



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

**PROPUESTA DE UN PROCESO COMBINADO DE TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO
SUB-SUPERFICIAL (HAFSS) HORIZONTAL CON LAGUNAJE ANAEROBIO Y DE
MADURACIÓN, PARA EL TRATAMIENTO DE LOS AFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES
DE LA CUENCA DEL RÍO LAS VACAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL PAÍS**

Franklin Gary Ajcholón Tubac

Asesorado por el Ing. Qco. Zenón Much Santos

Guatemala, febrero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE UN PROCESO COMBINADO DE TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO
SUB-SUPERFICIAL (HAFSS) HORIZONTAL CON LAGUNAJE ANAEROBIO Y DE
MADURACIÓN, PARA EL TRATAMIENTO DE LOS AFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES
DE LA CUENCA DEL RÍO LAS VACAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL PAÍS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FRANKLIN GARY AJCHOLÓN TUBAC
ASESORADO POR EL ING. ZENÓN MUCH SANTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO 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

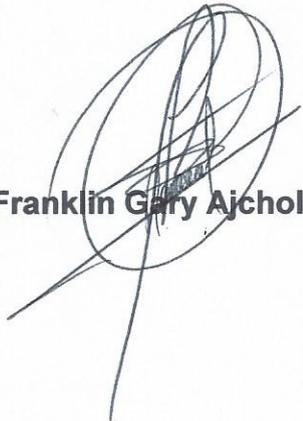
DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Juan Pablo Argueta Elías
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordóñez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López.

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:

PROPUESTA DE UN PROCESO COMBINADO DE TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL (HAFSS) HORIZONTAL CON LAGUNAJE ANAEROBIO Y DE MADURACIÓN, PARA EL TRATAMIENTO DE LOS AFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES DE LA CUENCA DEL RÍO LAS VACAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL PAÍS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 17 de octubre de 2017.



Franklin Gary Ajcholón Tubac



Guatemala, 1 de octubre de 2018

FACULTAD DE INGENIERIA

Ingeniero

Carlos Salvador Wong Davi

Director

Escuela de Ingeniería Química

Su Despacho

Por medio de la presente le informo que he revisado y aprobado el trabajo de graduación **“Propuesta de un proceso combinado de tipo humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) horizontal con lagunaje anaerobio y de maduración, para el tratamiento de los afluentes de aguas residuales de la cuenca del Río Las Vacas en el área metropolitana del país“**, realizado por el estudiante de Ingeniería Química **Franklin Gary Ajcholón Tubac** con CUI **2310905440101** y registro académico 2012 13066 el cual llena los requisitos exigidos de investigación tanto por la Facultad de Ingeniería como por la Universidad de San Carlos, por lo que lo someto a su consideración para que continúe con los tramites requeridos por la Escuela de Ingeniería Química.

Agradeciendo la atención a la presente, le saluda respetuosamente,

M. Sc. Ing.  Zenon Much Santos
Asesor de Tesis

ZENON MUCH SANTOS

Ing. Químico Col. No. 420

M. Sc. en Ingeniería Sanitaria



Guatemala, 16 de octubre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.050.2018.

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 **071-2016** 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 el estudiante universitario: **Franklin Gary Ajcholón Tubac**.
Identificado con el CUI: **2310 90544 0101**.
Identificado con registro académico: **2012-13066**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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:

PROPUESTA DE UN PROCESO COMBINADO DE TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL (HAFSS) HORIZONTAL CON LAGUNAJE ANAEROBIO Y DE MADURACIÓN, PARA EL TRATAMIENTO DE LOS AFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES DE LA CUENCA DEL RÍO LAS VACAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL PAÍS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Zenon Much Santos**.

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"

Ing. Jaime Domingo Carranza González
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.006.2019

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 del estudiante, **FRANKLIN GARY AJCHOLÓN TUBAC** titulado: **"PROPUESTA DE UN PROCESO COMBINADO DE TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL (HAFSS) HORIZONTAL CON LAGUNAJE ANAEROBIO Y DE MADURACIÓN, PARA EL TRATAMIENTO DE LOS AFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES DE LA CUENCA DEL RÍO LAS VACAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL PAÍS"**.
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

Guatemala, enero 2019

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale



Asociación Centroamericana de Academias de Ingeniería y Ciencias
Entregando el Mejor Talento a la Ingeniería

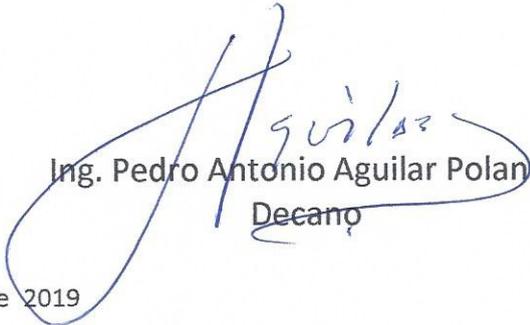




DTG. 037.2019

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: **PROPUESTA DE UN PROCESO COMBINADO DE TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL (HAFSS) HORIZONTAL CON LAGUNAJE ANAEROBIO Y DE MADURACIÓN, PARA EL TRATAMIENTO DE LOS AFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES DE LA CUENCA DEL RÍO LAS VACAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL PAÍS**, presentado el estudiante universitario: **Franklin Gary Ajcholón Tubac**, 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, febrero de 2019

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser la piedra angular en mi vida y darme la oportunidad y la sabiduría para alcanzar este sueño tan importante en mi carrera como profesional.

Mis padres

Edgar Rolando Ajcholón y Blanca Aracely Tubac, por su sacrificio y esfuerzo a lo largo de su vida para que lograra llegar a este día. Sin duda alguna este triunfo es de ustedes.

Mis hermanos

Jaqueline Ajcholón Tubac y Edison Ajcholón Tubac, por su afecto a mi persona y su apoyo incondicional desde el inicio hasta la etapa final de mi carrera

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por nunca apartarse de mi vida y guiarme por su camino. Gracias a Él ha sido posible alcanzar esta meta.
Mis padres	Por cuidarme, formarme y enseñarme el camino correcto a lo largo de mi vida. Gracias a ustedes he logrado culminar esta etapa en mi carrera profesional.
Mi familia	Por sus consejos, enseñanzas y su apoyo incondicional en momentos difíciles de mi vida.
Mis amigos	Por su amistad que ha sido parte importante en mi formación como profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi alma mater, por brindarme la oportunidad de estudiar en esta excelente casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad de aprender el conocimiento necesario para enfrentar el ámbito laboral.
Escuela de Ingeniería Química	Por brindarme las herramientas necesarias para resolver problemas ingenieriles de calidad y con excelencia en mi ámbito como profesional.

Ing. Vinicio Maltéz	Por ser parte en mi formación como profesional en Ingenio Santa Ana y compartirme de su alto conocimiento.
Ing. Luis Estrada	Por su amistad y apoyo durante la etapa final de mi carrera y compartirme de su conocimiento.
Ing. Ángel Ajcabul	Por su amistad hacia mi persona y su apoyo en el ámbito laboral.
Ing. Jeovany Miranda	Por brindarme la oportunidad de realizar mi investigación final con el apoyo de Empagua.
Ing. Otto Callejas	Por brindarme su apoyo para la realización de este trabajo de investigación.
Ing. Otto Raúl de León	Por sus enseñanzas en la universidad y compartir de su conocimiento hacia mi persona.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de aguas residuales	3
2.1.1. Parámetros fisicoquímicos.....	3
2.1.1.1. Sólidos en suspensión.....	3
2.1.1.2. Turbidez.....	4
2.1.1.3. Temperatura	4
2.1.1.4. Oxígeno disuelto (OD)	4
2.1.1.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	5
2.1.1.6. Demanda química de oxígeno (DQO)	5
2.1.1.7. Aceites y Grasas.....	5
2.1.1.8. Acidez (pH)	5
2.1.1.9. Fósforo total.....	6

	2.1.1.10.	Nitrógeno total	6
	2.1.1.11.	Color de aguas residuales.....	6
2.1.2.		Parámetros microbiológicos	7
	2.1.2.1.	Bacterias	7
		2.1.2.1.1. Coliformes totales	7
		2.1.2.1.2. Coliformes fecales.....	8
2.2.		Hidrología del río Las Vacas	8
2.3.		Características fisicobióticas del río Las Vacas	10
2.4.		Mapa de localización del río Las Vacas en la red hidrológica de la república de Guatemala	12
2.5.		Tratamientos de aguas residuales	13
	2.5.1.	Pretratamiento.....	14
		2.5.1.1. Desbaste	15
		2.5.1.2. Desarenado.....	16
		2.5.1.3. Desengrasado	16
	2.5.2.	Tratamiento primario	17
	2.5.3.	Lagunas anaerobias	18
	2.5.4.	Tratamiento secundario.....	20
		2.5.4.1. Humedales artificiales	22
		2.5.4.2. Fundamentos de los humedales	23
		2.5.4.3. Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)	24
		2.5.4.4. Esquemas de funcionamiento	26
		2.5.4.5. Construcción de los humedales artificiales	26
	2.5.5.	Tratamiento terciario	36
		2.5.5.1. Lagunas de maduración	37
		2.5.5.2. Construcción de lagunaje de maduración.....	38

	2.5.5.3.	Ventajas e inconvenientes del lagunaje	41
2.6.		Comparativo, tratamiento ríos Villalobos y Las Vacas.....	43
2.7.		Evaluación de la calidad del agua	43
	2.7.1.	Índice de calidad del agua general ICA	43
	2.7.2.	Estimación del ICA	44
	2.7.3.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores	53
3.		DISEÑO METODOLÓGICO	55
	3.1.	Condiciones del área donde se realizará el estudio	55
	3.2.	Delimitación del campo de estudio	57
	3.2.1.	Delimitación geográfica del área de muestreo.....	57
		3.2.1.1. Sitios de muestreo para el río las Vacas.....	57
	3.2.2.	Delimitación temporal	59
	3.3.	Recurso humano disponible	59
	3.4.	Recursos y materiales disponibles	59
	3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	60
	3.5.1.	Métodos cualitativos	61
	3.5.2.	Métodos de cuantificación	61
		3.5.2.1. Métodos para los análisis fisicoquímicos	61
		3.5.2.2. Métodos para los análisis microbiológicos	62
	3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	62
	3.6.1.	Tablas de tabulación de datos del río Las Vacas ...	62
	3.7.	Análisis Estadístico.....	63
	3.7.1.	Media maestral	64

3.7.2.	Desviación estándar	64
3.7.3.	Coeficiente de variación de Pearson	65
3.7.4.	Análisis de varianza	66
4.	RESULTADOS.....	69
4.1.	Caracterización fisicoquímica del río Las Vacas en el área metropolitana en función de las fechas y los puntos de muestreo	69
4.2.	Caracterización microbiológica del río Las Vacas en el área metropolitana, en función de los puntos y las fechas de muestreo	71
4.3.	Determinación del índice de calidad del agua ICA, del río Las Vacas en el área del departamento de Guatemala	73
4.4.	Determinar la media aritmética de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, medidos en época seca, en los diferentes puntos de muestreo	74
4.5.	Determinar la descarga con mayor foco de contaminación hacia el río Las Vacas	75
4.6.	Realizar prueba de Tukey y ANOVA para los puntos de muestreo establecidos	76
4.7.	Propuesta de un proceso de tratamiento terciario de aguas residuales para los afluentes del río Las Vacas	80
	CONCLUSIONES.....	99
	RECOMENDACIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	103
	APÉNDICES.....	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ubicación río las vacas área metropolitana del país	13
2.	Valoración del ICA en función de Coliformes Fecales.....	47
3.	Valoración del ICA en función del pH.....	47
4.	Valoración del ICA en función del DBO5.....	48
5.	Valoración del ICA en función de los Nitratos	48
6.	Valoración del ICA en función de Fosfatos	49
7.	Valoración del ICA en función de la Temperatura	50
8.	Valoración del ICA en función de la turbidez.....	50
9.	Valoración del ICA en función de los SDT	51
10.	Valoración del ICA en función del OD	52
11.	Mapa de localización de sitios de muestreo	58

TABLAS

I.	Caudal medio en estaciones hidrométricas (m ³ /s)	9
II.	Comparativa, tratamiento ríos Villalobos y Las Vacas	43
III.	Clasificación de calidad del agua ICA	45
IV.	Ponderación para el cálculo del ICA	46
V.	Valores de oxígeno disuelto en función de la temperatura.....	51
VI.	Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de descarga de aguas residuales en cuerpos receptores	53
VII.	Cuadro de condiciones del sistema a estudiar	55
VIII.	Cuadro de variables dependientes.....	56

IX.	Resultados de los análisis fisicoquímico y microbiológicos del río Las Vacas	63
X.	Media maestra de cada parámetro en cada punto de muestreo	64
XI.	Desviación Estándar de parámetros en cada punto de muestreo	65
XII.	Coeficiente de variación de Pearson de cada parámetro	65
XIII.	Criterios para análisis de varianza Anova	66
XIV.	Resumen de Resultados Anova	67
XV.	Punto 1: descarga covias regulador de caudal zona 5, ciudad capital	69
XVI.	Punto 2: descarga colector oriente colonia Los Ángeles zona 6, ciudad capital	70
XVII.	Punto 3: descarga colector poniente, Buganvilias	70
XVIII.	Bajo puente antiguo Buganvilias zona 6	71
XIX.	Microbiología, descarga Covias, regulador de caudal zona 5, ciudad capital	72
XX.	Microbiología, colector oriente, colonia Los Ángeles zona 6, ciudad capital	72
XXI.	Microbiología, descarga colector poniente Buganvilias	72
XXII.	Microbiología, bajo puente antiguo Buganvilias	73
XXIII.	Medición del índice de calidad del agua del río Las Vacas en los puntos de muestreo	73
XXIV.	Índice de calidad de agua promedio [ICA], $m = 34,27$	74
XXV.	Media aritmética de los 4 puntos de muestreo	75
XXVI.	Porcentajes contaminación en época seca río Las Vacas	75
XXVII.	Recolección de datos fisicoquímicos y microbiológicos	76
XXVIII.	Promedio del parámetro	77
XXIX.	Resumen de resultados Anova para los 4 puntos en estudio	78
XXX.	Promedios de parámetros prueba de Tukey	79
XXXI.	Resumen grupos prueba de Tukey	79

XXXII.	Caudales del afluente.....	81
XXXIII.	Nivel de tratamiento del afluente	81
XXXIV.	Cálculo inicial de volumen y tiempo de retención.....	88
XXXV.	Diseño de laguna anaerobia	88
XXXVI.	Resultados de laguna anaerobia.....	89
XXXVII.	Coeficiente de temperatura	91
XXXVIII.	Muestra de cálculo de Kt para DBO5	91
XXXIX.	Parámetros críticos de diseño para determinación de tiempo de retención en humedal.....	93
XL.	Diseño humedal artificial subsuperficial	93
XLI.	Resultados efluente del humedal	95
XLII.	Resultados de diseño 3 lagunas de maduración en serie para eliminación de coniformes fecales	97
XLIII.	Resultados de diseño 3 lagunas de maduración en serie para eliminación de coniformes fecales núm. 2.....	97
XLIV.	Resultados de diseño 3 lagunas de maduración en serie para eliminación de coniformes fecales núm. 3.....	98

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
A	Ancho
b	Ancho de barrotes
Bc	Ancho de canal
Br	Ancho de canal zona de rejillas
B	Ancho unidad desarenador-desengrasador
Ar	Área útil de canal
As	Área superficial
At	Área transversal
CHS	Carga hidráulica superficial
COV	Carga orgánica volumétrica
Cs	Carga superficial
Qmax	Caudal máximo
Q	Caudal medio
Cd	Conductividad hidráulica
Ce	Concentración en el efluente
Co	Concentración en el influente
Kr	Constante de reacción de referencia
Kt	Constante de reacción a una temperatura T
L	Espacio entre barrotes
n	Factor de Manning
G	Grado de colmatación
HAFSS	Humedal artificial de flujo sub-superficial

L	Longitud
N	Número de barrotes
S	Pendiente
ps	Porosidad
P	Profundidad
h	Profundidad de lámina de agua
Rh	Radio hidráulico
SS	Sólidos en suspensión
T	Temperatura
Tr	Temperatura de referencia
Tw	Temperatura del agua de diseño
t	Tiempo de residencia
TRH	Tiempo hidráulico de retención
v	Velocidad
Vp	Velocidad entre rejillas
V	Volumen
Vf	Volumen efectivo

GLOSARIO

AMSA	Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán
Coliformes fecales	El número más probable hace referencia a la cantidad de coliformes presentes, en especial <i>Escherichia Coli</i> indicador de desechos fecales.
DBO	Es la demanda bioquímica de oxígeno para que los organismos degraden materia orgánica.
DQO	La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica e inorgánica del agua.
Desarenador	Decantador de arenas en suspensión en el agua.
Desengrasador	Decantador de grasas y aceites en el agua.
Fósforo total	Indica la cantidad total de fosfatos en el agua.
Humedal	Sistema acuático natural o artificial, de agua dulce o salada, de carácter temporal o permanente, generalmente en remanso y de poca profundidad.

