



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA DE  
COAGULANTES ORGÁNICO E INORGÁNICO CON RELACIÓN AL USO DE UN  
COAGULANTE INORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA DEL  
RÍO VILLALOBOS**

**Luisa María Tejeda Méndez**

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, mayo de 2019



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA DE  
COAGULANTES ORGÁNICO E INORGÁNICO CON RELACIÓN AL USO DE UN  
COAGULANTE INORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA DEL  
RÍO VILLALOBOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUISA MARÍA TEJEDA MÉNDEZ**

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, MAYO DE 2019



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lémus
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA DE  
COAGULANTES ORGÁNICO E INORGÁNICO CON RELACIÓN AL USO DE UN  
COAGULANTE INORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA DEL  
RÍO VILLALOBOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de enero de 2013.



**Luisa María Tejeda Méndez**



Guatemala, 30 de Agosto de 2018

Ingeniero

Carlos Wong Davi

Director de Escuela de Ingeniería Química

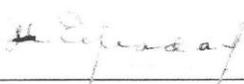
Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Presente.

Por medio de la presente hago constar que apruebo el Informe Final del trabajo de graduación titulado **EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA DE COAGULANTES ORGANICO E INORGANICO CON RELACION AL USO DE UN COAGULANTE INORGANICO EN EL TRATAMIENTO DE CLARIFICACION DEL AGUA DEL RIO VILLALOBOS**, realizado por la estudiante **Luisa María Tejeda Méndez** quien se identifica con el registro académico **200614981**, con CUI/Pasaporte No. 1814211270108 de la carrera de Ingeniería Química. Por lo que lo someto a su consideración para que continúe con los siguientes trámites requeridos.

Agradeciendo la atención de la presente, le saluda respetuosamente,

  
Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias



Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS  
Ingeniero Químico, Col. 685  
M. Sc. Ingeniería Sanitaria  
PROFESOR TITULAR  
Escuela de Ing. Química USAC

Asesor





Guatemala, 23 de febrero de 2019.  
Ref. EIQ.TG-IF.009.2019.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 101-2012 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN  
-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Luisa María Tejeda Méndez**.  
Identificada con número de carné: **1814211270108**.  
Identificada con registro académico: **200614981**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA DE COAGULANTES ORGÁNICO E INORGÁNICO CON RELACIÓN AL USO DE UN COAGULANTE INORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA DEL RÍO VILLALOBOS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Inga. Dimria Lissette Estrada Moreira  
COORDINADORA DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo







**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica  
EIQD-REG-SG-004

Ref.EIQ.TG.031.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **LUISA MARÍA TEJEDA MÉNDEZ** titulado: **"EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA DE COAGULANTES ORGÁNICO E INORGÁNICO CON RELACIÓN AL USO DE UN COAGULANTE INORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA DEL RÍO VILLALOBOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

FACULTAD DE INGENIERIA USAC  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
DIRECTOR

Guatemala, abril 2019

Cc: Archivo  
CSWD/ale



Formando Ingenieros Quimicos en Guatemala desde 1939



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

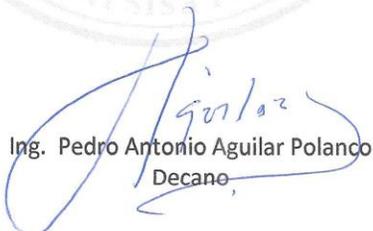


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG.253.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA DE COAGULANTES ORGÁNICO E INORGÁNICO CON RELACIÓN AL USO DE UN COAGULANTE INORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA DEL RÍO VILLOBOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Luisa María Tejeda Méndez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por haberme dado la vida por medio de Cristo y, por haberme concedido todos los medios necesarios y su bendición para culminar esta etapa.
- Mis padres** Luis Alfonso Tejeda y Karla Méndez de Tejeda. Por sus palabras de aliento y ánimo, por su apoyo incondicional, desde siempre y sus buenos consejos en todo lo que hago.
- Mi esposo** William Hernández. Por su apoyo, aliento y ayuda para culminar esta etapa.
- Mis hermanos** Karla María, María Nickté, Luis Alfonso y Krista María. Por la buena amistad, confianza y apoyo que ha existido siempre entre nosotros.
- Mis familiares y amigos** Mis amigos quienes me apoyaron y brindaron buenos consejos para este informe. Mis familiares, tíos y tías, quienes me dieron directamente su apoyo en el momento adecuado, están en mi corazón.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Porque gracias a esta institución, muchos estudiantes logran cumplir sus metas, con una base sólida de buen conocimiento y profesionalismo.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por abrirme sus puertas y enseñarme a utilizar los medios necesarios para desarrollarme profesionalmente.
<b>Mis catedráticos</b>	Porque compartieron su conocimiento y dieron de su tiempo y esfuerzo para impartir sus enseñanzas.
<b>Mi asesor</b>	Jorge Mario Estrada, por su rápido apoyo y guía en este informe.
<b>Representaciones Químicas, S. A.</b>	Por brindarme el apoyo, equipo y los medios necesarios para la realización de este informe.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis.....	XVI
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Tesis.....	1
1.2. Patentes .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. La cuenca del río Villalobos.....	3
2.2. Caracterización física de la microcuenca del río Villalobos .....	4
2.3. Municipios con mayor influencia en las aguas del río Villalobos .....	5
2.3.1. Municipio de Guatemala .....	5
2.3.2. Municipio de Mixco .....	5
2.3.3. Municipio de Villa Nueva .....	5
2.3.4. Municipio de Villa Canales.....	6
2.3.5. Municipio de Amatitlán.....	6
2.3.6. Municipio de Santa Catarina Pinula.....	7
2.3.7. Municipio de San Miguel Petapa .....	7
2.4. Aguas residuales .....	8

2.5.	Tratamiento biológico .....	9
2.6.	Tratamiento fisicoquímico .....	10
2.7.	Características fisicoquímicas en el agua .....	11
2.7.1.	Viscosidad .....	12
2.7.2.	Tensión superficial .....	13
2.7.3.	Densidad .....	14
2.7.4.	Turbiedad .....	15
2.7.5.	Color.....	16
2.7.6.	Potencial de hidrógeno.....	17
2.8.	Prueba de jarras.....	18
2.9.	Coagulación y floculación.....	19
2.10.	Coagulantes .....	22
2.10.1.	Coagulantes orgánicos.....	22
2.10.2.	Coagulantes inorgánicos .....	23
2.10.3.	Sulfato férrico como coagulante .....	24
2.10.4.	Comparación entre sulfato férrico y sulfato de aluminio.....	25
2.11.	Costos relacionados con el tratamiento fisicoquímico.....	27
2.12.	Relación beneficio costo .....	27
3.	MARCO METODOLÓGICO .....	29
3.1.	Variables .....	29
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	29
3.3.	Punto de muestreo .....	30
3.4.	Recursos humanos disponibles .....	31
3.5.	Recursos materiales disponibles.....	31
3.5.1.	Instalaciones .....	31
3.5.2.	Equipo de medición.....	31
3.5.3.	Reactivos.....	34

3.5.4.	Cristalería .....	34
3.5.5.	Utensilios auxiliares .....	35
3.6.	Técnicas cuantitativas y cualitativas .....	35
3.6.1.	Procedimiento.....	35
3.7.	Recolección y tabulación de la información.....	38
3.8.	Análisis estadístico .....	44
3.8.1.	Análisis de varianza unifactorial para las mezclas de coagulantes .....	45
4.	RESULTADOS .....	49
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	55
	CONCLUSIONES .....	61
	RECOMENDACIONES.....	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67
	APÉNDICES .....	69
	ANEXOS .....	75



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Cuenca del lago de Amatitlán y sus ríos .....	4
2.	Mapa de los municipios de Guatemala .....	8
3.	Esquema de un tratamiento fisicoquímico.....	11
4.	Esquema de la medición de turbiedad con turbidímetro .....	16
5.	Equipo de prueba de jarras .....	19
6.	Reacciones en el proceso de coagulación-floculación, modelo de enlace de puente para la desestabilización de coloides.....	21
7.	Estructura de la espermina .....	23
8.	Comparación de los rangos de coagulación e insolubilidad de los iones hidróxido férrico y aluminio .....	26
9.	Imagen del punto de muestreo.....	30
10.	Turbidímetro.....	32
11.	Colorímetro .....	32
12.	Cintas medidoras de pH.....	33
13.	Prueba de jarras.....	33
14.	Balanza analítica .....	34
15.	Muestra de agua en prueba de jarras .....	37
16.	Comparación del costo del sulfato férrico como coagulante y las mezclas realizadas con poliamina N-50.....	49
17.	Costo de cada mezcla utilizada por tratamiento de 1m <sup>3</sup> /h con aguas del río Villalobos .....	50
18.	Porcentaje de remoción con mezcla utilizada en las aguas del río Villalobos respecto de la turbiedad obtenida.....	50

19.	Porcentaje de remoción con cada mezcla utilizada en las aguas del río Villalobos respecto al color obtenido.....	51
20.	Porcentaje de rendimiento con cada mezcla utilizada en las aguas del río Villalobos respecto a la turbiedad obtenida.....	51
21.	Porcentaje de rendimiento de cada mezcla utilizada en las aguas del río Villalobos respecto al color obtenido.....	52
22.	Tendencia del beneficio/costo para el tratamiento de clarificación con cada mezcla respecto de la turbiedad.....	52
23.	Tendencia del beneficio/costo para el tratamiento con cada mezcla respecto del color .....	53

## TABLAS

I.	Aplicaciones del tratamiento biológico .....	9
II.	Viscosidad de algunos líquidos a 25 °C .....	13
III.	Tensión superficial de algunos líquidos a 20 °C.....	14
IV.	Densidades de diversos sólidos y líquidos .....	15
V.	Comparación de parámetros de trabajo del sulfato férrico y sulfato de aluminio .....	26
VI.	Recursos humanos disponibles.....	31
VII.	Relación de mezcla .....	36
VIII.	Datos iniciales de cada muestra.....	38
IX.	Dosis óptima para cada mezcla .....	39
X.	Turbiedad final con cada mezcla .....	39
XI.	Color final con cada mezcla .....	40
XII.	Media de los datos obtenidos.....	40
XIII.	Costo de cada mezcla realizada .....	41
XIV.	Costo de cada mezcla al tratar un metro cúbico de agua por hora .....	41

XV.	Porcentaje de remoción respecto de la turbiedad.....	42
XVI.	Porcentaje de remoción respecto del color.....	42
XVII.	Porcentaje de rendimiento de cada mezcla respecto de la turbiedad.....	42
XVIII.	Porcentaje de rendimiento de cada mezcla respecto del color.....	43
XIX.	Porcentaje de remoción y costo de tratamiento para cada corrida realizada con cada mezcla respecto de la turbiedad .....	43
XX.	Porcentaje de remoción y costo de tratamiento para cada corrida realizada con cada mezcla respecto del color .....	44
XXI.	Experimento de un factor para el tratamiento de clarificación de las aguas del río Villalobos en la turbiedad obtenida luego del tratamiento con cada coagulante (mezcla) utilizado .....	45
XXII.	Análisis de varianza de la clarificación de las aguas del río Villalobos .....	46
XXIII.	Experimento de un factor para el tratamiento de clarificación de las aguas del río Villalobos en la dosis óptima obtenida luego del tratamiento con cada coagulante (mezcla) utilizado.....	46
XXIV.	Análisis de varianza de la clarificación de las aguas del río Villalobos .....	47
XXV.	Análisis de un factor para el tratamiento de clarificación de las aguas del río Villalobos en la dosis óptima obtenida luego del tratamiento con cada coagulante (mezcla) utilizado .....	47
XXVI.	Análisis de varianza de la clarificación de las aguas del rio Villalobos .....	48
XXVII.	Modelo matemático para la relación beneficio/costo del tratamiento de clarificación con cada mezcla respecto de la turbiedad (A) .....	53

XXVIII. Modelo matemático para la relación beneficio/costo del tratamiento de clarificación con cada mezcla respecto de la turbiedad (B)..... 54

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\rho$	Densidad
USD	Dólares americanos
h	Hora
lb	Libra
mP	Mega pascales
mL	Mililitros
ppm	Partes por millón
ft <sup>3</sup>	Pie cúbico
pH	Potencial de hidrógeno
$\eta$	Viscosidad dinámica



## GLOSARIO

<b>Aguas residuales</b>	Aguas que resultan después de haber sido utilizadas en industrias y en domicilios domésticos.
<b>Coagulante</b>	Compuesto que inestabiliza la materia suspendida en forma coloidal a través de la alteración de la capa iónica cargada que rodea las partículas coloidales, favoreciendo la separación de una fase insoluble en el agua por medio de la sedimentación.
<b>Costo</b>	Es el gasto económico que representa la fabricación de un producto o la prestación de un servicio. El costo de un producto está formado por el precio de la materia prima, el precio de la mano de obra directa empleada en la producción, el precio de la mano de obra indirecta empleada para el funcionamiento y el costo de amortización de la maquinaria.
<b>Floculación</b>	Es la aglomeración de partículas desestabilizadas, mediante el uso de un floculante o polímero, llamados flóculos, que por su tamaño y peso tienden a sedimentarse por gravedad.
<b>Poliamina</b>	Cualquier compuesto que contenga dos o más grupos amino, como la espermidina y la espermina,

que son dos componentes tisulares presentes en el ser humano.

**Prueba de jarras**

Equipo que simula los procesos de coagulación y floculación que fomentan la eliminación de los coloides en suspensión y materia orgánica que puede conducir a problemas de turbidez, olor y sabor. Este método permite realizar ajustes en el pH, variaciones en la dosis de coagulante o polímero, alternando velocidades de mezclado a pequeña escala, con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento.

**Río Villalobos**

Río que se encuentra localizado en el departamento de Guatemala. Su trayecto es dentro de la ciudad capital. Tiene una longitud de 21,8 kilómetros en promedio y un perímetro de 58 kilómetros, aproximadamente.

**Sulfato férrico**

Sal de hierro, con fórmula  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , densidad de 1.5g/ml y pH aproximado de 2. Utilizado en solución para el tratamiento de aguas residuales, para remover metales, arsénico y otros contaminantes no metálicos. También para tratar agua para riego tecnificado en la agroindustria.

**Turbiedad**

Dificultad que se presenta en el agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos.

## RESUMEN

En el presente informe se desarrolla un coagulante para tratamiento fisicoquímico de las aguas del río Villalobos, el coagulante se elabora como una mezcla física de coagulantes orgánico e inorgánico tales como una poliamina y sulfato férrico.

Se elaboraron tres relaciones de mezcla para obtener la mezcla de mayor efectividad para el tratamiento de clarificación, y esto compararlo con el tratamiento utilizando solamente sulfato férrico como coagulante.

Las pruebas de clarificación se realizaron con aguas del río Villalobos, escogiéndose estas debido a la cantidad de sólidos disueltos y sólidos en suspensión que acarrean, la complicación que lleva tratarlas y los problemas ambientales que estos causan directamente en el lago de Amatitlán.

Las pruebas de clarificación se realizaron a nivel laboratorio, utilizando una prueba de jarras. En las pruebas se realizaron cinco corridas, y en cada una se encontró las dosis óptimas de cada mezcla realizada y las dosis óptimas utilizando sulfato férrico solamente. Para la determinación de la dosis óptima, se tomaron los valores de la turbiedad final y el color final después de cada tratamiento.

Para completar el tratamiento se utilizó un coadyuvante de carácter anionico, que ayuda a facilitar la aglomeración de los coágulos formados.

Con los valores obtenidos de turbiedad, color y dosis óptima, se procedió a calcular la remoción obtenida de sólidos disueltos y en suspensión con cada mezcla, y con ello el rendimiento que cada mezcla tuvo en el tratamiento.

Se calculó el costo que cada mezcla tiene y el costo de tratamiento para las aguas del río Villalobos.

Con la relación del porcentaje de remoción y el costo de cada mezcla, se hizo una evaluación respecto de la turbiedad y respecto del color, para lo cual se obtuvo que la mezcla que contiene 95 % de sulfato férrico y 5 % de poliamina, es la mezcla con mayor capacidad de remoción, no es la mezcla más costosa.

Los recursos necesarios fueron provistos por la empresa Representaciones Químicas S.A., ya que los resultados obtenidos son parte de su departamento de investigación y desarrollo.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar a escala laboratorio el desempeño de mezclas de sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y poliamina N-50, en relación al uso exclusivo de sulfato férrico para la remoción de color y turbiedad en el proceso de clarificación del agua del río Villalobos.

### Específicos

1. Seleccionar y elaborar las proporciones de mezcla de sulfato férrico y poliamina N-50.
2. Determinar la dosis óptima de sulfato férrico como coagulante para cada muestra de agua por analizar.
3. Determinar la dosis óptima de cada mezcla para cada muestra de agua por analizar.
4. Comparar las dosis óptimas de cada mezcla, respecto de la dosis óptima obtenida usando exclusivamente sulfato férrico.
5. Evaluar los costos de mezcla de cada dosis óptima obtenida.
6. Determinar la relación óptima de coagulantes orgánico e inorgánico y su dosis óptima respectiva, en relación al costo.

## **Hipótesis**

Para este trabajo se realizaron las siguientes hipótesis.

### **Hipótesis nula:**

El uso de mezcla de coagulantes orgánicos e inorgánicos no tiene diferencia significativa con el uso exclusivo de coagulantes inorgánicos.

### **Hipótesis alternativa:**

Existe una mezcla óptima de coagulantes orgánicos e inorgánicos, que supere en rendimiento y reduzca los costos de utilizar exclusivamente un coagulante inorgánico.

## INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los compuestos básicos para la preservación de la vida en el mundo. Cuando este recurso es mal utilizado se vuelve limitado, es decir el uso inadecuado, la falta de reutilización del agua y su adecuado tratamiento provocan alta contaminación y pérdida del recurso hídrico. Según un cálculo estimado en la tierra se encuentran 1,36 mil millones de kilómetros cúbicos de agua, más del 90 % de esto se encuentra en los océanos, alrededor de un 2,15 % está congelada en los glaciares, mayormente en la Antártida y en Groenlandia, y gran parte del 0,65 % restante está en la atmósfera, en las aguas subterráneas, lagos, pantanos y ciénagas.

Lamentablemente solo un 0,0001 % de la hidrosfera se encuentra en los cauces de arroyos y ríos en algún momento, y solamente este porcentaje de agua está disponible para los diferentes usos que el ser humano necesita.

En este estudio se realizan pruebas de clarificación para una posible reutilización de las aguas de río Villalobos, ya que aun existen poblaciones con poco acceso al agua para uso doméstico. La clarificación de las aguas de este río, que posee un alto impacto en la contaminación del lago de Amatitlán, podría aportar progresivamente una mejora a la actual condición que sufre este importante recurso hídrico de Guatemala.

El tratamiento de aguas residuales se vuelve sumamente importante al saber que toda la forma de este mundo, de esta vida, podría perderse si este recurso llegara a su límite. En la actualidad, el tratar las aguas utilizadas industrialmente o de uso doméstico debe ser un compromiso de todos. El

tratamiento fisicoquímico forma parte de los tratamientos de clarificación más rápidos, empleando poco espacio físico para realizarlo. Este tratamiento posee la característica que recurre a aditivos químicos o naturales para su realización, y la cantidad que se requiera dependerá de las características que las aguas por tratar posean.

Se necesita un coagulante adecuado al tipo de agua y un coadyuvante para lograr un adecuado arrastre de sólidos disueltos y sólidos en suspensión que se encuentren en el agua. El sulfato férrico forma parte de las sales coagulantes más utilizadas y es conocido por su buen desempeño, aunque poco utilizado para la clarificación, logrando obtenerse en los resultados turbiedades menores a cinco NTU (unidades nefelométricas de turbidez), utilizando dosis relativamente altas.

Las poliaminas también forman parte de los coagulantes menos utilizados, por su costo, pero posee excelentes resultados en el tratamiento de clarificación, agregando dosis relativamente bajas, a un alto costo de operación. Por lo que en este informe se buscó elaborar una mezcla de estos dos coagulantes que ayude a disminuir la dosis de uso y proveer excelentes resultados en el tratamiento fisicoquímico.

