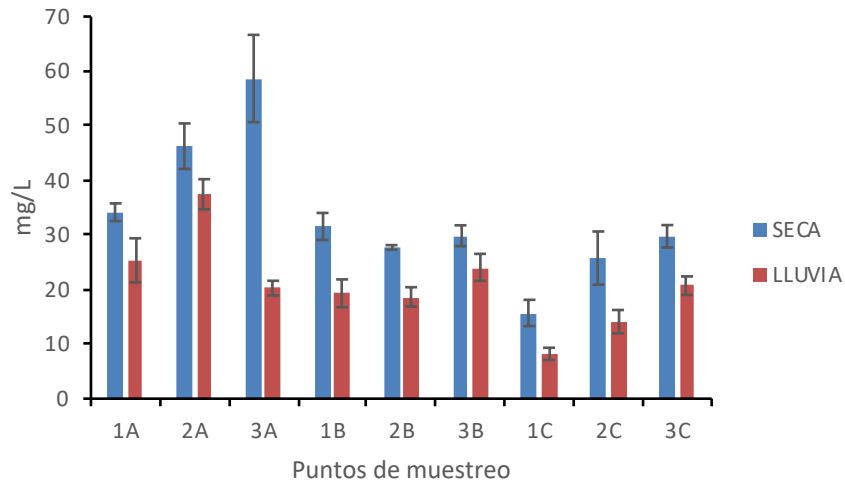


Figura 16. Comparativa de DBO5 en temporada de secas y lluvia

El parámetro de DQO no mostró variaciones estadísticas en secas ($p=0.229$) ni en lluvias ($p=0.2$) y al igual que la DBO5, las mayores concentraciones se localizan en la ribera de la ciudad debido a la gran cantidad de puntos de descarga de agua residual. En el gráfico, se resalta el punto 3 A notablemente, lo cual se puede explicar debido a que la carga orgánica presente en el punto es mayor (Figura 17).

Al igual que la DBO5 y coliformes totales, se aprecia presencia de contaminación por drenes en la ribera opuesta de la ciudad, aunque en menor magnitud.

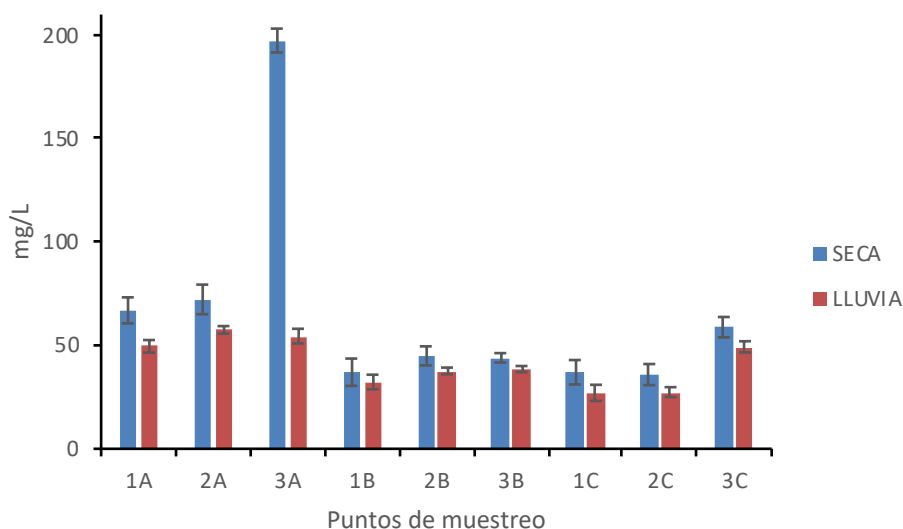


Figura 17. Comparativa de DQO en temporada de secas y lluvias

Finalmente, el nivel de nitratos en todos los puntos se mantuvo debajo de 10 mg/L, sin embargo, por la sensibilidad del kit, no se conoce realmente el valor de estos y se debe resaltar que existen trabajos que remarcan que niveles por encima de 4 mg/L causan efectos negativos sobre el ecosistema. La temperatura se monitoreó, sin embargo, no existió variación alguna y solo se consideró para el cálculo del ICA. En el caso de cobre las pruebas dieron negativo por lo cual se descarta la presencia de metales en el agua del río.

En relación al análisis de las descargas de agua residual sobre el río, en el cuadro 1 se presentan los resultados obtenidos tras la experimentación, en la cual se

muestran los datos promediados durante los 4 meses de estudio. La primera columna corresponde a los puntos de descarga siendo D1-D2 los drenes en el centro de la ciudad y D3 el dren de descarga a la salida de la ciudad. Se omitió el punto de descarga a la entrada de la ciudad debido a que corresponde a un arroyo y por lo tanto existe una dilución del agua residual, así como el dren del rastro ya que es intermitente y contiene materia orgánica diferente a los demás puntos de descarga.

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas y biológicas del agua residual

Punto de descarga	PH	Cond. (mS)	T (°C)	TDS (ppm)	SST (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	CT (UFC/100 mL)
D1	7.65±0.02	1342±20	29±3	657±7	50±7	59.1±4	51±2	2600±80
D2	7.7±0.03	605±15	30±5	305±12	65±6	75.6±3	67±6	1950±30
D3	7.95±0.01	1020±50	29±3	510±14	72±12	78±5	74±5	3100±70

En los resultados, la variable pH, conductividad, TDS y SST no mostraron diferencias estadísticas entre los puntos de descarga debido a que se obtuvo un valor del factor p por encima de 0.05 ($p=0.96$, 0.88 , 0.89 y 0.81 respectivamente). En cambio, en las variables como temperatura, DBO₅, DQO y CT (coliformes Totales) sí existe una variación estadística entre los puntos de muestreo ($p=0.001$, 0.003 , 0.001 y 0.001 respectivamente).

Analizando cada parámetro y comparando con la NOM-003-SEMARNAT-1996 (Díaz, 2013), se tiene que el pH se encuentra dentro los límites establecidos (5.5 y 10 unidades). De acuerdo a la temperatura es necesario tener un control de esta para su posterior análisis ya que puede existir la presencia de microorganismos termófilos.

Para la parte de los Sólidos Suspendidos Totales, de acuerdo a la norma el límite para uso en riego agrícola es de 150 a 200 mg/L, para uso público urbano es de 75 a 125 ppm por lo que se encuentran dentro de los límites. Sin embargo, sobrepasa los límites para protección de vida acuática que establece como límites entre 40 a 60 ppm.

De lo obtenido para DBO_5 , comparando con la norma se tiene que para uso en riego agrícola existe un límite de 150 a 200 ppm, para uso público urbano es de 75 a 150, teniendo estos dentro de lo establecido, sin embargo, para la protección de vida acuática cuyos límites son de 30 a 60 ppm se sobrepasa por lo que es necesario un control dando importancia ya que la zona tiene como fuente económica la pesca.

Cabe señalar que de acuerdo a la relación que existe entre DBO_5 y DQO con un valor menor a 2.5 se puede determinar que los orígenes de las aguas residuales son principalmente de uso doméstico.

Finalmente se destaca que la concentración de coliformes fecales sobrepasa los límites establecidos (1000-2000 UFC/100 ml) en dos de los tres drenes de descarga, por lo cual al estar muy elevados el agua puede ser perjudicial a la vida humana.

6.4 Cálculo del índice de la Calidad del Agua

Para el cálculo del ICA en cada uno de los nueve puntos de muestreo en el río se utilizó las ponderaciones marcadas en el cuadro 2. En la columna de resultado se colocó cada valor del parámetro por cada punto, en la columna de unidades se colocaron las unidades de cada parámetro, en la columna de SI_i se coloca el valor de ponderación obtenido de curvas Q (Anexo 1), en la columna de W_i se colocaron los pesos relativos asignados por cada parámetro y ponderado entre 0 y 1. El valor de la última columna correspondiente a subtotal se obtuvo de la multiplicación de SI_i con W_i . Finalmente, la suma de cada valor del subtotal da el ICA correspondiente (Olguín *et al.*, 2010).

Cuadro 2. Parámetros y ponderaciones para el cálculo de los ICA

Parámetro	Resultado	Unidades	SI _i	W _i	Subtotal
Oxígeno disuelto	65	% Sat	50	0.1957	9.7850
Coliformes fecales	215	u.f.c./100mL	37	0.1757	6.5009
pH	6.9	u.std.	90	0.1457	13.1130
Dem. Bioq. Ox. (DBO ₅)	37	mg/L	2	0.1257	0.2514
Nitratos (N-NO ₃)	6.8	mg/L	70	0.1257	8.7990
Fosfatos (P-PO ₄)	1.3	mg/L	35	0.1257	4.3995
Sól. Dis. Tot. (SDT)	180	mg/L	70	0.1058	7.4060
					50.25

En la figura 18 se presentan los ICA obtenidos con base al monitoreo de los parámetros fisicoquímicos y biológicos a las muestras de agua en la temporada de secas y lluvias, así como su clasificación.