Lagunaje

Estanques impermeables con el fin de depurar aguas residuales con ayuda de microorganismos de algas o plantas acuáticas.

Nitrógeno total

Indica la cantidad total de nitrógeno en el agua.

RESUMEN

El presente informe es la propuesta de un proceso de tratamiento de aguas residuales de autodepuración tipo humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) horizontal combinado con lagunaje anaerobio y de maduración, en época seca, para los afluentes de la cuenca de río Las Vacas en el área metropolitana del país.

Para realizar el estudio se localizaron cuatro descargas significativas hacia el afluente y un punto de recolección de las descargas anteriores en el cauce, estas fueron: (1) descarga Covias, regulador de caudal zona 5; (2) descarga colector colonia Los Ángeles zona 6; (3) descarga colector poniente Buganvilias; (4) bajo puente antiguo Las Buganvilias. En los distintos puntos se realizaron dos pruebas de calidad del agua fisicoquímica y microbiológica en noviembre y febrero, ambos en época seca.

Se verificó y comparó el resultado de los análisis de laboratorio para las 3 descargas hacia el río Las Vacas, respecto al límite máximo permisible según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20. Para la caracterización del punto de recolección de las 3 descargas (bajo el puente antiguo Las Buganvilias) se aplicó el método de índice de calidad de agua ICA en donde se obtuvo una calificación de 34 puntos, lo cual la posiciona como agua mala.

También, se determinó el ICA en las 3 descargas y se promedió un resultado de 28 puntos. Se realizó el análisis estadístico Anova y prueba de Tukey; con el primero se encontró que el promedio de los resultados de color, oxígeno disuelto y grasas y aceites, en al menos 1 grupo de los puntos de

muestreo, los datos si varían significativamente. Con la prueba de Tukey se determinó que existe diferencia significativa entre los parámetros fisicoquímicos de los puntos 4 y 3 para el color, 4-2 y 4-1 para las grasas y aceites y 4 y 2, 3 y 2 y 2 y 1 para el oxígeno disuelto. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna puesto que si varían significativamente entre las descargas y el punto de confluencia.

La descarga con mayor contaminación es la no.1, descarga Covias zona 5. En función de los resultados se planteó un proceso de autodepuración combinado tipo humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) horizontal con lagunaje anaerobio y de maduración. Este se compone de las siguientes etapas: pretratamiento (canal de entrada, rejillas y desarenador-desengrasador) una laguna anaerobia como tratamiento primario, un humedal como tratamiento secundario y 3 lagunas de maduración con arreglo en serie como tratamiento terciario.

La laguna anaerobia reducirá concentración de parámetros fisicoquímicos con un tiempo de residencia de 2 días, con dimensiones de 5m de altura, 360 m de largo por 201m de ancho. El diseño del humedal tiene capacidad para 181 440 m³/día con un tiempo de residencia de 5 días, las dimensiones calculadas son de 3,6 km de largo por 1 km de ancho. Los coliformes fecales se reducirán en el humedal de 4,30E+07 a 4,86E+06. En la primera laguna de maduración, con dimensiones de (0,806 X 1) Km², se reducirán los coliformes fecales a 2,80E+05, en la segunda laguna de (0,80 X 1) km² se reducirá a 1,67E+04 y en la tercera laguna de (0,77 X 1) km² se reducirán en el efluente a 1,00E+03 NMP/100 ml.

El tiempo total de retención del proceso en general será de 19 días. Este es proporcional a la planta de tratamiento río Villalobos la cual tiene un tiempo

de residencia de 4 días para un caudal de 38 240 m³/día. De manera que se acepta la hipótesis planteada siendo el humedal con laguna de maduración un proceso técnicamente viable y de bajo costo económico respecto a alternativas convencionales como lodos activados. Se recomienda empatar la siguiente investigación con la recolección de más muestreos en distintos puntos del afluente; realizar estudios específicos para una óptima ubicación del proceso de tratamiento propuesto.

OBJETIVOS

General

Proponer un proceso de tratamiento de aguas residuales de autodepuración, en época seca mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos, para la cuenca del río Las Vacas en el área metropolitana del país.

Específicos

1. Medir los parámetros fisicoquímicos en 3 descargas significativas de aguas residuales hacia del río Las Vacas en el área del departamento de Guatemala y compararlos con el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20.
2. Medir los parámetros microbiológicos en 3 descargas significativas de aguas residuales hacia del río Las Vacas en el área del departamento de Guatemala y compararlos con el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20.
3. Caracterizar el punto de unión de las 3 descargas en el río Las Vacas mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos
4. Determinar el índice de calidad del agua General de las tres descargas y en el punto de confluencia de las mismas en el río Las Vacas.

5. Determinar la media aritmética de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las 3 descargas y compararla con la media aritmética de los resultados en el punto de confluencia en el río Las Vacas.
6. Realizar la prueba de Tukey para los muestreos establecidos.
7. Determinar la descarga con mayor foco de contaminación hacia el río Las Vacas.
8. Proponer un proceso combinado de tratamiento de aguas residuales tipo humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal, con lagunaje anaerobio y de maduración durante época seca del año, para los afluentes del río Las Vacas en el área metropolitana del país.

HIPÓTESIS

Aplicar un proceso combinado de tipo humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) horizontal, con lagunaje anaerobio y de maduración, es un tratamiento de autodepuración de aguas residuales recomendable para los afluentes de aguas residuales del río Las Vacas en el área metropolitana del país, durante época seca del año.

Hipótesis nula (Ho)

Ho 1: los parámetros fisicoquímicos de las descargas de los colectores de aguas residuales hacia el río Las Vacas en el área metropolitana no superan los límites máximos permisibles según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20.

Ho 2: los parámetros microbiológicos de las descargas de los colectores de aguas residuales hacia el río Las Vacas en el área metropolitana no superan los límites máximos permisibles según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20.

Ho 3: los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en el punto de unión de las 3 descargas de aguas residuales en el río Las Vacas, no superan la contaminación de las mismas.

Ho 4: la contaminación que aportan las descargas de los colectores de aguas residuales hacia el río Las Vacas y en el punto de confluencia no es significativa según el índice de calidad de agua general ICA.

Ho 5: la media aritmética de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en las 3 descargas no supera la contaminación en el punto de unión de las mismas sobre el cauce del río Las Vacas.

Ho 6: según el Anova y la prueba de Tukey, los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en las 3 descargas y en el punto de confluencia no varían significativamente entre sí.

Ho 7: el punto de confluencia de las 3 descargas no tiene el mayor foco de contaminación fisicoquímica y microbiológica.

Ho 8: el proceso humedal de flujo sub-superficial horizontal, con lagunaje anaerobio y de maduración, no es el adecuado para el tratamiento de aguas residuales del río Las vacas en el área metropolitana del país.

Hipótesis alternativa (Hi)

Hi 1: los parámetros fisicoquímicos de las descargas de los colectores de aguas residuales hacia el río Las Vacas en el área metropolitana, superan los límites máximos permisibles según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20.

Hi 2: los parámetros microbiológicos de las descargas de los colectores de aguas residuales hacia el río Las Vacas en el área metropolitana superan los límites máximos permisibles según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20.

Hi 3: los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en el punto de unión de las 3 descargas de aguas residuales en el río Las Vacas superan la contaminación de las mismas.

Hi 4: la contaminación que aportan las descargas de los colectores de aguas residuales hacia el río Las Vacas y en el punto de confluencia si es significativa según el índice de calidad de agua general ICA.

Ho 5: la media aritmética de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en las 3 descargas superan la contaminación en el punto de unión de las mismas sobre el cauce del Río Las Vacas.

Ho 6: según el Anova y la prueba de Tukey, los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en las 3 descargas y en el punto de confluencia varían significativamente entre sí.

Ho 7: el punto de confluencia de las 3 descargas tiene el mayor foco de contaminación fisicoquímica y microbiológica.

Ho 8: el proceso humedal de flujo sub-superficial horizontal, con lagunaje anaerobio y de maduración es el adecuado para el tratamiento de aguas residuales del río Las Vacas en el área metropolitana del país.

INTRODUCCIÓN

El río Las Vacas nace en los cerros que forman la periferia sudeste de la ciudad de Guatemala y pasa en dirección noreste para desembocar en el río Motagua. La corriente forma la unión con el río Chixoy (río Negro) y el riachuelo Santa Rosita, su trayecto es al este de la ciudad capital y al noreste de la aldea Santa Rosita. Toma un curso rumbo al norte; atraviesa la aldea San Antonio Las Flores, al Este de la cabecera Chuarrancho cambia al noreste; continúa su curso al oeste de la aldea Concepción Grande; entre los fluentes que ha recibido con anterioridad, le influye el río Plátanos. El río se ha desarrollado como uno de los mayores desagües de aguas servidas de la ciudad de Guatemala.

Al descargar aguas residuales a cuerpos receptores con sustancias tóxicas en el efluente por debajo de ciertas concentraciones límites establecidas en Guatemala (Acuerdo Gubernativo 236-2006), se inicia un proceso de autodepuración de los desechos de forma natural, debido a diversos microorganismos como las bacterias y las algas. Estos microorganismos descomponen los desechos, metabolizándolos y transformándolos en sustancias simples, como dióxido de carbono, nitrógeno, etc. Este proceso se aplica a sustancias orgánicas, como detergentes y fenoles, y también a algunas sustancias inorgánicas, ya que hay microorganismos capaces de absorber ciertos metales, incorporándolos a sus células.

Típicamente, el tratamiento de aguas residuales comienza por la separación física inicial de sólidos grandes (basura) de la corriente de aguas domésticas o industriales empleando un sistema de rejillas (mallas);

posteriormente, se aplica un desarenado (separación de sólidos pequeños muy densos como la arena) seguido de una sedimentación primaria (o tratamiento similar) que separa los sólidos suspendidos existentes en el agua residual. A continuación, sigue la conversión progresiva de la materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente, presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida (proceso llamado sedimentación secundaria), el agua tratada puede experimentar procesos adicionales (tratamiento terciario) como desinfección, filtración, etc. Este efluente final puede ser descargado o reintroducidos de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente o bahía) u otro ambiente. Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y una neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada.

El presente estudio determinará el índice de calidad de agua del río Las Vacas en el área metropolitana del país, mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos; esta herramienta se ha utilizado en otros ríos para determinar su calidad. En 2016 se hizo un análisis comparativo entre el índice simplificado de calidad del agua (ISCA) y el índice de calidad del agua (ICA), aplicados al monitoreo de aguas superficiales en el río la quebrada, el frutal. En 2015 se realizó el análisis de calidad del agua en la cuenca media del río Motagua mediante índice de calidad de agua ICA. También, en 2012 se determinó el índice de calidad de agua ICA en el río Pínula cuenca del lago de Amatitlán.

1. ANTECEDENTES

El río Las Vacas recibe los afluentes de los ríos: Negro, Contreras, Santa Rosita, Chinautla, El Zapote, Quezada, Chuapón, El Aguacate, Los Acoles y Los Plátanos; forma parte del caudal del río Motagua, el cual es utilizado para la irrigación de plantaciones en la parte noreste del país. La cuenca del río Motagua sirve como cuerpo receptor de las aguas servidas de la ciudad de Guatemala, a través del río Las Vacas; por lo que éste último constituye el mayor foco de contaminación para el río Motagua.¹

En 2001, Oliva, Callejas y Pérez, realizaron una investigación financiada por CONCYT Y SENACYT, *Proyecto 82-99 de la línea fodecyt* sobre los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua del río Las Vacas; se determinó la contaminación por nutrientes, metales tóxicos y bacterias, debido a que el río Las Vacas recibe aproximadamente el 60 % de las aguas residuales de la ciudad de Guatemala lo que impacta negativamente el río Motagua.

Se realizó un estudio de factibilidad técnica, económica, social, ambiental y la ingeniería de detalle del proyecto *Diseño de obras para mitigar el impacto del río Las Vacas sobre la infraestructura de la calzada La Paz, acceso alternativo de la ruta CA-09 Norte y población aledaña al cauce*, tenía como objetivo principal establecer las medidas apropiadas para evitar o mitigar los impactos que el río produciría sobre dicha infraestructura vial y la población que se iría asentando cercana a su cauce en el tramo sujeto de análisis, con el fin de salvaguardar la vida de la población sus bienes y los bienes del estado, ante la ocurrencia de futuros eventos desastrosos como consecuencia de los fenómenos extraordinarios que afecten el país.

¹ OLIVA HERNÁNDEZ, Bessie Evelyn. *Caracterización fisicoquímica y bacteriológica de las aguas del río Las Vacas*. p. 43.

En 1995 la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en conjunto con la Empresa Municipal de Agua (Empagua) realizó un estudio sobre el mejoramiento del manejo de aguas residuales en el área metropolitana de Guatemala. El área de estudio de interés se centró en la cuenca norte del río Las Vacas la cual está dividida: región central, norte 1 y norte 2 con áreas tributarias en 1994 de 6,460, 2,190, y 740 hectáreas (ha), respectivamente. La estrategia del manejo de aguas pluviales en la región central sería interceptada y tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales por medio de un proceso secundario de sedimentación.

El sistema propuesto para el manejo de aguas residuales constaba de un sistema de alcantarillado el cual involucraba la instalación de colectores principales e interceptores con diámetros de 200 a 3 000 mm, en donde las aguas llegarían por gravedad hacia el punto de descarga con el fin de no emplear sistemas de bombeo. El proceso de filtro percolador de gran volumen fue el tratamiento de aguas residuales propuesto. Y para el tratamiento de fango se propuso digestores anaeróbicos sin calentamiento con lechos de secado de lodos. El estudio involucró niveles de reducción de la carga contaminante, eficiencia de la inversión, disponibilidad para pagar, contribución a la protección de fuentes de agua potable, disponibilidad de sitios para plantas de tratamiento de aguas residuales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de aguas residuales

Estos son necesarios para determinar la calidad de agua de un cuerpo, en función de estos se determina el uso al que puede ser sometido el afluente así como el tipo de tratamiento necesario para la potabilidad de la misma.

2.1.1. Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos son una serie de características del agua que definen la química inorgánica del agua, en función de la carga y de cada parámetro que el cuerpo de agua contenga dependerá la forma y tipo de filtración

2.1.1.1. Sólidos en suspensión

El agua puede contener tanto partículas en suspensión como compuestos solubilizados, se define la suma de ambos como sólidos totales (ST). La determinación de ST se realiza conforme a la norma UNE 77030:1982, evapora un volumen conocido de muestra y secando el residuo en estufa a 105 °C, hasta que el peso sea constante, se indica el resultado en ppm [mg/L]. Esta medida permite conocer el contenido total de sustancias no volátiles presentes en el agua. Además del contenido en sólidos totales, conviene conocer que parte de estos sólidos se encuentra disuelta (SD) y que otra es sedimentable.

2.1.1.2. Turbidez

Es el parámetro que mide la transparencia del agua y mide la dificultad de la luz de pasar a través de la misma. También, es un indicador de la cantidad de materia insoluble en suspensión, como arcillas, coloides generalmente se presenta en NTU.