# **1. ANTECEDENTES**

## **1.1. Tesis**

Entre las referencias que se encontraron sobresale la tesis de Claudia Fabiola, Grijalva. Su trabajo fue el único encontrado en la biblioteca, sobre evaluación y comparación de coagulantes para tratamiento de aguas residuales, titulado Análisis comparativo de un polímero coagulante catiónico vrs. sulfato de aluminio en la clarificación de agua en una planta de elaboración de bebidas carbonatadas. Este trabajo compara un coagulante polímero catiónico con un coagulante inorgánico como el sulfato de aluminio, que es uno de los coagulantes inorgánicos más utilizados en la industria. En este caso se evaluará el sulfato férrico, coagulante inorgánico que posee gran rendimiento en el tratamiento y no es muy común dentro de las industrias.

## **1.2. Patentes**

La patente que se utilizará para realizar las mezclas y evaluar la optimización del tratamiento de clarificación de las aguas del río Villalobos es la patente No. 3 953 330, de 1976, realizada por los inventores: Richard G. Tonkyn, Norman Vorchheimer, William Fowler y Richard Heberle. Patente que presenta ejemplos sobre la realización de mezclas físicas de coagulantes inorgánicos con coagulantes inorgánicos como la poliamina. Muestra también las relaciones de mezcla recomendadas para hacer más eficiente la remoción de sólidos disueltos y sólidos en suspensión.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. La cuenca del río Villalobos**

La cuenca del lago de Amatitlán se encuentra conformada por varias subcuencas, las que finalmente convergen en el río Villalobos, en el lado norte del lago y el río Michatoya al sur. Los ríos tributarios principales del río Villalobos son: Platanitos, Pinula, Las Minas, Tulujá, El Bosque, Molino, San Lucas y Parrameño.

La cuenca del río Villalobos se encuentra situada dentro del sistema montañoso formado por la faja volcánica del Pacífico que atraviesa al país y que se compone de rocas terciarias y cuaternarias. El valle es el resultado de una depresión de origen tectónico de dirección NE-SO en una extensión aproximada de 800 km<sup>2</sup>.

Las temperaturas varían entre 15 a 28 grados celsius. La precipitación pluvial se establece dentro del rango de 650 a 1 500 mm al año y los vientos son de predominancia de norte a sur.

Los caudales de los diferentes ríos que se integran dentro del río Villalobos poseen gran importancia y proveen información sobre la cantidad de contaminantes que se están introduciendo dentro del río, así como también sobre cuáles son los ríos que mayormente colaboran en el aumento de contaminación.

Figura 1. **Figura 1. Cuenca del lago de Amatitlán y sus ríos**



Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán –  
AMSA. *Folleto nivel medio 2010*

[http://www.pdh.org.gt/archivos/descargas/Biblioteca/Informes%20Especiales/informe\\_supervisin\\_lago\\_de\\_amatitlan.pdf](http://www.pdh.org.gt/archivos/descargas/Biblioteca/Informes%20Especiales/informe_supervisin_lago_de_amatitlan.pdf). Consulta 11 de febrero 2016.

## 2.2. **Caracterización física de la microcuenca del río Villalobos**

- Área: 4 002 miles de hectáreas
- Área: 10,53 %
- Longitud: 21,80 km
- Ancho: 6,75 km
- Perímetro: 58,00 km

### **2.3. Municipios con mayor influencia en las aguas del río Villalobos**

Hay varios municipios que actualmente contribuyen a la contaminación del río Villalobos, debido a la localización de drenajes, tanto residenciales y empresariales como pluviales, y a otras actividades que personas realizan a orillas de este río como lavar ropa, bañarse, tirar basura, entre otras.

#### **2.3.1. Municipio de Guatemala**

Es el municipio más importante de Guatemala, en el cual se concentra el poder político y económico del país, así como la mayor cantidad de industria y comercio. El departamento fue creado por decreto de la Asamblea Constituyente del Estado de Guatemala de fecha 4 noviembre 1825, que dividió el entonces territorio en siete departamentos. Tiene una altura de 1 502 m, SNM, una extensión de 2 253 km<sup>2</sup> y una población de 2 538 227 habitantes.

#### **2.3.2. Municipio de Mixco**

Este municipio está ubicado en el extremo oeste de la ciudad capital. Se localiza a 90° 34' de longitud oeste y 14° 16' de latitud norte, con un área total de 99 km<sup>2</sup> de los cuales 45,26 km<sup>2</sup> están dentro de la cuenca del río Villalobos. Es un municipio prácticamente integrado a la ciudad capital, a través del comercio, producción, transporte, vías de comunicación y en cierta medida, en aspectos de salubridad en cuanto al manejo de aguas residuales.

#### **2.3.3. Municipio de Villa Nueva**

Es un municipio ubicado al sur de la ciudad capital, posee colindancias al norte con el municipio de Guatemala km. 07; al oriente con San Miguel Petapa,

al sur con Amatitlán km. 25,2; al poniente con Santa Lucia Milpas Altas km 28. Posee una extensión territorial de 114 km<sup>2</sup> de área en total de la que una parte de su extensión se encuentra dentro de la cuenca del lago de Amatitlán.

#### **2.3.4. Municipio de Villa Canales**

Municipio del departamento de Guatemala. La estadística indica 160 km<sup>2</sup>. Colinda al norte con Guatemala; al este, con Santa Catarina Pinula, Fraijanes (Guatemala) y Barberena (Santa Rosa); al sur, San Vicente Pacaya (Escuintla) y Barberena (Santa Rosa); al oeste, Guatemala, Petapa, Amatitlán (Guatemala) y San Vicente Pacaya (Escuintla). La cabecera está en una planicie 5 km al norte del lugar conocido como El Relleno del lago de Amatitlán, al lado este del río Villalobos y al oeste de los ríos Tuluja y El Bosque, al oeste de la sierra de Canales que al sur se extiende hacia el lago de Amatitlán.

#### **2.3.5. Municipio de Amatitlán**

Se localiza a 28 km desde la ciudad capital en la ruta que conduce al Pacífico. Tiene una extensión territorial de 204 km<sup>2</sup>, divididos en una cabecera municipal, catorce aldeas y quince caseríos.

Aunque el INE (Instituto Nacional de Estadística) estima una población de 85 000 habitantes, diversos estudios de campo consideran que son entre 115 y 125 000 habitantes de este municipio. La ciudad está situada a 1 190 metros de altura sobre el nivel del mar. Su clima templado se ha visto modificado debido a la deforestación y alteración del régimen pluvial, por lo que actualmente es más cálido. Su topografía es plana con predominancia de suelo arenoso. Uno de los atractivos más importantes de Amatitlán es su lago, el segundo más grande de

Guatemala, que se encuentra en la parte norte del municipio a una milla de la ciudad y tiene una extensión aproximada de 15,2 km<sup>2</sup>.

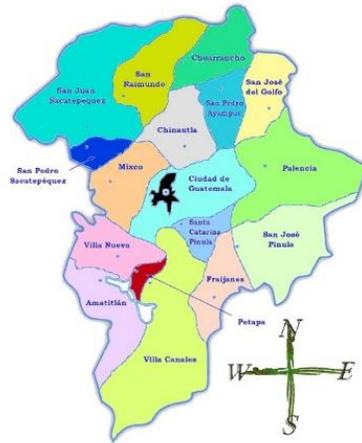
### **2.3.6. Municipio de Santa Catarina Pinula**

Municipio con área aproximada de 48 km<sup>2</sup>. Colinda al norte con Guatemala; al este, con San José Pinula y Fraijanes; al sur, con Fraijanes y Villa Canales; al oeste, con Villa Canales y Guatemala. La cabecera está al sureste de la capital y tiene varias vías de acceso. Por la aldea Puerta Parada, por la carretera Interamericana CA-1, se aparta la ruta nacional 2 que 6 km. al oeste lleva a la cabecera, ubicada al sur del río Pinula.

### **2.3.7. Municipio de San Miguel Petapa**

Municipio del departamento de Guatemala. Municipalidad de cuarta categoría área aproximada según estimación del Instituto Geográfico Nacional 23 km<sup>2</sup>. Nombre geográfico oficial: Petapa. Colinda al norte, con Villa Nueva y Guatemala (Guatemala); al este, con Villa Canales (Guatemala); al sur, con Amatitlán (Guatemala); al oeste, con Villa Nueva. Tiene litigios con los municipios de Guatemala, Villa Canales y Villa Nueva.

Figura 2. **Mapa de los municipios de Guatemala**



Fuente: Gifex, *Mapas del mundo*. <http://www.oocities.org/baitu.geo/guatemala/>. Consulta: 10 de febrero de 2016.

## 2.4. **Aguas residuales**

Se consideran aguas residuales, a los líquidos que han sido utilizados en actividades diarias en una ciudad. Las cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales son: aguas domésticas o urbanas, aguas residuales industriales, escorrentías de usos agrícolas, pluviales.

El servicio de agua domiciliar es relativamente barato, como resultado de esto, las economías del tratamiento de aguas residuales son bastante críticas ya que lleva una inversión alta en principio. Utilizando procesos bastante sofisticados se puede llegar a obtener agua potable procedente de aguas residuales, pero para ello se deben llevar a cabo cuidadosamente varias etapas y esto representa un costo elevado.

Los contaminantes en las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. En la mayoría de ocasiones

no es ni práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de las aguas residuales.

## 2.5. Tratamiento biológico

El tratamiento biológico se lleva a cabo por la actividad de los microorganismos, con el objeto de eliminar sólidos coloides no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. Los microorganismos se nutren de diversos compuestos que contaminan las aguas generando flóculos por agregación que se separan en forma de lodos o fangos.

Los tratamientos biológicos pueden ser aerobios o anaerobios. En el proceso de tratamiento aerobio del agua residual los microorganismos emplean la materia orgánica presente, junto al oxígeno disuelto, para producir el crecimiento de las células y  $\text{CO}_2$  y agua como productos finales.

En el proceso de tratamiento anaerobio se transforman los residuos orgánicos en metano y dióxido de carbono, en ausencia de aire. Los microorganismos anaerobios pueden estar dispuestos en cultivo en suspensión o cultivo fijo.

Tabla I. **Aplicaciones del tratamiento biológico**

<b>Aplicaciones de tratamientos biológicos</b>	
•	Eliminación de materia orgánica carbonosa del agua residual
•	Nitrificación
•	Desnitrificación
•	Eliminación de fósforo
•	Estabilización de fangos

Fuente: Bureau Veritas Formación. *Manual para la formación en medio ambiente*, p. 229.

## 2.6. Tratamiento fisicoquímico

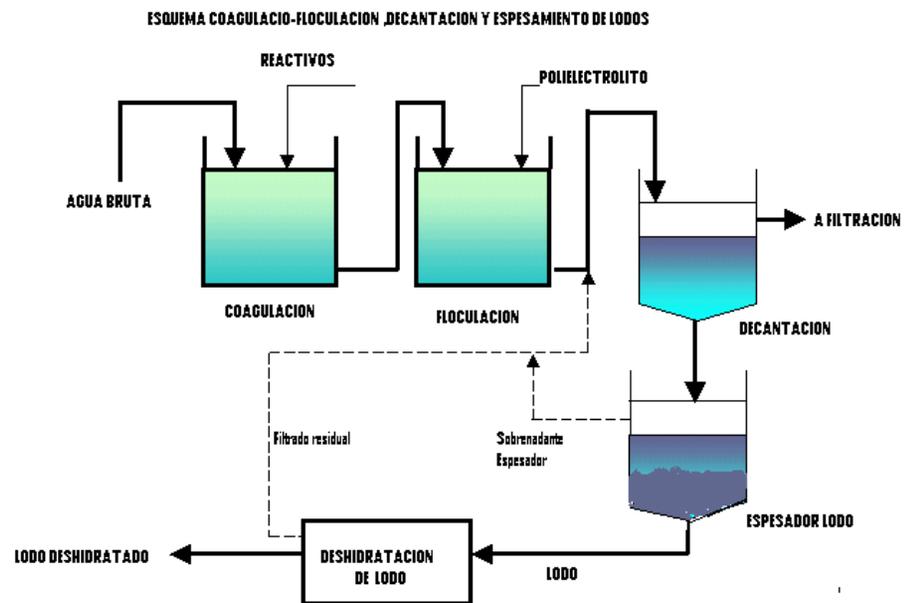
Los sistemas de tratamiento fisicoquímico completo de las aguas residuales ofrecen tanto ventajas como desventajas con respecto a los sistemas de tratamiento biológico. Los costos de las instalaciones de plantas físico-químicas pueden ser menores que los de las instalaciones de tratamiento biológico, requiriendo normalmente menos terreno debido al tamaño de los tanques pero, necesitan un mayor control del proceso y el uso y dosificación de los químicos que cada planta necesita. Estos químicos pueden ser coagulantes orgánicos o sales, reguladores de pH como soda, cal o ácidos y coadyuvantes como poliacrilamidas.

Básicamente un tratamiento fisicoquímico consta de las siguientes etapas:

- Filtración inicial: se busca eliminar espuma y objetos sólidos, que puedan interferir con el tratamiento.
- Trampas de grasa: esto depende del tipo de agua residual por tratar, las trampas logran atrapar la mayor cantidad de grasas posibles.
- Regulador de pH: si el agua que se está tratando posee un pH muy alcalino o muy ácido, se utilizará un regulador. Los más empleados son la cal, la soda, el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico.
- Clarificación: en esta etapa se adiciona un agente coagulante y un agente floculante, que se encargan de precipitar los sólidos en suspensión que causan la turbidez en el agua, ya que son difíciles de filtrar y pueden tardar hasta 755 días para precipitar. Además, dan características de turbiedad y color al agua residual.
- Sedimentación: al ser precipitados todos los sólidos en suspensión se da un tiempo determinado para la sedimentación, para que puedan ser removidos en forma de lodos.

- Filtración: los lodos residuales del tratamiento se filtran para que el proceso de secado sea más rápido.
- Adsorción: dependiendo del tipo de agua que se esté tratando se utiliza carbón activado para eliminación de olores y algunos compuestos.
- Desinfección: esta etapa depende del uso que se requiera para el agua tratada.

Figura 3. **Esquema de un tratamiento fisicoquímico**



Fuente: Aguaunidad. *Procesos de potabilización*.

<https://sites.google.com/site/aguaunidad12/procesos-de-potabilizacio>. Consultado el 12 de febrero de 2016.

## 2.7. Características fisicoquímicas en el agua

Son las características que se deben tomar en cuenta cuando se proceda a realizar un tratamiento en aguas residuales, ya que el tipo de tratamiento que

necesita el agua depende directamente de ellas, algunas con mayor importancia que otras para la elección del tratamiento.

### **2.7.1. Viscosidad**

El movimiento irregular de las moléculas en un líquido y un gas en general, y particularmente en el agua, da lugar a que una parte de este pueda desplazarse respecto de otra fluyendo. No obstante, las fuerzas de atracción entre las moléculas se oponen a este desplazamiento, y dan lugar a una resistencia, a la cual se le denomina viscosidad. La formulación matemática de esta propiedad es la ley de Newton de la viscosidad, que se describe en la siguiente fórmula:

$$f = \mu \frac{u}{d} (A)$$

[Ecuación 1]

En esta,  $f$  es la fuerza tangencial necesaria para mantener una diferencia de velocidad  $u$  entre dos capas paralelas de líquido de sección  $A$  moviéndose en el mismo sentido y separadas por una distancia  $d$ . La viscosidad  $\eta$  se expresa en poises, siendo  $1 \text{ poise} = 1 \text{ dina s cm}^{-2}$ .

La viscosidad del agua exhibe la misma tendencia de otros líquidos de disminuir, al aumentar la temperatura y a aumentar con el incremento de la presión, de forma similar a la de la mayoría de líquidos.

Tabla II. **Viscosidad de algunos líquidos a 25 °C**

Sustancia	Agua	Etanol	Ácido sulfúrico	Fenol	benceno	Aceite de oliva
$\eta/mP$	8,90	17,0	190	6,0	9 500	800

Fuente: RODRÍGUEZ, José Miguel. *Fisicoquímica de aguas*, p. 9.

### 2.7.2. Tensión superficial

Una molécula en el interior de una masa de agua está rodeada completamente por otras moléculas y es atraída en todas las direcciones con igual intensidad. Si la molécula está situada en la superficie del líquido, será atraída por las moléculas que se hallan en la zona inferior ubicadas bajo la molécula en cuestión, de esta forma, causa una fuerza resultante hacia abajo que tiende a retener la molécula superficial. La superficie del agua se comportaría como una ligera membrana, evitando en cierta manera la rotura de la superficie, debido a ello algunos insectos pueden caminar sobre ella. Estas fuerzas también favorecen la forma esférica de las gotas de agua, así como la formación de meniscos o curvaturas de líquido cuando se vierte en un recipiente.

La tensión superficial, ( $\gamma$ ) se define como la energía necesaria por unidad de área para expandir la superficie del líquido, o más bien, como el trabajo necesario para incrementar, a temperatura constante, la superficie de líquido en una cantidad igual al área de una cara de un cubo que contiene una masa de líquido igual a un mol de vapor.

Tabla III. **Tensión superficial de algunos líquidos a 20 °C**

Sustancia	Agua	Etanol	Acetona	Benceno	Mercurio	CCl <sub>4</sub>
$\gamma$ /dina cm <sup>-1</sup>	72,75	22,27	23,70	28,88	466,0	26,77

Fuente: RODRÍGUEZ, José Miguel. *Fisicoquímica de aguas*, p. 11.

### 2.7.3. Densidad

La densidad del agua (es decir su masa por unidad de volumen) es una propiedad fuertemente afectada por la acción de los enlaces de hidrógeno existentes en el líquido. Es un hecho conocido que el hielo flota sobre la superficie de agua líquida, con las siguientes consecuencias prácticas que esto supone. Si no fuera así, las masas de agua naturales se congelarían desde el fondo hacia la superficie del líquido, y la vida de los cauces hídricos, dificultando también todo un ecosistema marino provocando su muerte.

En concreto, la densidad del agua es muy baja si se compara con la de otras sustancias habituales, además, exhibe una evolución atípica en el sentido de que aumenta con la temperatura hasta presentar un valor máximo de 1 000 g cm<sup>-3</sup> a una temperatura de 3,98°C. A partir de lo cual la densidad disminuye con nuevos aumentos de temperatura.

Tabla IV. **Densidades de diversos sólidos y líquidos**

Sustancia	Peso promedio, lb/ft <sup>3</sup>
Bronce	481
Iridio	1 383
Plomo	710
Papel	58
Azufre	125
Alcohol etílico (100 %)	49
Agua de mar	64
Aceites vegetales	58
Ácido sulfúrico (87 %)	112
Agua, 4°C densidad máxima	62,428

Fuente: PERRY, Roberth H. *Biblioteca del ingeniero químico*, p. 3-11.

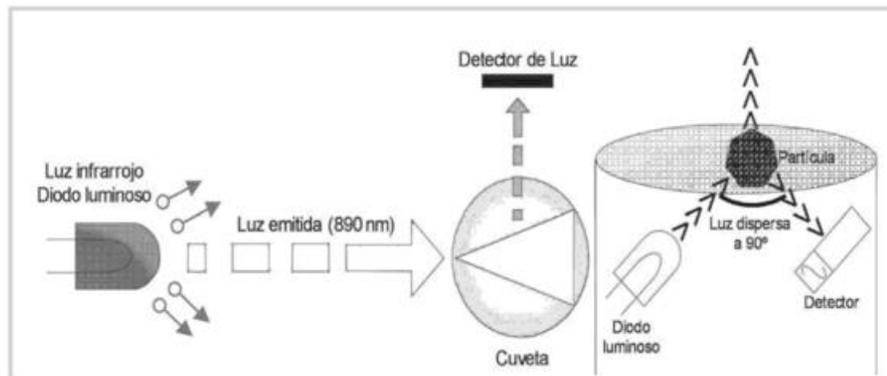
#### 2.7.4. **Turbiedad**

Se define como turbiedad de una muestra de agua, a la medida de la pérdida de su transparencia, ocasionada por el material particulado o en suspensión que arrastra la corriente de agua. Es un parámetro que se basa en la cantidad de luz absorbida o dispersada por la materia sedimentable y coloidal. La turbiedad ocasionada por la materia coloidal puede ser resultado de la presencia de detergentes en el agua, jabones o emulsificadores. También puede ser ocasionado por arcillas, limos, algas, etcétera, que se mantienen en suspensión debido a la fuerza de arrastre de la corriente o a su naturaleza coloidal. En el agua natural la turbiedad produce cierto color, dificulta en la penetración de la luz a través de la columna de agua y, por tanto, interfiere en la fotosíntesis.