PUNTO	ICA secas	CLASIFICACIÓN	ICA lluvia	CLASIFICACIÓN
3A	42.07	C	51.17	MC
3B	52.69	MC	54.43	MC
3C	53.85	MC	55.11	MC
PUNTO	ICA secas	CLASIFICACIÓN	ICA lluvia	CLASIFICACIÓN
2A	43.83	C	51.08	MC
2B	53.56	MC	57.14	MC
2C	53.95	MC	58.64	MC
PUNTO	ICA secas	CLASIFICACIÓN	ICA lluvia	CLASIFICACIÓN
1A	48.83	C	55.21	MC
1B	54.92	MC	62.34	MC
1C	55.55	MC	62.46	MC

Figura 18. Índices de Calidad del Agua en nueve puntos de muestreo del río Tecolutla

6.5 Desarrollo de la propuesta

En la figura 19 se observa la celda de electrocoagulación que se divide en dos zonas, la primera zona de espumas localizada en la parte superior del prototipo, lugar donde se depositan los contaminantes del agua y la segunda zona de reacción correspondiente al volumen de agua que entra en contacto directo con los metales de sacrificio.

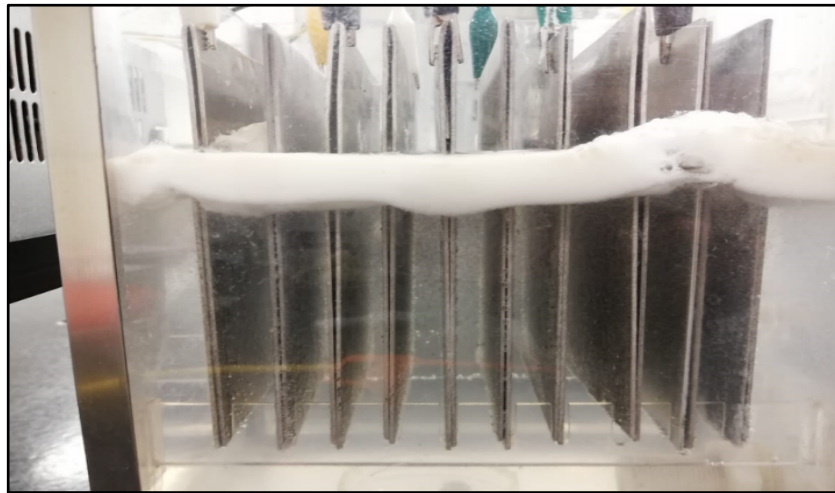


Figura 19. Celda de electrocoagulación en funcionamiento

Es importante señalar que para obtener las condiciones óptimas de operación se suministró la corriente eléctrica regulada en amperaje de acuerdo con el diseño experimental cuyo resultado se observa en el cuadro 3 siendo el pH de 7 e intensidad de corriente de 7.5 A.

La mejor condición de operación logró una remoción de SST del 86% en 15 minutos de funcionamiento. Por otro lado, las pruebas de pH de 10 no pudieron ser realizadas debido a que comenzaba a aumentar la temperatura y el consumo energético se eleva aunado al sobrecalentamiento de los cables y la reacción electroquímica tendía a ser explosiva.

Cuadro 3. Resultados experimentales de optimización

Nº de corrida	pH	Intensidad de corriente (A)	% de remoción SST (mg/L)
1	7	2.5	76±3%
2	8.5	2.5	74±2%
3	10	2.5	60±4%
4	7	5	75±1%
5	8.5	5	74±5%
6	10	5	-----*
7	7	7.5	86±3 %
8	8.5	7.5	64±4 %
9	10	7.5	-----*

*- - - indica que la operación no pudo llevarse a cabo.

Al evaluar el agua residual antes y después de la electrocoagulación, con el punto óptimo aumentó su pH de 7.76 a 8.04 (figura 20), mismo que, aunque es muy ligera la diferencia, se debe recordar que para la operación el pH inicial se ajustó a 7 por lo que la variación fue del 14.28%. El incremento durante el proceso podría deberse a que por la inducción de corriente eléctrica se produce la ruptura de la molécula de agua y los iones OH⁻ se unen a los iones de Al que al ser inducida la corriente eléctrica cambia de Al⁰ a Al⁺³ provocando la formación de $Al(OH)_3$.

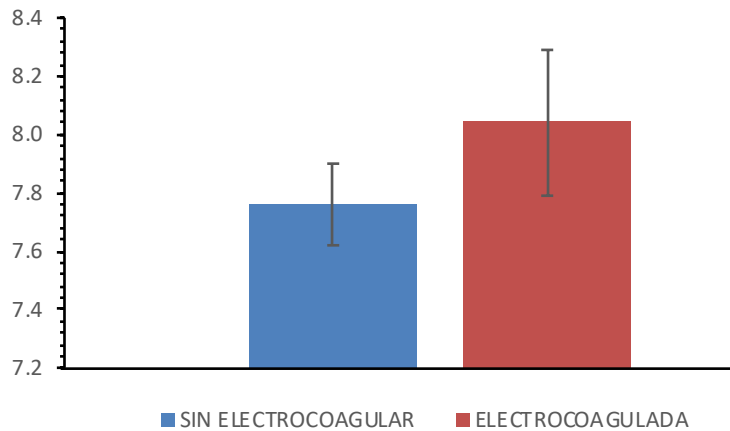


Figura 20. Variación de pH antes y después de electrocoagular

En relación con los sólidos orgánicos existe una disminución de 64.22 mg/L a 10 mg/L logrando un porcentaje de remoción del 84.44% en tan solo 15 minutos lo cual puede demostrar la viabilidad técnica del proceso (Figura 21).

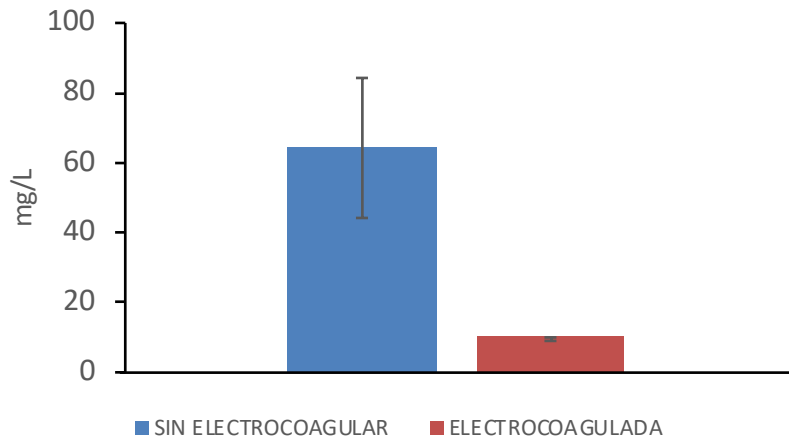


Figura 21. Variación de SST antes y después de electrocoagular

Los fosfatos disminuyeron de 563.33 mg/L a 90 mg/L logrando un porcentaje de remoción de 84.01% (Figura 22). Los fosfatos al igual que los nitratos son importantes para la vida acuática ya que propicia el crecimiento de flora y fauna en agua. A concentraciones altas de fosfatos se puede provocar una eutrofización, causando un decremento del oxígeno disponible para la vida acuática propiciando la muerte de esta (Chapa y Guerrero, 2010).

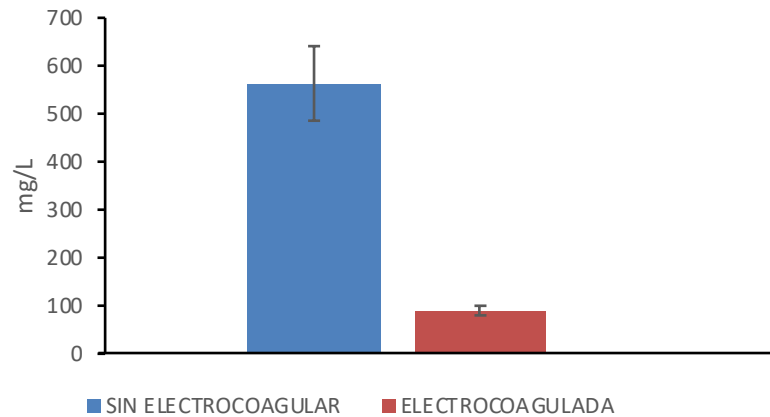


Figura 22. Variación de fosfatos antes y después de electrocoagular

Los nitratos disminuyeron de 132.9 a 44.3 mg/L logrando un porcentaje de disminución de 66.89% (Figura 23).