2.1.1.3. Temperatura

La temperatura del agua tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos procesos que en ella se realizan, de forma que un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias y aumenta la de los sólidos disueltos. Un aumento anormal de la temperatura del agua, suele tener su origen en el vertido de aguas utilizadas en procesos industriales de intercambio de calor, aunque actualmente algunas industrias utilizan torres de enfriamiento antes de que el agua sea vertida en el afluente de donde proviene. De no ser así, el incremento desmedido de la temperatura en los ríos y lagos puede llegar a causar una muerte total, animal y vegetal, acabando con la vida de un reservorio de natural de agua. Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 para descarga de aguas residuales en cuerpos receptores, el agua no debe pasar de +/- 7 grados Celsius.

2.1.1.4. Oxígeno disuelto (OD)

Es un parámetro indicativo de la calidad de un agua. El valor máximo de OD es un parámetro muy relacionado con la temperatura del agua y disminuye con ella. La concentración máxima de OD en el intervalo normal de temperaturas es de aproximadamente 9 mg/L; se considera que cuando la concentración baja de 4 mg/L, el agua no es apta para desarrollar vida.

2.1.1.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Es la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos aerobios puedan oxidar metabólicamente la materia orgánica presente en la muestra de agua. Se determina por diferencia entre el oxígeno disuelto en la muestra inicial y el medido en función. Según la *Ley de gestión ambiental 2000*, se debe realizar en 5 tiempos de incubación. La incubación se realiza en volúmenes conocidos colocados en una estufa a 20 °C, en ausencia de luz. La DBO5 da información de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra, sin aportar información sobre su naturaleza.

2.1.1.6. Demanda química de oxígeno (DQO)

Presenta todo el carbono oxidable de una muestra, como demanda química de oxígeno o cantidad de oxígeno consumida (mg/L) por los compuestos orgánicos presentes en el efluente.

2.1.1.7. Aceites y grasas

Los aceites y grasas en los vertidos líquidos generan problemas a la hora de la depuración de las aguas residuales impiden su sedimentación y formación de una película que recubre los microorganismos encargados de la biodegradación; impide con ello la captación de oxígeno por los mismos y disminuye su poder depurador.

2.1.1.8. Acidez (pH)

Es una medida de la concentración de iones hidronio (H_3O^+) en la disolución. Las aguas con valores de pH menores de 7 son aguas ácidas y

favorecen la corrosión de las piezas metálicas en contacto con ellas, y las que poseen valores mayores de 7 se denominan básicas y pueden producir precipitación de sales insolubles (incrustaciones). En las medidas de pH hay que tener presente que estas sufren variaciones con la temperatura.

2.1.1.9. Fósforo total

El fósforo y el nitrógeno son dos de los nutrientes fundamentales de todos los seres vivos; de forma que contenidos anormalmente altos de estos en las aguas pueden producir un crecimiento incontrolado de la biomasa acuática (eutrofización). Una gran parte del fósforo presente en las aguas se debe al uso de abonos fosfatados y detergentes.

2.1.1.10. Nitrógeno total

El nitrógeno es un elemento importante en las aguas residuales, ya que es necesario para el crecimiento de los microorganismos. Si el agua residual no contiene suficiente nitrógeno pueden ocurrir problemas por deficiencia de nutrientes durante el tratamiento secundario. También, el nitrógeno es un contribuyente especial para el agotamiento del oxígeno y la eutrofización de las aguas cuando se encuentra en elevadas concentraciones.

2.1.1.11. Color de aguas residuales

Se determina mediante colorimetría óptico-visual de la coloración amarillenta de aguas frente a patrones de platino-cobalto simulados según Hazen. (Hazen.1892)

2.1.2. Parámetros microbiológicos

Los parámetros microbiológicos definen la potabilidad de un cuerpo de agua, dependiendo el tipo de uso que se le dará, así será el nivel máximo aceptable permisible, así como el tipo de tratamiento para la reducción de agentes patógenos

2.1.2.1. Bacterias

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de la contaminación bacteriana debido a que estos son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente; están presentes en el tracto gastrointestinal en grandes cantidades; permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección.

2.1.2.1.1. Coliformes totales

Los microorganismos que conforman el grupo de los coliformes totales son: *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*; viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales; los coliformes fecales (*Escherichia*) son de origen intestinal.

Todos pertenecen a la familia *Enterobacteriaceae*; son bacilos Gram negativos, anaerobios facultativos, no esporulantes, fermentadores de lactosa con producción de gas; constituyen aproximadamente el 10 % de los microorganismos intestinales de los seres humanos y otros animales; las bacterias del tracto intestinal no suelen sobrevivir en el medio acuático; están sometidas a un estrés fisiológico y pierden gradualmente la capacidad de

producir colonias en medios diferenciales y selectivos. Su velocidad de mortalidad depende de la temperatura del agua, los efectos de la luz solar, las poblaciones de otras bacterias presentes y la composición química del agua. La presencia de coliformes en el agua indica la contaminación bacteriana reciente y constituye un indicador de degradación de los cuerpos de agua.

2.1.2.1.2. Coliformes fecales

Los coliformes fecales se denominan termotolerantes por su capacidad de soportar temperaturas más elevadas. Esta denominación está ganando más adeptos actualmente, pues sería una forma más apropiada de definir este subgrupo que se diferencia de los coliformes totales por la característica de crecer a una temperatura superior. La capacidad de reproducción de los coliformes fecales fuera del intestino de los animales es favorecida por la existencia de condiciones adecuadas de materia orgánica, pH, humedad, etc.

Estas bacterias son de interés clínico, ya que pueden ser capaces de generar infecciones oportunistas en el tracto respiratorio superior e inferior, además de bacteriemia, infecciones de piel y tejidos blandos, enfermedad diarreica aguda y otras enfermedades severas en el ser humano.

2.2. Hidrología del río Las Vacas

Vertiente del Atlántico: en el caso de la vertiente del Atlántico, la longitud de los ríos es mucho mayor e incluye el río más largo del país, el río Motagua con 486,55 km. Las pendientes son más suaves y su desarrollo es menos brusco, ya que en la parte montañosa los ríos hacen su recorrido en grandes barrancas o cañones.

Las crecidas son de mayor duración y los tiempos de propagación son también mayores. Los caudales son más constantes durante todo el año. Parte del área dentro de esta vertiente tiene muy baja pluviosidad, 500 mm/anales, mientras que, en la zona de Puerto Barrios y Morales, la pluviosidad alcanza hasta 3 500 mm/anales.

La cuenca del río Las Vacas es prácticamente urbana. Actualmente, se estima que el área urbana es de 62 %; la cobertura boscosa, arbustiva y sotobosque es aun importante, del orden del 30 % del área de la cuenca, especialmente, en la parte alta de la cuenca y en los parques de jacarandas y Cayalá y la reserva forestal de Canajuyú. El uso para cultivos, vivienda rural y suelo limpio es limitado, aproximadamente 8 %. Es importante considerar, que el proceso de urbanización en la cuenca continúa, especialmente en las áreas planas. En el futuro se reducirán aún más las áreas boscosas y rurales actualmente existentes. Se estima que el área considerada verde de la cuenca se restringirá en los barrancos en los parques Jacarandas y Cayalá y reserva forestal de Canajuyú, estimándose un 14 % de la cuenca podría quedar como área verde, mientras que el 86 % como área con cobertura urbana y comercial. En las estimaciones de crecidas se asume la cobertura del futuro en la cuenca.

Tabla I. **Caudal medio en estaciones hidrométricas (m3/s)**

NOMBRE DE ESTACION	Caudal medio (m3/s) en estaciones hidrométricas													Q90%	REG
	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MED		
MORALES	80,96	240,10	248,25	321,51	530,56	424,51	203,94	170,78	108,05	83,84	58,59	43,64	209,56	49,16	18
PUNTE ORELLANA	22,33	69,28	88,79	101,12	212,07	124,01	36,54	22,70	14,79	12,43	10,96	10,28	60,44	9,41	17
CONCUA 2	11,56	44,67	49,27	69,05	97,76	94,05	26,28	15,04	11,79	10,11	9,08	9,85	37,38	7,95	14
PASABIEN	0,94	2,43	2,39	2,51	4,17	4,45	3,17	2,41	1,99	1,58	1,04	0,84	2,33	0,77	20
EL TULE	1,05	2,18	2,10	1,99	3,11	2,95	3,22	2,69	2,09	1,59	1,02	0,84	2,07	0,73	33
EL TESORO	0,84	1,30	1,41	1,52	1,91	1,85	1,10	0,97	0,95	0,89	0,88	0,90	1,21	0,72	10
CHICHE	0,58	2,38	3,20	3,76	7,06	4,45	1,40	0,70	0,51	0,43	0,41	0,37	2,10	0,34	16
SN. ANT. LAS FLORES	6,01	6,17	6,12	6,47	9,38	9,42	10,91	14,39	1,59	1,35	13,45	6,26	7,63	0,83	6
PANAJAX	9,60	23,49	18,98	19,96	33,10	32,81	11,95	8,32	7,72	7,57	6,77	6,81	15,59	3,58	10
PUNTE JUMAY	0,81	2,56	1,50	1,57	1,94	4,06	0,97	0,52	0,39	0,30	0,27	0,21	1,26	0,14	4
LAS QUEBRADAS	1,70	2,14	2,06	1,95	2,19	3,67	3,53	4,44	4,02	1,59	1,50	1,05	2,49	0,83	14
LA PRESA BOBOS I	2,82	3,39	3,34	3,17	3,30	3,84	4,48	4,44	3,96	2,10	1,93	1,54	3,19	1,09	10
EL SISIMITE	11,68	39,06	49,88	55,82	115,16	75,83	33,56	17,21	11,05	8,33	5,89	6,76	35,85	4,55	20

Fuente: elaboración propia.

2.3. Características fisicobióticas del río Las Vacas

La lluvia caída dentro de los límites de la cuenca logra depositarse y escurrir verticalmente a través del suelo y subsuelo alienta la humedad local y de los acuíferos del subsuelo. Los factores físicos, como las pendientes, la deforestación, manejo inadecuado del suelo, urbanización, así como la intensidad y duración de las lluvias deterioran el porcentaje de alimentación de las aguas subterráneas. Según el Insivumeh la precipitación pluvial anual en 124 días de lluvia durante el periodo de 1986 a 1989, fue de 1112 mm. Esto también tiene efectos en los deslizamientos como se verá más adelante.

Físicamente la cuenca del río Las vacas está constituida en su mayor parte por rocas sueltas de origen piroclástico. La capacidad de infiltración, debido a condiciones de impermeabilización, se ha ido reduciendo con el crecimiento de la ciudad, la urbanización de la cuenca deteriora la cuenca y esto a su vez pone en peligro las obras que allí se contribuyen. En la parte media y baja de la cuenca, los materiales del subsuelo son más compactos y los suelos son de grano muy fino, como el caso de las cenizas, las pendientes son moderadamente altas y todavía hay alguna cobertura vegetal.

Estas condiciones no son del todo favorables a la infiltración y estudios del INSIVUMEH muestran perfiles de poca humedad. La vegetación de la cuenca del río Las Vacas en los bancos es de vital importancia por su efecto en la morfología, erosionabilidad y estabilidad del banco, beneficiosa y en algunos casos perjudicial cuando se observa una inclinación hacia el lado del cauce indicando inestabilidad del banco en la cara superior de ambos bancos es similar el tipo de vegetación, dentro de los arboles: coníferas (pino, ciprés y casuarina), latifoliadas (encino, eucalipto, sauce, amate, torreliana, gravilea, matasano y cedro), arbustos: bambú, higuerrilli, izote, chichicaste y vara de castilla, pastos: grama natural, napier y jaraguá.

En el caso de los pies de los bancos la vegetación es muy escasa y es apreciable la erosión debido al flujo del agua en casi la totalidad del tramo. Es importante aclarar que en varios puntos identificados en este estudio existen basureros clandestinos y que dentro de todos los impactos negativos que generan, se destaca el que hacen desaparecer la vegetación del lugar, lo que trae aparejado la erosión, pérdida de suelos e incremento del caudal sólido y por consiguiente el aumento de arrastre de sedimentos.

Entre las especies arbustivas el bambú es la especie dominante mientras que entre los pastos o gramíneas son gramas nativas y el pasto napier los dominantes. En tramos despoblados del cauce pueden observarse bosques de galería con densidad variable donde sauce y bambú son especies indicadoras como es el caso del banco derecho donde se ubica CEMACO S.A. en la orilla opuesta de la colonia Covias. En cambio, en tramos poblados se observan vestigios del bosque sobre el margen izquierdo y en mucha mayor intensidad sobre el margen derecho que no está habitado. En comunidades como: asentamiento: Manzanares, Santiago de los Caballeros, El Esfuerzo y Joyas de Senahú, existen ciertas áreas puntuales de bosque, en el resto de los tramos identificados en estudio a causa de la creciente urbanización y afloramiento de asentamientos humanos en las riberas del río, se propone la reforestación con empastado o siembra de árboles según sea el caso en función de la pendiente del banco, mejorando así el ecosistema ribereño.

Esta parte va dirigida a establecer los procesos responsables de la erosión y su distribución sobre el banco a lo largo del cauce, interpretando las antecedentes para su mejor comprensión. Localizándose la erosión en los bancos prácticamente generalizadas en el tramo analizado con un estado de erosión inactiva al momento de la inspección, con excepción del tramo bajo el puente nuevo o Precon donde se comprobó que su estado es activo

visualizándose el incremento de la erosión con un nivel serio sin extensión, ya que no se manifiesta este proceso aguas arriba ni abajo del punto, reflejando el modelo matemático para el análisis hidráulico velocidades del flujo altas aguas arriba del punto, lo que explica la naturaleza del proceso proponiéndose medidas de mitigación consistentes en muros de contención sin contraer significativamente el cauce del río.

Mediante comparaciones de fotografías aéreas de vuelos realizados en los años 1987, 2001 y 2006, se comprobó que los meandros ubicados en la colonia Joyas de Senahú que se aprecia una agudización de los mismos debido a la erosión por flujos chocantes, esto se debe a fuertes remolinos adyacentes al bando y ausencia de vegetación en la cara del banco, teniendo como característica curvas cerradas con radios cortos con extensión de la erosión local, decidiéndose la colocación de muros de gaviones suavizándose las curvas de manera que se rectifique el cauce a su estado inicial.

2.4. Mapa de localización del río Las Vacas en la red hidrológica de la república de Guatemala

A continuación se muestra un mapa donde se localiza el río las vacas dentro del territorio de la ciudad capital, así como las confluencias con los ríos más significativos.

agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reúso. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de aguas potables.

Típicamente, el tratamiento de aguas residuales comienza por la separación física inicial de sólidos grandes (basura) de la corriente de aguas domésticas o industriales empleando un sistema de rejillas (mallas); también, pueden ser triturados esos materiales por equipo especial; posteriormente, se aplica un desarenado (separación de sólidos pequeños muy densos como la arena) seguido de una sedimentación primaria (o tratamiento similar) que separa los sólidos suspendidos existentes en el agua residual.

A continuación, sigue la conversión progresiva de la materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente, presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida (proceso llamado sedimentación secundaria), el agua tratada puede experimentar procesos adicionales (tratamiento terciario) como desinfección, filtración, etc. Este efluente final puede ser descargado o reintroducidos de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente o bahía) u otro ambiente (terreno superficial, subsuelo, etc.). Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada.

2.5.1. Pretratamiento

Las aguas residuales antes de su tratamiento, propiamente dicho, se someten a un pretratamiento, que comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen por objetivo separar del agua residual la mayor

cantidad posible de materias, que, por su naturaleza o tamaño, pueden dar lugar a problemas en las etapas posteriores del tratamiento. El correcto diseño y posterior mantenimiento de la etapa de pretratamiento son aspectos de gran importancia, pues cualquier deficiencia en los mismos repercutirá negativamente en el resto de las instalaciones originando obstrucciones de tuberías, válvulas y bombas, desgaste de equipos, formación de costras, etc.