La medición de la turbiedad se realiza por comparación entre la intensidad de la luz dispersa en una muestra y la luz dispersa para una suspensión de referencia en las mismas condiciones.

Para la medición de la luz se utilizan instrumentos llamados turbidímetros o nefelómetros, los resultados de las mediciones se expresan en unidades nefelométricas de turbiedad (NTU).

Figura 4. **Esquema de la medición de turbiedad con turbidímetro**



Fuente: DELGADILLO, Oscar. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. p.55.

### 2.7.5. Color

El color es una característica que se debe a varios causantes y se pueden medir dos tipos de colores, el color verdadero que se define como el que se produce por sustancias disueltas y que es de gran utilidad en las mediciones de agua potable. El color aparente es el que se puede percibir a simple vista, está dado por los sólidos en suspensión más el color verdadero en la muestra. El color se mide en unidades de platino cobalto, que es el método frecuentemente utilizado.

El color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual. Cuando el color que presenta es café claro, el agua residual lleva aproximadamente seis horas después de su descarga.

Cuando el color es un gris claro, el agua ha sufrido algún grado de descomposición. Cuando el color que presenta es un gris oscuro o negro, se trata de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacteriana en condiciones anaerobias.

### **2.7.6. Potencial de hidrógeno**

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución o sustancia, el pH indica la concentración de iones hidronio ( $H_3O^+$ ) presentes en determinadas sustancias. Es una medida del balance de los iones de hidrógeno [ $H^+$ ], y los iones hidroxilo [ $OH^-$ ], en el agua. La escala de pH va de 0 a 14, considerándose como valor neutral el  $pH=7$ . El agua que presente un pH con valores arriba del 7 es considerada básica o alcalina, y el agua que presente valores de pH por debajo de 7 es considerada ácida.

El término pH fue acuñado por el químico danés Sørensen, quien lo definió como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno. Se define como:

$$pH = -\log[H^+]$$

[Ecuación No. 2]

Es usado de esta forma para definir una escala fácil y práctica de medir y usar, esto significa que cada número sucesivo de pH es diez veces mayor que el anterior.

El impacto ambiental más significativo del pH comprende efectos sinérgicos, estos efectos comprenden la combinación de dos o más sustancias que producen efectos mayores a su simple adición. El escurrimiento de agua en áreas agrícolas, residenciales e industriales puede contener hierro, aluminio,

amoníaco, mercurio u otros componentes. El pH puede determinar los efectos tóxicos, si los hubiere, de estas sustancias.

## **2.8. Prueba de jarras**

La prueba de jarras es un método estandarizado para tratamiento de clarificación a nivel de laboratorio. Las pruebas ayudan a determinar la dosis óptima de coagulante y floculante, así como también provee dosis de regulador de pH, siendo este un ácido o un álcali, según sea el requerimiento del agua por tratar.

Los parámetros que se determinan en la clarificación del agua son la turbiedad del agua al inicio y al final, el color al inicio y al final del tratamiento, así como también el potencial de hidrógeno. Este último es importante ya que algunos coagulantes son responsables de variar su valor y este debe ser neutro, ya sea que se deseche el agua o bien que se le de algún otro uso.

Existe gran variedad de equipos para prueba de jarras, pero en todos, su versatilidad radica en utilizar cinco o seis frascos con un volumen que puede variar entre 1 y 3 litros de agua, a los cuales son agregadas diferentes dosis de coagulante, mientras se agita a 200 rpm durante un tiempo determinado y luego se suspende la agitación rápida, dejando una agitación suave a 20 rpm entre cinco y diez minutos para la aplicación del floculante y la precipitación.

La agitación rápida en la etapa de la coagulación es indispensable y la agitación lenta en la etapa de floculación lo es también, por lo que es necesario que un sistema de clarificación cuente con los rangos de velocidad permitidos para el buen funcionamiento de los componentes químicos utilizados en el proceso.

Figura 5. **Equipo de prueba de jarras**



Fuente: Equipo de representaciones químicas S.A.

## 2.9. **Coagulación y floculación**

El proceso de tratamiento fisicoquímico incluye dos términos, la coagulación y la floculación, que en sí son dos etapas distintas en el tratamiento. En 1990 se estableció el acuerdo para estandarizar los conceptos de estos dos términos.

La coagulación es el proceso en el que se da la desestabilización de los componentes en una sustancia, por la superación de las fuerzas que mantienen su estabilidad, al agregar otro componente dentro de la sustancia.

La floculación es la etapa que sucede a la coagulación, es el proceso en el que las partículas ya desestabilizadas en la coagulación, se unen para formar

grandes partículas estables o aglomerados, que por su alta densidad precipitan. Esto sucede al agregar una sustancia que promueva la unión de las partículas. Se ha observado que con un polímero aniónico se obtiene un tratamiento más económico, aun cuando las partículas sólidas del agua estén cargadas negativamente.

La Mer y Healy<sup>1</sup> han desarrollado una teoría de enlace de puente que da un modelo cualitativo aceptable que explica la capacidad de los polímeros de elevado peso molecular para desestabilizar las dispersiones coloidales.

Para una desestabilización eficaz, la molécula de polímero debe contener grupos químicos que puedan interaccionar con los lugares de la superficie de la partícula coloidal, cuando una molécula polimérica se pone en contacto con una coloidal, algunos de estos grupos se adsorben en la superficie, dejando el resto de la molécula en disolución.

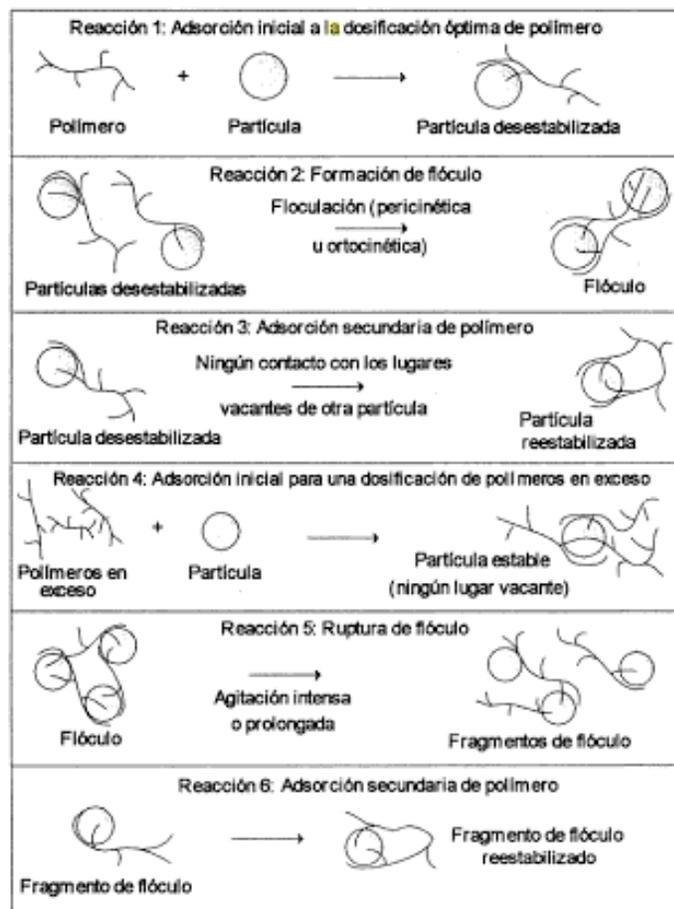
Si una segunda partícula con algunos lugares vacantes (sin adsorción) se pone en contacto con estos segmentos que quedaron en disolución, puede ocurrir la formación de un complejo partícula-polímero, en el cual el polímero sirve de puente. Con el tiempo algunos segmentos de molécula polimérica, se adsorben eventualmente en otros lugares de la partícula original, en esta forma el polímero ya no es capaz de servir de puente. Las dosificaciones de polímero muy elevadas producen un coloide reestabilizado y no hay disposición de lugares para la formación de puente entre partículas.

---

<sup>1</sup> AGUILAR, M.I. *Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales, coagulación-floculación*  
p. 42

En ciertas condiciones un sistema que ha sido desestabilizado y agregado, puede ser reestabilizado por agitación prolongada, debido a que se puede dar la rotura de los enlaces polímero-superficie y posterior repliegue. Las reacciones descritas anteriormente se detallan a continuación, para una mejor comprensión del proceso de coagulación y floculación.

Figura 6. **Reacciones en el proceso de coagulación-floculación, modelo de enlace de puente para la desestabilización de coloides**



Fuente: AGUILAR, M.I. *Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales, coagulación-floculación*

p. 41.

## **2.10. Coagulantes**

Los coagulantes son sustancias químicas utilizadas para el proceso de coagulación en el tratamiento de aguas, algunos de ellos son inorgánicos y los más nuevos son polímeros orgánicos. Estos coagulantes deben poseer una carga mayor a la que mantiene a los coloides en suspensión, generalmente son coagulantes de naturaleza catiónica, ya que las partículas coloidales en el agua poseen carga aniónica, de esta forma se logra que las partículas se estabilicen con el coagulante.

### **2.10.1. Coagulantes orgánicos**

Existe gran diversidad de coagulantes orgánicos, estos son provenientes de material natural, tal como celulosa, polímeros, aceites, entre otros.

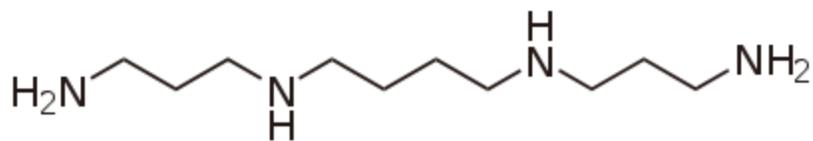
Estos coagulantes poseen actualmente un alto costo en la industria, pero poseen la ventaja de disminuir las dosis en el tratamiento de clarificación, algunos de ellos, gracias a su alto rendimiento en la remoción, tienden a no necesitar un ayudante en la etapa de floculación, sino que estos coagulantes mismos forman flóculos bastante pesados y bien aglomerados que precipitan solos y en poco tiempo.

Las poliaminas forman parte de estos coagulantes, generalmente son de carga catiónica debido a su estructura molecular y se ha comprobado su buen funcionamiento en el tratamiento de clarificación, pero su costo suele ser elevado y mundialmente hay pocos fabricantes.

Las poliaminas constituyen un grupo de sustancias naturales que se encuentran en cantidades apreciables en todas las células vivas. Las más

importantes de este grupo son la putrescina, espermidina y espermina, que tienen la común característica de ser aminas alifáticas. Su naturaleza de bases orgánicas les permite interaccionar con una gran variedad de componentes celulares, se pueden unir a través de fuerzas iónicas con los ácidos nucleicos, proteínas y fosfolípidos que contienen grupos con cargas negativas. Asimismo, pueden establecer uniones tipo hidrógeno o interacciones hidrofóbicas con diferentes clases de moléculas o estructuras.

Figura 7. **Estructura de la espermina**



Fuente: DRAINAS, DIONYSIOS, BIOMEDICA LIFE SCIENCES S.A. *Conjugados de poliamina con retinoides ácidos y preparación de los mismos*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Espermina>.

Consulta: 30 de marzo de 2016.

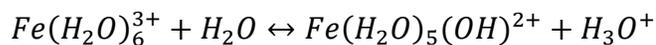
### **2.10.2. Coagulantes inorgánicos**

Los coagulantes inorgánicos, son en su mayoría, sales férricas o sales de aluminio, tales como: el sulfato de aluminio, el policloruro de aluminio, el sulfato férrico, el cloruro férrico, y uno menos utilizado, el sulfato ferroso. También se ha utilizado el hidróxido de calcio, el cual proporciona resultados menos favorables a los anteriormente mencionados, por lo que su uso se ha limitado como agente para elevar el pH.

La capacidad que el aluminio y el hierro tienen para desestabilizar las partículas coloidales presentes en las aguas residuales, se debe a que son metales trivalentes, Al (III) y Fe (III).

Los iones acuometálicos, en los que se presentan estos metales trivalentes, son ácidos, es decir, son donadores de protones. El agregar una sal férrica o aluminica al agua en concentraciones inferiores al límite de solubilidad, el hidróxido metálico  $(Fe(H_2O)_6)^{3+}$  da lugar a la formación de monómeros, dímeros y quizá pequeños complejos poliméricos hidroxometal, además del ion libre acuometal.

Una de las reacciones típicas es la siguiente:

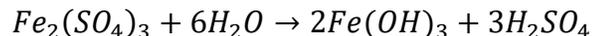


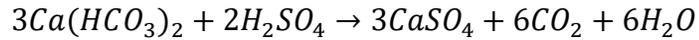
### **2.10.3. Sulfato férrico como coagulante**

El uso del sulfato férrico como coagulante se ha desarrollado desde hace años, este es un coagulante muy efectivo que funciona en un amplio rango de pH. El sulfato férrico da como resultado una rapidez en la coagulación y floculación, y sus características de sedimentación resultantes son muy buenas debido al floculo de alta densidad formado.

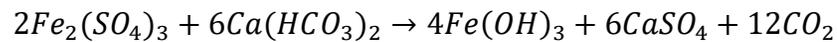
La dosis óptima del sulfato férrico en el tratamiento de clarificación es fluctuante y depende del tipo de agua con que se esté trabajando, pero se obtienen como resultados parámetros de turbiedad y color bastante bajos, a dosis óptimas de trabajo.

En la química y física de la coagulación y la floculación del sulfato férrico en el tratamiento de agua, ocurren reacciones en segundos luego que el hierro trivalente soluble es agregado al agua cruda con cierta dureza, de ahí el  $Ca(HCO_3)_2$ , a continuación se presentan las reacciones:





Mediante estas reacciones se puede ver claramente el curso de la coagulación química que dicta la calidad del agua producida. El sulfato férrico es muy soluble en agua haciendo que el hierro trivalente ( $Fe^{3+}$ ) disponible para las reacciones anteriores transforme al coagulante en hidróxido férrico:

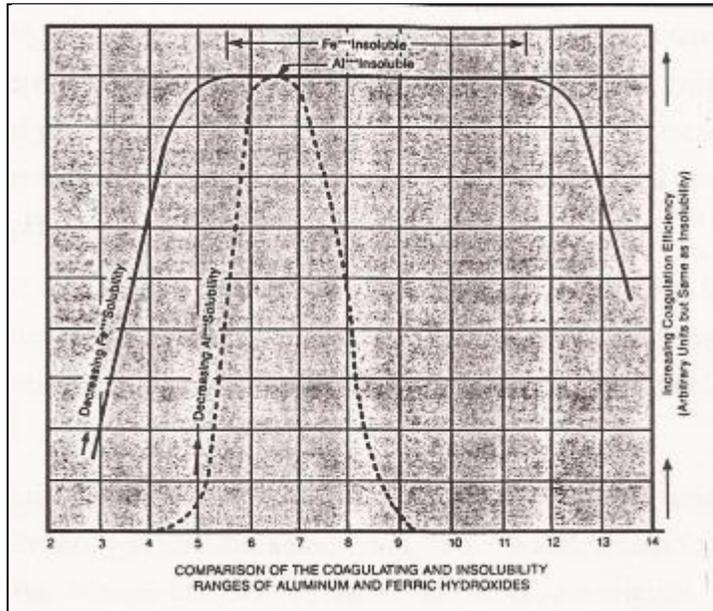


Para que el coagulante sea efectivo debe tornarse insoluble durante la reacción y mantenerse así. El sulfato férrico es un coagulante efectivo sobre el rango completo de pH y es normalmente encontrado en el tratamiento de agua como hidróxido férrico, el cual es formado a partir del sulfato férrico como lo muestra la reacción anterior.

#### **2.10.4. Comparación entre sulfato férrico y sulfato de aluminio**

Algunas de las características más importantes son la estabilidad que presenta el sulfato férrico frente al sulfato de aluminio. El hidróxido de aluminio formado por la reacción del sulfato de aluminio y agua cruda actúa en un rango de pH mucho más estrecho que el hidróxido férrico formado por la misma reacción, ya que el aluminio produce un hidróxido anfotérico. Pero el hidróxido férrico es insoluble y permanece así dentro del rango de pH 5,5 a 11, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 8. **Comparación de los rangos de coagulación e insolubilidad de los iones hidróxido férrico y aluminio**



Fuente: GONZÁLES, Susana E., *Diseño de una línea para la producción de sulfato férrico*. p. 17.

Los coagulantes, sulfato férrico y de aluminio, poseen sus ventajas y sus desventajas, algunas de ellas radican en la sobredosificación del producto, otras en el funcionamiento del producto en las condiciones iniciales del agua y otras en los efectos que causan al ser desechadas las aguas en los cuerpos hídricos. En la siguiente tabla se mencionan algunos de estos efectos.

Tabla V. **Comparación de parámetros de trabajo del sulfato férrico y sulfato de aluminio**

Parámetro	Sulfato de Aluminio	Sulfato férrico
pH	No modifica al sobredosificar	Modifica al sobredosificar

Continuación de la tabla V.

Color	No modifica al sobredosificar	Modifica al sobredosificar
pH de trabajo	Puede no funcionar si está fuera de rango (6-9)	Funciona en amplio rango (4-9)
Residuos de metal	Dañino para la salud	No dañino, micronutriente para plantas

Fuente: elaboración propia.

### **2.11. Costos relacionados con el tratamiento fisicoquímico**

Los costos relacionados con este tipo de tratamiento se ven afectados por los químicos necesarios para la clarificación del agua. En algunos casos, es necesario aplicar un regulador de pH, un coagulante (orgánico o inorgánico) y un coadyuvante, ayudante de floculación. Dependiendo de los parámetros del agua residual se necesitará aplicar el regulador de pH.

Cuando ya se cuenta con las instalaciones necesarias para el tratamiento fisicoquímico (ver sección 2.6), y se obtiene el coagulante adecuado y el coadyuvante, se procede a conocer las dosis adecuadas para el tratamiento, lo cual conlleva a conocer el costo que tendría tratar el volumen de agua necesario, o bien el caudal por tratar.

### **2.12. Relación beneficio costo**

Esta es la relación que indica el retorno en dinero obtenido por cada unidad monetaria invertida. Este es un método que se utiliza en proyectos, tales

como vías de comunicación, construcción de represas, tratamiento de residuos, entre otros.

La relación beneficio-costo ayuda a decidir acerca de la justificación económica del proyecto. La relación usual se define:

$$R_{B/C} = \frac{\textit{beneficios}}{\textit{costos}}$$

**[Ecuación No. 3]**

Los beneficios se definen como la diferencia entre las ventajas y las desventajas para el usuario o la diferencia entre los beneficios positivos y los beneficios negativos para el usuario.

Para calcular la relación, los beneficios y los costos se determinan en términos de los valores presentes o los valores anuales uniformes equivalentes.

En el caso de analizar la factibilidad de tecnologías nuevas a través de un presupuesto parcial, este índice se puede calcular tomando en cuenta solo los costos variables y no los costos totales (que incluyen los costos fijos) pues la mayor parte de las veces son los únicos costos que son afectados por la introducción de la tecnología. Cuando la relación es igual a uno, el productor no gana ni pierde. Relaciones mayores a uno indican ganancia y menores a uno, pérdida.

### **3. MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Variables**

Las variables dependientes que se toman para este estudio son: la relación de la mezcla entre coagulante inorgánico y coagulante orgánico y la dosis de mezcla que se utilizaba en cada prueba. Esta dosis se mide en partes por millón (ppm).

Las variables independientes en este estudio son: el color del agua por tratar, medido en unidades de platino cobalto (UPC), la turbiedad del agua medida en unidades nefelométricas de turbiedad (NTU) y el pH del agua.

#### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

El estudio se realizará utilizando aguas del río Villalobos, para determinar la dosis óptima de cada mezcla realizada, tomando datos iniciales y finales de turbiedad y color para definir la dosis óptima. Las pruebas se realizarán en una prueba de jarras para simular una clarificación de un tratamiento fisicoquímico.

La prueba es de tipo cuantitativo, debido a que estarán comparando las turbiedades y el color respecto de la dosis óptima obtenida en la prueba.

### 3.3. Punto de muestreo

Las muestras de agua utilizadas son obtenidas del río Villalobos, específicamente el punto de muestreo se encuentra entre, la finalización de la calzada Aguilar Batres y la carretera hacia Valle Dorado de San Cristóbal, kilómetro 13 hacia Villa Nueva.