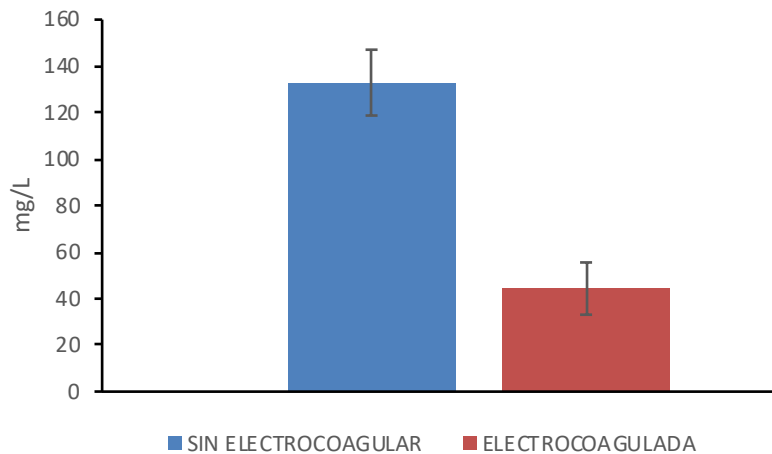


Figura 23. Variación de nitratos antes y después de electrocoagular

Altos niveles de nitratos pueden ser provocados por fertilizantes, sistemas sépticos y pesticidas utilizados en la agricultura a orilla del río por todo su cauce. Aunque se logra una reducción de los niveles, se debe poner énfasis para que los niveles de nitratos del cuerpo receptor de agua no sobrepasen los 10 mg/L estipulados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) ya que puede ser precursor de la metahemoglobinemia (Shihana *et al.*, 2016).

VII. DISCUSIÓN

El uso del dron es nuevo pero que está tomando realce en la actualidad para el monitoreo de contaminantes, aunque la mayor aplicación se tiene en drones aéreos para monitoreo de gases como CO₂, CO Y NO₂ (Carrillo *et al.*, 2017). Sin embargo el dron acuático propuesto presenta ventajas como en el volumen de muestra ya que puede muestrear hasta 5 litros de agua en comparación con los 500 mL que puede tomar el dron aéreo de la empresa GAMASER¹ (2018) que es un laboratorio de control de calidad de aguas ubicado en Valencia, España.

El uso de un dron acuático para toma de muestras de agua es una herramienta de gran ayuda ya que permite agilizar los muestreo y realizarlos en menor tiempo en comparación con el método tradicional. La aplicación de este tipo de vehículos es cada día mayor en tareas que implican algún tipo de dificultad o riesgo para vehículos convencionales tripulados por personas, como son la detección de incendios, la identificación de manchas de petróleo en el mar, el seguimiento del tráfico, toma de muestras en accesos difíciles, entre otros (Garijo *et al.*, 2009).

Sin embargo, una de sus limitantes podría ser el costo, ya que el prototipo utilizado tiene un costo de \$8,500.00 M/N además del tiempo de vida de la batería de sólo 25 minutos, aunque esto coincide con reportes de otros drones usados para monitoreo de vida silvestre (INECOL, 2017).

Los resultados presentados indican la viabilidad técnica y que no se afectan en los parámetros fisicoquímicos del agua y no genera turbulencia en la toma de muestra, aunque no se tienen referencias de otros autores para comparar. Otro factor a destacar es que se pueden tomar muestras a diferentes profundidades ya que el porta-muestra consta de una manguera ajustable, esto podría ser benéfico al estudiar perfiles de contaminación en ríos. Por todo lo anterior se puede decir que la relación costo-beneficio del uso del dron es favorable. El tiempo de vida del

¹ Ver más:

<https://www.gamaser.es/Sites/9/Docs/Novidades/muestreo%20drones.pdf>

equipo está considerado a 5 años dando mantenimiento preventivo como limpieza en las partes electrónicas sin embargo se debe considerar que la vida útil de las baterías es alrededor de 3 años.

Los resultados obtenidos en el agua residual vertida sobre el río demuestran que la mayoría de los parámetros están bajo los lineamientos de la NORM-001-SEMARNAT-1996 siendo únicamente los coliformes totales los que superan el límite normativo. Se obtuvo niveles de SST de entre 50 mg/L y 72 mg/L estando por debajo de los 580 mg/L reportado por Álvaro (2010) lo que indica que el agua se encuentra diluida. Sin embargo, los niveles de coliformes totales obtenidos entre 1950 UFC/mL sobrepasan los 1100 UFC reportados por el autor.

Como era de esperarse, los parámetros fisicoquímicos mostraron sus mayores niveles de concentración en la temporada de secas en relación a la temporada de lluvias debido a que los contaminantes se diluyen a excepción del pH y el oxígeno disuelto que se incrementaron en lluvias, el primero ligeramente y el segundo significativamente.

Los resultados fisicoquímicos obtenidos como pH (8.2-8.6), fosfatos (1-3.83 mg/L), DBO5 (15.7-58.65 mg/L) y coliformes totales (875-1465 UFC/mL) concuerdan con los de Arriaga *et al.*, (2009) quien reportó resultados semejantes pH (7.9-8.2), fosfatos (0.5-2.1 mg/L), DBO5 (25-66 mg/L) y coliformes totales (>1000 UFC/mL) por lo que se puede observar que existe un impacto antrópico sobre el río Tecolutla.

Se debe mencionar que los fosfatos monitoreados cuyos resultados variaron para temporada de secas entre 1.16 mg/L hasta 3.83 mg/L y para lluvias entre 1 mg/L hasta 3 mg/L coinciden con los encontrados por López (2017) al reportar entre 1 mg/L y 4 mg/L en secas y 1 mg/L y 2 mg/L en temporada de lluvias para el río Tecolutla en la zona de Gutiérrez Zamora. Se debe resaltar que el nivel de fosfatos debe estar por debajo de los 0.47 g/L marcados por Kundu *et al.*, (2015) ya que el enriquecimiento en nutrientes como fosfatos y nitratos de aguas

superficiales potencializan el proceso de eutrofización que promueve la producción de algas cuyos metabolitos modifican su color, olor y sabor además que dichas algas pueden llegar a reducir los niveles de oxígeno en el agua al grado de impedir la supervivencia de algunas especies de peces.

En comparación con ríos de la zona norte del estado de Veracruz, los niveles de coliformes totales (875-1465 UFC/mL) se asemejan con los reportados por Galindo *et al.*, (2005) en el río Cazones (1100 UFC/mL) en la zona de Poza Rica, Veracruz en el cual existen vertidos de agua residual. Por otro lado, los niveles de DBO5 (15.7-58.65 mg/L) del río Tecolutla se mostraron inferiores a los reportados por Ramos (2017) para el río Pantepec en la zona de Tuxpan, Veracruz (89.3-128.3 mg/L), mientras que el DQO del río Tecolutla (66.95-197.4 mg/L) se asemejan a los del río Pantepec en la zona de Tuxpan, Veracruz (90-183.3mg/L), resultados que a pesar de ser altos aún son superados por otros ríos en Veracruz como el río localizado en Orizaba y donde Torres *et al.*, (2013) reportó valores de DQO de 200 mg/L hasta superando los 500 mg/L.

En el caso del agua del río, al analizar los ICA se aprecia que la ciudad de Gutiérrez Zamora impacta negativamente con sus descargas ya que se degrada la calidad del agua a lo largo del cruce del río. Como se aprecia, a medida que el río Tecolutla va cruzando la ciudad de Gutiérrez Zamora, este va disminuyendo su calidad, principalmente del lado de la ciudad debido a las descargas de agua residual. De acuerdo a la escala de la National Foundation Sanitization, el río en temporada de secas presenta una calidad de agua de medianamente contaminada a contaminada, mientras que en temporada de lluvias se homogeniza el río estando categorizado como medianamente contaminado. Se debe señalar que el río ya llega degradado a Gutiérrez Zamora debido a que río arriba se encuentran comunidades de Papantla, Espinal y del estado de Puebla que vierten de igual manera su agua residual de manera directa o indirecta sobre el río Tecolutla.

Los resultados mostraron dos zonas en los ríos, en la ribera de la ciudad como contaminada y en el resto del río como medianamente contaminada en temporada de secas mientras que en lluvias se homogenizó el agua del río y permaneció como medianamente contaminada. Esta variación se puede explicar debido a que en lluvias el agua se homogeniza y de igual manera las descargas se diluyen ya que el mismo drenaje deposita el agua pluvial (Leyva, 2013).

Los valores de ICA obtenidos en temporada de secas cuyos valores están entre 42.07% y 55.55% coinciden con los reportados por Arriaga *et al.*, (2009) quien entre el 2007 y 2008 estudio el río Tecolutla y calculó un ICA de 49% a 53% de calidad de agua para la zona de Gutiérrez Zamora, sin embargo, por la temporalidad de su estudio no se tienen comparaciones en temporada de lluvia.

Algo a destacar es que a nivel orilla del río del lado de la ciudad, en temporada de secas, el ICA los parámetros coinciden con los estudios de Olguín *et al.* (2010) en su estudio del río Carneros y Papas, sin embargo, estos modelos de estudio estaban severamente contaminados y en su mayoría el agua era residual por lo que se deben tomar medidas para evitar que se sigan manifestando los impactos ambientales.