2.5.1.1. Desbaste

El objetivo del desbaste es la eliminación de los sólidos de pequeño y mediano tamaño (trozos de madera, trapos, raíces, etc.) que de otro modo podrían deteriorar o bloquear los equipos mecánicos y obstruir el paso de la corriente de agua. El procedimiento más usual consiste en hacer pasar las aguas a través de rejas que, de acuerdo con la separación entre los barrotes, pueden clasificarse en:

- Desbaste de gruesos: el paso libre entre los barrotes es de 50 a 100 mm
- Desbaste de finos: el paso libre entre los barrotes es de 10 a 25 mm

En función de su geometría, las rejas pueden ser rectas o curvas y, según como se ejecute la extracción de los residuos retenidos en los barrotes, se distingue entre rejas de limpieza manual y rejas de limpieza automática. En grandes instalaciones de depuración se hacen pasar los residuos extraídos de las rejas por mecanismos de compactación, con objeto de reducir su volumen antes de ser depositados en contenedores.

2.5.1.2. Desarenado

Tiene por objetivo la eliminación de materias pesadas de tamaño superior a 0,2 mm para evitar que sedimenten en canales y conducciones y para proteger a las bombas y otros elementos de la abrasión. Aparte de las arenas propiamente dichas, en esta operación se eliminan también gravas y partículas minerales, así como elementos de origen orgánico, no putrescibles (granos de café, semillas, huesos, cascaras de frutas y huevos, etc.).

Los canales desarenadores pueden ser de flujo variable o de flujo constante. Los canales desarenadores de flujo variable se emplean en pequeñas instalaciones de depuración, y en ellos las arenas se extraen manualmente de un canal longitudinal, con una capacidad para el almacenamiento de arenas de 4-5 días. Los canales desarenadores de flujo constante mantienen una velocidad de paso fija, en torno a 0,3 m/s, independientemente del caudal que los atraviesa, con lo que se logra que sedimente la mayor parte de las partículas de origen inorgánico y la menor parte posible de las de origen orgánico (< 5 % de materia orgánica).

2.5.1.3. Desengrasado

En esta etapa se eliminan las grasas y demás materias flotantes más ligeras que el agua. Dentro de los desengrasadores se distingue entre los desengrasadores estáticos y los aireados. En los desengrasadores estáticos se hacen pasar las aguas a través de un depósito dotado de un tabique, que obliga a las aguas a salir por la parte inferior del mismo, lo que permite que los componentes de menor densidad que el agua, queden retenidos en la superficie.

La retirada de las grasas se lleva a cabo de forma manual, haciendo uso de un recoge hojas de piscina. En los desengrasadores aireados se inyecta aire con objeto de desemulsionar las grasas y lograr su mejor flotación. En plantas de tamaño medio-grande las operaciones de desarenado y desengrasado se llevan a cabo de forma conjunta en unidades de tratamiento conocidas como desarenadores- desengrasadores aireados.

2.5.2. Tratamiento primario

Es el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico o fisicoquímico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO5 de las aguas residuales que entren, se reduzca, por lo menos, en un 20 % antes del vertido, y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca, por lo menos, en un 50 %. El principal objetivo de los tratamientos primarios se centra en la eliminación de sólidos en suspensión, consiguiéndose además una cierta reducción de la contaminación biodegradable, dado que una parte de los sólidos que se eliminan está constituida por materia orgánica. Los tratamientos primarios más habituales son la decantación primaria y los tratamientos fisicoquímicos.

- Decantación primaria: su objetivo es la eliminación de la mayor parte posible los sólidos sedimentables, bajo la acción exclusiva de la gravedad. La retirada de estos sólidos es muy importante ya que, en caso contrario, originarían fuertes demandas de oxígeno en el resto de las etapas de tratamiento de la estación.
- Tratamientos fisicoquímicos: en este tipo de tratamiento, mediante la adición de reactivos químicos, se consigue incrementar la reducción de los sólidos en suspensión, al eliminarse, además, los sólidos coloidales, al incrementarse su tamaño y densidad mediante procesos de

coagulación-floculación. Los tratamientos fisicoquímicos se aplican fundamentalmente: Cuando las aguas residuales presentan vertidos industriales que pueden afectar negativamente al tratamiento biológico.

- Para evitar sobrecargas en el posterior tratamiento biológico
- Cuando se dan fuertes variaciones estacionales de caudal
- Para la reducción del contenido en fósforo

2.5.3. Lagunas anaerobias

Básicamente, puede decirse que las lagunas anaerobias se diseñan con el objetivo primordial de la eliminación de DBO_5 , mientras que en las lagunas de maduración este objetivo se centra en la eliminación de organismos patógenos. Si bien, ello no excluye que en las lagunas de maduración también se produzca una cierta eliminación de DBO_5 , ni que en las lagunas anaerobias y facultativas también se eliminen patógenos.

Las lagunas anaerobias se diseñan para lograr dos objetivos básicos:

- Retener la mayor cantidad de sólidos sedimentables
- Estabilizar los lodos que se van acumulando en las lagunas

El diseño es básicamente empírico y se basa en criterios de carga orgánica volumétrica y/o tiempos de retención. La carga orgánica volumétrica viene dada por:

$$COV = c_0 \frac{Q}{V}$$

Donde

- COV: es la carga orgánica volumétrica (g DBO m⁻³d⁻¹)
- C₀: es la DBO₅ del influente (g/m³)
- Q es el caudal (m³/d)
- V: el volumen de la laguna (m³)

De la expresión anterior, despejando el volumen se obtiene:

$$V = C_0 \frac{Q}{COV}$$

Dependiendo de la temperatura de diseño, los valores que suelen emplearse de la carga volumétrica se recogen en la tabla 6, en la que también se muestran los rendimientos medios de DBO₅ para cada situación. El límite superior de carga orgánica volumétrica se limita a 350 g DBO₅m⁻³d⁻¹, para minimizar la generación de olores desagradables. Este límite es aplicable para el tratamiento de aguas residuales con contenidos en sulfatos menores de 300 mg SO₄/l. Fijado el valor de COV se determina el volumen necesario de la etapa anaerobia, con el que puede determinarse el tiempo de retención hidráulica mediante la expresión.

$$\theta = \frac{V}{Q}$$

No deben emplearse valores de TRH <1 d, si la ecuación anterior da un valor de menos de un día, debe usarse un valor de 2 d y recalcularse el volumen.

Las alturas más usuales de lámina de agua en este tipo de lagunas oscilan entre 3 y 5 m. La acumulación de lodos en el fondo de las lagunas anaerobias se estima en torno a 0,04 m³ hab-eq⁻¹ ano⁻¹. Otras consideraciones son las siguientes:

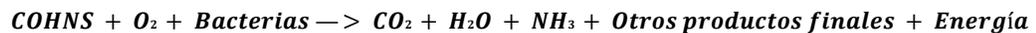
- Se desaconseja trabajar con lagunas anaerobias en serie, ya que las lagunas que reciben los efluentes depurados presentan problemas de operación por la baja carga orgánica aplicada.
- La frecuencia de purga de lodos depende de la naturaleza del vertido, carga aplicada y clima de la zona. En función a estas variables, la limpieza debe hacerse cada 5-10 años.
- Ciertos estudios demuestran que la recirculación es contraproducente, dado que la mayor turbulencia provoca el mantenimiento de sólidos en suspensión que, en ausencia de recirculación, se incorporarían a la capa de lodos. El desprendimiento de burbujas es suficiente para garantizar un nivel adecuado de mezcla.

2.5.4. Tratamiento secundario

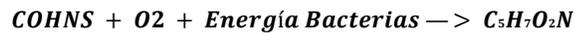
Es el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro proceso en el que se consiga la eliminación de materia orgánica. El tratamiento biológico se realiza con la ayuda de microorganismos (fundamentalmente bacterias) que en condiciones aerobias actúan sobre la materia orgánica presente en las aguas residuales. Una parte de la materia orgánica se oxida por la flora bacteriana, que obtiene de esta forma la energía necesaria para el mantenimiento celular. De forma simultánea, otra fracción de materia orgánica

se convierte en nuevo tejido celular nuevo (síntesis celular), empleándose para ello la energía liberada en la fase de oxidación.

Oxidación



Síntesis



Donde COHNS representa los elementos predominantes en la materia orgánica presente en las aguas residuales y C₅H₇O₂N representa la composición media de los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica. Finalmente, cuando se consume la materia orgánica disponible, las nuevas células empiezan a consumir su propio tejido celular con el fin de obtener energía para el mantenimiento celular. Este tercer proceso se conoce como respiración endógena.

Respiración endógena



El aporte de oxígeno para el mantenimiento de las reacciones de oxidación, síntesis y respiración endógena, se efectúa introduciendo, generalmente, aire en los recipientes en que se llevan a cabo estas reacciones, recipientes que se conocen con el nombre de reactores biológicos o cubas de aireación. Las nuevas bacterias que van apareciendo en los reactores, como consecuencia de las reacciones de síntesis, tienden a unirse (floculación);

forman agregados de mayor densidad que el líquido circundante, y en cuya superficie se va adsorbiendo la materia en forma coloidal.

Para la separación de estos agregados, conocidos como lodos o fangos, el contenido de los reactores biológicos (licor de mezcla), se conduce a una etapa posterior de sedimentación (decantación o clarificación secundaria), donde se consigue la separación de los lodos de los efluentes depurados por la acción de la gravedad. De los lodos decantados una fracción se purga como lodos en exceso, mientras que otra porción se recircula al reactor biológico para mantener en él una concentración determinada de microorganismos. El proceso descrito se conoce como lodo activo. Fue desarrollado en 1914 en Inglaterra por Arder y Lockett y, hoy en día, esta tecnología en sus distintas modalidades (convencional, contacto-estabilización, aireación prolongada, etc.) es la más ampliamente aplicada a nivel mundial para el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

2.5.4.1. Humedales artificiales

El tratamiento secundario está constituido por los propios humedales artificiales, que se alimentan con los efluentes procedentes de las lagunas anaerobias, las cuales pueden presentarse con tratamiento primario. El tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante la tecnología de humedales artificiales se basa en la reproducción artificial de las condiciones propias de las zonas húmedas naturales para aprovechar los procesos de eliminación de contaminantes que se dan en las mismas.

Cabe distinguir dos tipos básicos de humedales artificiales: los humedales de flujo superficial, en los que las aguas, en forma de lámina de poco espesor, circulan a través de los tallos de las plantas emergentes implantadas en el

humedal; y los humedales de flujo sub-superficial, en los que las aguas discurren a través de un sustrato filtrante que sirve de soporte a la vegetación, no siendo visible el agua.

2.5.4.2. Fundamentos de los humedales

Los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen los procesos de eliminación de contaminantes que tienen lugar en los humedales naturales. El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por las siguientes particularidades:

- El vaso del humedal se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar pérdidas de agua al subsuelo.
- Se emplean sustratos para el enraizamiento de las plantas diferentes al terreno original.
- Se eligen las plantas que van a colonizar el humedal.
- La depuración de las aguas residuales a tratar se consigue haciéndolas pasar a través de zonas húmedas artificiales, en las que tienen lugar procesos físicos, biológicos y químicos, que dan lugar a unos efluentes finales depurados.
- La tecnología de humedales artificiales puede ser considerada como un complejo ecosistema, en el que los principales actores son:
 - El sustrato: que sirve de soporte a la vegetación, y permite la fijación de la población microbiana (en forma de biopelícula) que

va a participar en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes.

- La vegetación (microfitos): que contribuye a la oxigenación del sustrato, a la eliminación de nutrientes y en la que también tiene lugar el desarrollo de la biopelícula. El agua a tratar: que circula a través del sustrato y de la vegetación.
- La vegetación que se emplea en este tipo de humedales es la misma que coloniza los humedales naturales: plantas acuáticas emergentes (carrizos, juncos, aneas, etc.), plantas anfibias que se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo.

Estas plantas presentan una elevada productividad (50-70 toneladas de materia seca ha/año) y toleran bien las condiciones de falta de oxígeno que se producen en suelos encharcados, ya que cuentan con canales o zonas de aireación (aerenquima) que facilitan el paso del oxígeno, producido por fotosíntesis, hasta la zona radicular.

2.5.4.3. Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)

En estos humedales el agua a tratar circula exclusivamente a través de un material granular (arena, gravilla, grava), de permeabilidad suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación que, habitualmente, suele ser carrizo. Generalmente, los HAFSS son instalaciones de menor tamaño que los de flujo superficial y, en la mayoría de los casos, se emplean para el tratamiento de las aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2 000 habitantes.

Este tipo de humedales presenta ciertas ventajas con respecto a los de flujo superficial, al necesitar menos superficie de terreno para su ubicación y al evitar los problemas de aparición de olores y de mosquitos, al circular el agua su superficialmente. Igualmente, presentan una mejor respuesta ante los descensos de la temperatura ambiente. Como desventajas, cabe citar su mayor coste constructivo motivado, principalmente, por el importe de adquisición y colocación del sustrato filtrante y los mayores riegos de colmatación de dicho sustrato.

Según la dirección en la que circulan las aguas a través del sustrato, los HAFSS se clasifican en verticales y horizontales (figura 2). En los HAFSS horizontales la alimentación se efectúa de forma continua, atravesando las aguas horizontalmente un sustrato filtrante de gravillas-grava, de unos 0,6 m de espesor, en el que se fija la vegetación. A la salida de los humedales, una tubería flexible permite controlar el nivel de encharcamiento que suele mantenerse unos 5 cm por debajo del nivel de los áridos, lo que impide que las aguas sean visibles.

En los HAFSS verticales la alimentación se efectúa de forma intermitente, para lo que se recurre generalmente al empleo de sifones. Las aguas circulan verticalmente a través de un sustrato filtrante de arena-gravilla, de aproximadamente 1 m de espesor, en el que se fija la vegetación. En el fondo de los humedales, una red de drenaje permite la recogida de los efluentes depurados. A esta red de drenaje se conectan un conjunto de chimeneas, que sobresalen de la capa de áridos, al objeto de incrementar la oxigenación del sustrato filtrante.

2.5.4.4. Esquemas de funcionamiento

En este tipo de humedales el esquema del proceso es, en esencia, semejante al de un tratamiento convencional; consta de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y, opcionalmente, tratamiento terciario. Puesto que el pretratamiento y el tratamiento primario se han estudiado en profundidad, se describe a continuación el tratamiento secundario y el terciario.

2.5.4.5. Construcción de los humedales artificiales

- El confinamiento

Lo normal es construir los humedales por excavación en el terreno. El fondo suele presentar en los HAFSS una pendiente del orden del 1 % en la dirección entrada-salida y algo menor en los HAFS, mientras que en los taludes suelen ser de unos 45 grados, en los humedales de flujo subsuperficial y más suaves en los de flujo superficial. Con relación a la geometría del confinamiento, en los humedales de flujo superficial se recomiendan relaciones longitud/anchura del orden de 5/1, mientras que en los de flujo subsuperficial es normal operar con relaciones 3/1.

Un aspecto de suma importancia es lograr que el vaso de los humedales sea estanco, para que no se produzcan fugas de agua y evitar la contaminación del subsuelo por infiltración. Si el suelo donde se va a ubicar el humedal presenta una baja permeabilidad, bastará con proceder a su compactación; en caso contrario, será necesario proceder a su impermeabilización, recurriendo al empleo de arcillas o bentonitas, que se irán compactando por tongadas en capas de unos 10 cm. de espesor o bien utilizar laminas plásticas. Unos de los

plásticos más empleado es el PEAD, recomendándose espesores de al menos un milímetro, para evitar que la lámina pueda ser perforada por las raíces y rizomas de las plantas.

Para evitar punzamientos tanto por piedras del terreno, como por el propio sustrato filtrante, se recomienda que, por debajo y por encima de la lámina plástica, se disponga una lámina de geotextil de 150 - 300 g/cm², o que se extienda una capa de arena por debajo de lámina plástica. En la impermeabilización mediante lámina plástica, deben controlarse exhaustivamente las soldaduras entre láminas (por aire caliente o por compuestos químicos) y el buen anclaje de las láminas al terreno. El método más habitual para anclar las láminas al terreno, en la coronación de los taludes, consiste en excavar una zanja de aproximadamente 1 m de ancho en la coronación del talud, introducir la lámina impermeable y volver a llenar la zanja para que la lámina quede atrapada. Para esta etapa también puede recurrirse al empleo de grapas metálicas.