Con las siguientes coordenadas:

14°33'18.45" N 90°34'37.39" O

Elevación: 1 309 m Altura, ojo: 1,36Km

Figura 9. Imagen del punto de muestreo



Fuente: google earth. Consulta: 20 de enero de 2016.

### **3.4. Recursos humanos disponibles**

En la siguiente tabla se describe la función y la responsabilidad de los recursos disponibles para el desarrollo de este estudio.

Tabla VI. **Recursos humanos disponibles**

Función	Responsable
Investigador	Luisa María Tejeda Méndez
Asesor	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Fuente: elaboración propia.

### **3.5. Recursos materiales disponibles**

Los recursos materiales para lograr los objetivos de este estudio fueron provistos por la empresa Representaciones Químicas S.A.

#### **3.5.1. Instalaciones**

La instalación principal será el laboratorio de la empresa Representaciones Químicas S.A., localizada en la 13 calle, 7-14, zona 11 de la ciudad de Guatemala.

#### **3.5.2. Equipo de medición**

El equipo de medición utilizado se detalla a continuación:

Figura 10. **Turbidímetro**



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas S.A.

Figura 11. **Colorímetro**



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas S.A.

Figura 12. **Cintas medidoras de pH**



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas S.A.

Figura 13. **Prueba de jarras**



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas S.A.

Figura 14. **Balanza analítica**



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas S.A.

### **3.5.3. Reactivos**

- Coagulante orgánico (poliamina)
- Coagulante inorgánico (sulfato férrico)
- Floculante aniónico

### **3.5.4. Cristalería**

- Pipetas de 2 y 5mL
- Beackers de 500mL
- Beacker de 10mL
- Lápiz de succión

### **3.5.5. Utensilios auxiliares**

- Cubeta de plástico para la toma de muestras
- Recipientes plásticos para almacenar las mezclas concentradas.
- Recipientes plásticos con tapadera para almacenar las mezclas diluídas para las pruebas.
- Garrafa para almacenar el agua de muestra.

### **3.6. Técnicas cuantitativas y cualitativas**

Para el análisis de clarificación de las aguas del río Villalobos, utilizando diferentes relaciones de mezclas de coagulantes, se utiliza una técnica cuantitativa, abarcando desde la preparación de las mezclas hasta obtener los datos necesarios.

#### **3.6.1. Procedimiento**

- Formulación de mezclas de coagulantes: para la realización de las mezclas se utilizó como referencia la patente No. 3 953 330, de 1976, realizada por los inventores: Richard G. Tonkyn, Norman Vorchheimer, William Fowler y Richard Heberle, ya que esta patente muestra ejemplos de relaciones de mezclas entre un coagulante inorgánico y una poliamina. En la siguiente tabla se muestran las relaciones de mezcla escogidas.

Tabla VII. **Relación de mezcla**

Mezcla No.	Porcentaje de coagulante inorgánico	Porcentaje de coagulante orgánico
1	100	0
2	97	3
3	95	5
4	90	10

Fuente: elaboración propia.

- Captación de la muestra: la muestra de agua se tomó en el río cada día que se realizaron las pruebas, para evitar la descomposición de la misma y alterar los resultados de las pruebas.
- Datos iniciales: los datos iniciales importantes de cada muestra de agua fueron la turbiedad, el color y el pH. El último dato mencionado se tomó para referencia, si la muestra se encontraba dentro de los parámetros de potencial de hidrógeno para trabajarla ya que, si este se encuentra en valores de pH muy ácidos o muy alcalinos, no se podría trabajar directamente con la mezcla de coagulantes, ya que habría que aplicar algún ácido o álcali para regularlo antes de aplicar el coagulante.
- Clarificación: para la clarificación de las muestras de agua se utilizó el equipo de prueba de jarras. Este equipo consta de cuatro jarras de 500mL cada una, para las cuales hay un agitador que se mueve a 200rpm para la etapa en la que se agrega el coagulante en cada una de las jarras. Luego de ello se baja a 180rpm de agitación y se procede a agregar el floculante, se deja floculando por determinado tiempo hasta que se forman los flóculos y se depositan en el fondo de la jarra por gravedad. En este equipo se aplicaron las diferentes mezclas realizadas hasta determinar la dosis óptima de cada mezcla, determinada por los

valores de turbiedad y color obtenidos después del tratamiento. Las dosis se aplicaron de cien en cien partes por millón. Este proceso se repitió hasta cumplir el número de corridas necesario para el análisis.

- Para la determinación de la turbiedad final se utilizó un turbidímetro, y para la determinación del color final del agua ya tratada se utilizó un colorímetro.

Figura 15. **Muestra de agua en prueba de jarras**



Fuente: Laboratorio representaciones químicas S.A.

- Costeo: se procedió a calcular el costo de cada mezcla realizada, tomando en cuenta la relación de coagulante inorgánico y orgánico que contiene cada una. Con la media de la dosis óptima de cada mezcla ya determinada, se procedió a calcular el costo de un tratamiento fisicoquímico, utilizando como base de cálculo un metro cúbico por hora de caudal del río Villalobos, para conocer el valor del tratamiento con cada mezcla.
- Remoción y rendimiento: se utilizaron las medias de turbiedad, color y dosis óptima obtenidas con cada mezcla y se emplearon para calcular el porcentaje de remoción de sólidos disueltos y sólidos en suspensión con

cada mezcla. Esto se realizó respecto de los datos de turbiedad y de los datos de color iniciales y finales.

- Beneficio/costo: se realizó una relación gráfica del beneficio y el costo de tratamiento para cada mezcla. Se elaboró un gráfico para la turbiedad y para el color, el porcentaje de remoción frente al el costo de tratamiento dado en dólares por hora. Esto se realizó tomando en cuenta las cinco corridas realizadas, para obtener la tendencia que cada mezcla tiene en el tratamiento, relacionando así el costo de tratar un metro cúbico por hora y la remoción que se obtendrá.

### 3.7. Recolección y tabulación de la información

En este estudio se recolectaron los datos necesarios para cumplir los objetivos. En las siguientes tablas se tabuló la información utilizada.

Tabla VIII. **Datos iniciales de cada muestra**

Corrida No.	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH
1	19,3	80	7
2	30	60	7
3	71,3	450	6,5
4	119	550	7
5	78,2	450	7

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Representaciones Químicas S. A.

Tabla IX. **Dosis óptima para cada mezcla**

DOSIS ÓPTIMA (ppm)					
Mezcla sulfato férrico/poliamina N-50	1	2	3	4	5
100/0	300	300	400	400	400
97/3	300	300	400	200	400
95/5	300	200	400	200	400
90/10	200	200	300	100	300

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Representaciones Químicas S. A.

Tabla X. **Turbiedad final con cada mezcla**

TURBIEDAD (NTU)					
Mezcla sulfato férrico/poliamina N-50	1	2	3	4	5
100/0	13,8	14,3	7,3	7,3	8,25
97/3	9,48	11,2	5,89	6,8	7,88
95/5	4,5	12,5	2,3	4,65	4,38
90/10	7	6.8	5,7	4,38	5,49

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Representaciones Químicas S. A.

Tabla XI. **Color final con cada mezcla**

COLOR (UPC)					
Mezcla sulfato férrico/poliamina N-50	1	2	3	4	5
100/0	50	30	20	40	50
97/3	40	20	20	40	50
95/5	10	20	20	30	30
90/10	10	20	10	30	20

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Representaciones Químicas S. A.

Tabla XII. **Media de los datos obtenidos**

Mezcla $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ / N-50	Dosis óptima	Turbiedad	Color
100/0	360	10,19	38
97/3	320	8,25	34
95/5	300	5,66	22
90/10	220	5,87	18

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Representaciones Químicas S. A.

Tabla XIII. **Costo de cada mezcla realizada**

Mezcla sulfato férrico/poliamina N-50	Costo mezcla (USD/KG)
100/0	0,1
90/10	0,331
95/5	0,2155
97/3	0,1693

Fuente: elaboración propia, con base en técnicas cuantitativas.

Tabla XIV. **Costo de cada mezcla al tratar un metro cúbico de agua por hora**

Mezcla sulfato férrico/poliamina N-50	Media de dosis óptima (kg/m <sup>3</sup> )	Costo al tratar 1m <sup>3</sup> /h (USD/h)
100/0	0,36	0,036
97/3	0,32	0,054
95/5	0,30	0,065
90/10	0,22	0,073

Fuente: elaboración propia, con base en técnicas cuantitativas.

Tabla XV. **Porcentaje de remoción respecto de la turbiedad**

Porcentaje de remoción	Mezcla sulfato férrico/ poliamina N-50
84	100/0
87	97/3
91	95/5
91	90/10

Fuente: elaboración propia, con base en técnicas cuantitativas.

Tabla XVI. **Porcentaje de remoción respecto del color**

Porcentaje de remoción	Mezcla sulfato férrico/ poliamina N-50
88	100/0
89	97/3
93	95/5
94	90/10

Fuente: elaboración propia, con base en técnicas cuantitativas.

Tabla XVII. **Porcentaje de rendimiento de cada mezcla respecto de la turbiedad**

Porcentaje de rendimiento	Mezcla sulfato férrico/ poliamina N-50
23	100/0
27	97/3
30	95/5
41	90/10

Fuente: elaboración propia, con base en técnicas cuantitativas.

Tabla XVIII. **Porcentaje de rendimiento de cada mezcla respecto del color**

Porcentaje de rendimiento	Mezcla sulfato férrico/ poliamina N-50
24	100/0
28	97/3
31	95/5
43	90/10

Fuente: elaboración propia, con base en técnicas cuantitativas.

Tabla XIX. **Porcentaje de remoción y costo de tratamiento para cada corrida realizada con cada mezcla respecto de la turbiedad**

Mezcla sulfato férrico/ poliamina N-50	Porcentaje de remoción	costo (USD/h)
100/0	28,5	0,0300
	52,3	0,0300
	89,8	0,0400
	93,9	0,0400
	89,5	0,0400
97/3	50,9	0,0508
	62,7	0,0508
	91,7	0,0677
	94,3	0,0339
	89,9	0,0677
95/5	58,3	0,0431
	96,1	0,0431
	76,7	0,0647
	96,8	0,0862
	94,4	0,0862
90/10	96,3	0,0331
	63,7	0,0662
	77,3	0,0662
	92,0	0,0993
	93,0	0,0993

Fuente: elaboración propia, con base en técnicas cuantitativas.

Tabla XX. **Porcentaje de remoción y costo de tratamiento para cada corrida realizada con cada mezcla respecto del color**

Mezcla sulfato férrico/ poliamina N-50	Porcentaje de remoción	costo (USD/h)
100/0	37,5	0,0300
	50,0	0,0300
	95,6	0,0400
	92,7	0,0400
	88,9	0,0400
97/3	50,0	0,0508
	66,7	0,0508
	95,6	0,0677
	92,7	0,0339
	88,9	0,0677
95/5	87,5	0,0647
	66,7	0,0431
	95,6	0,0862
	94,5	0,0431
	93,3	0,0862
90/10	87,5	0,0662
	66,7	0,0662
	97,8	0,0993
	94,5	0,0331
	95,6	0,0993

Fuente: elaboración propia, con base en técnicas cuantitativas.

### 3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico tiene el objetivo de determinar si existe una diferencia significativa entre los resultados, causada por los factores independientes del ensayo realizado. El análisis de varianza unifactorial

requiere analizar la influencia de un factor en la variable respuesta, que en este caso se trata de la clarificación del agua tratada. El factor por analizar son las mezclas de coagulantes inorgánico/orgánico realizadas.

### 3.8.1. Análisis de varianza unifactorial para las mezclas de coagulantes

Se realizó un análisis de varianza para saber si el uso de las mezclas respecto del sulfato férrico solo, afecta estadísticamente en la clarificación del agua. Los resultados se tabulan en las siguientes tablas:

Tabla XXI. Experimento de un factor para el tratamiento de clarificación de las aguas del río Villalobos en la turbiedad obtenida luego del tratamiento con cada coagulante (mezcla) utilizado

Mezcla $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ / N-50	TURBIEDAD					Total	Promedio
	1	2	3	4	5		
100/0	13,8	14,3	7,3	7,3	8,25	50,95	10,19
97/3	9,48	11,2	5,89	6,8	7,88	41,25	8,25
95/5	4,5	12,5	2,3	4,65	4,38	28,33	5,666
90/10	7	6,8	5,7	4,38	5,49	29,37	5,874

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Análisis de varianza de la clarificación de las aguas del río Villalobos**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	69,029	3	23,009	2,726	0,0785	3,238
Dentro de los grupos	135,031	16	8,439			
Total	204,060	19				

Fuente: elaboración propia.

- Si el valor de la F calculada es mayor al valor crítico para F, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.
- Si el valor de la F calculada es menor al valor crítico para F, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula.

Tabla XXIII. **Experimento de un factor para el tratamiento de clarificación de las aguas del río Villalobos en la dosis óptima obtenida luego del tratamiento con cada coagulante (mezcla) utilizado**

Mezcla $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ / N-50	DOSIS ÓPTIMA					Total	Media
	1	2	3	4	5		
100/0	13,8	14,3	7,3	7,3	8,25	1800	360
97/3	9,48	11,2	5,89	6,8	7,88	1600	320
95/5	4,5	12,5	2,3	4,65	4,38	1500	300
90/10	7	6,8	5,7	4,38	5,49	1100	220

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Análisis de varianza de la clarificación de las aguas del río Villalobos**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	52000	3	17333,333	2,568	0,091	3,239
Dentro de los grupos	108000	16	6750			
Total	160000	19				

Fuente: elaboración propia.

- Si el valor de la F calculada es mayor al valor crítico para F, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.
- Si el valor de la F calculada es menor al valor crítico para F, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula.

Tabla XXV. **Análisis de un factor para el tratamiento de clarificación de las aguas del río Villalobos en la dosis óptima obtenida luego del tratamiento con cada coagulante (mezcla) utilizado**

Mezcla $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 / \text{N-50}$	COLOR					Total	Media
	1	2	3	4	5		
100/0	50	30	20	40	50	190	38
97/3	40	20	20	40	50	170	34
95/5	10	20	20	30	30	110	22
90/10	10	20	10	30	20	90	18

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Análisis de varianza de la clarificación de las aguas del río Villalobos**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1360	3	453,33	3,701	0,034	3,239
Dentro de los grupos	1960	6	122,5			
Total	3320	9				

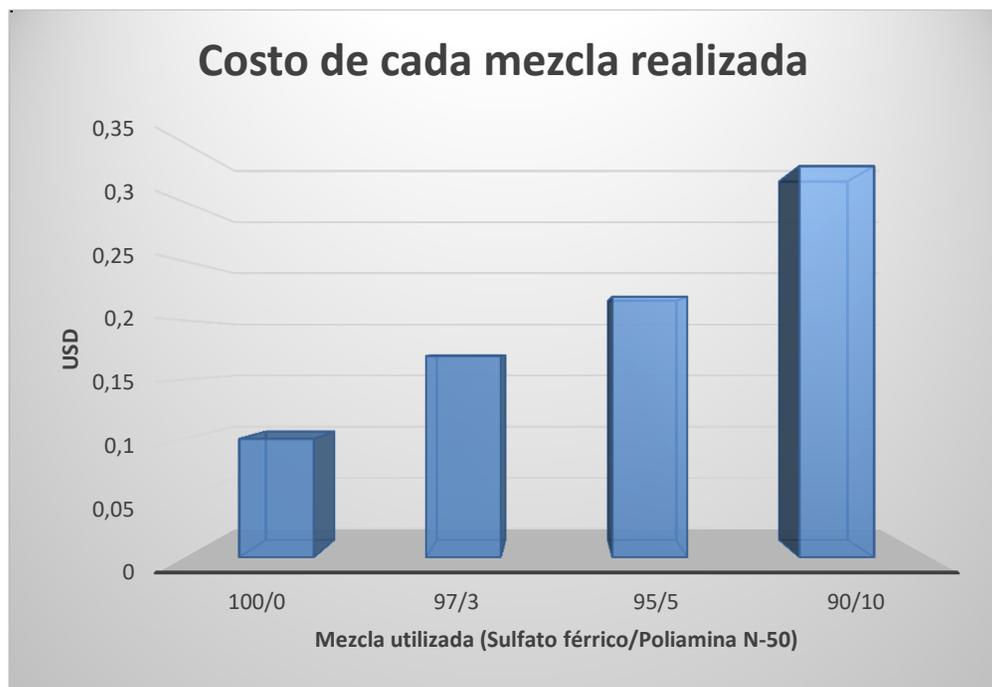
Fuente: elaboración propia.

- Si el valor de la F calculada es mayor al valor crítico para F, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.
- Si el valor de la F calculada es menor al valor crítico para F, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula.

## 4. RESULTADOS

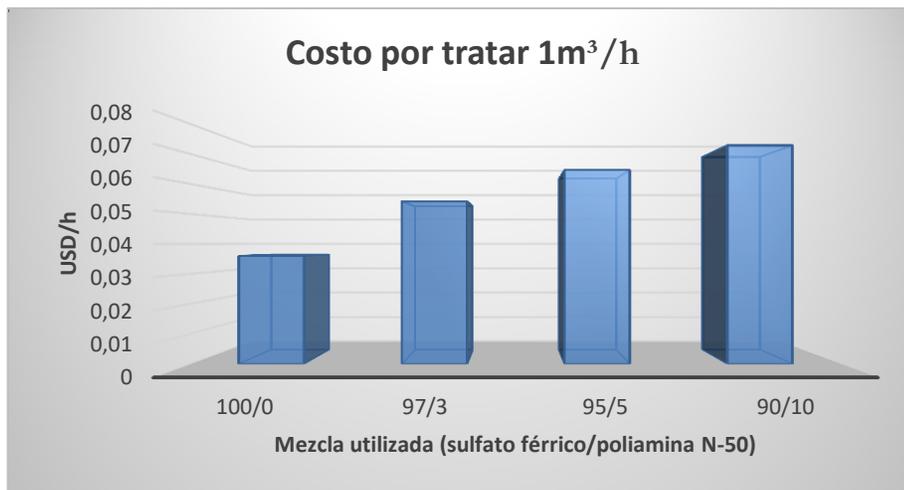
En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos al realizar las mezclas de poliamina N-50 y sulfato férrico comparándolas con sulfato férrico, al ser utilizados como coagulantes para tratar fisicoquímicamente las aguas del río Villalobos a nivel laboratorio, utilizando una prueba de jarras.