De igual forma, los resultados de ICA del río Tecolutla coinciden en relación a otros ríos de la zona norte de Veracruz de acuerdo con los estudios de Houbron y Florescano (2009), quienes cuantificaron el ICA utilizando 18 parámetros fisicoquímicos y biológicos y catalogaron al río Tecolutla como contaminado al igual que al río Pantepec, río Cazones en la cuenca alta y al río Panuco. El autor hace referencia que las descargas de agua residual son las causantes de dicho parámetro y que el agua en caso de ser distribuida a los hogares debe primero tener un tratamiento de potabilización.

Debido a los resultados del ICA del agua del río Tecolutla se observó un fuerte impacto de la ciudad de Gutiérrez Zamora por lo que se optó por proponer una alternativa para el tratamiento del agua residual generada por dicho municipio. En

este sentido se debe decir que la primera opción es una planta de tratamiento de agua residual por lodos activados (PTAR), sin embargo, es un sistema diseñado para elevada carga orgánica y requiere el uso intensivo de productos químicos y energía (Lahera, 2010) algo que no cumple el agua residual de Gutiérrez Zamora ya que se encuentra diluida. Otro aspecto importante es el costo que incluye la construcción, operación mantenimiento por aproximadamente 20 años de vida útil (Noyola *et al.*, 2013) ya que se estima que para construir una PTAR se requiere una inversión mínima de \$77, 740, 065.00 M/N (CMAS, 2007).

Por lo anterior, se debe de estudiar la viabilidad de técnicas no convencionales. En este sentido, la biorremediación hasta el día de hoy es un proceso lento de depuración aunque tiene la ventaja de que puede degradar compuestos difíciles como hidrocarburos aromáticos aunque con altos costos de tratamiento (Cortón y Viale, 2006) y la fitorremediación de agua residual es un tratamiento lento que requiere grandes áreas de tratamiento (Nuñez *et al.*, 2004) por lo que se optó por la electrocoagulación como alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales, ya que éste genera pocos residuos secundarios, es rentable económicamente y tiene altos porcentajes de remoción, cercanos o iguales al cien por ciento (Acosta *et al.*, 2013).

La propuesta de electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio logró un porcentaje de disminución de materia sólida del 86% en 15 minutos, concordando con los resultados de Arango y Garcés (2007) quienes lograron una remoción del 90% de sólidos de agua residual de la industria láctea utilizando electrodos de aluminio-ferro y 60 W de consumo energético en un tiempo de 20 minutos además de concordar con Conde (2012) quién obtuvo una remoción de 80.65% de sólidos de suero de leche utilizando de igual forma electrodos de aluminio-ferro. Y 70 W.

Se pudo observar que los sólidos y demás contaminantes como grasas y aceites migraron en la parte superior del agua. De acuerdo con Arango (2005), los flóculos formados por la electrocoagulación son similares a los producidos químicamente,

pero más grandes, contienen menos agua ligada, son antiácidos y más estables y pueden ser separados rápidamente por filtración por lo que se recomienda que posterior a la electrocoagulación se complemente el proceso con un tanque de sedimentación con la finalidad de separar las espumas tal y como propone Robles y López (2017).

En relación a los demás contaminantes y comparando con los reportados por Rodríguez y Friedrich (2008) en su estudio de electrocoagulación de agua residual se tiene que la disminución de nitratos de 66.89% supera los 29.1% reportados por los autores, aunque la disminución de fosfatos del 84.01% está por debajo del 99.1% obtenido por los citados. Un aspecto a destacar es que se reporta que los microorganismos del agua residual electrocoagulada disminuyen ya que Rodríguez y Friedrich (2008) reportaron una disminución del 62% de bacterias totales mientras que Robles y López (2017) reportaron una disminución del 99% de coliformes totales.

Con los resultados obtenidos, las condiciones de operación óptimas fueron intensidad de corriente de 7.5 A, potencial de 7.1 V, pH neutro y un tiempo de operación de 15 minutos comparadas con las condiciones reportadas por Hernández (2016) quién estudió el agua residual de un rastro y utilizó una intensidad de corriente de 0.5 A, pH de 4 y un tiempo de 6 minutos logrando una remoción de sólidos de 59%.

De acuerdo el balance energético se tiene que para el tratamiento de agua se requiere $530.042 \frac{kw}{h}$ logrando depurar con esta potencia 119,446.25 litros cada hora. Para la inversión del proceso se requiere un total de \$ 36,969,657.66 M/N de forma general, tomando en cuenta los aspectos principales de tubería, electrodos de sacrificio, paneles solares, equipo eléctrico y construcción de la cámara de sedimentación y electrocoagulación. Sin embargo, se debe resaltar que el precio podría considerarse elevado para inversión del municipio por lo que se podría contemplar el uso de plantas de tratamiento prefabricados, con muy bajo consumo

de energía basados en el proceso aerobio de lodos activados con los cuales permitan obtener agua tratada apta para reuso en riego de áreas verdes como las manejadas por SICOLMEX² con sede en Querétaro, Qro. o por ASAJet³ ubicada en Guadalajara, Jal.

De acuerdo a la proyección de 25 años vida útil de la planta con respecto a los paneles solares el costo por tratamiento de agua equivaldría a \$1.40 M/N por 1000 litros comparado con el precio de \$56.00 M/N que reportó Robles y López (2017) para el tratamiento de agua residual de Colombia por lo que se puede decir que la electrocoagulación propuesta es un proceso factible energéticamente reflejado en el precio ofrecido al consumidor.

² Ver más: <http://sicolmex.com/plantas-prefabricadas-domesticas/>

³ Ver más: <https://plantasdetratamiento.com.mx/plantas-de-tratamiento-asajet/>

VIII. CONCLUSIONES Y APLICACIÓN PRÁCTICA

Con los resultados obtenidos en la validación del dron acuático se puede decir que es viable su aplicación en el desarrollo de análisis de agua superficiales ya que permite desarrollar y optimizar los muestreos. Se puede utilizar en todo tipo de aguas sin embargo se debe tener la consideración de que, si es un río, la velocidad del agua podría llegar a arrastrar al dron, sin embargo, en lagos y lagunas no habría inconveniente.

En relación a la propuesta de electrocoagulación, se puede decir que es viable económica y tecnológicamente, la población de Gutiérrez Zamora y de Tecolutla resultarían beneficiada debido a que se evitaría la contaminación del río. Se debe resaltar que en Tecolutla se lleva acabo el turismo ya que es zona costera y sobre el río se llevan a cabo paseos en lancha. Sin embargo, en caso de que no se cuente con el soporte económico para la inversión inicial, se debería optar por otras alternativas, pero sin dejar de lado el tratamiento de agua residual.

El proceso de electrocoagulación además podría ser empleado en otras comunidades ya que la generación de agua residual no es limitativa ya que todas las poblaciones tienen la misma problemática, sin embargo, las consecuencias se visualizan en aquellas con cuerpos de agua en su territorio.

Finalmente, es de suma importancia resaltar que el presente proyecto en caso de ser implementado, puede ayudar a cumplir el objetivo 6 denominado agua limpia y saneamiento de los objetivos de desarrollo sostenible marcados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

En relación a la aplicación práctica, el presente trabajo funge primeramente como diagnóstico actual del agua del río Tecolutla, la información recabada es de suma relevancia para que las autoridades municipales de Gutiérrez Zamora tomen medidas de mitigación de la contaminación sobre el río ya que se deben tomar al menos los factores fisicoquímicos y biológicos analizados en el presente proyecto y de esta manera beneficiar a la población del municipio ya que el agua que

reciben es tomada del río y cualquier medida de prevención o remediación les impactará benéficamente.

Además, se debe resaltar que el monitoreo sobre el río y las descargas deben realizarse de manera periódica con la finalidad de tener un banco de información anual y poder comparar la evolución de los parámetros con lo que se podrían tomar decisiones en el ámbito ambiental.

La propuesta de electrocoagulación se podría instalar en Gutiérrez Zamora. Primeramente, se debe entubar cada fuente emisora de descargas para evitar que sean vertidas sobre el río Tecolutla. Después se debe canalizar el entubado hacia un terreno río abajo donde se llevaría a cabo el tratamiento en lagunas de electrocoagulación y donde a su vez estarían los paneles solares que suministrarían la energía eléctrica (Figura 24). Finalmente, el agua tratada podría verterse al río Tecolutla o ser usada para riego tomando en cuenta que la zona es netamente agrícola y ganadera.