- La evacuación de los efluentes depurados

En los humedales de flujo superficial las aguas, tras recorrer longitudinalmente todo el humedal, se evacúan al exterior. En humedales de grandes extensiones, se recomienda que la evacuación tenga lugar por varios puntos para evitar en lo posible la creación de caminos preferentes. Mediante el empleo de tuberías abatibles, extensibles o flexibles, se controla el nivel del agua en los humedales, que para esta modalidad suele ser de 0,2-0,4 m. Para minimizar el escape de flotantes, principalmente en humedales de pequeñas dimensiones, en las zonas de evacuación de efluentes, pueden implantarse chapas deflectoras. En los humedales de flujo subsuperficial, la evacuación de los efluentes es diferente según se trate de humedales horizontales o verticales.

En los HAFSS horizontales la evacuación de las aguas depuradas puede realizarse a través de tuberías de drenaje embutidas en el fondo de una zona de bolos gruesos (50-100 mm.), dispuesta a la salida. Los drenajes conectan con una tubería final flexible, ubicada en la arqueta de evacuación de efluentes. Esta tubería permite modificar el nivel de encharcamiento del sustrato; lo habitual es unos 60 cm en la zona media del humedal, y que el nivel quede unos 5 cm. por debajo de la superficie del sustrato.

- Las capas de áridos

En el caso de los humedales de flujo libre, para el enraizamiento de la vegetación se puede recurrir al empleo de tierra vegetal y de áridos (gravilla). Dado que en este tipo de humedales la circulación del agua es básicamente a través de los tallos de las plantas y, en muy poca medida, a través del sustrato, este no juega un papel destacado. Por el contrario, en los humedales de flujo subsuperficial las capas de áridos que forman el sustrato filtrante constituyen la parte esencial del sistema de tratamiento, dependiendo de su rigurosa selección y adecuada colocación el buen funcionamiento del humedal, puesto que uno de los mayores riesgos de este tipo de humedales es la posible colmatación del medio filtrante.

En el caso de los HAFSS, el tamaño de los áridos que se emplean depende de la naturaleza de las aguas a tratar; es mayor el tamaño cuanto más cargadas se encuentren estas aguas. De este modo, los tamaños oscilan entre 3-6 mm para aguas poco cargadas, hasta 6 -12 mm para aguas de alta carga. El espesor del sustrato en el punto medio del humedal es de unos 60 cm, si bien comienza a trabajarse con espesores en torno a 30 cm, buscando un mayor grado de oxigenación, ante la observación de que la mayor parte de las raíces y rizomas no penetran en el sustrato más allá de 30-40 cm.

- El sistema de reparto de agua

Para lograr el buen funcionamiento hidráulico de los humedales artificiales, de forma que todo su volumen permanezca activo, y evitar la aparición de caminos preferenciales, es preciso que la alimentación de los mismos se efectúe de la forma más uniforme posible. En los humedales de flujo libre se utilizan tuberías de entradas, vertederos o tuberías perforadas para distribuir el agua a tratar en la zona de entrada al humedal.

En el caso de los HAFSS horizontales suele recurrirse al empleo de tuberías perforadas que descargan sobre una zona de bolos gruesos (50-100 mm), dispuesta en cabecera del humedal, que permite la distribución uniforme de las aguas. El gran tamaño de estos áridos minimiza los problemas de obstrucción. Recientemente, y al objeto de lograr un reparto más homogéneo de las aguas a tratar a lo largo de toda la zona de alimentación dispuesta en cabecera de los humedales, se comienza a recurrir al empleo de vertederos Thompson longitudinales.

- La plantación

En el caso de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, la especie vegetal predominantemente empleada es el carrizo (*Phragmites australis*), que presenta las siguientes ventajas:

- Perfecta adaptación a las condiciones hídricas de explotación de los humedales.
- Buena transferencia de oxígeno desde las partes aéreas hasta los rizomas y raíces, lo que favorece el desarrollo de bacterias en su entorno.

- Buena resistencia a la alternancia de periodos de alimentación y de reposo.
- Infiltración favorecida por el desarrollo de tallos a través de los que percola el agua, lo que reduce los riesgos de colmatación. Fácil adaptación a la altitud (salvo alta montaña) y a climas diversos.
- Mayor duración del ciclo vegetativo, permaneciendo activo durante un periodo de tiempo superior al de otras plantas emergentes.

El establecimiento de la vegetación en los humedales artificiales puede realizarse recurriendo al empleo de plantas procedentes de viveros, o mediante multiplicación vegetativa a partir de los rizomas. Este método es el más habitual y consiste en el troceado de los mismos en fragmentos de unos 5 cm de longitud, que se plantan en el sustrato con una densidad de unos 5 trozos/m². Con esta densidad de plantación se consigue la cobertura total del humedal, aproximadamente en un año.

- Puesta en servicio de una instalación de humedales artificiales

Como paso previo a la puesta en servicio de una instalación de humedales artificiales, se procederá a la comprobación de:

- El correcto funcionamiento de los elementos integrantes del pretratamiento (rejillas de desbaste), tratamiento primario (laguna anaerobia), sistema de medida de caudal y compuertas y válvulas que permiten el *bypass* de las aguas y la puesta en marcha/paro de los diferentes humedales implantados.

- La estanqueidad de los recintos que contienen a los sustratos filtrantes y las plantas.

La alimentación a los humedales se iniciará, una vez finalizada la plantación, para favorecer su crecimiento. Desde el primer momento de su puesta en operación, los humedales comienzan su función depuradora, basada inicialmente en procesos de filtración a través del sustrato y de los rizomas y raíces. Paulatinamente, sobre estos soportes se irá desarrollando la biomasa bacteriana, comenzando a tener importancia los procesos biológicos de degradación de los contaminantes, a la vez que las plantas irán captando los nutrientes que precisan para su desarrollo. En el caso de los humedales de flujo subsuperficial la etapa de arranque y estabilización del sistema, en la que se va desarrollando toda la zona radicular de las plantas y la biomasa bacteriana coloniza el sustrato y los rizomas y raíces, se extiende aproximadamente a lo largo de un ciclo vegetativo. En los humedales de flujo superficial es preciso el transcurso de dos-tres ciclos para alcanzar un régimen operativo estable.

Inicialmente, en los humedales de flujo subsuperficial horizontal, el nivel de agua se mantendrá unos 5 cm. por debajo de la superficie del sustrato filtrante, y se irá bajando paulatinamente para favorecer un desarrollo más rápido de la zona radicular de las plantas durante el primer ciclo de su crecimiento. Al final de este proceso, el nivel del agua en el sustrato recuperará su valor inicial. Durante los periodos de puesta en operación de los humedales, se procederá a la eliminación de la vegetación espontanea que pueda aparecer para evitar competencias con las especies implantadas.

- Mantenimiento de un HASS

Periódicamente se procederá a la limpieza de los sistemas de distribución ubicados en cabecera de los canales. La frecuencia de esta operación la marcarán las condiciones operativas de cada situación concreta. Se evitará, en todo momento, la entrada a las instalaciones de la estación depuradora de animales que puedan emplear las especies vegetales implantadas como alimento. Se evitará, en lo posible, pisar el sustrato filtrante para impedir su compactación, lo que disminuiría su conductividad hidráulica. El corte de las plantas secas, de forma manual o mecánica, y su retirada, debe hacerse finalizado el periodo vegetativo, para que las partes secas no caigan sobre el sustrato, liberando los nutrientes retenidos.

Dado que los rendimientos en la eliminación de nutrientes, que se logran mediante la siega y retirada periódica de la biomasa vegetal de los humedales artificiales no son muy elevados, situándose por debajo del 20 % en lo que al nitrógeno se refiere, y por debajo del 10 % en el caso del fósforo, en ocasiones se pone en duda la necesidad de estas operaciones de mantenimiento, llegándose a aconsejar que no se lleven a cabo en climas fríos, dado el efecto de protección térmica que ejerce la vegetación.

Por el contrario, en la zona mediterránea si se recomienda proceder al cosechado de la biomasa una vez al año, para evitar la acumulación de materia muerta (necrosoma) en el humedal. Es aconsejable que la siega se lleve a cabo una vez pasado el periodo de posibles heladas. Esta cosecha de la biomasa permite la limpieza de los lechos y la revisión de los sistemas de alimentación-distribución (principalmente en los humedales de flujo subsuperficial vertical), de los taludes, etc.

En todo caso, se evitará la siega de la biomasa en los periodos de nidificación de las aves que habiten en el humedal. Especialmente, en los primeros meses de operación de los HAFSS, deben eliminarse las malas hierbas que hacen competencia al carrizo. Estas malas hierbas deben extraerse a mano evitando, en todo momento, el uso de herbicidas. Periódicamente, se controlará la aparición de enfermedades en las plantas. Si esto ocurre, se iniciarán los pertinentes tratamientos, de acuerdo con las indicaciones del personal especializado

- Anomalías más frecuentes y su solución

El principal y más grave problema que puede darse en la explotación de un humedal artificial de flujo subsuperficial, radica en la colmatación del sustrato, lo que tendrá su reflejo en la aparición de charcos en la superficie del humedal y en la instauración de condiciones de operación anaerobias, con la consiguiente disminución en los rendimientos de depuración y empeoramiento del aspecto de los efluentes depurados. Si la selección del sustrato es la adecuada, la principal causa de esta colmatación habrá que buscarla en un mal funcionamiento de los tratamientos previos (pretratamiento y tratamientos primarios).

Ante un problema de estas características, se aconseja detener la alimentación de la unidad durante unas dos semanas, para volver a reiniciarla una vez transcurrido este periodo. En invierno es normal que mueran las hojas y los tallos del carrizo, pero si este hecho ocurre en otros momentos del año, y no se debe a falta de agua, la causa podría radicar en la presencia de sustancias tóxicas en las aguas a depurar, en la aparición de algún tipo de enfermedad en las plantas, o en ataques de plagas. Estas situaciones se solventarán mediante la aplicación de los adecuados tratamientos fitosanitarios.

- Ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales

Los humedales artificiales, como cualquier otro sistema de depuración de aguas residuales, presentan una serie de ventajas e inconvenientes que pueden aconsejar o no su utilización en cada caso concreto:

- Ventajas
 - Sencillez operativa, al limitarse las labores de explotación a la retirada de residuos del pretratamiento y al corte y retirada de la vegetación una vez seca.
 - Consumo energético nulo si las aguas residuales a tratar pueden circular por gravedad hasta los humedales
 - Inexistencia de averías al carecer de equipos mecánicos.
 - En el caso de los HAFSS de flujo horizontal, al operar con elevados tiempos de retención, se toleran bien las puntas de caudal y de carga.
 - Escasa generación de lodos en el tratamiento primario.
 - Posible aprovechamiento de la biomasa vegetal generada (ornamentación, alimentación animal) Los humedales de flujo superficial permiten la creación y restauración de zonas húmedas aptas para potenciar la vida salvaje, la educación ambiental y las zonas de recreo.

- Mínima producción de olores al no estar expuestas al aire las aguas a tratar en los humedales de flujo subsuperficial y por alimentarse con efluentes ya depurados los humedales de flujo superficial. Perfecta integración ambiental.
- Inconvenientes
 - Exigen más superficie de terreno para su implantación que las tecnologías convencionales de depuración, lo que puede repercutir grandemente en los costes de construcción si conlleva la adquisición de los terrenos.
 - Larga puesta en marcha que va desde meses a un año en sistemas de flujo subsuperficial.
 - Los humedales de flujo subsuperficial presentan riesgos de colmatación del sustrato, si este no se elige convenientemente no funcionan correctamente las etapas de pretratamiento y tratamiento primario, o si la instalación recibe vertidos anómalos con elevadas concentraciones de sólidos en suspensión o grasas.
 - Pérdidas de agua por evapotranspiración, lo que incrementa la salinidad de los efluentes depurados.
 - Los humedales artificiales presentan pocas posibilidades de actuación y control ante modificaciones de las condiciones operativas, por lo que es muy importante que estén bien concebidos, dimensionados y construidos.

2.5.5. Tratamiento terciario

Los tratamientos terciarios (conocidos también como tratamientos avanzados, más rigurosos, complementarios, etc.) permiten obtener efluentes finales de mejor calidad para que puedan ser vertidos en zonas donde los requisitos son más exigentes o puedan ser reutilizados. La eliminación de materia articulada y coloidal presente en los efluentes depurados, puede lograrse mediante la aplicación de tratamientos fisicoquímicos (coagulación-floculación) y la posterior etapa de separación (decantación, filtración). Para la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fosforo), se recurre cada vez más al empleo de procesos biológicos.

No obstante, el caso del de fósforo, los procesos de precipitación química, empleado sales de hierro y de aluminio, continúan siendo los de mayor aplicación. En la eliminación biológica de nitrógeno se opera de forma secuencial, que dan como resultado final su liberación a la atmosfera, en forma de nitrógeno gaseoso. Para la eliminación biológica del fosforo se combinan reactores operando bajo condiciones anaerobias, quedando el fosforo almacenado en los microorganismos, que posteriormente se extraen como lodos en exceso. Combinando los procesos anteriores también es posible la eliminación conjunta de ambos nutrientes.

Con relación a la desinfección de los efluentes depurados, si bien el cloro ha sido, y continua siendo, el desinfectante típico en el campo de las aguas residuales, al incrementarse el número de requisitos para lograr bajas o indetectables cantidades de cloro residual en los efluentes tratados, se hace precisa la implantación de procesos posteriores de clarificación o bien, la sustitución de los sistemas de cloración por sistemas de desinfección

alternativos, como la radiación UV, el empleo de ozono o el empleo de membranas.

En ocasiones se someten a los efluentes de los HAFSS a una etapa de afino en lagunas de maduración para mejorar, principalmente, el grado de abatimiento de los organismos patógenos. Esta eliminación se produce, fundamentalmente, por la acción de la radiación ultravioleta de la luz solar.

2.5.5.1. Lagunas de maduración

Tiempo de retención y temperatura son los principales parámetros involucrados en el diseño de las lagunas de maduración; diseño que se basa en modelos cinéticos para la eliminación de organismos patógenos representados, generalmente, por medio de los coliformes fecales. La mayoría de los modelos proponen cinéticas de primer orden; es la ecuación de diseño más habitual la desarrollada por Marais en 1974:

$$N_e = \frac{N_i}{1 + k_b \cdot t}$$

Donde:

- N_e = número de coliformes fecales/100 ml en el efluente
- N_i = número de coliformes fecales/100 ml en el influente
- k_b = constante de velocidad para la eliminación de coliformes (d⁻¹)

Esta constante se relaciona con la temperatura mediante la expresión:

$$k_b = 2,6 (1,19)^{(T-20)}$$

Donde:

- T = temperatura media del agua (C)
- t = tiempo de retención (d)

En el caso de disponer varias lagunas de maduración en serie la ecuación de diseño correspondiente queda como sigue:

$$N_n = \frac{N_1}{(1 + k_d \cdot t_1) (1 + k_d \cdot t_2) \dots (1 + k_d \cdot t_n)}$$

Donde:

- t_n = es el tiempo de retención en la laguna n.

La OMS recomienda un tiempo mínimo de residencia de 5 días si se dispone de una única laguna de maduración y de 3 días para cada laguna si se dispone de varias dispuestas en serie. Tras el dimensionamiento, debe comprobarse que la carga orgánica superficial con la que opera la primera laguna de maduración no supera la carga con la que opera la laguna facultativa precedente, recomendándose que no supere el 75 % de esta última carga.

2.5.5.2. Construcción de lagunaje de maduración

La etapa constructiva de los lagunajes es tan importante como la del diseño para la obtención de los resultados de los rendimientos previstos. Como recomendaciones generales pueden citarse:

- Se recomienda que el número de lagunas sea el mayor posible y como mínimo deben construirse tres. El rendimiento aumenta con esta disposición, pues se minimiza la concentración de algas en la última laguna, obteniéndose un efluente final de mejor calidad.
- En lo referente a la geometría de las lagunas, las formas redondeadas dan mejores resultados, al evitarse las zonas muertas y los cortocircuitos (camino preferentes).
- En el caso de lagunas rectangulares, se recomiendan relaciones longitud/anchura en el rango de 2/1 a 4/1, al objeto de favorecer el flujo pistón y para asegurar un mejor rendimiento.
- Según las características del terreno en el que se asienten las lagunas, será necesario o no proceder a la impermeabilización de los vasos con lamina plástica o arcilla compactada.
- De forma natural los vasos de las lagunas se van impermeabilizando mediante tres mecanismos:
 - Taponamiento físico de los poros del suelo con sólidos sedimentados
 - Taponamiento químico de los poros del suelo mediante intercambio iónico
 - Taponamiento biológico por crecimiento de microorganismos
- Los taludes interiores se construyen con un máximo de 2:1 (horizontal-vertical) para las lagunas anaerobias y 3:1 para las facultativas y de maduración. Estos taludes deben ir protegidos contra la erosión que

provoca el oleaje que se genera en las lagunas por acción del viento, especialmente en la zona comprendida 30 cm por encima y por debajo del nivel de agua.