Figura 16. **Comparación del costo del sulfato férrico como coagulante y las mezclas realizadas con poliamina N-50**



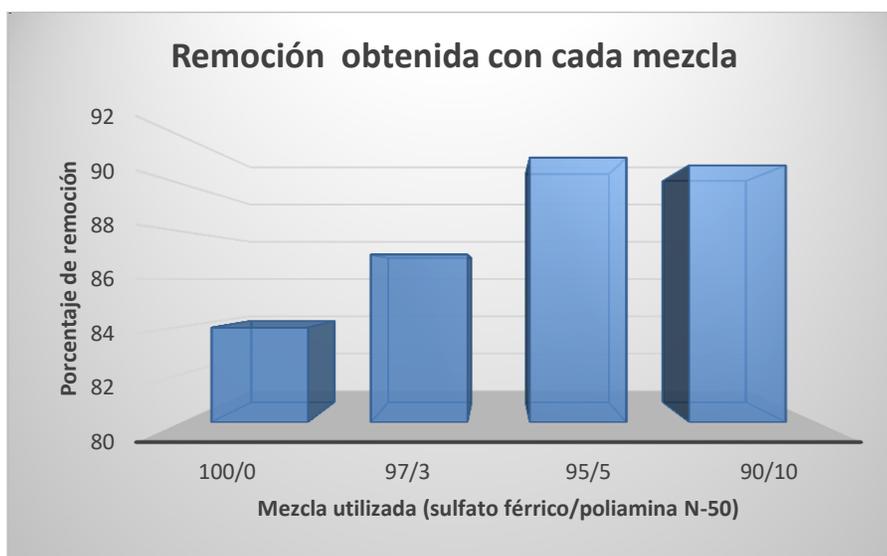
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Costo de cada mezcla utilizada por tratamiento de 1m<sup>3</sup>/h con aguas del río Villalobos**



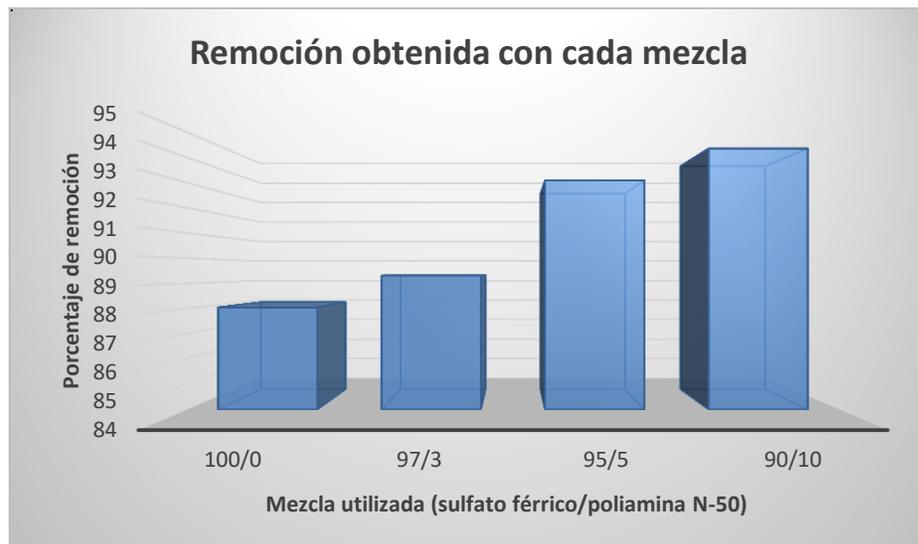
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Porcentaje de remoción con mezcla utilizada en las aguas del río Villalobos respecto de la turbiedad obtenida**



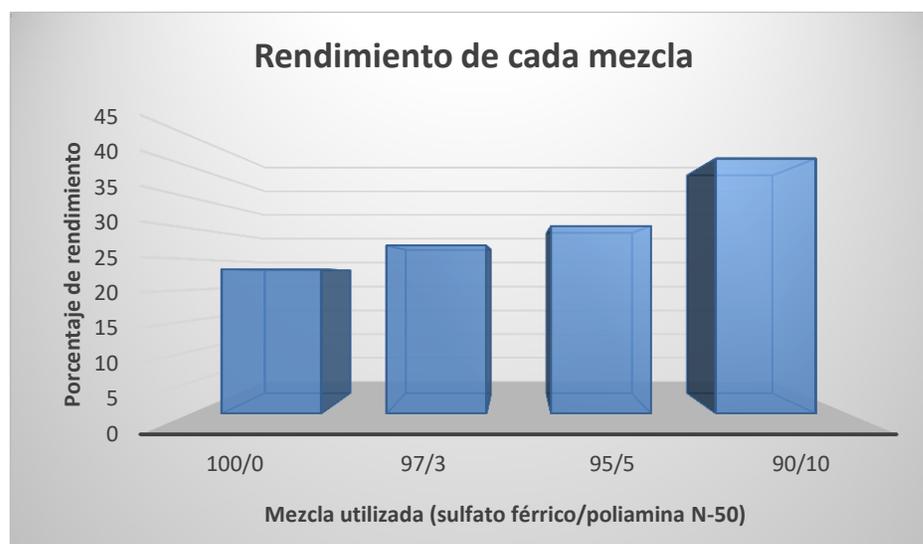
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Porcentaje de remoción con cada mezcla utilizada en las aguas del río Villalobos respecto del color obtenido**



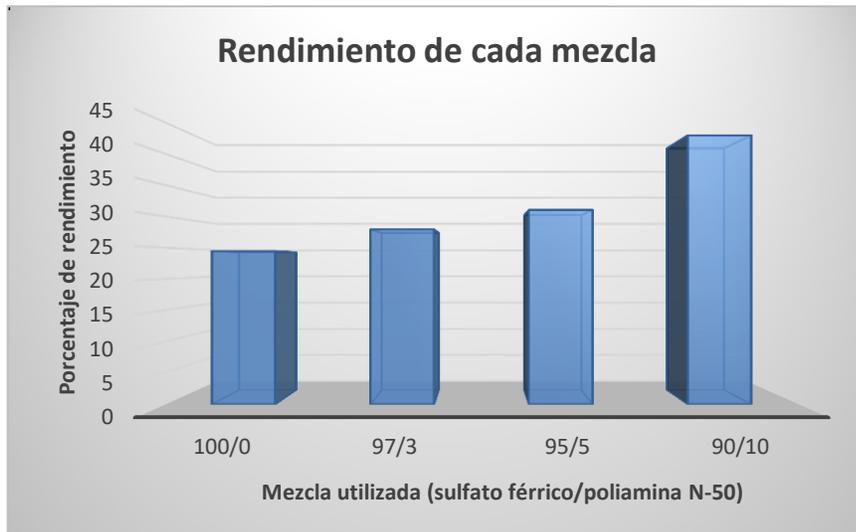
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Porcentaje de rendimiento con cada mezcla utilizada en las aguas del río Villalobos respecto de la turbiedad obtenida**



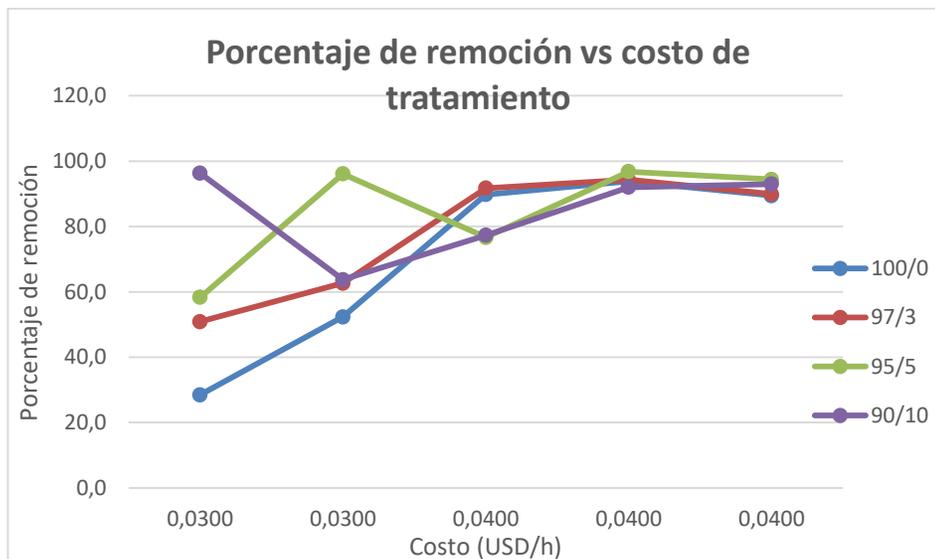
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Porcentaje de rendimiento cada mezcla utilizada en las aguas del río Villalobos respecto del color obtenido**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Tendencia del beneficio/costo para el tratamiento de clarificación con cada mezcla respecto de la turbiedad**



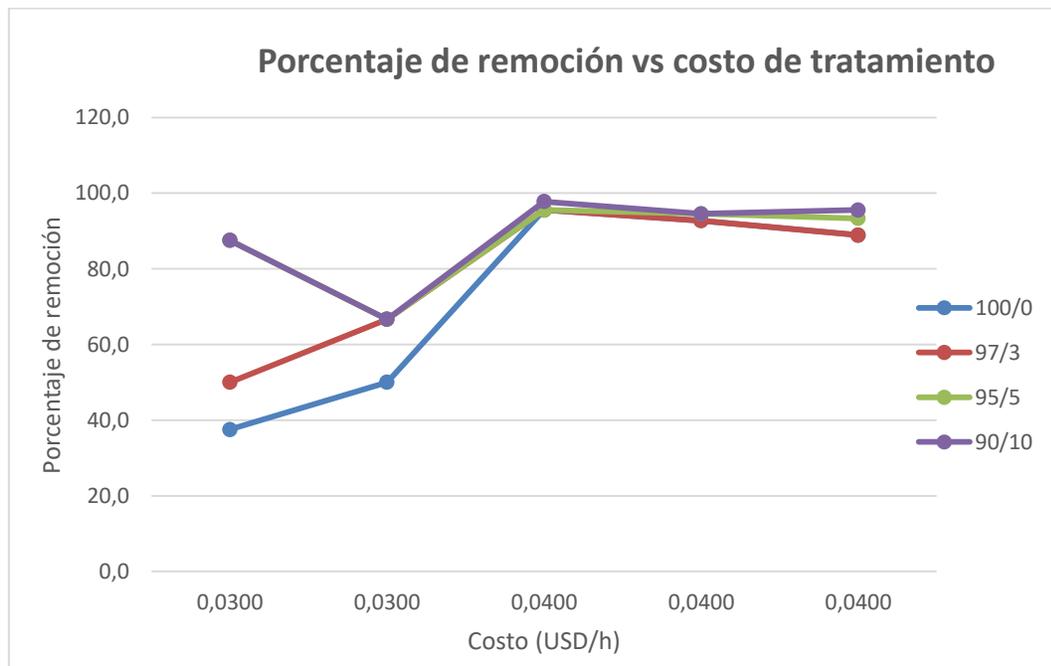
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Modelo matemático para la relación beneficio/costo del tratamiento de clarificación con cada mezcla respecto de la turbiedad (A)**

Mezcla sulfato férrico/N-50	Ecuación	R <sup>2</sup>
100/0	$y = 2,9884x^4 - 37,703x^3 + 158,31x^2 - 231,99x + 136,89$	1
97/3	$y = -6,6096x^4 + 82,207x^3 - 356,59x^2 + 631,21x - 291,89$	1
95/5	$y = 2,6429x^4 - 33,731x^3 + 144,96x^2 - 226,61x + 163,62$	1
90/10	$y = 1,2648x^4 - 20,168x^3 + 112,48x^2 - 247,84x + 250,58$	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Tendencia del beneficio/costo para el tratamiento con cada mezcla respecto del color**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Modelo matemático para la relación beneficio/costo del tratamiento de clarificación con cada mezcla respecto de la turbiedad (B)**

Mezcla sulfato férrico/N-50	Ecuación	R <sup>2</sup>
100/0	$y = 5,3672x^4 - 67,245x^3 + 285,82x^2 - 454,75x + 268,31$	1
97/3	$y = 3,1103x^4 - 38,426x^3 + 158,91x^2 - 237,74x + 164,14$	1
95/5	$y = 4,5549x^4 - 58,819x^3 + 263,9x^2 - 469,14x + 346,99$	1
90/10	$y = 5,2031x^4 - 66,412x^3 + 294,37x^2 - 517,1x + 371,44$	1

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de investigación se realizó la clarificación de las aguas del río Villalobos utilizando sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y se buscó compararlo con mezclas realizadas con sulfato férrico y un coagulante orgánico como la poliamina N-50.

El sulfato férrico utilizado en solución al 35,8 % se obtuvo de la empresa Representaciones Químicas S.A., quien es el fabricante de este coagulante inorgánico. La poliamina N-50 es proveniente de un fabricante de la India.

Se buscó realizar mezclas entre estos dos coagulantes para conocer el efecto que tiene en la clarificación de aguas residuales y si los resultados obtenidos son efectivos y convenientes al tratamiento, ya que la poliamina es un coagulante de alto costo, pero con un alto rendimiento para la clarificación de aguas residuales.

En la tabla VI se muestra la relación de mezcla que se escogió trabajar para esta investigación, tomando de pruebas cuatro mezclas diferentes.

Al realizar la prueba de jarras utilizando las mezclas realizadas como coagulante, se tomaron las mezclas y se diluyeron al 10 %, tomando como 100 % concentrada la mezcla inicial. Para realizar una prueba de jarras se necesita colocar el agua a tratar dentro de las jarras, luego de haber tomado los datos iniciales como pH, turbiedad y color. Estos datos iniciales de las cinco corridas realizadas se encuentran tabulados en la tabla VII.

Se procede a darle agitación en la prueba de jarras a 200 rpm y se agregaron las cantidades de coagulante con cada mezcla, realizando cinco corridas, hallando una dosis óptima para cada mezcla en cada corrida, medida en partes por millón. Cada una fue realizada con la muestra tomada directamente del río Villalobos en el mismo día, para evitar errores provenientes de la descomposición del agua, provocadas por el almacenamiento.

La dosis óptima obtenida en cada corrida fue determinada por las mediciones de turbiedad y color finales. En las tablas de la VIII a la X se muestran los valores obtenidos en cada corrida para la dosis óptima, la turbiedad final y el color final.

Se realizó un análisis de varianza de un factor, para saber si existen diferencias significativas en el uso de las mezclas realizadas. El análisis de varianza para para la dosis óptima encontrada con cada mezcla utilizada, representado en las tablas XXIII y XXIV, para un F calculado con un 95 % de confianza muestra que no existe diferencia significativa en las mezclas utilizadas.

El análisis de varianza para las medias del color obtenido con cada mezcla utilizada, representado en las tablas XXV y XXIV, para un F calculado con un 95 % de confianza muestra que sí hay diferencia en las medias, por lo que podría realizarse la prueba de medias de Tukey para encontrar la fuente de la variación.

El análisis de varianza para las medias de turbiedad obtenidas con cada mezcla utilizada, representado en las tablas XXI y XXII, para un F calculado con un 95 % de confianza, muestra que no existe diferencia significativa entre las mezclas utilizadas.

Se procedió a costear cada mezcla realizada, ya que este es un factor importante para el tratamiento fisicoquímico de aguas. En la figura 11 se muestra el costo de cada mezcla en dólares americanos por kilogramo de mezcla. Se puede ver que al aumentar la cantidad de poliamina N-50 en la mezcla, aumenta el costo de la solución final. Esto se debe a que el kilo de poliamina N-50 tiene un valor 24 veces mayor que el sulfato férrico en solución. Pero posee un mayor rendimiento en el tratamiento de coagulación-floculación.

Se realizó un cálculo para el costo del tratamiento de un caudal, asumiendo un caudal de un metro cúbico por hora de aguas del río Villalobos, utilizando la media de las dosis óptimas obtenidas con cada mezcla y el costo obtenido de cada una.

En la figura 16 se muestra el costo en dólares americanos por hora, que se tendría con cada una de las mezclas utilizadas al tratar un metro cúbico de aguas por hora. Cayendo de nuevo en que el costo más alto lo representa la fórmula 90/10, ya que lleva el máximo porcentaje de poliamina N-50 en la mezcla.

Un resultado importante para la clarificación de aguas residuales es el porcentaje de remoción de sólidos disueltos y los sólidos en suspensión, ya que esto muestra la capacidad del coagulante para desestabilizar las cargas negativas en la suciedad del agua y así formar mejores coágulos para que estos puedan ser fácilmente precipitados, lo que se traduce en una mejor clarificación del agua.

Se calculó el porcentaje de remoción de los sólidos con respecto a la turbiedad y respecto al color, ya que una turbiedad baja denota una clarificación alta y el color denota que no hay sólidos disueltos dentro del agua ya

clarificada. Para ello se utilizaron los valores de las medias de la turbiedad inicial y la turbiedad final después del tratamiento, lo mismo para realizar el cálculo del color, se utilizaron las medias del color inicial y el color final.

En las figuras 17 y 18 se muestran estos resultados y se puede observar que hay una mejor remoción respecto de la turbiedad con la mezcla 95/5, con esta misma respecto del color, hay una remoción del 93 % y un 94 % con la mezcla 90/10. Los cuales son porcentajes que muestran una buena remoción.

El rendimiento que tiene cada una de las mezclas al ser utilizadas como coagulantes en el tratamiento se puede medir a partir de los valores de la remoción obtenida y la media de las dosis óptimas medidas con cada mezcla.

En las figuras 19 y 20 se muestra el porcentaje de rendimiento en la remoción de sólidos disueltos y sólidos en suspensión de las aguas del río Villalobos, de cada una de las mezclas utilizadas. Esto medido respecto de la turbiedad y del color final de cada corrida realizada.

Como se puede observar, la mezcla con mayor porcentaje de rendimiento en la remoción de sólidos en el agua, es la 90/10, medida respecto de la turbiedad y del color. Y la mezcla menos eficiente en la remoción es la 100/0, que es en la que solo se utilizó el sulfato férrico como coagulante.

Se obtuvo la tendencia beneficio costo del tratamiento de un caudal de  $1\text{m}^3/\text{h}$  con cada mezcla utilizada. Para ello se graficó el porcentaje de remoción que cada mezcla tuvo y el costo de cada mezcla por tratamiento, ambos realizados respecto de la turbiedad y respecto del color obtenidos.

En las figuras 21 y 22 se describen las tendencias del tratamiento realizado para cada mezcla utilizada, tomando en cuenta cada una de las cinco corridas del tratamiento.

Se puede observar respecto de la turbiedad, el punto máximo es de 96,8 % de remoción y un costo de 0,086 dólares americanos por hora. Estos datos son dados por la mezcla 95/5. En la figura 22 se ve que el punto máximo es de 97,8 % de remoción con un costo de tratamiento de 0,1 dólares americanos por hora, esta mezcla es la 90/10. Por debajo de este punto, está un 95,7 % de remoción respecto del color, que pertenece a la mezcla 95/5.



## CONCLUSIONES

1. Las proporciones de mezcla utilizadas se basaron en la patente No. 3 953 330, de 1976, realizada por los inventores: Richard G. Tonkyn, Norman Vorchheimer, William Fowler y Richard Heberle, en la que se describe que la relación de coagulante inorgánico deberá ser de 20 a 10 veces mayor respecto del coagulante orgánico, por razones de costos. Por lo tanto, las mezclas realizadas llevan del 3% al 10 % de poliamina N-50.
2. En cada una de las corridas realizadas se obtuvo la dosis óptima de sulfato férrico solo como coagulante, estas dosis tienen un rango de 300 a 400 partes por millón, lo cual no es una dosis alta para tratamiento fisicoquímico.
3. Se determinó la dosis óptima para cada mezcla realizada y probada como coagulante, estas dosis varían en un rango de 100 a 400 partes por millón, siendo la dosis óptima más baja para la mezcla 90/10 de sulfato férrico / poliamina N-50.
4. En comparación, para las dosis óptimas del sulfato férrico empleado como coagulante y las dosis óptimas obtenidas con las mezclas de coagulantes utilizadas, la media de la dosis óptima es para el sulfato férrico de 360ppm y las medias de las dosis óptimas para las mezclas realizadas están en un rango de 320 a 220 ppm. Por lo tanto, la dosis del sulfato férrico no se considera alta en comparación al rango mayor de la media de las dosis de las mezclas, la cual pertenece a la 97/7.

5. Al evaluar los costos de cada una de las mezclas realizadas, se tiene que la mezcla más económica es la 100/0, que es el sulfato férrico sin poliamina N-50, y la mezcla más costosa es la mezcla 90/10, que es la que posee mayor porcentaje de poliamina N-50.
6. El costo para un caudal asumido de un metro cúbico por hora, tomando en cuenta el costo de cada mezcla y la media de sus dosis óptimas, esto dio como resultado un rango para el tratamiento de clarificación, donde el tratamiento menos costoso se da al utilizar el sulfato férrico sin mezclar, y el tratamiento más económico se obtiene al realizarlo utilizando la mezcla 90/10.
7. Las mezclas de coagulantes realizadas mostraron tener un mayor rendimiento en la remoción de sólidos disueltos y sólidos en suspensión, reflejado en los resultados de turbiedad y color después de haber realizado el tratamiento de clarificación, comparado con la remoción que posee el sulfato férrico solo como coagulante. Las mezclas con mejores resultados en la remoción, fueron la mezcla 95/5 y la 90/10, tanto en los resultados con respecto de la turbiedad como del color obtenidos, respectivamente.
8. La relación óptima de mezcla de coagulantes es la mezcla 95/5. Debido a que posee mayor remoción respecto de la turbiedad y posee favorable remoción respecto del color. Además, no posee el costo más elevado de todas las mezclas utilizadas para el tratamiento de clarificación en laboratorio en las aguas del río Villalobos.
9. Según los resultados mostrados por el análisis de varianza realizado, se obtuvo que no hay diferencia alguna al utilizar una mezcla o el

coagulante sulfato férrico solo, ya que cada mezcla logra proporcionar buenos resultados en la clarificación, sin embargo, sí existe variación en el costo del tratamiento con cada mezcla.