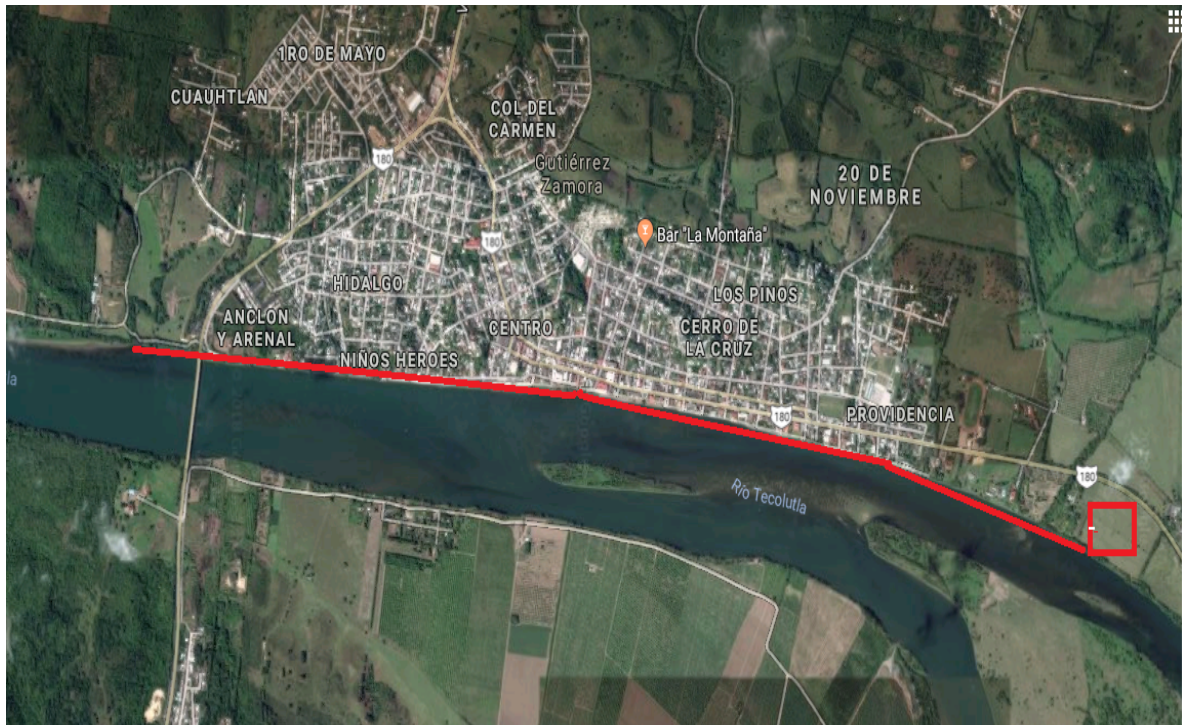


Figura 24. Propuesta de entubado para el proceso de electrocoagulación

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, G.; Coy, C.; Bourdón, A. y Cuervo, E. (2013). La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Revista facultad de ciencias básicas.* **9(2)**:306-317
2. Álvaro, P. (2002). Calidad del agua residual de la planta tratadora de agua CECFOR No 3 para uso agrícola. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Coahuila, México. 10 pp.
3. Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de agua residual. *Revista Lasallista de investigación.* **2(1)**:49-56.
4. Arango, A. y Garcés, L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT.* **43(147)**: 56-67.
5. Arriaga, M.; Hernández, L.; Sandoval, F.; Vera, J.; Vargas, E. y García, L. 2009. Monitoreo de la calidad del agua del río Tecolutla desde Coyutla hasta Gutiérrez Zamora, Veracruz. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales.* **5(2)**: 141-147.
6. Carmona, J. y Caro, A. 2017. The last peri-urban rivers of the Mexico Basin: Establishment of potencial reference conditions throught the evaluation of ecological quality and biological indicators. *Revista Mexicana de Biodiversidad.* **88(2)**: 425-436.
7. Carrillo, A. y Salazar, R. (2017). Contribución al desarrollo de un drone y una red ZigBee con el propósito de monitorear variables ambientales. Repositorio institucional del ITESCO.
8. Chávez, L. 2015. Evaluación espacial y temporal del índice de calidad del agua del río Cazonen en Coatzintla, Ver. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana, Veracruz, México. 39 pp.

9. Chapa, C. Y Guerrero, R. (2010). Eutrofización: abundancia que mata. Revista ¿Cómo ves? **134(1)**: 20-25.
10. CMAS (Comisión municipal de agua y saneamiento). 2007. Evaluación socioeconómica de una planta de tratamiento de agua residual en San Juan del Río, Qro. Página electrónica (http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/Proyec_hidraulicos/ptar_sra_2.pdf).
11. CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad). 2017. (Actualizado el 10 de febrero). Página electrónica (http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_076.html).
12. CONAGUA (Comisión nacional del agua). 2014. (Actualizado en diciembre 2014). Página electrónica (https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.htm).
13. CONAGUA (Comisión nacional del agua). 2015. (Actualizado en diciembre 2015). Página electrónica (<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>).
14. Conde, E. (2012). Evaluación del proceso de electrocoagulación sobre aguas de lavado con contenido de lactosuero. Tesis de licenciatura. Universidad Del Valle. Cali, Colombia. 25 pp.
15. Cortón, E. y Viale, A. (2006). Solucionando grandes problemas ambientales con la ayuda de pequeños amigos: las técnicas de biorremediación. Revista científica de ecología y medio ambiente. **15(3)**: 148-157.
16. Díaz, L. 2013. Evaluación de la calidad de agua y sedimentos del río Grande de Morelia Michoacán. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México. 181 pp.
17. Elordi, M., Colman, J. y Porta, A. 2016. Evaluación del impacto antrópico sobre la calidad del agua del arroyo Las Piedras, Quilmes, Buenos Aires, Argentina. Acta bioquímica clínica latinoamericana. **50(4)**:26-30.
18. Espinosa, G.; Ilizaliturri, D; Gonzáles, J.; Mejía, A.; Nava A: Cuevas, M. y Cilia, G. 2013. Contaminantes orgánicos persistentes en la cuenca baja del

- río Coatzacoalcos, Veracruz. Revista de contaminación e impacto ambiental. **1(3)**: 309-322.
19. Ferrero, A.; Reinoso, G. y Gutiérrez, C. 2013. Evaluación de la calidad del agua del río Opia (Tolima-Colombia) mediante macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos. Caldasia. **35(2)**:371-387.
 20. Galindo, J.; Vázquez, L.; Cruz, M.; López, M. y San Martín, P. 2005. Contaminación del río Cazonas, Veracruz, México durante el periodo octubre 2004- junio 2005. Revista UDO agrícola. **5(1)**: 74-80.
 21. García, B. 2016. Evaluación de la calidad de agua del río Shilcayo, mediante la diversidad de insectos acuáticos, Tarapoto, Perú. Tesis de licenciatura. Escuela Agrícola Panamericana. Zamorano, Honduras. 28 pp.
 22. Garijo, D.; López, J. y Pérez, I. (2009). Control de un vehículo aéreo no tripulado. Tesis. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España. 3 pp.
 23. Glun, J. y Heinke, Gary. 1999. Ingeniería ambiental. Ed. Pearson. Estados Unidos. 389 pp.
 24. Hernández, D. (2016). Tratamiento acoplado fisicoquímico-electrocoagulación para incrementar la remoción de la materia orgánica de un agua residual de rastro municipal. Tesis de maestría. Universidad Autónoma del estado de México. Toluca, México. 40 pp.
 25. Hernández, S. 2015. Evaluación de la calidad físico-química y bacteriológica del arroyo Coyopolan del municipio de Ixhuacán de los Reyes, Veracruz. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana, Veracruz, México. 141 pp.
 26. Houbron E. y Florescano, E. (2009). Calidad del agua, Atlas del patrimonio natural histórico y cultural del estado de Veracruz Ed. Gobierno del Estado de Veracruz. 6(I): 133-154.
 27. INECOL (Instituto nacional de ecología). 2017. Drones, observación de fauna y de habitats desde el aire. Página electrónica:

- (<https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/563-drones-observacion-de-fauna-y-de-habitats-desde-el-aire>).
28. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. Pontuario de información geográfica de los Estados Unidos Mexicanos: Gutiérrez Zamora. Página electrónica: (<http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datosgeograficos/30/30069.pdf>).
 29. James, E.; Gustavious, P. y Brett, M. 2010. Improving river water quality in Veracruz Mexico by using QUAL2K to assist in analysis and water treatment decision making. Tesis de maestría. Brigham Young University. Utah, E.E.U.U. 37 pp.
 30. Kunsu, S.; Vassanda, m. Rajendiran, S. y Subba, A. (2010). Phosphates from detergents and autrophication of Surface water ecosystem in India. *Current Science*. **108(7)**: 36-42.
 31. Lahera, V. (2010). Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista Quivera*. **12(2)**: 58-69.
 32. Leyva, C. 2013. Contaminación del agua por descargas de aguas residuales. Tesina de especialidad. Universidad Veracruzana. Veracruz, México. 95 pp.
 33. López, V. (2017). Contaminantes en el río Tecolutla. *Revista Difunde*. **1(0)**: 24-26.
 34. Macías, P. 2015. Determinación de metales pesados (Pb, Cd, Cr) en agua y sedimentos de la zona estuarina del río Tuxpan, Veracruz. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana, Veracruz, México. 62 pp.
 35. Maganda, C. y Koff, L. 2016. Analyzing the dynamics of inter-state water peace: A study of the Huitzilapan- Xalapa water transfers. *Revista de paz y conflictos*. **9(2)**: 59-83.
 36. Mazabel, D. y Rodríguez, B. 2011. Agua, cultura y desarrollo. Ed. Universidad de Guanajuato. México. 5 pp.