- La coronación de las lagunas debe presentar un ancho que permita la circulación del personal y de vehículos, debiendo estar compactado adecuadamente para evitar su deterioro debido al tránsito.
- En el movimiento de tierras se debe intentar equilibrar las excavaciones con los rellenos.
- En lagunas menores de 2 hectáreas, se emplean resguardos en torno a 0,5 m, mientras que para lagunas mayores los resguardos son del orden de 1 m.
- Para evitar danos en los taludes por efecto del oleaje promovido por el viento, estos deben protegerse con escolleras.
- Los puntos de alimentación a las lagunas y de evacuación de efluentes se ubicarán los más lejanos posible y evitando caminos preferenciales.
- En lagunas de gran tamaño se dispondrán varios puntos de alimentación y varios puntos de salida.
- Debe evitarse la existencia de árboles próximos a las lagunas y de cualquier impedimento que dificulte la aireación natural de las lagunas.
- Para minimizar los posibles impactos olfativos, las lagunas deben ubicarse alejadas de los núcleos de población, teniendo en cuenta la dirección de los vientos dominantes.

- Por motivos de seguridad, las lagunas deben estar valladas y señalizadas.

2.5.5.3. Ventajas e inconvenientes del lagunaje

El lagunaje, como cualquier otro sistema de depuración de aguas residuales, presenta una serie de ventajas e inconvenientes que pueden aconsejar o no su utilización.

- Ventajas
 - Bajo coste de inversión (que es función, básicamente, del coste del terreno y de su permeabilidad).
 - Facilidad constructiva, el movimiento de tierras es la actividad principal en la construcción de los lagunajes.
 - Consumo energético nulo, si el agua a tratar puede llegar por gravedad hasta la estación depuradora. Las únicas fuentes de energía son el sol y el viento.
 - Ausencia de averías electromecánicas al carecer de equipos.
 - Solamente con la observación visual y olfativa de las distintas lagunas se tiene una estimación, bastante exacta, de su estado operativo.
 - Escaso y simple mantenimiento, que se limita a retirar los residuos del pretratamiento y a mantener las superficies de las lagunas libres de flotantes para evitar la proliferación de mosquitos.

- Gran inercia, por los elevados volúmenes y por los largos tiempos de retención, lo que le permite una fácil adaptación a cambios de caudal y de carga orgánica, muy habituales en las poblaciones de pequeño tamaño.
- Se puede emplear para tratar aguas residuales industriales con elevados contenidos en materias biodegradables. El lagunaje anaerobio constituye un excelente pretratamiento para vertidos con elevados contenidos en materia orgánica y sólidos en suspensión.
- Inconvenientes
 - Elevados requisitos de terreno para su implantación.
 - La implantación de este sistema de depuración puede verse imposibilitada en zonas frías o de baja radiación solar.
 - Generación de olores desagradables en las lagunas.
 - Possible proliferación de mosquitos.
 - Pérdidas de agua por evaporación.
 - Elevadas concentraciones de sólidos en suspensión en los efluentes finales, como consecuencia de la proliferación de las micro algas.
 - Riesgo de contaminación de acuíferos por infiltraciones.

2.6. Comparativo, tratamiento ríos Villalobos y Las Vacas

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre el tratamiento del río Villalobos y el proceso planteado para el río Las Vacas.

Tabla II. Comparativa, tratamiento ríos Villalobos y Las Vacas

Parámetros	Río Villalobos	Río Las Vacas
Tipo de agua a tratar	Industrial/domiciliar	Industrial/domiciliar
Efluente dirigido hacia	Río Villalobos	Río Las Vacas
Tipo de planta	Laguna y fito depuración	Hafss con lagunaje anaerobio y de maduración
Tipo de tratamiento	Pretratamiento, primario, secundario y terciario	Pretratamiento, primario, secundario y terciario
Tiempo de residencia	4 días	19 días
Caudal	38 240 m ³ /día	180 440 m ³ /día

Fuente: elaboración propia.

2.7. Evaluación de la calidad del agua

Para caracterizar fisicoquímica y microbiológicamente un cuerpo de agua es necesario utilizar herramientas específicas que involucren dichos parámetros generan modelos matemáticos para determinar la calidad del agua. A continuación se presenta un método para la evaluación de aguas residuales.

2.7.1. Índice de calidad del agua general ICA

Los índices pueden generarse utilizando ciertos elementos básicos en función de los usos del agua; el ICA define la aptitud del cuerpo de agua respecto a los usos prioritario que este pueda tener. Estos índices son llamados

de 'usos específicos'. El índice de calidad de agua propuesto por Brown es una versión modificada del WQI que fue desarrollada por La Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU. (NSF), que, en un esfuerzo por idear un sistema para comparar ríos en varios lugares del país, creó y diseñó un índice estándar llamado WQI (*water quality index*) que en español se conoce como ICA o índice de calidad de agua.

Los resultados pueden ser utilizados para determinar si un tramo particular de dicho río es saludable o no. Para la determinación del ICA interviene 9 parámetros:

- Coliformes fecales (en NMP/100 ml)
- pH (en unidades de pH)
- Demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO5 en mg/ L)
- Nitratos (NO₃ en mg/L)
- Fosfatos (PO₄ en mg/L)
- Cambio de la temperatura (en °C)
- Turbidez (en FAU)
- Sólidos disueltos totales (en mg/ L)
- Oxígeno disuelto (OD en % saturación)

2.7.2. Estimación del ICA

El ICA adopta para condiciones óptimas un valor máximo determinado de 100, que va disminuyendo con el aumento de la contaminación el curso de agua en estudio. Posteriormente al cálculo, el índice de calidad de agua de tipo 'general' se clasifica la calidad del agua con base en la siguiente tabla.

Tabla III. Clasificación de calidad del agua ICA

CALIDAD DE AGUA	COLOR	VALOR
Excelente		91 a 100
Buena		71 a 90
Regular		51 a 70
Mala		26 a 50
Pésima		0 a 25

$$ICA_a = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i)$$

$$ICA_m = \prod_{i=1}^9 (Sub_i^{w_i})$$

Fuente: LOBOS, José. *Evaluación de los contaminantes del embalse del cerrón grande PAES.*

p. 14.

Donde:

- w_i : pesos relativos asignados a cada parámetro (subi), y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.
- Subi: subíndice del parámetro i.

Otros autores demostraron que el cálculo de los ICA mediante técnicas multiplicativas es superior a las aritméticas; es decir, son mucho más sensibles a la variación de los parámetros, reflejan con mayor precisión un cambio de calidad. Es por esta razón que la técnica que se aplicará en este estudio es la multiplicativa. Para determinar el valor del ICA es necesario sustituir los datos en la ecuación 2 obteniendo los sub_i de distintas gráficas como se explicará a

continuación; dicho valor se eleva por sus respectivos w_i de la tabla siguiente y se multiplican los 9 resultados obteniendo de esta manera el ICA.

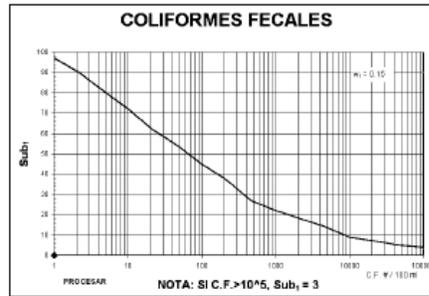
Tabla IV. **Ponderación para el cálculo del ICA**

i	Sub i	w_i
1	Coliformes Fecales	0,15
2	pH	0,12
3	DBO5	0,1
4	Nitratos	0,1
5	Fosfatos	0,1
6	Temperatura	0,1
7	Turbidez	0,08
8	Sólidos disueltos totales	0,08
9	Oxígeno disuelto	0,17

Fuente: elaboración propia.

Los pasos para calcular los Sub_i del índice de calidad general son: si los coliformes fecales son mayores de 100 000 Bact/100 mL el (sub₁) es igual a 3; si el valor de coliformes fecales es menor de 100 000 Bact/100 mL, buscar el valor en el eje de (X) en la figura 1 se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (sub₁) de coliformes fecales, se procede a elevarlo al peso w_1 .

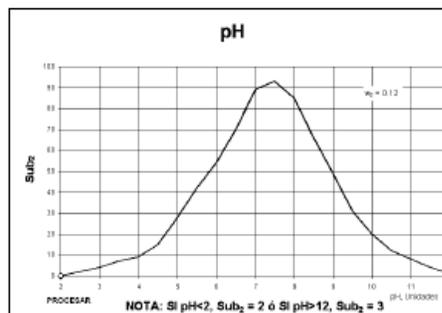
Figura 2. **Valoración del ICA en función de los coliformes fecales**



Fuente: elaboración propia.

Si el valor de pH es menor o igual a 2 unidades el (sub2) es igual a 2, si el valor de pH es mayor o igual a 10 unidades el (subi) es igual a 3. Si el valor de pH está entre 2 y 10, buscar el valor en el eje de (X) en la figura se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (subi) de pH y se procede a elevarlo al peso w_i .

Figura 3. **Valoración del ICA en función del pH**

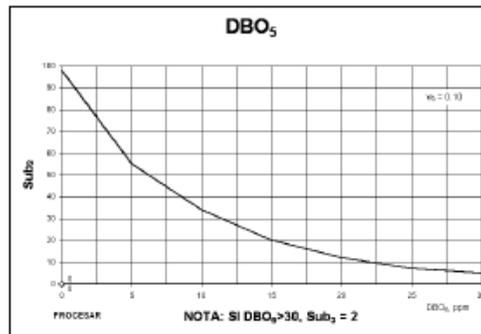


Fuente: elaboración propia.

Si la DBO5 es mayor de 30 mg/L el (subi) es igual a 2. Si la DBO5 es menor de 30 mg/L buscar el valor en el eje de (X), en la figura se procede a

interpolarse al valor en el eje de las (Y); el valor encontrado es el (subi) de DBO5 y se procede a elevarlo al peso w_i

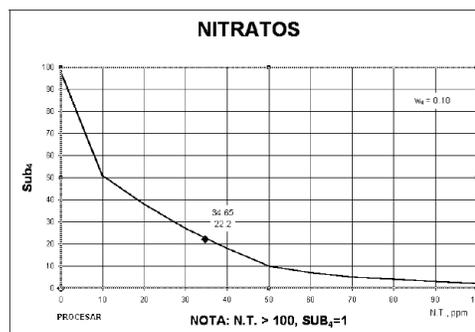
Figura 4. **Valoración del ICA en función del DBO5**



Fuente: elaboración propia.

Si nitratos es mayor de 100 mg/L el (subi) es igual a 2. Si nitratos es menor de 100 mg/L buscar el valor en el eje de (X), en la figura se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y); el valor encontrado es el (subi) de Nitratos y se procede a elevarlo al peso w_i .

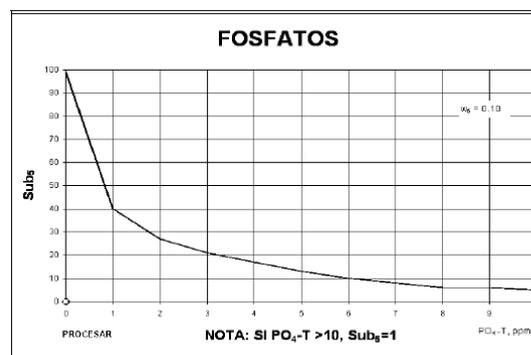
Figura 5. **Valoración del ICA en función de los Nitratos**



Fuente: elaboración propia.

Si el fosfato es mayor de 10 mg/L el (subi) es igual a 5. Si el fosfato es menor de 10 mg/L buscar el valor en el eje de (X); en la figura se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y); el valor encontrado es el (subi) y se procede a elevarlo al peso w_i .

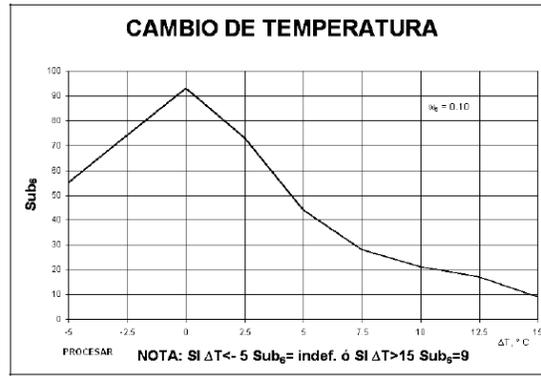
Figura 6. **Valoración del ICA en función de los fosfatos**



Fuente: elaboración propia.

Para el parámetro de temperatura (subi) primero hay que calcular la diferencia entre la T ambiente y la T muestra y con el valor obtenido proceder. Si el valor de esa diferencia es mayor de 15 °C el (subi) es igual a 9. Si el valor obtenido es menor de 15 °C, buscar el valor en el eje de (X); en la figura se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y); el valor encontrado es el (subi+1) de temperatura y se procede a elevarlo al peso w_i .

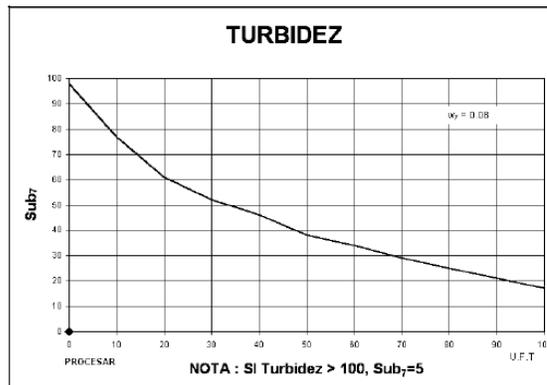
Figura 7. **Valoración del ICA en función de la temperatura**



Fuente: elaboración propia.

Si la turbidez es mayor de 100 FAU el (subi) es igual a 5. Si la turbidez es menor de 100 FAU, buscar el valor en el eje de (X); en la figura se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y); el valor encontrado es el (subi) de turbidez y se procede a elevarlo al peso wi.

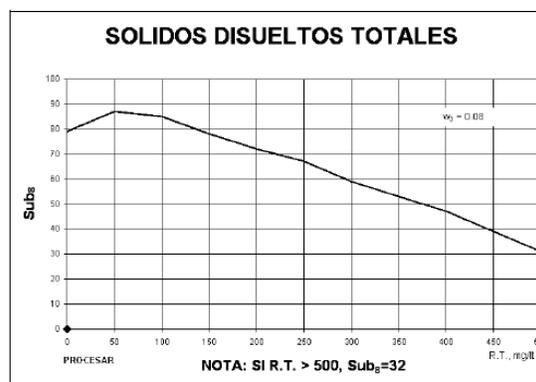
Figura 8. **Valoración del ICA en función de la turbidez**



Fuente: elaboración propia.

Si los sólidos disueltos totales son mayores de 500 mg/L el (subi) es igual a 3; si es menor de 500 mg/L, buscar el valor en el eje de (X); en la figura se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y); el valor encontrado es el (subi) de residuo total y se procede a elevarlo al peso w_i .

Figura 9. **Valoración del ICA en función de los SDT**



Fuente: elaboración propia.

Para el parámetro de oxígeno disuelto (OD) primero hay que calcular el porcentaje de saturación del OD en el agua. Para esto hay que identificar el valor de saturación de OD según la temperatura del agua utilizando la siguiente tabla:

Tabla V. **Valores de oxígeno disuelto en función de la temperatura**

T [C]	OD mg/L						
1	14,19	12	10,76	23	8,56	34	7,05
2	13,81	13	10,52	24	8,4	35	6,93
3	13,44	14	10,29	25	8,24	36	6,82

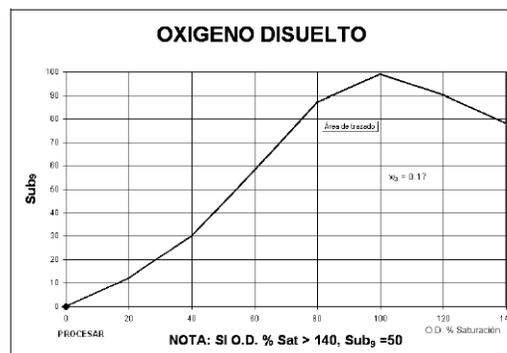
Continuación de la tabla V.