## RECOMENDACIONES

1. Para desarrollar un tratamiento fisicoquímico a escala industrial se deberá tener en cuenta el costo de cada mezcla, para escoger la mezcla según convenga el uso, y así ser utilizada como coagulante. Se deberá emplear un coadyuvante catiónico para una mejor decantación.
2. Las dosis encontradas en este estudio podrían variar para cada mezcla realizada, si las aguas del río Villalobos se encuentran en una época del año muy lluviosa o si la corriente del río es escasa. Siempre deberá realizarse análisis de prueba de jarras, para lo cual se pueden tomar las dosis encontradas en este estudio como punto de partida.
3. Es necesario realizar la toma del pH inicial del agua por tratar, ya que, si este se encuentra en valores menores a 6 o mayores a 8 será necesario el uso de un regulador ácido o alcalino, antes de realizarse pruebas con las mezclas realizadas en este estudio. De lo contrario, los resultados podrían no ser positivos.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR, M.I; SÁENZ, J.; LLORENS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J.F. *Tratamiento físicoquímico de aguas residuales coagulación-floculación*. España: Universidad de Murcia, 2002. 151 p.
2. DELGADILLO, Oscar; CAMACHO, Alan; PÉREZ, Mauricio. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Universidad de Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia: Edición Antequera Duran, 2010. 99 p.
3. DURÁN, María del Carmen. *Introducción a la química ambiental*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Ediciones Reverente S.A., 2007. 670 p.
4. GARCÍA, Hairo Osvaldo. *Cuantificación de la calidad del agua del río Villalobos en época lluviosa en un período de 24 horas 2 veces al mes en un punto previo a la entrada al lago de Amatitlán*. Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Sanitaria. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, ERIS, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2002. 46 p.
5. GONZÁLES, Susana E., *Diseño de una línea para la producción de sulfato férrico*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Facultad de Ciencias y Humanidades, Universidad del Valle de Guatemala, 1995. 45 p.

6. JIMÉNEZ, Domingo; SETTE, Rubens; DE LORA, Federico. *Introducción a los procesos de tratamiento de aguas residuales*. 2ª ed. España: Editorial Teverté, S.A., 1996. 707 p.
7. LOMBARDERO, José Luis. *Manual para la formación en medio ambiente*. España: Lex nova S.A, 2008. 806 p.
8. PERRY, Roberth H. *Biblioteca del ingeniero químico*. 5ª ed. México: Mc-Graw Hill, 1986. 118 p.
9. RODRÍGUEZ, José Miguel; GALVÍN, Rafael. *Fisicoquímica de aguas*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S.A, 1999. 467 p.

## APÉNDICES

Las pruebas realizadas se documentan en las siguientes fotografías:

### Apéndice 1. Imagen del agua sin el tratamiento



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Agua tratada con sulfato férrico como coagulante**



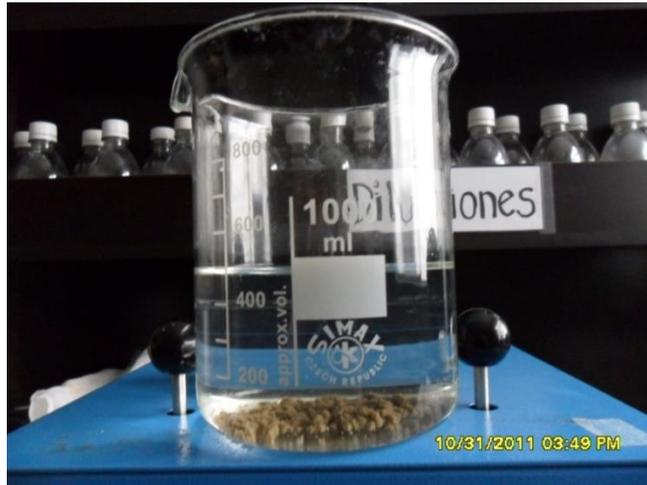
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Agua tratada con la mezcla 97/3 (sulfato férrico y poliamina N-50)**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Agua tratada con la mezcla 95/5 (sulfato férrico y poliamina N-50)**



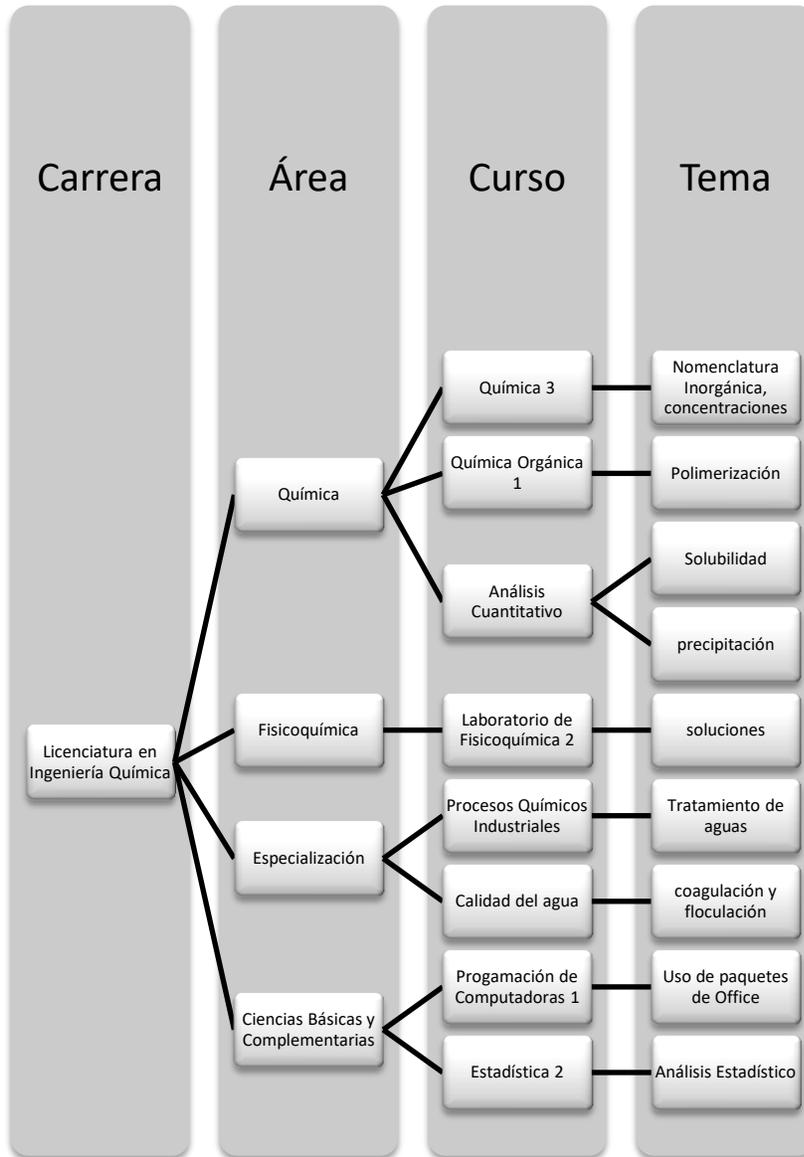
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Agua tratada con la mezcla 90/10 (sulfato férrico y poliamina N-50)**



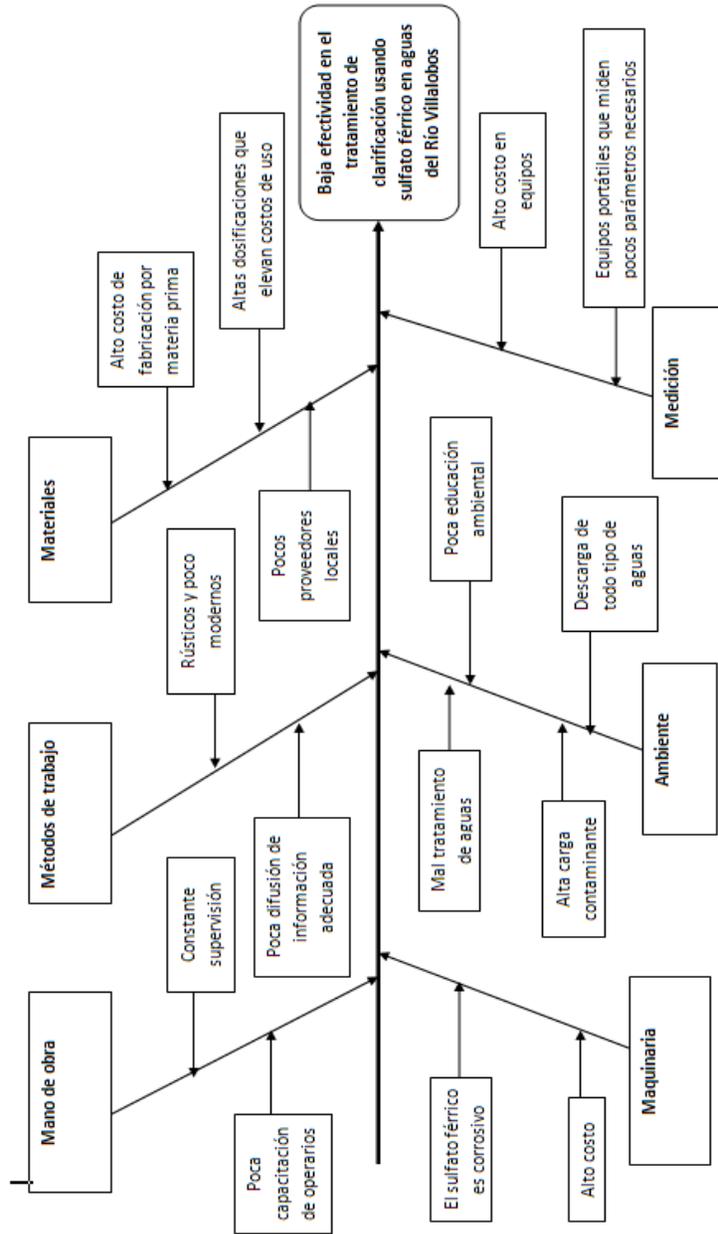
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.



## **ANEXOS**

### **Anexo 1. Acuerdo Gubernativo 236-2006**

Guatemala, 5 de Mayo de 2006

#### **EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA CONSIDERANDO:**

Que por imperativo constitucional el Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga el impacto adverso del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico; para lo cual es necesario dictar normas que garanticen la utilización y el aprovechamiento racional de la fauna, de la flora, de la tierra y del agua, evitando su depredación.

#### **CONSIDERANDO:**

Que la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, tiene por objeto velar por el mantenimiento del equilibrio ecológico y la calidad del medio ambiente para mejorar la calidad de vida de los habitantes del país.

#### **CONSIDERANDO:**

Que de conformidad con la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, el Gobierno debe emitir las disposiciones y reglamentos correspondientes, para ejercer el control, aprovechamiento y uso de las aguas; prevenir, controlar y determinar los niveles de contaminación de los ríos, lagos y mares y cualquier otra causa o fuente de contaminación hídrica.

#### **CONSIDERANDO:**

Que es importante contar con un instrumento normativo moderno que ofrezca certeza jurídica para la inversión, permita la creación de empleo, propicie el mejoramiento progresivo de la calidad de las aguas y contribuya a la sostenibilidad del recurso hídrico; coordinando para el efecto los esfuerzos de los órganos de la administración pública con las municipalidades y la sociedad civil.

Continuación del anexo 1.

POR TANTO:

En uso de las funciones que le confieren el artículo 183, literal e) de la Constitución Política de la República de Guatemala,

ACUERDA: Emitir el siguiente

“REGLAMENTO DE LAS DESCARGAS Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES  
Y DE LA DISPOSICIÓN DE LODOS”

### CAPÍTULO I DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1. OBJETO. El objeto del presente Reglamento es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reuso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. Lo anterior para que, a través del mejoramiento de las características de dichas aguas, se logre establecer un proceso continuo que permita:

- a) Proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana.
- b) Recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización.
- c) Promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada.

También es objeto del presente Reglamento establecer los mecanismos de evaluación, control y seguimiento para que el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales promueva la conservación y mejoramiento del recurso hídrico.

Artículo 2. APLICACIÓN. El presente Reglamento debe aplicarse a: a) Los entes generadores de aguas residuales;

- b) Las personas que descarguen sus aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público;
- c) Las personas que produzcan aguas residuales para reuso;
- d) Las personas que reusen parcial o totalmente aguas residuales; y
- e) Las personas responsables del manejo, tratamiento y disposición final de lodos.

Artículo 3. COMPETENCIA. Compete la aplicación del presente Reglamento al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Las Municipalidades y demás instituciones de gobierno, incluidas las

Continuación del anexo 1.

descentralizadas y autónomas, deberán hacer del conocimiento de dicho Ministerio los hechos contrarios a estas disposiciones, para los efectos de la aplicación de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.

## CAPÍTULO II DEFINICIONES

Artículo 4. DEFINICIONES. Para los efectos de la aplicación e interpretación de este Reglamento, se entenderá por:

**AFLUENTE:** el agua captada por un ente generador.

**AGUAS RESIDUALES:** las aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.

**AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL:** las aguas residuales generadas por servicios públicos municipales y actividades de servicios, industriales, agrícolas, pecuarias, hospitalarias y todas aquellas que no sean de tipo ordinario, así como la mezcla de las mismas.

**AGUAS RESIDUALES DE TIPO ORDINARIO:** las aguas residuales generadas por las actividades domésticas, tales como uso en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas, que se conduzcan a través de un alcantarillado.

**ALCANTARILLADO PLUVIAL:** el conjunto de tuberías, canalizaciones y obras accesorias para recolectar y conducir las aguas de lluvia.

**ALCANTARILLADO PÚBLICO:** el conjunto de tuberías y obras accesorias utilizadas por la municipalidad, para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo ordinario o de tipo especial, o combinación de ambas que deben ser previamente tratadas antes de descargarlas a un cuerpo receptor.

**CARACTERIZACIÓN DE UNA MUESTRA:** la determinación de características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.

**CARACTERIZACIÓN DE UN EFLUENTE O UN AFLUENTE:** la determinación de características físicas, químicas y biológicas de las aguas, incluyendo caudal, de los parámetros requeridos en el presente Reglamento.

Continuación del anexo 1.

**CARGA:** el resultado de multiplicar el caudal por la concentración determinados en un efluente y expresada en kilogramos por día.

**CAUDAL:** el volumen de agua por unidad de tiempo.

**COLIFORMES FECALES:** el parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas, provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales de sangre caliente.

**CUERPO RECEPTOR:** embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.

**DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO:** la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celsius.

**DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO:** la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.

**DILUCION:** el proceso que consiste en agregar un volumen de agua con el propósito de disminuir la concentración en un efluente de aguas residuales.

**EFLUENTE DE AGUAS RESIDUALES:** las aguas residuales descargadas por un ente generador.

**ENTES GENERADORES:** la persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, y cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor.

**ENTES GENERADORES EXISTENTES:** los entes generadores establecidos previo a la vigencia del presente Reglamento.

**ENTES GENERADORES NUEVOS:** los entes generadores establecidos posteriormente a la vigencia del presente Reglamento.

Continuación del anexo 1.

**ESTABILIZACIÓN DE LODOS:** el proceso físico, químico o biológico al que se someten los lodos para acondicionarlos previo a su aprovechamiento o disposición final.

**ESTERO:** la zona del litoral que se inunda durante la pleamar. Puede ser tanto arenoso como rocoso y en ocasiones alcanza gran amplitud, tanto mayor cuanto más leve sea la pendiente y más notorias las mareas. Con frecuencia tiene un amplio desarrollo en las desembocaduras fluviales.

**EUTROFIZACIÓN:** el proceso de disminución de la calidad de un cuerpo de agua como consecuencia del aumento de nutrientes, lo que a su vez propicia el desarrollo de microorganismos y limita la disponibilidad de oxígeno disuelto que requiere la fauna y flora.

**FERTIRRIEGO:** la práctica agrícola que permite el reuso de un efluente de aguas residuales, que no requiere tratamiento, a fin de aprovechar los diversos nutrientes que posee para destinarlos en la recuperación y mejoramiento de suelos así como en fertilización de cultivos que no se consuman crudos o precocidos.

**HUMEDAL:** el sistema acuático natural o artificial, de agua dulce o salada, de carácter temporal o permanente, generalmente en remanso y de poca profundidad.

**INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN AMBIENTAL:** los documentos técnicos definidos en el Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental, Acuerdo Gubernativo No. 23-2003 y sus reformas, contenidos en los Acuerdos Gubernativos No. 424-2003 y 704-2003; los cuales permiten realizar una identificación y evaluación sistemática de los impactos ambientales de un proyecto, obra, industria o cualquier otra actividad, desde la fase de construcción hasta la fase de abandono.

**LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE:** el valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales y en aguas para reuso y lodos.

**LODOS:** los sólidos con un contenido variable de humedad provenientes del tratamiento de aguas residuales.

**MANTO FREÁTICO:** la capa de roca subterránea, porosa y fisurada que actúa como reservorio de aguas que pueden ser utilizables por gravedad o por bombeo.

Continuación del anexo 1.

**META DE CUMPLIMIENTO:** la determinación numérica de los valores que deben alcanzarse en la descarga de aguas residuales al final de cada etapa de cumplimiento. En el caso de los entes generadores nuevos y de las personas nuevas que descargan al alcantarillado público, al iniciar operaciones.

**MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA:** el régimen de cumplimiento de valores de parámetros en cargas, con parámetro de calidad asociado, en distintas etapas.

**MONITOREO:** el proceso mediante el cual se obtienen, interpretan y evalúan los resultados de una o varias muestras, con una frecuencia de tiempo determinada, para establecer el comportamiento de los valores de los parámetros de efluentes, aguas para reuso y lodos.

**MUESTRA:** la parte representativa, a analizar, de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.

**MUESTRAS COMPUESTAS:** dos o más muestras simples que se toman en intervalos determinados de tiempo y que se adicionan para obtener un resultado de las características de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.

**MUESTRA SIMPLE:** la muestra tomada en una sola operación que representa las características de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos en el momento de la toma.

**PARÁMETRO:** la variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos, asignándole un valor numérico.

**PARÁMETRO DE CALIDAD ASOCIADO:** el valor de concentración de demanda bioquímica de oxígeno, expresado en miligramos por litro, que determina la condición del efluente y se aplica en el modelo de reducción progresiva de cargas.

**PERSONA QUE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO:** la persona individual o jurídica, pública o privada, que descarga aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público.

**PERSONA EXISTENTE QUE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO:** la persona que descarga al alcantarillado público establecida previo a la vigencia del presente Reglamento.

Continuación del anexo 1.

**PERSONA NUEVA QUE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO:** la persona que descarga al alcantarillado público establecida posteriormente a la vigencia del presente Reglamento.

**PUNTO DE DESCARGA:** el sitio en el cual el efluente de aguas residuales confluye en un cuerpo receptor o con otro efluente de aguas residuales.

**REUSO:** el aprovechamiento de un efluente, tratado o no.

**SERVICIOS PÚBLICOS MUNICIPALES:** aquellos que, de acuerdo con el Código Municipal, prestan las municipalidades directamente o los concesionan y que generan aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas.

**SISTEMA DE ALCANTARILLADO PRIVADO:** el conjunto de tuberías y obras accesorias para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo especial, originadas por distintas personas individuales o jurídicas privadas, hasta su disposición a una planta de tratamiento de aguas residuales privada.

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES:** cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

### CAPÍTULO III ESTUDIO TÉCNICO

Artículo 5. ESTUDIO TÉCNICO. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, que vierten éstas o no a un cuerpo receptor o al alcantarillado público tendrán la obligación de preparar un estudio avalado por técnicos en la materia a efecto de caracterizar efluentes, descargas, aguas para reuso y lodos.

Artículo 6. **CONTENIDO DEL ESTUDIO TÉCNICO.** Las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas, indicadas en el artículo 5 del presente Reglamento, para documentar el estudio técnico deberán tomar en cuenta los siguientes requisitos:

- I. Información general:
  - a) Nombre, razón o denominación social.
  - b) Persona contacto ante el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Continuación del anexo 1.