37. Morales, A. 2016. Análisis del comportamiento ambiental de los herbicidas de mayor uso en la subcuenca río Tecolutla, Veracruz. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. México DF. 133 pp.
38. Noyola, A.; Morgan, J. y Guereca, L. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Editorial UNAM.
39. Nuñez, R.; Meas, Y.; Ortega, R. Y Olgúin, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. Revista Ciencia. **69(4)**: 69-82.
40. Olgúin, E.; Gonzáles, E.; Sánchez, G.; Zamora, J. y Owen, T. 2010. Contaminación de ríos urbanos: El caso de la subcuenca del río Sordo en Xalapa, Veracruz, México. Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal. **1(2)**: 178-190.
41. OMS (Organización mundial de la salud). 2007. Lucha contra las enfermedades transmitidas por el agua en los hogares. Página electrónica (https://www.who.int/household_water/advocacy/combating_disease_es.f)
42. Osuna, A.; Díaz, J.; Anda, J.; Villegas, E.; Gallardo, J. y Dávila, G. 2015. Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010. Revista ambiente y agua. **10(2)**: 350-362.
43. Paxiúba, W. y Narciso, M. 2010. Physicochemical characterization of white, black, and clearwater rivers of the Amazon Basin and its implications on the distribution of freshwater stingrays (*Chondrichthyes, Potamotrygonidae*). Pan-American Journal of Aquatic Sciences. **5(3)**: 454-464.
44. Ramírez, G. 2011. Estudio de la viabilidad de un sitio en el municipio de Ayahualulco Veracruz para diseñar un relleno sanitario intermunicipal. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F., México. 9 pp.
45. Ramos, A. 2017. Análisis de la calidad de agua del río Tuxpan en los municipios de Álamos Temapache y Tuxpan Veracruz. Tesis de especialidad. Universidad Veracruzana. Veracruz, México. 41 pp.
46. Restrepo, A.; Arango, A. y Garcés, L. 2006. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Página electrónica

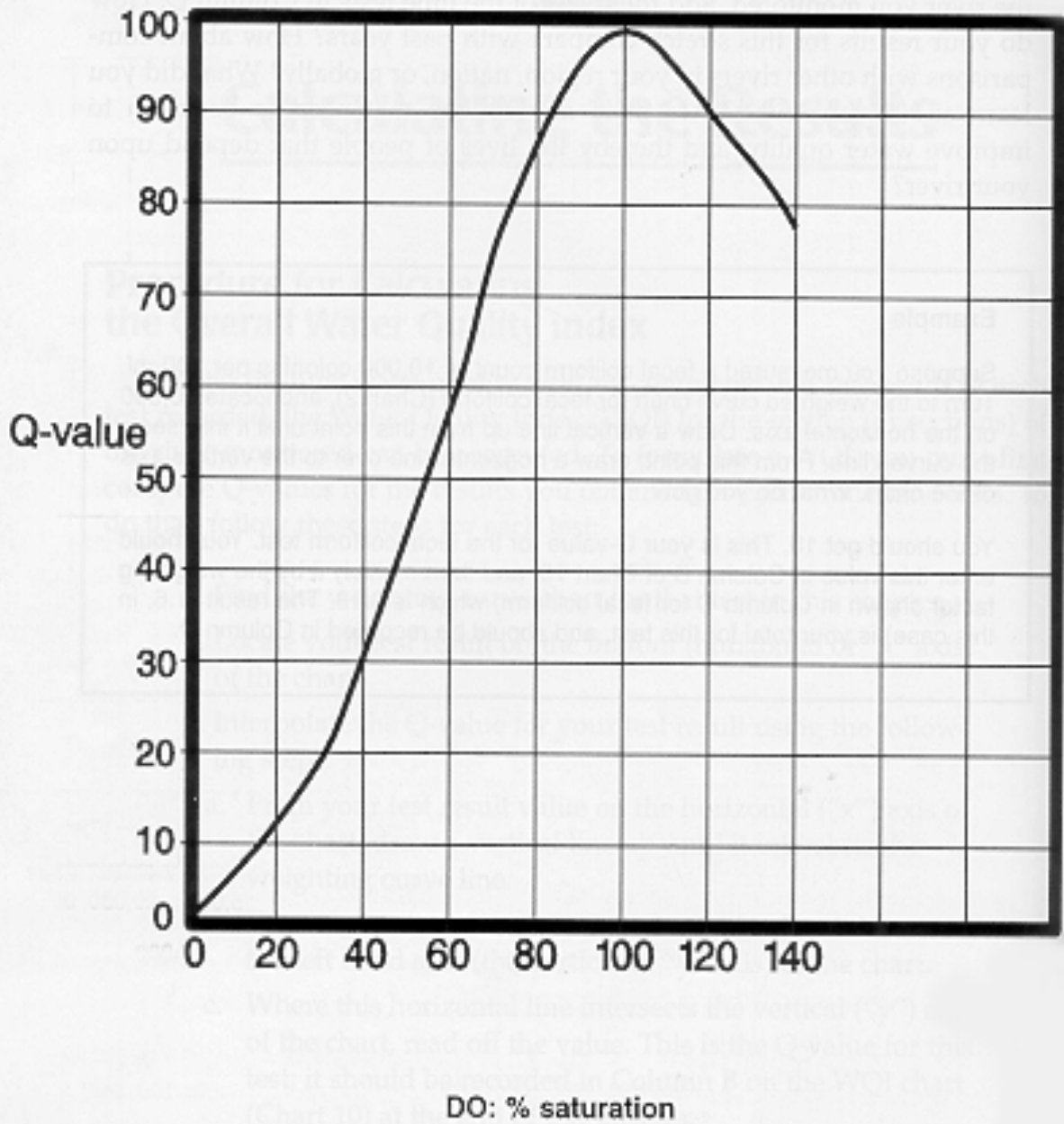
(http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf).

47. Robles, L. y López, A. (2017). Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas basado en electrocoagulación. Tesis de maestría. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. 30pp
48. SEMARNAT (Secretaría de medio ambiente y recursos naturales). 2015. Indicadores de calidad del agua. Página electrónica (http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce).
49. Shihana, F. (2016). Una prueba de cabecera para la metahemoglobinemia. Boletín de la OMS, **94(8)**: 557-632.
50. Torres, B.; Gonzáles, G.; Rustrián, E. y Houbron, E. 2013. Enfoque de cuenca para la identificación de fuentes de contaminación y evaluación de la calidad de un río, Veracruz, México. Revista internacional de contaminación ambiental. **29(3)**: 135-146.
51. Vázquez, F.; Sharma, V. y Pérez, L. 2002. Concentration of elements and metals in sediments of the southeastern Gulf of Mexico. Environmental Geology. **4(2)**:41-46.