4	13,09	15	10,07	26	8,09	37	6,71
5	12,75	16	9,85	27	7,95	38	6,61
6	12,43	17	9,65	28	7,81	39	6,51
7	12,12	18	9,45	29	7,67	40	6,41
8	11,83	19	9,26	30	7,54	41	6,31
9	11,55	20	9,07	31	7,41	42	6,22
10	11,27	21	8,9	32	7,28	43	6,13
11	11,01	22	8,72	33	7,16	44	6,04

Fuente: Tabla 3-140 de PERRY *Manual del ingeniero químico*

Luego, si el % de saturación de OD es mayor de 140 % el (subi) es igual a 47. Si el valor obtenido es menor del 140 % de saturación de OD buscar el valor en el eje de (X) en la figura; se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y); el valor encontrado es el (subi) de oxígeno disuelto y se procede a elevarlo al peso w_i .

Figura 10. Valoración del ICA en función del OD



Fuente: elaboración propia.

2.7.3. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores

A continuación se presentan las mediciones de los valores máximos de cada parámetro que caracteriza a una descarga de aguas residuales hacia un cuerpo receptor en Guatemala.

Tabla VI. **Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de descarga de aguas residuales en cuerpos receptores**

Acuerdo Gubernativo 236-2006			<i>Fecha máxima de cumplimiento</i>			
	Artículo 20		02/05/2011	02/05/2015	02/05/2020	02/05/2024
			Etapas			
<i>Parámetros</i>	<i>Dimensionales</i>	<i>Valores Iniciales</i>	<i>Uno</i>	<i>Dos</i>	<i>Tres</i>	<i>Cuatro</i>
Temperatura	°C	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7
Grasas y aceites	mg/L	1500	100	50	25	10
Material flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Solidos Suspendidos	mg/L	3,500	600	400	150	100
Nitrogeno total	mg/L	1400	100	50	25	20
Fosforo total	mg/L	700	75	30	15	10
pH		6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	NMP/100 ml	> 1x10 ⁸	> 1x10 ⁶	> 1x10 ⁵	> 1x10 ⁴	> 1x10 ⁴
Arsénico	mg/L	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	mg/L	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro Total	mg/L	6	3	1	1	1
Cobre	mg/L	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	mg/L	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	mg/L	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Niquel	mg/L	6	4	2	2	2
Plomo	mg/L	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	mg/L	10	10	10	10	10
Color	UPC	1500	1300	1000	750	500

TCR	Temperatura del Cuerpo Receptor
NMP/100 ml	Numero Mas Probable en 100 mililitros
UPC	Unidades Platino Cobalto

Fuente: República de Guatemala. *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Acuerdo Gubernativo 236-2006. p. 12.*

Según el artículo 2 y 3 de dicho reglamento, este debe aplicarse a entes generadores, el cual se define como 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. Las municipalidades y demás instituciones de gobierno, incluidas las descentralizadas y autónomas, deberán hacer del conocimiento del MARN los hechos contrarios a estas disposiciones, para los efectos de la aplicación de la *Ley de protección y mejoramiento del medio ambiente*.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Condiciones del área donde se realizará el estudio

A continuación se muestran las diferentes condiciones involucradas para realizar el análisis de tratamiento de aguas residuales en el territorio metropolitano de la ciudad capital.

Tabla VII. Cuadro de condiciones del sistema a estudiar

Variable independiente	Dimensional	Descripción
Condiciones ambientales	No aplica	Como temperatura del ambiente, presión atmosférica, época seca o lluviosa.
Condiciones físicas en el punto de muestra	No aplica	Viabilidad de acceso al punto de muestreo a causa de derrumbes o deslaves.
Tipo de aguas de descarga en el afluente	No aplica	Estas son características del lugar de procedencia de las descargas al afluente.
Zona de riesgo	No aplica	Material de relleno inestable para la colocación de la planta de tratamiento.
Contaminación química de los afluentes	No aplica	Debido a la contaminación de las industrias en la cual se vierten los desechos químicos.
Tipo de industrias que descargan aguas residuales a los afluentes	No aplica	Puede ser industria siderúrgica, alimentos, cosméticos, agroquímicos, refinerías, entre otras.
Contaminación bacteriológica de los afluentes	No aplica	Según los tipos de descargas de aguas que se hacen en los afluentes.
Condiciones económicas para la realización de análisis	No aplica	Entes que realizan la financiación del proyecto.
Condiciones sociales de la circundante de los afluentes	No aplica	Aspectos sociales y económicos, comunidades aledañas a los afluentes.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Cuadro de variables dependientes**

Variable dependientes	Dimensional	Descripción
Temperatura del río		Depende de la temperatura del ambiente y de la temperatura de los afluentes que desembocan en el
pH	Adimensional	Depende de la contaminación del afluente, así como de la temperatura del río y del ambiente.
Turbidez	UNT	Está en función de cantidad de sólidos totales en punto de muestra del afluente.
Sólidos totales suspendidos, sedimentables	Ppm	Depende de la cantidad de material orgánico descargado en el afluente.
Iones de metales pesados	Ppm	Depende del tipo de industria que descarga aguas residuales al afluente.
Fosforo y nitrógeno	Ppm	Depende de del tipo de contaminación de los afluentes.
DBO y DQO	Ppm	Tipos de contaminación en los afluentes
Oxígeno disuelto	Ppm	Nivel de contaminación del río.
Estudio de prefactibilidad	No aplica	Posible diseño y ubicación de la planta de tratamiento.
Tipo de planta de tratamiento	No aplica	Depende de la contaminación física, química y bacteriológica del afluente.
Tipo de tratamiento de agua residual	No aplica	Depende de las condiciones económicas y del nivel de contaminación.
Foco de mayor contaminación	No aplica	Depende de los tipos y la cantidad de descargas en el afluente y las industrias involucradas.
Actividad microbiológica (bacterias, virus y parásitos)	NMP/100 ml	Depende del nivel de contaminación por aguas residuales por parte de las industrias o el alcantarillado público.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio se determinó de manera geográfica en función de las descargas de aguas residuales significativas hacia el río las vacas dentro del territorio de la ciudad capital a continuación se presenta detalladamente la delimitación del mismo.

3.2.1. Delimitación geográfica del área de muestreo

Se realizaron dos muestreos en 3 descargas distintas con aporte de aguas residuales significativas hacia el río Las Vacas y en un punto final del río en donde se unen dichas descargas. Se tomaron los sitios que se muestran a continuación debido a que estos afluentes aportan de manera significativa aguas residuales de varias zonas del área metropolitana del país, con el fin de determinar si las descargas cumplen con los requisitos del Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 20 también, determinar la calidad del agua del río luego de haber recibido dichos afluentes. Previo a la toma de muestras se realizó un recorrido de reconocimiento en cada descarga, así como del río en cuestión.

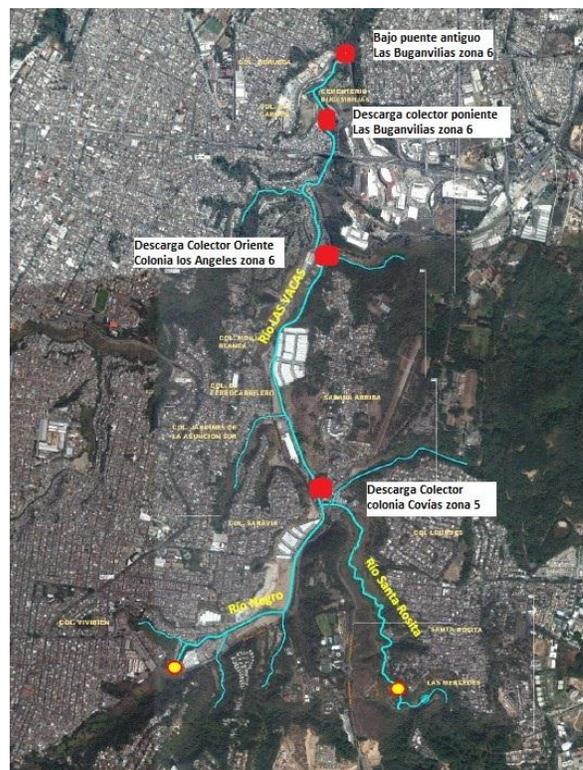
3.2.1.1. Sitios de muestreo para el río las Vacas

- Descarga colector colonia Covias zona 5
 - Descarga en la cual aportan aguas residuales las zonas 5, 15, 16 y 14 de la ciudad capital.
- Descarga colector oriente colonia Los Ángeles zona 6
 - Descarga que aporta aguas residuales de zona 5, área de campo marte, zona 6 y zona 1.

- Descarga colector poniente Las Buganvilias zona 6
 - Descarga que aporta aguas residuales de zona 3 por cementerio general, avenida Elena, zona 2, zona 6 hasta cementerio Las Buganvilias.

- Bajo puente antiguo Las Buganvilias zona 6
 - Punto del río Las Vacas en donde se recolectan las 3 descargas anteriormente detalladas.

Figura 11. **Mapa de localización de sitios de muestreo**



Fuente: *Google maps*. www.maps-google-com/. Consulta: 2 de febrero de 2018.

3.2.2. Delimitación temporal

La toma de muestras se llevará a cabo durante la época seca ya que se puede tener un mejor manejo de datos en los sitios de muestreo por ausencia temporal de desbordes. Así mismo, se realizan dos tomas de muestra por cada punto mencionado en la delimitación geográfica.

3.3. Recurso humano disponible

- Investigador: Franklin Gary Ajcholón Tubac
- Asesor: Ing. Qco. Zenón Much Santos
- Encargado de financiar el proyecto: Empagua
- Equipo del trabajo de campo: Investigador y personal autorizado

3.4. Recursos y materiales disponibles

Para la realización de análisis fisicoquímicos y microbiológicos de campo, se cuenta con los siguientes equipos:

- Termómetro de vástago para medición de temperatura en sitios con viabilidad de acceso a una distancia de +/- 1 metro.
- Termómetro de láser para medir temperatura del cuerpo de agua en sitios con vulnerabilidad de riesgo elevada. Con una distancia de acceso de 50 (+/-5) metros.
- Tiras medidoras de pH, dureza, alcalinidad, cloro libre y cloro residual.
- Medidor de oxígeno disuelto (OD).

- Equipo de seguridad para la toma de muestras (overol, botas de agua, mascarilla industria, filtros de gases y de ácidos, lentes de seguridad, guantes de polipropileno).
- Frascos estériles para tomar muestras y recipiente para incubar las muestras recién tomadas en el campo.

Para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de laboratorio se cuenta con los siguientes equipos:

- Turbidímetros
- Medidor de sólidos totales, suspendidos, sedimentables
- Potenciómetro de electrodos
- Termómetro digital
- Incubadora para los análisis microbiológicos
- Medidor de DBO, DQO y OD
- Medidor de metales pesados
- Medidor de grasas y aceites
- Medidor de fósforo y nitrógeno total

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Estas definen la forma y mecanismo de caracterización de la toma de muestras para la técnica cualitativa se enfoca en el método de muestreo y la cuantitativa se enfoca en los métodos para la determinación de cada parámetro tanto fisicoquímico como microbiológico.

3.5.1. Métodos cualitativos

En cada uno de los sitios seleccionados se realizarán dos muestreos, en los cuales se registrarán datos para la ubicación del sitio de muestreo y se tomarán las muestras de agua necesarias para los análisis. Se tomarán muestras de agua de 1 litro en recipientes de polipropileno, para la realización de los análisis fisicoquímicos realizados en el laboratorio y muestras de agua de 1 litro en recipientes adecuados para la realización de análisis microbiológicos. Las muestras se transportarán para su análisis al laboratorio en hielera, las cuales se mantendrán a una temperatura interna menor de 4 grados Celsius.

3.5.2. Métodos de cuantificación

A continuación se presentan los diferentes métodos para cuantificar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de un cuerpo de agua.

3.5.2.1. Métodos para los análisis fisicoquímicos

Los análisis de cuantificación serán realizados bajo el *standard method* el cual se basa en los siguientes métodos

- Demanda química de oxígeno (DQO): método con dicromato de potasio
- Oxígeno disuelto (OD): en el campo con un medidor digital
- Fósforo total: método de ácido ascórbico
- Nitrógeno total: método de Kjeldahl
- Sólidos sedimentables: cono de imhoff
- Sólidos en suspensión: método de filtración
- Sólidos totales: método de evaporación
- Temperatura: ésta se mide en el campo

- pH: se mide en el campo
- Conductividad eléctrica: se mide en el campo
- Sólidos totales disueltos: se miden en el campo

3.5.2.2. Métodos para los análisis microbiológicos

- Determinación del grupo de coliformes fecales: método de tubos múltiples
- Determinación del grupo de coliformes totales: método de tubos múltiples

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Los datos se recopilaron en tablas y se ordenaron en forma de esquematizar y comparar cada parámetro con las distintas fechas de muestreo.

3.6.1. Tablas de tabulación de datos del río Las Vacas

A continuación se presentan las tablas que se esquematizaron para la tabulación de datos del río las vacas, estos involucran las fechas de muestreos de cada parámetro en un determinado punto.

Tabla IX. **Resultados de los análisis fisicoquímico y microbiológico del río Las Vacas**

Parámetro	Fecha de muestra	Unidades	Resultado	LMP	Cumple (sí/no)
Temperatura	1				
	2				
pH	1				
	2				
Grasas y aceites	1				
	2				
Sólidos suspendidos	1				
	2				
Sólidos sedimentables	1				
	2				
	3				
Nitrógeno total	1				
	2				
Fósforo total	1				
	2				
Color	1				
	2				
Oxígeno disuelto	1				
	2				
Demanda química O ₂	1				
	2				
Demanda bioquímica O ₂	1				
	2				
Coliformes totales	1				
	2				
Coliformes fecales	1				
	2				

Fuente: elaboración propia.

3.7. Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico para determinar el comportamiento de los datos entre sí, se utilizó la estadística descriptiva como método de análisis comparativo.

3.7.1. Media maestra

A continuación se presenta una tabla con las medias muestrales de cada parámetro fisicoquímico y microbiológico.

Tabla X. **Media maestra de cada parámetro en cada punto de muestreo**

Parámetros	Punto 4	Punto 3	Punto 2	Punto 1
Dbó 5	64,48	195,12	194,87	137,14
Dqo	187,89	441,29	419,05	300,98
Fósforo total	3,15	5,74	5,39	3,60
Nitrógeno total	28,81	50,10	43,58	31,50
Color	144,83	353,42	354,37	226,09
Sólidos en suspensión	94,74	192,86	213,95	233,33
Aceites y grasas	6,45	12,00	17,14	18,38
Ph	7,20	7,15	7,30	7,25
Temperatura	19,49	19,49	19,49	19,95
Material flotante	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxígeno disuelto	16,59	21,13	9,13	21,82
Coliformes fecales	7,29e+07	6,68e+07	5,88e+07	1,34e+08
Coliformes totales	7,29e+07	6,68e+07	5,88e+07	1,34e+08

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Desviación estándar

Esta representa la diferencia entre la media y un dato puntual. A continuación se presenta una tabla con las desviaciones estándar de cada parámetro analizado

Tabla XI. **Desviación Estándar de parámetros en cada punto de muestreo**

Parámetros	Punto 4	Punto 3	Punto 2	Punto 1
Dbo 5	18,38	63,64	7,07	28,28
Dqo	28,28	148,49	28,28	49,50
Fósforo total	1,56	0,35	0,28	0,14
Nitrógeno total	6,36	12,02	11,31	5,66
Color	7,07	91,92	21,21	42,43
Sólidos en suspensión	7,07	84,85	21,21	395,98
Aceites y grasas	1,63	0,00	3,54	2,12
Ph	0,00	0,21	0,00	0,07
Temperatura	0,71	0,71	0,71	1,41
Material flotante	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxígeno disuelto	0,57	1,70	1,13	2,83
Coliformes fecales	1,39e+08	7,57e+07	3,54e+07	1,04e+08
Coliformes totales	1,39e+08	7,57e+07	3,54e+07	1,04e+08

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Coeficiente de variación de Pearson

Esta presenta la diferencia entre la desviación estándar y la media de una muestra. A continuación se presenta una tabla con los CV de cada parámetro en análisis.