- c) Descripción de la naturaleza de la actividad de la persona individual o jurídica sujeta al presente Reglamento.
- d) Horarios de descarga de aguas residuales.
- e) Descripción del tratamiento de aguas residuales.
- f) Caracterización del efluente de aguas residuales, incluyendo sólidos sedimentables.
- g) Caracterización de las aguas para reuso. h) Caracterización de lodos a disponer.
- i) Caracterización del afluente. Aplica en el caso de la deducción especial de parámetros del artículo 23 del presente Reglamento.
- j) Identificación del cuerpo receptor hacia el cual se descargan las aguas residuales, si aplica.
- k) Identificación del alcantarillado hacia el cual se descargan las aguas residuales, si aplica.
- l) Enumeración de parámetros exentos de medición y su justificación respectiva. II. Documentos:

- a) Plano de localización y ubicación, con coordenadas geográficas, del ente generador o de la persona que descarga aguas residuales al alcantarillado público.
- b) Plano de ubicación y localización, con coordenadas geográficas, del o los dispositivos de descarga, para la toma de muestras, tanto del afluente como del efluente. En el caso del afluente cuando aplique.
- c) Plan de gestión de aguas residuales, aguas para reuso y lodos. Las municipalidades o empresas encargadas de prestar el servicio de tratamiento de aguas residuales, a personas que descargan sus aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, incluirán la siguiente información: el catastro de dichos usuarios y el monitoreo de sus descargas.
- d) Plan de tratamiento de aguas residuales, si se descargan a un cuerpo receptor o alcantarillado.
- e) Informes de resultados de las caracterizaciones realizadas.

Artículo 7. RESGUARDO DEL ESTUDIO TÉCNICO. La persona individual o jurídica conservará el Estudio Técnico, manteniéndolo a disposición de las autoridades del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales cuando se lo requieran por razones de seguimiento y evaluación.

Artículo 8. INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN, CONTROL Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL. Para los efectos del cumplimiento del artículo 97 del Código de Salud, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales al aprobar un Instrumento de Evaluación Ambiental a los entes

Continuación del anexo 1.

generadores nuevos, incluirá en la resolución el dictámen relacionado con la descarga de aguas residuales de conformidad con lo establecido en el presente Reglamento.

Para efectos de verificación y control del cumplimiento de este Reglamento, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales deberá utilizar los Instrumentos contenidos en el Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental.

Artículo 9. PLAZO PARA LA EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO Y CUMPLIMIENTO. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales deberá evaluar en forma permanente el desempeño ambiental y el cumplimiento de los planes contemplados en el numeral II Documentos, literales c) y d) del artículo 6.

Artículo 10. VIGENCIA DEL ESTUDIO TÉCNICO. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas deberá, cada cinco años, actualizar el contenido del estudio técnico estipulado en el presente Reglamento.

Artículo 11. AMPLIACION DEL ESTUDIO TÉCNICO. En caso de que las autoridades del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales determinen que la información del artículo 6 se puede fortalecer adicionando datos, justificará por escrito su requerimiento.

Artículo 12. EXENCIÓN DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS. La exención de medición de parámetros procederá cuando se demuestre a través del Estudio al que se refiere el artículo 5 del presente Reglamento, que por las características del proceso productivo no se generan algunos de los parámetros establecidos en el presente Reglamento, aplicables a descarga de aguas residuales, reuso de aguas residuales y lodos.

#### CAPÍTULO IV CARACTERIZACIÓN

Artículo 13. CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE Y DEL EFLUENTE DE AGUAS RESIDUALES. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, que vierten éstas en un cuerpo receptor o al alcantarillado público, deberá realizar la caracterización del afluente, así como del efluente de aguas residuales e incluir los resultados en el estudio técnico.

Continuación del anexo 1.

Artículo 14. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS PARA REUSO. La persona individual o jurídica, pública o privada, que genere aguas residuales para reuso o las reuse, deberá realizar la caracterización de las aguas que genere y que desea aprovechar e incluir el resultado en el estudio técnico.

Artículo 15. CARACTERIZACIÓN DE LODOS. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar lodos, deberá realizar la caracterización de los mismos e incluir el resultado en el estudio técnico.

## CAPÍTULO V

### PARÁMETROS PARA AGUAS RESIDUALES Y VALORES DE DESCARGA A CUERPOS RECEPTORES

Artículo 16. PARÁMETROS DE AGUAS RESIDUALES. Los parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales son los siguientes:

- a) Temperatura,
- b) Potencial de hidrógeno, c) Grasas y aceites,
- d) Materia flotante,
- e) Sólidos suspendidos totales,
- f) Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados Celsius,
- g) Demanda química de oxígeno,
- h) Nitrógeno total,
  
- i) Fósforo total, j) Arsénico,
- k) Cadmio,
- l) Cianuro total, m) Cobre,
- n) Cromo hexavalente, o) Mercurio,
- p) Níquel, q) Plomo, r) Zinc,
- s) Color y
- t) Coliformes fecales.

Continuación del anexo 1.

Etapa	U				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil once				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<6000	6000≤EG<12000	12000≤EG<25000	25000≤EG<50000	5000
Reducción porcentual	10	20	30	35	
Etapa	D				
Duración, años	4				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil quince				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5500	5500≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<50000	5000
Reducción porcentual	10	20	40	45	
Etapa	T				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinte				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5000	5000≤EG<10000	10000≤EG<30000		3000
Reducción porcentual	50	70	85		
Etapa	C				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro				
Duración, años	4				
Carga, kilogramos por día	3000<EG<4000			4000	
Reducción porcentual	40			60	

Para efectos de la aplicación del presente modelo, el valor inicial de descarga estará determinado en el Estudio Técnico. Dicho valor inicial, se refiere a la carga expresada en kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno. Para los porcentajes de reducción de la etapa uno, se utilizará el valor inicial de descarga del Estudio Técnico y para cada una de las etapas siguientes, la carga inicial será el resultado obtenido de la reducción porcentual de la etapa anterior.

Continuación del anexo 1.

Artículo 18. DETERMINACIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO. Los entes generadores, en el Estudio Técnico, deberán incluir la determinación de la demanda química de oxígeno, a efecto de establecer su relación con la demanda bioquímica de oxígeno, mediante la siguiente fórmula: demanda química de oxígeno dividido entre la demanda bioquímica de oxígeno.

Artículo 19. META DE CUMPLIMIENTO. La meta de cumplimiento, al finalizar las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas, se establece en tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro de demanda bioquímica de oxígeno. Los entes generadores existentes que alcancen y mantengan éstos valores habrán cumplido con la meta establecida en este artículo y con el modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 17 del presente Reglamento.

Los entes generadores existentes que registren cargas menores o iguales a tres mil kilogramos por día, pero que registren valores mayores a doscientos miligramos por litro en el parámetro de calidad asociado, procederán a efectuar la reducción del valor de dicho parámetro de conformidad con los porcentajes correspondientes a la primera columna del lado izquierdo correspondiente a los rangos, en el modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 17, del presente Reglamento.

Los entes generadores existentes de aguas residuales de tipo especial y ordinario que después de tratar dichas aguas, y que en cualesquiera de las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas alcancen y mantengan valores en el parámetro de calidad asociado, iguales o menores que cien miligramos por litro en la demanda bioquímica de oxígeno, podrán realizar descargas mayores a tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno.

Artículo 20. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES. Los límites máximos permisibles de los parámetros para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores son:

Continuación del anexo 1.

			Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial hidrógeno de	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>8</sup>	< 1x10 <sup>6</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

**Artículo 21. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA ENTES GENERADORES NUEVOS.** Los entes generadores nuevos deberán cumplir, desde el inicio de sus operaciones, con una meta de tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro de demanda bioquímica de oxígeno. En el caso de que el parámetro de calidad asociado sea igual o menor a cien miligramos por litro en la demanda bioquímica de oxígeno, podrán realizar descargas mayores a tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno.

Adicionalmente, deberán cumplir los límites máximos permisibles de los parámetros siguientes:

Continuación del anexo 1.

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	20
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por litro	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Cuando de conformidad con lo establecido en el artículo 8 de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente se requiera un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, el ente generador deberá cumplir con los valores de los límites máximos permisibles contenidos en el presente artículo.

El ente generador nuevo que, por razones técnicas debidamente justificadas, requiera de un período de estabilización productiva, definirá en el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental la necesidad y etapas de ajuste consecutivas dentro del período de estabilización, el cual no excederá de seis meses, contados a partir del inicio de operaciones del ente generador. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, establecerá en la resolución aprobatoria del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente, el plazo o plazos consecutivos de las etapas que fueren necesarias para dicho período de estabilización.

Artículo 22. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES EN ESTEROS. Cuando el cuerpo receptor sea un estero se aplicarán las siguientes disposiciones:

Continuación del anexo 1.

a) Los entes generadores existentes deberán observar los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 20 del presente Reglamento. El parámetro de demanda bioquímica de oxígeno aplicable es el siguiente:

		Fecha máxima de cumplimiento				
		Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro	
		Etapa				
Parámetro	Dimensional	Valor inicial	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Demanda bioquímica	Miligramos por litro	500	300	250	150	100

b) Los entes generadores nuevos deberán aplicar los límites máximos permisibles y la reducción de la última etapa del artículo 20 y del artículo 22 literal a).

c) Para los entes generadores que descargan aguas residuales de tipo especial a esteros, los valores de las concentraciones de los parámetros establecidos en el presente Reglamento, se determinan de acuerdo a la diferencia entre la concentración del efluente y la del afluente. El resultado que se obtenga se utilizará como base para establecer si el ente generador cumple con los límites máximos permisibles de los artículos 20 y 22 literal a) del presente Reglamento.

d) A los entes generadores regulados en el presente artículo no les serán aplicables los artículos 17 y 19, del presente Reglamento.

**Artículo 23. DEDUCCIÓN ESPECIAL DE VALORES EN PARÁMETROS.** A los entes generadores de aguas residuales de tipo especial que registren en sus afluentes valores mayores a los límites máximos permisibles de los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos, se aplicará el concepto de deducción especial. Dicha deducción especial consiste en restar el valor de cada parámetro del efluente del valor registrado en el afluente. El resultado que se obtenga se utilizará como base para establecer si el ente generador cumple con los límites máximos permisibles del presente Reglamento.

Continuación del anexo 1.

Artículo 24. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGAS A CUERPOS RECEPTORES PARA AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y DE URBANIZACIONES NO CONECTADAS AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Las municipalidades o empresas encargadas del tratamiento de aguas residuales del alcantarillado público y las urbanizaciones existentes no conectadas al alcantarillado público, cumplirán con los límites máximos permisibles para descargar a cuerpos receptores, de cualesquiera de las formas siguientes:

- a) Con lo preceptuado en los artículos 17, 18, 19 y 20, de conformidad con los plazos establecidos en estos artículos del presente Reglamento.
- b) Con los límites máximos permisibles y plazos establecidos en el siguiente cuadro:

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro	Dos de mayo de dos mil veintinueve
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y	Miligramos por litro	100	50	10	10	10
Materia	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de	Miligramos por litro	700	250	100	100	100
Sólidos	Miligramos por litro	300	275	200	100	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	150	150	70	20	20
Fósforo total	Miligramos por litro	50	40	20	10	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno de	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>8</sup>	< 1x10 <sup>7</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	1	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	3	3	3	3
Cromo	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.02	0.02	0.01	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	2	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	0.4	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1000	750	500	500

Continuación del anexo 1.

Todas las municipalidades deberán cumplir con tener en operación, por lo menos con sistemas de tratamiento primario al cumplirse a más tardar el dos de mayo del dos mil quince.

Las municipalidades que reciban descargas de aguas residuales de tipo especial en el alcantarillado público, que contengan compuestos que no puedan ser tratados en un sistema de tratamiento primario, no estarán sujetas a los límites máximos permisibles de demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos, nitrógeno total y fósforo total en la etapa uno del cuadro anterior, del presente artículo, lo cual deberá ser acreditado en el Estudio Técnico.

La anterior disposición no exime a las municipalidades de cumplir con límites máximos permisibles de los parámetros del párrafo anterior en las etapas subsiguientes.

## CAPÍTULO VI

### PARÁMETROS PARA AGUAS RESIDUALES Y VALORES DE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO

Artículo 25. PARÁMETROS. Los parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales vertidas al alcantarillado público son los siguientes:

- a) Temperatura,
- b) Potencial de hidrógeno, c) Grasas y aceites,
- d) Materia flotante,
- e) Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados Celsius, f) Demanda química de oxígeno,
- g) Sólidos suspendidos totales, h) Nitrógeno total,
- i) Fósforo total, j) Arsénico,
- k) Cadmio,
- l) Cianuro total, m) Cobre,
- n) Cromo hexavalente, o) Mercurio,
- p) Níquel, q) Plomo, r) Zinc,
- s) Color y
- t) Coliformes fecales.

Continuación del anexo 1.

**Artículo 26. MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA DE CARGAS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO PARA DESCARGAS AL ALCANTARILLADO PÚBLICO.**

Las personas existentes que descargan al alcantarillado público deberán reducir en forma progresiva la demanda bioquímica de oxígeno, conforme a los valores y las etapas de cumplimiento del cuadro siguiente:

<b>Etapas</b>	<b>Uno</b>				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil once				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000 ≤ EG < 6000	6000 ≤ EG < 12000	12000 ≤ EG < 25000	25000 ≤ EG < 50000	50000 ≤ EG < 250000
Reducción porcentual	10	20	30	35	50
<b>Etapas</b>	<b>Dos</b>				
Duración, años	4				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil quince				
Carga, kilogramos por día	3000 ≤ EG < 5500	5500 ≤ EG < 10000	10000 ≤ EG < 30000	30000 ≤ EG < 50000	50000 ≤ EG < 125000
Reducción porcentual	10	20	40	45	50
<b>Etapas</b>	<b>Tres</b>				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinte				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000 ≤ EG < 5000	5000 ≤ EG < 10000	10000 ≤ EG < 30000	30000 ≤ EG < 65000	
Reducción porcentual	50	70	85	90	
<b>Etapas</b>	<b>Cuatro</b>				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro				
Duración, años	4				
Carga, kilogramos por día	3000 < EG < 4000		4000 ≤ EG < 7000		
Reducción porcentual	40		60		

EG = carga del ente generador correspondiente, en kilogramos por día.

Continuación del anexo 1.

Las personas existentes que descargan aguas residuales al alcantarillado público y que registren cargas menores o iguales a tres mil kilogramos por día, deben continuar con la reducción de la carga, hasta alcanzar el parámetro de valor asociado de cada etapa.

Para efectos de la aplicación del presente modelo, el valor inicial de descarga estará determinado en el Estudio Técnico; dicho valor inicial, se refiere a la carga expresada en kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno. Para los porcentajes de reducción de la etapa uno se utilizará el valor inicial de descarga del Estudio Técnico y para cada una de las etapas siguientes, la carga inicial será el resultado obtenido de la reducción porcentual de la etapa anterior.

Artículo 27. <u>PARÁMETRO DE CALIDAD ASOCIADO DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO.</u> Las personas que			Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
Parámetro	Dimensional	Valor inicial	Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Demanda bioquímica	Miligramos por litro	3500	1500	750	450	200

Artículo 28. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Para la descarga de las aguas residuales de tipo especial hacia un alcantarillado público, se deberá cumplir con los límites máximos permisibles de conformidad con las etapas de cumplimiento correspondientes establecidos en el cuadro siguiente:

			Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	200	100	60	60
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	1500	700	400	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	180	150	80	40
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	40	20	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9

Continuación del anexo 1.

Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>8</sup>	< 1x10 <sup>6</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

Las personas que empleen colorantes no biodegradables en sus procesos productivos y que descarguen aguas residuales al alcantarillado público, deberán indicar en el estudio técnico los tratamientos utilizados para cumplir con los límites máximos permisibles de color en las etapas correspondientes, con el propósito de evitar su incorporación al cuerpo receptor.

**Artículo 29. DETERMINACIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO PARA LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL AL**

**ALCANTARILLADO PÚBLICO.** Las personas que descarguen aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, deberán incluir en el Estudio Técnico a que se hace referencia en el artículo 5 del presente Reglamento, la determinación de la demanda química de oxígeno a efecto de establecer su relación con la demanda bioquímica de oxígeno, mediante la siguiente fórmula: demanda química de oxígeno dividido entre la demanda bioquímica de oxígeno.

**Artículo 30. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA PERSONAS NUEVAS QUE DESCARGUEN AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL AL**

**ALCANTARILLADO PÚBLICO.** Cuando de conformidad con lo establecido en el artículo 8 de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, a las personas nuevas que descarguen aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, se les requiera un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, deberán cumplir con los valores de los límites máximos permisibles contenidos en el siguiente cuadro:

Continuación del anexo 1.

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	60
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	200
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	40
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por litro	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500

La persona que, por razones técnicas debidamente justificadas, requiera de un período de estabilización productiva, definirá en el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental la necesidad y etapas de ajuste consecutivas dentro del período de estabilización, el cual no excederá de seis meses, contados a partir del inicio de operaciones del ente generador. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, establecerá en la resolución aprobatoria del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente, el plazo o plazos consecutivos de las etapas que fueren necesarias para dicho período de estabilización.

Artículo 31. OPCIONES DE CUMPLIMIENTO DE PARÁMETROS PARA LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas que se encuentren autorizadas por la municipalidad para descargar aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, podrán cumplir los límites máximos permisibles de cualesquiera de las formas siguientes:

Continuación del anexo 1.

- a) Estableciendo sistemas de tratamiento propios.
- b) Pagando a la municipalidad o a las empresas encargadas del tratamiento de aguas residuales del alcantarillado público, una tasa correspondiente al servicio que se preste, siempre y cuando dichas municipalidades cuenten con sistema de tratamiento para aguas residuales en operación.

Se exceptúan de la opción de cumplimiento contenida en el inciso b) del presente artículo, las personas que descarguen aguas residuales con metales pesados cuyos límites máximos permisibles excedan de los valores establecidos en los artículos 28 y 30.

Artículo 32. EXENCIÓN DE PAGO POR SERVICIOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Las personas que descarguen sus aguas residuales al alcantarillado público, cumpliendo con los límites máximos permisibles de la literal b) del artículo 24 del presente Reglamento, estarán exentas de todo pago por los servicios de tratamiento de aguas residuales brindado por las Municipalidades o las concesionarias.

Artículo 33. CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE TARIFAS DE SERVICIO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

De acuerdo con lo establecido en el artículo 3 del Código Municipal, y para efectos de este Reglamento, las municipalidades coordinarán con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales la determinación de los criterios técnicos que servirán de base para establecer las tarifas del servicio de tratamiento de aguas residuales, para lo cual se tomará en cuenta como mínimo lo siguiente:

- a) Los costos de operación, mantenimiento, mejoramiento de calidad y cobertura de servicios.
- b) Los límites máximos permisibles establecidos en este Reglamento.
- c) Los estudios técnicos cuyos valores y caracterización sean conocidos por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y el que deba realizar la Municipalidad jurisdiccional.
- d) La tarifa será diferenciada atendiendo a las características de cada descarga. Las Municipalidades establecerán las tarifas o tasas respectivas de conformidad con el propio Código Municipal.

Continuación del anexo 1.

## CAPÍTULO VII PARÁMETROS DE AGUAS PARA REUSO

Artículo 34. AUTORIZACIÓN DE REUSO. El presente Reglamento autoriza los siguientes tipos de reuso de aguas residuales, que cumplan con los límites máximos permisibles que a cada uso correspondan.

TIPO I: REUSO PARA RIEGO AGRÍCOLA EN GENERAL: uso de un efluente que debido a los nutrientes que posee se puede utilizar en el riego extensivo e intensivo, a manera de fertirriego, para recuperación y mejoramiento de suelos y como fertilizante en plantaciones de cultivos que, previamente a su consumo, requieren de un proceso industrial, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35. Se exceptúa de este reuso los cultivos considerados en el tipo II.

TIPO II: REUSO PARA CULTIVOS COMESTIBLES: con restricciones en el riego de áreas con cultivos comestibles que se consumen crudos o precocidos, como hortalizas y frutas. Para el caso de coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno, deberá cumplirse de conformidad con los límites máximos permisibles del artículo 35. Adicionalmente, para otros parámetros, deberán cumplir los límites máximos permisibles presentados en el cuadro del artículo 21 del presente Reglamento, a excepción de sólidos en suspensión, nitrógeno total y fósforo total.

TIPO III: REUSO PARA ACUACULTURA: uso de un efluente para la piscicultura y camaronicultura, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35.

TIPO IV: REUSO PARA PASTOS Y OTROS CULTIVOS: con restricciones en el riego de áreas de cultivos no alimenticios para el ser humano como pastos, forrajes, fibras, semillas y otros, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35.

TIPO V: REUSO RECREATIVO: con restricciones en el aprovechamiento para fines recreativos en estanques artificiales donde el ser humano sólo puede tener contacto incidental, incluido el riego en áreas verdes, donde el público tenga contacto o no, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35.

Cualquier otro reuso no contemplado en el presente artículo deberá ser autorizado previamente por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Continuación del anexo 1.