ANEXO 1. CURVAS Q PARA CÁLCULO DE ICA

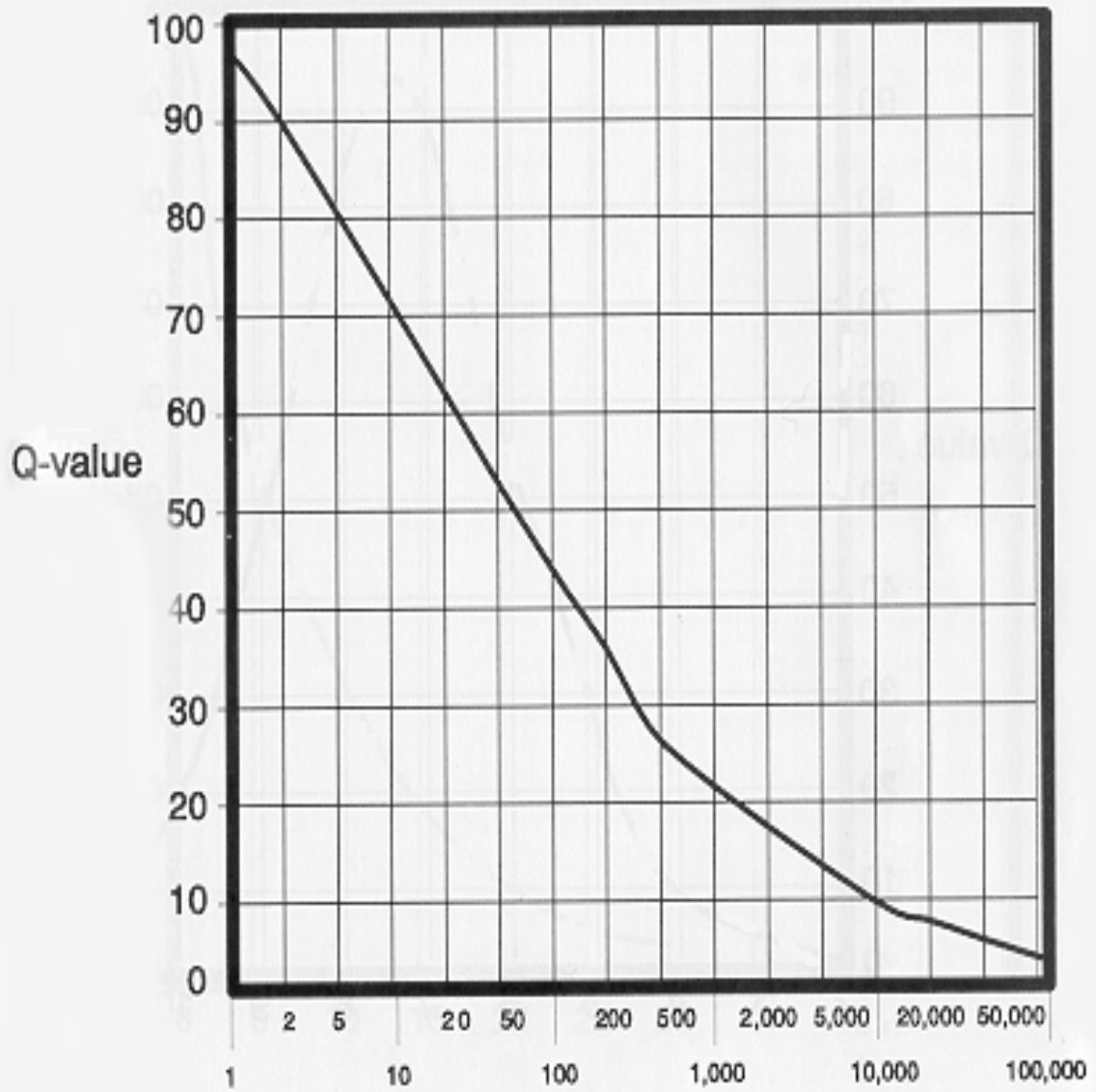
Weighting Curve Charts

Chart 1: Dissolved Oxygen (DO) Test Results



Note: if DO % saturation > 140.0, Q = 50.0

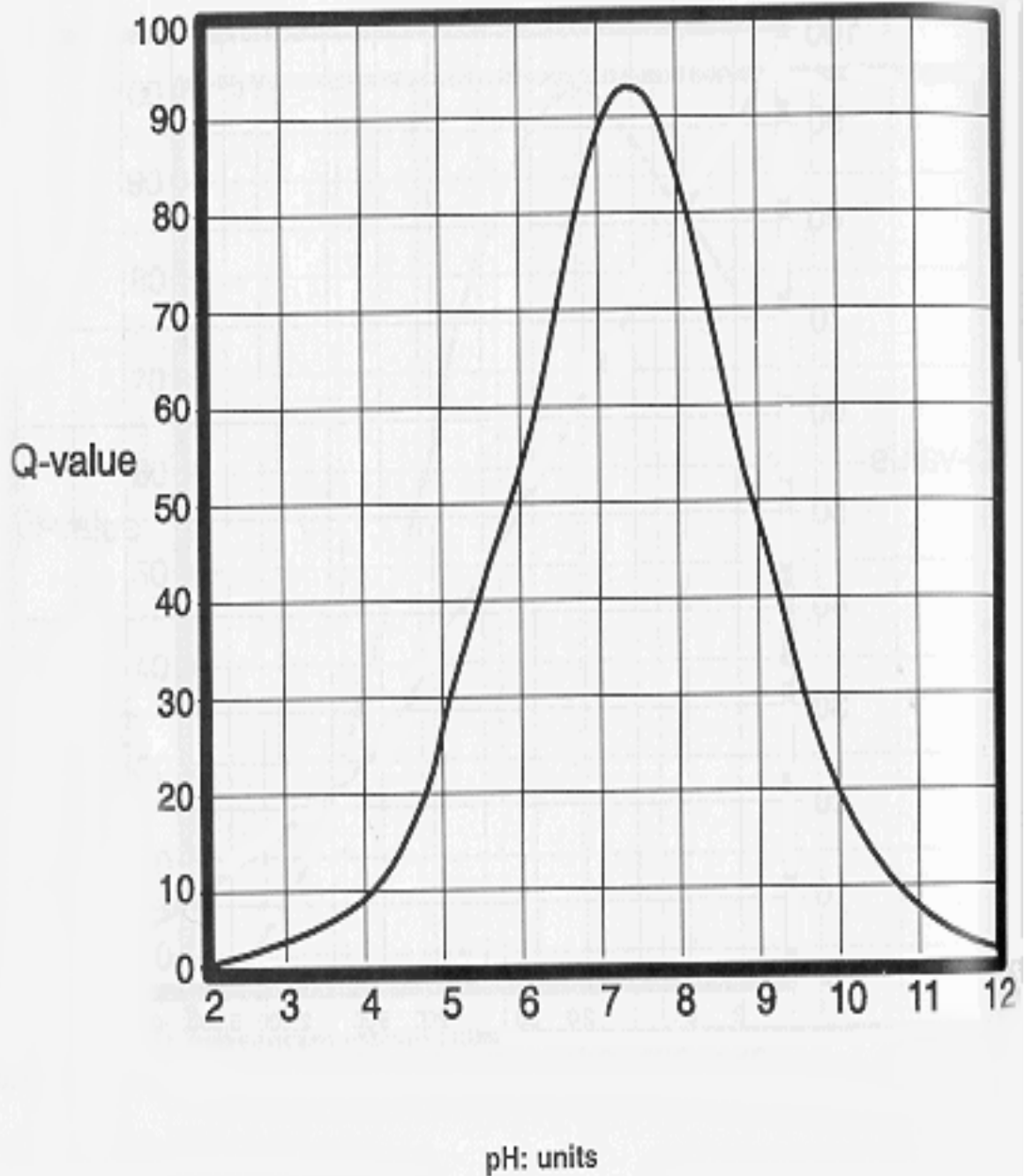
Chart 2: Fecal Coliform (FC) Test Results