Artículo 35. PARÁMETROS Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA REUSO. El agua residual para reuso deberá cumplir con los límites máximos permisibles del siguiente cuadro:

Tipo de reuso	Demanda bioquímica de oxígeno, miligramos por litro	Coliformes fecales, número más probable por cien mililitros
Tipo I	No aplica	No aplica
Tipo II	No aplica	$< 2 \times 10^2$
Tipo III	200	No aplica
Tipo IV	No aplica	$< 1 \times 10^3$
Tipo V	200	$< 1 \times 10^3$

Artículo 36. METALES PESADOS Y CIANUROS. Los límites máximos permisibles de metales pesados y cianuros en las aguas para reuso son los presentados en el cuadro del artículo 21 del presente Reglamento.

Artículo 37. RECIRCULACIÓN INTERNA DE AGUA. Todo ente generador podrá recircular las aguas residuales antes de que las mismas se viertan al cuerpo receptor. Dicha recirculación no se considerará como reuso ni estará sujeta a las disposiciones del presente Reglamento.

## CAPÍTULO VIII PARÁMETROS PARA LODOS

Artículo 38. OBLIGATORIEDAD. Todos los lodos producidos como consecuencia del tratamiento de aguas residuales que representen un riesgo para el ambiente y la salud y seguridad humana deben cumplir los límites máximos permisibles para su disposición final del presente Reglamento.

Artículo 39. APLICACIÓN. Los lodos que se regulan en el presente Reglamento son aquéllos generados por el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario o especial.

Artículo 40. TECNOLOGÍA Y SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS. Se permite el tratamiento de los lodos por medio de la tecnología o los sistemas que el ente generador considere más adecuados a sus condiciones particulares, incluyendo la incineración a temperaturas mayores de mil quinientos grados Celsius.

Artículo 41. DISPOSICIÓN FINAL. Se permite efectuar la disposición final de lodos, por cualesquiera de las siguientes formas:

Continuación del anexo 1.

- a) Aplicación al suelo: acondicionador, abono o compost; b) Disposición en rellenos sanitarios;
- c) Confinamiento o aislamiento; y,
- d) Combinación de las antes mencionadas.

Artículo 42. PARÁMETROS Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LODOS. Para poder efectuar la disposición final de lodos de acuerdo a las formas descritas en el artículo 41 del presente Reglamento, los valores de sus propiedades fisicoquímicas no deben exceder los límites máximos permisibles descritos en el siguiente cuadro:

Disposición Final	Dimensionales	Aplicación al suelo	Disposición en rellenos sanitarios	Confinamiento
Arsénico	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cadmio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cromo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	1500	3000	> 1000
Mercurio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	25	50	> 50
Plomo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	500	1000	> 1000

Los expresados en el cuadro anterior son los límites máximos permisibles para suelos con potencial de hidrógeno menor que siete unidades. En los suelos que posean potencial de hidrógeno mayor o igual que siete unidades se podrán disponer lodos hasta un cincuenta por ciento más de los valores presentados como límites máximos permisibles.

Artículo 43. APLICACIÓN AL SUELO. Los lodos que presenten metales pesados y que se ajusten a los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 42, podrán disponerse como acondicionador del suelo, en cuyo caso se permitirá disponer hasta doscientos mil kilogramos por hectárea por año. En caso de que la aplicación sea como abono se permitirá disponer hasta cien mil kilogramos por hectárea por año.

Artículo 44. DISPOSICIÓN HACIA RELLENOS SANITARIOS. Se permitirá la disposición en un relleno sanitario de los lodos que no sean bioinfectuosos, que no requieran confinamiento y que cumplan con los límites máximos permisibles del artículo 42 del presente Reglamento.

Continuación del anexo 1.

Los rellenos sanitarios deberán contar con autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y con aval del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.

Artículo 45. CONFINAMIENTO O AISLAMIENTO. Los lodos que en su estructura posean compuestos que requieran confinamiento o aislamiento para evitar el impacto adverso del manto freático, las fuentes de suministro de agua superficiales y subterráneas, el suelo, subsuelo y el aire, deben disponerse en recintos que posean autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y el aval de los Ministerios de Salud Pública y Asistencia Social y de Energía y Minas.

Artículo 46. ~~COMERCIALIZACIÓN~~. ~~La comercialización de los lodos producidos es libre, siempre que los mismos se caractericen y se cumpla con los tratados y convenios internacionales que rijan en la materia ratificados por Guatemala y con lo siguiente:~~

- a) No debe permitirse el contacto humano directo con los lodos.
- b) Los lodos deben cumplir las especificaciones descritas en el artículo 42.
- c) ~~El transporte de lodos debe realizarse~~ en recipientes y vehículos acondicionados para evitar fugas y derrames.
- d) Los recintos para su almacenamiento transitorio deben ser autorizados para el efecto por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
- e) Las empresas que presten los servicios de extracción, manejo o disposición final deben contar con la autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, y si es aplicable del Ministerio de Energía y Minas.

Artículo 47. CONTRATACIÓN DE SERVICIOS. Las empresas que presten los servicios de extracción, manejo o disposición final de lodos deberán cumplir lo dispuesto en los artículos 41, 42, 43, 44, 45 y 46 del presente Reglamento. En el caso de la contratación de cualquiera de los servicios establecidos en este artículo, el ente generador queda exento de responsabilidad.

Artículo 48. VIGILANCIA DE CUMPLIMIENTO. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales coordinará a través de sus dependencias la realización, a su costa, de muestreos aleatorios de los lotes de lodos que sean dispuestos, a efecto de verificar el cumplimiento de los parámetros del artículo 42 del presente Reglamento, cuando sea aplicable.

Continuación del anexo 1.

## CAPÍTULO IX SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN

Artículo 49. DE LA FRECUENCIA DE TOMA DE MUESTRAS. Para el seguimiento y evaluación de aguas residuales y de aguas para reuso, los entes generadores deberán tomar a su costa, como mínimo, dos muestras al año y efectuar los análisis que correspondan de conformidad con los parámetros contenidos en el estudio técnico.

Para el seguimiento y evaluación de lodos, los entes generadores deberán tomar a su costa, como mínimo, dos muestras al año y efectuar los análisis que correspondan de conformidad con los parámetros contenidos en el estudio técnico. ~~En el caso de las entidades contratadas para prestar los servicios de extracción, manejo y disposición final de lodos, éstas tendrán que realizar su toma de muestras de acuerdo al siguiente cuadro:~~

Peso promedio de lodos producidos	Periodicidad
Entre 0 y 1500 kilogramos diarios	Trimestral
Entre 1501 y 3000 kilogramos diarios	Bimensual
Más de 3000 kilogramos diarios	Mensual

Los entes generadores deberán llevar un registro de los resultados de estos análisis y conservarlos durante un plazo de cinco años posteriores a su realización, para su presentación al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales cuando le sea requerido por razones de seguimiento y evaluación. El número de muestras simples requeridas para conformar una muestra, se indica en el cuadro siguiente:

Número de muestras simples para conformar una muestra compuesta e intervalos por		
Horas por día que opera la actividad que genera la descarga de aguas residuales	Número mínimo de muestras simples para conformar una muestra compuesta	Intervalo mínimo en horas entre toma de muestras simples
Menor que 8	2	2
De 8 a 12	3	3
Mayor que 12	4	3

Artículo 50. MEDICIÓN DE CAUDAL. En la toma de cada muestra simple se hará una medición de caudal, para poder relacionarla con la concentración y así determinar la carga.

Continuación del anexo 1.

Artículo 51. VIGILANCIA DE CUMPLIMIENTO. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales vigilará que se cumplan con todos los requisitos y procedimientos, establecidos en el presente Reglamento para los entes generadores y para las personas que descargan aguas residuales al alcantarillado público. Asimismo, coordinará a través de sus dependencias competentes, la realización de muestreos aleatorios en los cuerpos receptores y en los dispositivos para toma de muestras, para evaluar el mejoramiento de la calidad del recurso hídrico y el cumplimiento del presente Reglamento.

Artículo 52. CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVOS PARA TOMA DE MUESTRAS. Los entes generadores deberán contar, en todos los puntos de descarga, con un dispositivo para facilitar la toma de muestras y la medición de caudales; dichos dispositivos deberán estar ubicados en lugares accesibles para la inspección. En el caso de los entes generadores a los cuales se aplique el artículo 22 y 23 contarán con el dispositivo para la toma de muestras del afluente.

Artículo 53. LUGARES EXCLUSIVOS PARA TOMA DE MUESTRAS. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y otras entidades de gobierno, incluidas las descentralizadas y autónomas, de acuerdo con las competencias asignadas por la Ley, a través de sus dependencias respectivas, coordinarán las acciones para la toma de muestras, exclusivamente en lugares donde se encuentran ubicados los dispositivos de descarga mencionados en el artículo 52.

Artículo 54. MÉTODOS DE ANÁLISIS Y MUESTREO. Para los efectos de lo previsto en el presente Reglamento, los laboratorios estatales, universitarios, privados legalmente constituidos, o los laboratorios establecidos por los entes generadores, emplearán los métodos de análisis y muestreo establecidos por la Comisión Guatemalteca de Normas; o en su defecto por entidades como:

- a) Asociación Americana de Salud Pública, Asociación Americana de Obras de Agua y Federación de Ambientes Acuáticos en los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales;
- b) Organizaciones técnicas reconocidas en el ámbito nacional e internacional,
- y c) Especificaciones del fabricante de los equipos que se utilicen.

Los informes de los resultados de los análisis de laboratorio, deberán ser firmados por profesional colegiado activo especializado en la materia.

Continuación del anexo 1.

## CAPÍTULO X PROHIBICIONES Y SANCIONES

Artículo 55. PROHIBICIÓN DE DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES. Se prohíbe terminantemente la disposición de aguas residuales de tipo ordinario a flor de tierra, en canales abiertos y en alcantarillado pluvial.

Artículo 56. PROHIBICIÓN DE DESCARGA DIRECTA. Se prohíbe descargar directamente aguas residuales no tratadas al manto freático.

Artículo 57. PROHIBICIÓN DE DILUIR. Se prohíbe el uso de cualquier tipo de aguas ajenas al ente generador, con el propósito de diluir las aguas residuales. Ninguna meta contemplada en el presente Reglamento se puede alcanzar diluyendo.

Artículo 58. PROHIBICIÓN DE REUSOS. Se prohíbe el reuso de aguas residuales en los siguientes casos:

- a) En las zonas núcleo de las áreas protegidas siguientes: parque nacional, reserva biológica, biotopo protegido, monumento natural, área recreativa natural, manantial y refugio de vida silvestre;
- b) En las zonas núcleo de los sitios Ramsar, declarados en el marco de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas;
- c) En otras áreas donde se ponga en riesgo la biodiversidad y la salud y seguridad humana;
- d) Para el uso con fines recreacionales exceptuando el tipo V, indicado en el artículo 34.

Artículo 59. PROHIBICIÓN DE DISPOSICIÓN DE LODOS. Se prohíbe terminantemente efectuar la disposición final de lodos en alcantarillados o cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

Además, se prohíbe la disposición de lodos como abono para cultivos comestibles que se pueden consumir crudos o precocidos, hortalizas y frutas, sin haber efectuado su estabilización y desinfección respectiva ni haber determinado la ausencia de metales pesados y que no excedan las dos mil unidades formadoras de colonia por kilogramo de coliformes fecales.

Continuación del anexo 1.

Artículo 60. APLICACIÓN DE SANCIONES. Las infracciones a este Reglamento darán lugar a la aplicación de cualesquiera de las sanciones establecidas en la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, según el grado de incumplimiento de límites máximos permisibles observando:

- a) La mayor o menor gravedad del impacto ambiental, según el tipo de incumplimiento de que se trate,
- b) La trascendencia del perjuicio a la población, c) Las condiciones en que se produce, y
- d) La reincidencia del infractor.

La omisión del cumplimiento de alguno de los requerimientos establecidos en el artículo 6 del presente reglamento, dará lugar a que el Ministerio de Ambiente y de Recursos Naturales, de conformidad con lo estipulado en el artículo 29, 31 y 34 de la Ley de la Protección y Mejoramiento de Medio Ambiente, inicie el proceso administrativo correspondiente.

## CAPÍTULO XI DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 61. EXCEPCIÓN DE LA PREPARACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO. Se exceptúan de la preparación del estudio técnico contemplado en el artículo 5 como ente generador toda vivienda unifamiliar y aquellas edificaciones, públicas y privadas, que generen solamente aguas residuales de tipo ordinario y que cuenten con acometida autorizada hacia el alcantarillado público o de entes administradores de servicios de tratamiento de aguas residuales.

Esta excepción no aplica para las municipalidades ni las empresas que tienen concesionados los servicios de recolección, transporte, manejo o disposición de aguas residuales; ni las plantas de tratamiento de urbanizaciones que no estén conectadas a una acometida municipal; porque de conformidad con lo estipulado en el artículo 5 del presente Reglamento, son generadores de aguas residuales.

Artículo 62. LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE FÓSFORO. Quienes efectúen descargas hacia cuencas de lagos, lagunas o embalses naturales, tendrán obligación de cumplir con cinco miligramos por litro de fósforo total al finalizar la cuarta etapa. Asimismo, en el caso de los entes generadores nuevos deberán cumplir con cinco miligramos por litro de fósforo total al inicio de sus operaciones.

Continuación del anexo 1.

Artículo 63. INCUMPLIMIENTO DE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES Y SUS ETAPAS CORRESPONDIENTES. Se entenderá que hay contaminación, para todos los efectos legales, cuando los entes generadores existentes y las personas existentes que descargan aguas residuales al alcantarillado público, incumplan con los límites máximos permisibles establecidos en las etapas correspondientes del artículo 17 y, también, cuando incumplan con las consideraciones de los artículos 19, 20, 22, 26, 27 y 28.

Se entenderá que existe contaminación, para todos los efectos legales, cuando los entes generadores nuevos y las personas nuevas que descargan aguas residuales al alcantarillado público, incumplan con los límites máximos permisibles en las etapas de cumplimiento correspondientes y las consideraciones contempladas en los artículos 17, 19, 20, 22, 26, 27 y 28, siempre y cuando los valores de sus descargas excedan los límites máximos permisibles que en el momento tengan autorizados los entes generadores existentes.

El incumplimiento de los límites máximos permisibles por parte de los entes generadores nuevos y las personas nuevas que descargan aguas residuales al alcantarillado público, de conformidad con los artículos 21 y 22, y 30, respectivamente, con valores que no excedan los límites máximos permisibles autorizados para los entes generadores existentes, conforme a los artículos 17, 19, 20 y 22 y las personas existentes que descargan aguas residuales al alcantarillado público, conforme a los artículos 26, 27 y 28, en las etapas de cumplimiento uno, dos y tres, dará lugar a la aplicación de las sanciones administrativas que contempla la ley.

Para todos los efectos legales, el período de estabilización otorgado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales a un ente generador nuevo o a una persona nueva que descarga aguas residuales al alcantarillado público, se considerará como una situación de caso fortuito o desastres naturales, y en consecuencia cualquier incumplimiento dentro de dicho período estará excluido de responsabilidad penal o administrativa.

Artículo 64. REVISIÓN DEL REGLAMENTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES. La revisión del presente Reglamento deberá hacerse cada cuatro años, respetando el principio de gradualidad en las etapas de cumplimiento y considerando el grado de cumplimiento de los entes generadores y de las personas que descargan al alcantarillado público.

Continuación del anexo 1.

Artículo 65. CUMPLIMIENTO DE LAS MUNICIPALIDADES.

Las Municipalidades que opten por cumplir lo preceptuado en el literal b) del artículo 24 de este Reglamento, iniciarán el cumplimiento de los límites máximos permisibles de la etapa uno para entes generadores existentes, el dos de mayo de dos mil once. A partir de dicha fecha, aplicarán las reducciones en los plazos y etapas establecidos, hasta el final de los dieciocho años.

Esta disposición no exime a las Municipalidades del cumplimiento de los demás aspectos que contempla el presente Reglamento.

Artículo 66. CUMPLIMIENTO DE PERSONAS PRIVADAS QUE DESCARGAN A SISTEMAS DE TRATAMIENTO PRIVADOS.

Las personas individuales o jurídicas privadas que descargan aguas residuales de tipo especial a un sistema de alcantarillado privado para conducir dichas aguas a la planta de tratamiento de aguas residuales privada en operación no se consideran entes generadores de aguas residuales o personas que descargan aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, porque para los efectos de aplicación del presente Reglamento, la persona individual o jurídica responsable de administrar la planta de tratamiento será considerada el ente generador o la persona que descarga aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público para todos los efectos del presente Reglamento. El único punto de referencia para el control de la descarga en estos casos es el efluente de la planta de tratamiento.

Artículo 67. CASOS NO PREVISTOS. Todos aquellos casos que no hayan sido previstos en el presente Reglamento, deberán ser resueltos por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de conformidad con los principios de la Ley del Organismo Judicial.

Artículo 68. EPÍGRAFES. Los epígrafes que preceden a los artículos del presente Reglamento, no tienen validez interpretativa y no pueden ser citados con respecto al contenido y alcances de esta norma.

## CAPÍTULO XII DISPOSICIONES TRANSITORIAS

Artículo 69. PLAZO PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, que vierten éstas o no a un cuerpo receptor o al alcantarillado público deberá

Continuación del anexo 1.

realizar el estudio técnico estipulado en el presente Reglamento, en el plazo de un año, contado a partir de la vigencia del mismo.

---

Artículo 70. EXPEDIENTES EN TRÁMITE. Las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas que vierten las aguas residuales a cuerpos receptores cuya solicitud de aprobación de instrumentos de evaluación ambiental se encuentre en trámite antes de la vigencia del presente Reglamento, se considerarán entes generadores existentes para todos los efectos de su aplicación, de acuerdo a los artículos 17, 18, 19, 20 y 22.

Asimismo a las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas que viertan sus descargas al alcantarillado público y cuya solicitud de aprobación de instrumentos de evaluación ambiental se encuentre en trámite antes de ~~la vigencia del presente Reglamento, les será aplicable lo preceptuado~~ en los artículos 26, 27, 28 y 29 del mismo.

Artículo 71. LÍMITES APROBADOS EN ESTUDIOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. Cuando en la resolución del Estudio de Evaluación Impacto Ambiental, se hayan aprobado límites con ~~valores menores que los contenidos~~ en el presente Reglamento, dichos límites continuarán siendo aplicables a ese ente generador existente. En caso de que los valores de los límites aprobados en la resolución del Estudio de Evaluación Impacto Ambiental sean mayores a los establecidos en los artículos 17, 19, 20, 22, 26, 27 y 28, ese ente generador o persona que descarga aguas residuales al alcantarillado público, deberá cumplir con lo dispuesto en las etapas y las fechas máximas de cumplimiento que corresponda a los artículos mencionados.

Artículo 72. MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA DE CARGAS DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO. Los resultados que se obtengan en los Estudios Técnicos, servirán de base para elaborar, en un plazo no mayor de dieciocho meses a partir de la vigencia del presente Reglamento, el modelo de reducción progresiva de cargas correspondiente a la demanda química de oxígeno.

Artículo 73. OTROS PARÁMETROS. Otros parámetros que en el futuro se identifiquen como competencia de este Reglamento serán agregados al presente cuerpo normativo al determinarse los mismos.

Artículo 74. MANUALES. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, queda facultado para que, en el plazo de un año a partir de la vigencia

Continuación del anexo 1.

del presente Reglamento, elabore el manual general que contenga, entre otros temas, los siguientes:

- a) Toma de muestras de aguas residuales, aguas para reuso y lodos. b) Cálculo de cargas.
- c) Aplicación del modelo de reducción progresiva de cargas. d) Deducción especial de valores en parámetros.

Artículo 75. DEROGATORIA. Se deroga el Acuerdo Gubernativo número 66-2005, de la Presidencia de la República, de fecha diecisiete de febrero de dos mil cinco, que contiene el Reglamento de Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores y cualquier otra disposición que se oponga al presente Reglamento.

Artículo 76. VIGENCIA. El presente Acuerdo Gubernativo empezará a regir al día siguiente después de su publicación en el Diario de Centro América.

COMUNÍQUESE.

OSCAR BERGER PERDOMO

JUAN MARIO DARY FUENTES

JORGE RAÚL ARROYAVE REYES

Fuente: Congreso de la República de Guatemala. *Acuerdo Gubernativo 236-2006*