FC: colonies/100 mL

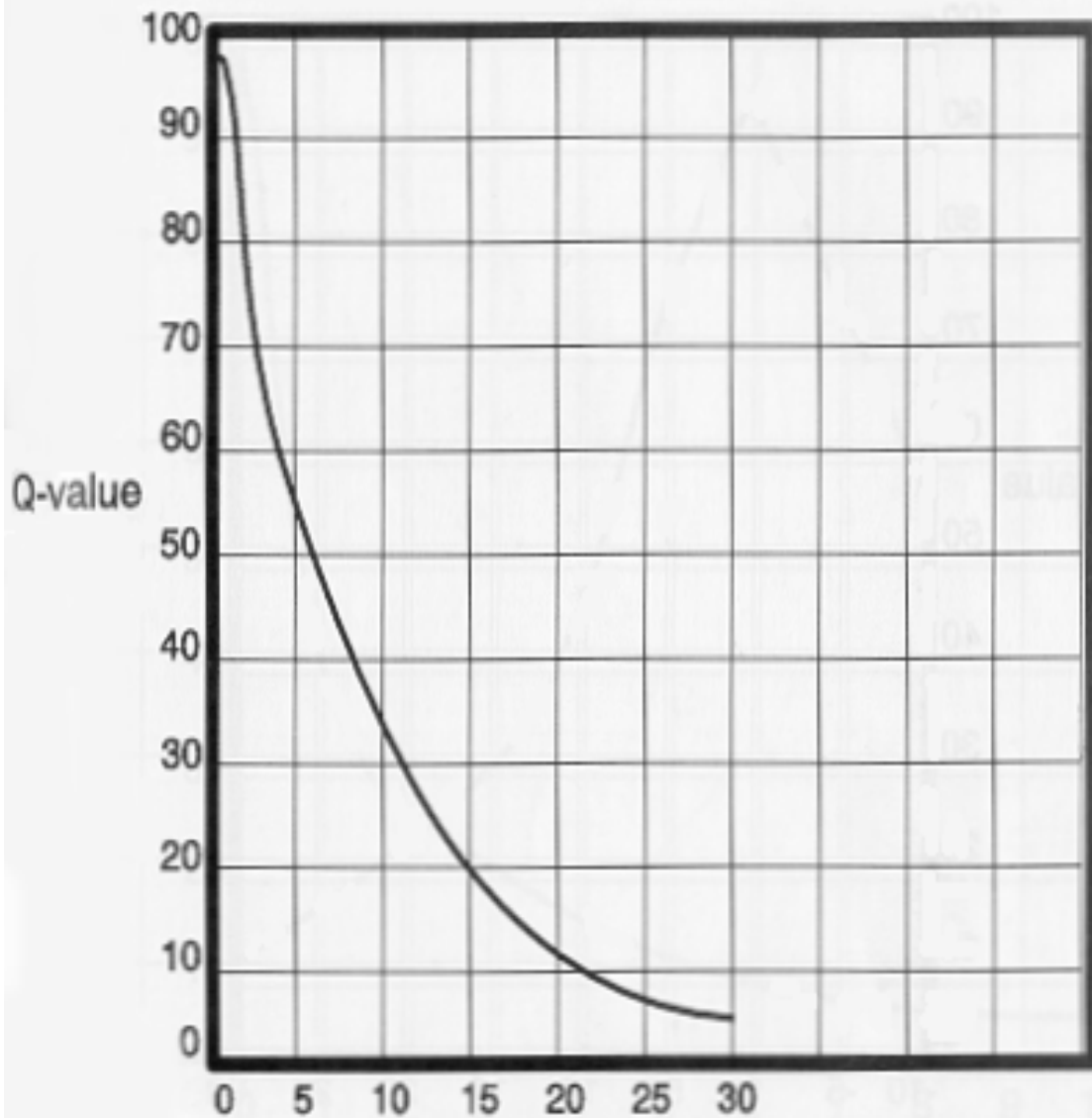
Note: if FC > 10⁴, Q = 2.0

Chart 3: pH Test Results



Note: if pH , 2.0, Q = 0.0; if pH > 12.0, Q = 0.0

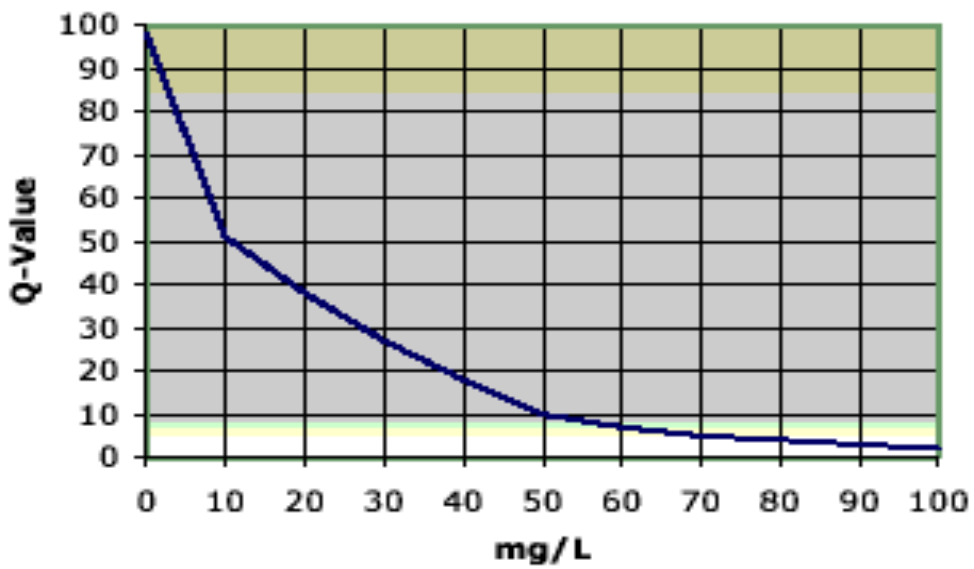
Chart 4: 5-Day Biochemical Oxygen Demand (BOD) Test Results



BOD₅: mg/L

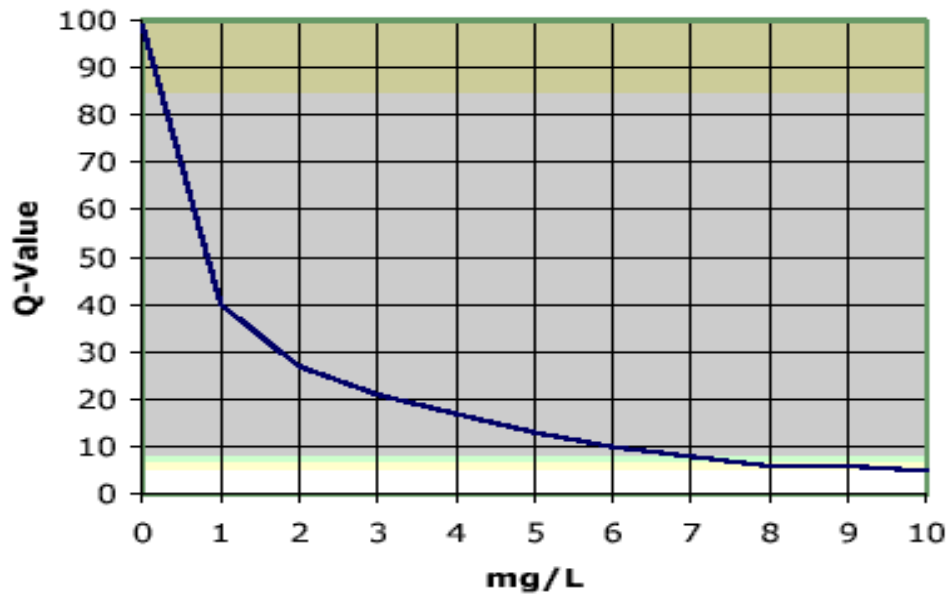
Note: if BOD₅ > 30.0, Q = 2.0

Nitrate Results

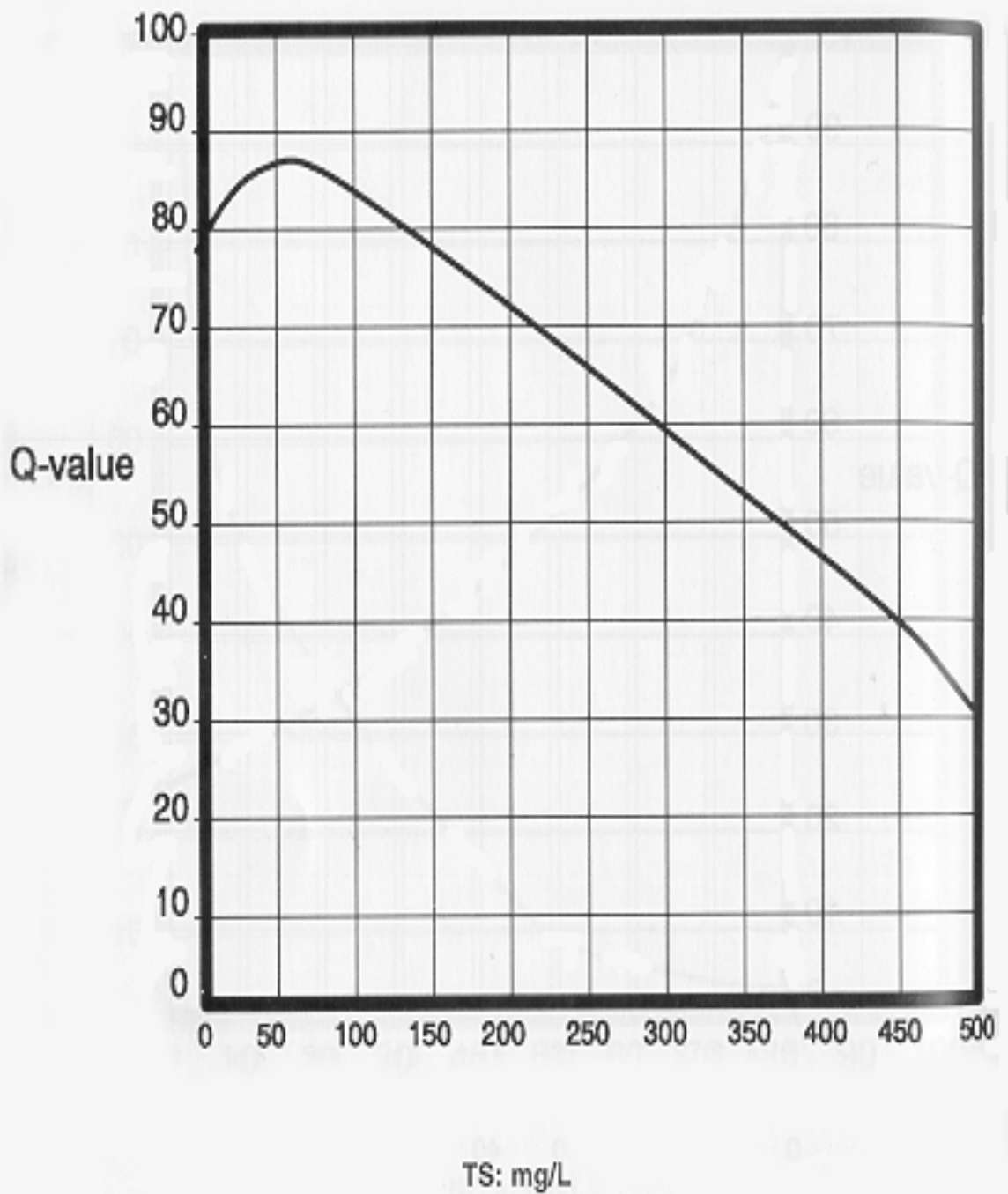


(If Nitrates > 100.0, Q=1.0)

Phosphate Results



(Note: If phosphate > 10.0, Q=2.0)



Note: if TS > 500.0, Q = 20.0