Tabla XII. **Coeficiente de variación de Pearson de cada parámetro**

Parámetros	Punto 4	Punto 3	Punto 2	Punto 1
Dbo 5	29 %	33 %	4 %	21 %
Dqo	15 %	34 %	7 %	16 %
Fósforo total	49 %	6 %	5 %	4 %
Nitrógeno total	22 %	24 %	26 %	18 %
Color	5 %	26 %	6 %	19 %
Sólidos en suspensión	7 %	44 %	10 %	170 %
Aceites y grasas	25 %	0 %	21 %	12 %
Ph	0 %	3 %	0 %	1 %

Continuación de la tabla XII.

Temperatura	4 %	4 %	4 %	7 %
Material flotante	0 %	0 %	0 %	0 %
Oxígeno disuelto	3 %	8 %	12 %	13 %
Coliformes fecales	191 %	113 %	60 %	78 %
Coliformes totales	191 %	113 %	60 %	78 %

Fuente: elaboración propia.

3.7.4. Análisis de varianza

- Hipótesis nula

El promedio de cada parámetro en los 4 puntos, NO varía significativamente entre sí.

- Hipótesis alternativa

El promedio de cada parámetro en al menos 1 grupo, sí varía significativamente entre sí.

Tabla XIII. **Criterios para análisis de varianza Anova**

Confiabilidad	95 %
Significancia	0,05
F crítica	6,59

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presenta una tabla con un resumen del análisis de varianza donde se determina que el valor de los parámetros en color amarillo difiere significativamente entre los distintos puntos de muestreo

Tabla XIV. **Resumen de Resultados Anova**

Parámetros	Valor f	Valor p	Acepta H_0
Dbo 5	6.12	0.06	No
Dqo	4.66	0.09	No
Fósforo total	4.20	0.10	No
Nitrógeno total	2.55	0.19	No
Color	8.29	0.03	Sí
Sólidos en suspensión	0.89	0.52	No
Aceites y grasas	12.23	0.02	Sí
Ph	0.67	0.62	No
Temperatura	0.14	0.93	No
Material flotante			
Oxígeno disuelto	22.09	0.01	Sí
Coliformes fecales	0.42	0.75	No
Coliformes totales	0.42	0.75	No

Para los 4 puntos en estudio

Fuente: elaboración propia.

Se rechaza la hipótesis nula para los parámetros color, aceites y grasas, oxígeno disuelto; por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa, para estos cuatro parámetros.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización fisicoquímica del río Las Vacas en el área metropolitana en función de las fechas y los puntos de muestreo

A continuación una tabla donde se comparan los parámetros fisicoquímicos con el acuerdo establecido, así mismo se muestra el cumplimiento de cada uno según el límite máximo establecido

Tabla XV. **Punto 1: descarga Covias regulador de caudal zona 5, ciudad capital**

Descarga col. Covias, zona 5		15/11/2016	27/02/2017	Lmp acu. 236-2006	Cumple Sí/no	% contaminación
Ítem	Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2			
1	Dbo 5	160	120	250	Sí	56,00
2	Dqo	340	270	500	Sí	61,00
3	Fósforo total	3,5	3,7	30	Sí	12,00
4	Nitrógeno total	36	28	50	Sí	64,00
5	Color	200	260	1 000	Sí	23,00
6	Sólidos en suspensión	140	700	400	No	105,00
7	Aceites y grasas	17	20	50	Sí	37,00
8	Ph	7,3	7,2	6 a 9	Sí	0,00
9	Temperatura	19	21	20 +/- 7	Sí	0,00
10	Material flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Sí	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Punto 2: descarga colector oriente colonia Los Ángeles zona 6, ciudad capital**

Colector oriente col. Ángeles z.6		15/11/2016	27/02/2017	Lmp acu. 236-2006	Cumple Sí/no	% contaminación
Ítem	Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2			
1	Db o 5	190	200	250	Sí	78,00
2	Dqo	440	400	500	Sí	84,00
3	Fósforo total	5,2	5,6	30	Sí	18,00
4	Nitrógeno total	53	37	50	Sí	90,00
5	Color	340	370	1000	Sí	35,50
6	Sólidos en suspensión	230	200	400	Sí	53,75
7	Aceites y grasas	15	20	50	Sí	35,00
8	Ph	7,3	7,3	6 a 9	Sí	0,00
9	Temperatura	19	20	20 +/- 7	Sí	0,00
10	Material flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Sí	0,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Punto 3: descarga colector poniente, Buganvillas**

Colector poniente Buganvillas		15/11/2016	27/02/2017	Lmp acu. 236-2006	Cumple Si/no	% Contaminación
Ítem	Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2			
1	Db o 5	250	160	250	Sí	82,00
2	Dqo	570	360	500	Sí	93,00
3	Fósforo total	6	5,5	30	Sí	19,17
4	Nitrógeno total	60	43	50	No	103,00
5	Color	430	300	1000	Sí	36,50
6	Sólidos en suspensión	270	150	400	Sí	52,50
7	Aceites y grasas	12	12	50	Sí	24,00
8	Ph	7,3	7	6 a 9	Sí	0,00
9	Temperatura	19	20	20 +/- 7	Sí	0,00
10	Material flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Sí	0,00

Fuente: elaboración propia.

La comparación de datos se hizo entre los límites máximos permisibles del acuerdo 236-2006 y la media aritmética de cada parámetro de la tabla XXV.

Tabla XVIII. **Bajo puente antiguo Buganvilias zona 6**

Bajo puente antiguo Buganvilias		15/11/2016	27/02/2017	Promedio
Ítem	Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2	
1	Dbó 5	80	54	67
2	Dqo	210	170	190
3	Fósforo total	4,6	2,4	3,5
4	Nitrógeno total	34	25	29,5
5	Color	150	140	145
6	Sólidos en suspensión	100	90	95
7	Aceites y grasas	7,8	5,5	6,65
8	Ph	7,2	7,2	7,2
9	Temperatura	19	20	19,5
10	Material flotante	Ausente	Ausente	Ausente

Fuente: elaboración propia.

4.2. **Caracterización microbiológica del río Las Vacas en el área metropolitana, en función de los puntos y las fechas de muestreo**

A continuación una tabla donde se comparan los parámetros microbiológicos con el acuerdo establecido, así mismo se muestra el cumplimiento de cada uno según el límite máximo establecido

Tabla XIX. **Microbiología, descarga Covias, regulador de caudal zona 5, ciudad capital**

Descarga col. Covias z.5			15/11/2016	27/02/2017	Lmp acu. 236-2006	Cumple Si/no	% Contaminación
Ítem	Parámetro	Unidades	Muestreo 1	Muestreo 2			
1	Coliforme fecal	Nmp/100 ml	2,40e+08	9,30e+07	1,00e+07	No	1665,00
2	Coliforme total	Nmp/100 ml	2,40e+08	9,30e+07	1,00e+07	No	1665,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Microbiología, colector oriente, colonia Los Ángeles zona 6, ciudad capital**

Descarga colector oriente col. Los ángeles z.6			15/11/2016	27/02/2017	Lmp acu. 236-2006	Cumple Sí/no	% contaminación
Ítem	Parámetro	Unidades	Muestreo 1	Muestreo 2			
1	Coliforme fecal	Nmp/100 ml	9,30e+07	4,30e+07	1,00e+07	No	680,00
2	Coliforme total	Nmp/100 ml	9,30e+07	4,30e+07	1,00e+07	No	680,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Microbiología, descarga colector poniente Baganvilias**

Descarga colector poniente buganvilias			15/11/2016	27/02/2017	Lmp acu. 236-2006	Cumple Si/no	% contaminación
Ítem	Parámetro	Unidades	Muestreo 1	Muestreo 2			
1	Coliforme fecal	Nmp/100 ml	4,30e+07	1,50e+08	1,00e+07	No	965,00
2	Coliforme total	Nmp/100 ml	4,30e+07	1,50e+08	1,00e+07	No	965,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Microbiología, bajo puente antiguo Bugarvilias**

Bajo puente antiguo Bugarvilias			15/11/2016	27/02/2017	Promedio
Ítem	Parámetro	Unidades	Muestreo 1	Muestreo 2	
1	Coliforme fecal	Nmp/100 ml	2,40e+08	4,30e+07	7,29e+07
2	Coliforme total	Nmp/100 ml	2,40e+08	4,30e+07	7,29e+07

Fuente: elaboración propia.

4.3. **Determinación del índice de calidad del agua ICA, del río Las Vacas en el área del departamento de Guatemala**

A continuación se presentan los resultados de la medición del ICA en los distintos puntos de muestreo, se observa que el punto de confluencia tiene menor contaminación que las descargas hacia el cuerpo receptor.

Tabla XXIII. **Medición del índice de calidad del agua del río Las Vacas en los puntos de muestreo**

Punto de muestreo	15/11/2016	27/02/2017	Prom/punto
Bajo puente antiguo Bugarvilias	33,45	35,09	34,27
Descarga colector poniente Bugarvilias	28,26	30,33	29,30
Descarga colector oriente colonia Los Ángeles z.6	28,46	29,34	28,90
Descarga Covias regulador de caudal z.5	32,66	9,09	20,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Índice de calidad de agua promedio [ICA], m =34,27

Calidad del agua	Color	Valor
Mala		34.27

Criterio clasificación de aguas residuales ICA

CALIDAD DE AGUA	COLOR	VALOR
Excelente		91 a 100
Buena		71 a 90
Regular		51 a 70
Mala		26 a 50
Pésima		0 a 25

Fuente: Lobos, José. Evaluación de los Contaminantes del Embalse del Cerrón Grande PAES 2002.

Fuente: LOBOS, José. *Evaluación de los contaminantes del embalse del Cerrón grande PAES.* p. 27.

4.4. Determinar la media aritmética de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, medidos en época seca, en los diferentes puntos de muestreo

A continuación se presenta una tabla con las medias aritméticas de cada parámetro medido en las 3 descargas y en el punto de unión de la misma.

Tabla XXV. **Media aritmética de los 4 puntos de muestreo**

Parámetro	Unidades	Descarga 1	Descarga 2	Descarga 3	Punto unión
DBO 5	mg/L	140	195	205	67
DQO	mg/L	305	420	465	190
Fósforo total	mg/L	3,6	5,4	5,75	3,5
Nitrógeno total	mg/L	32	45	51,5	29,5
Color	Pt-Co	230	355	365	145
Sólidos en suspensión	mg/L	420	215	210	95
Aceites y grasas	mg/L	18,5	17,5	12	6,65
pH	Log	7,25	7,3	7,5	7,20
Temperatura	Celsius	20	19,5	19,5	19,5
Material flotante	P/A	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1,67E+08	6,80E+07	9,65E+07	1,42E+08
Coliformes totales	NMP/100 ml	1,67E+08	6,80E+07	9,65E+07	1,42E+08

Fuente: elaboración propia.

4.5. **Determinar la descarga con mayor foco de contaminación hacia el río Las Vacas**

A continuación se presenta una tabla con los porcentajes de contaminación de cada punto en estudio, se encontró mayor contaminación microbiológica en colonia Covias zona.5 y en colector poniente las buganvillas mayor contaminación fisicoquímica

Tabla XXVI. **Porcentajes contaminación en época seca río Las Vacas**

Porcentaje contaminación del río Las Vacas según Acuerdo Gubernativo 236 - 2006					
Parámetros en estudio	Puente Baganvillas	Colector pon. Baganvillas	Colector col. Los Ángeles	Colector col. Covias	Promedio
Fisicoquímicos	18,70 %	41,02 %	39,43 %	35,80 %	33,74
Microbiológicos	1 415 %	965 %	680 %	1 665 %	1 181 %

Fuente: elaboración propia.

- Máxima contaminación fisicoquímica: descarga colector poniente Buganvillas.
- Máxima contaminación microbiológica: descarga Covias zona 5.
- Mayor foco de contaminación ICA: descarga Covias zona 5.

4.6. Realizar prueba de Tukey y ANOVA para los puntos de muestreo establecidos

Se analizaron los siguientes datos, a los cuales se les realizó un análisis de varianza Anova para determinar si existía diferencia significativa entre las medias de cada punto con cada uno de los parámetros

Tabla XXVII. **Recolección de datos fisicoquímicos y microbiológicos**

Parametro	Punto 4	Punto 3	Punto 2	Punto 1
DBO5	80	250	190	160
	54	160	200	120
DQ	210	570	440	340
	170	360	400	270
Fósforo total	5	6	5,2	3,5
	2	5,5	5,6	3,7
Nitrógeno total	34	60	53	36
	25	43	37	28
Color	150	430	340	200
	140	300	370	260
Sólidos suspensión	100	270	230	140
	90	150	200	700
Aceites y grasas	8	12	15	17
	6	12	20	20
Ph	7	7,3	7,3	7,3
	7	7	7,3	7,2
Temperatura	19	19	19	19

Continuación de la tabla XXVII.

	20	20	20	21
Oxígeno disuelto	17	20	10	20
	16	22,4	8,4	24
Coliformes fecales	2,40e+08	4,30e+07	9,30e+07	2,40e+08
	4,30e+07	1,50e+08	4,30e+07	9,30e+07
Coliformes totales	2,40e+08	4,30e+07	9,30e+07	2,40e+08
	4,30e+07	1,50e+08	4,30e+07	9,30e+07

Fuente: elaboración propia

- Análisis de varianza Anova

- Hipótesis nula

El promedio de cada parámetro en los 4 puntos, no varía significativamente entre sí.

- Hipótesis alternativa

El promedio de cada parámetro en al menos 1 grupo, sí varía significativamente entre sí.

Tabla XXVIII. **Promedio del parámetro**

Confiabilidad:	95 %
Significancia:	0,05
F crítica:	6,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Resumen de resultados Anova para los 4 puntos en estudio**

Parámetros	Valor f	Valor p	Acepta hi
Dbo 5	6,12	0,06	No
Dqo	4,66	0,09	No
Fósforo total	4,20	0,10	No
Nitrógeno total	2,55	0,19	No
Color	8,29	0,03	Sí
Sólidos en suspensión	0,89	0,52	No
Aceites y grasas	12,23	0,02	Sí
Ph	0,67	0,62	No
Temperatura	0,14	0,93	No
Material flotante			
Oxígeno disuelto	22,09	0,01	Sí
Coliformes fecales	0,42	0,75	No
Coliformes totales	0,42	0,75	No

Fuente: elaboración propia.

Se rechaza la hipótesis nula para los parámetros color, aceites y grasas, oxígeno disuelto, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa, para estos tres parámetros.

- Prueba de tukey

Debido a que, en al menos 1 grupo, la media de los tres parámetros seleccionados sí varía respecto a los 3 puntos restantes; se procedió a realizar la prueba de Tukey para los 4 parámetros en cuestión.

Tabla XXX. **Promedios de parámetros prueba de Tukey**

Puntos	Color	Grasas y aceites	Oxígeno disuelto
Punto 4	145	6,65	16,6
Punto 3	365	12	21,2
Punto 2	355	17,5	9,2
Punto 1	230	18,5	22

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Resumen grupos prueba de Tukey**

Parámetros	Color	Grasa y aceite	OD
Dif. Hon. Sig	211,1	9,0	7,2
grupo 4-3	220	5,35	4,6
grupo 4-2	210	10,85	7,4
grupo 4-1	85	11,85	5,4
grupo 3-2	10	5,5	12
grupo 3-1	135	6,5	0,8
grupo 2-1	125	1	12,8

Fuente: elaboración propia.

- Dif. Hon. Sig.: diferencia honestamente significativa
- Criterio

Se rechaza la hipótesis nula si la diferencia entre grupos es mayor a la diferencia honestamente significativa.

- Si existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de color de los puntos de muestreo 3 y 4.

- Si existe diferencia significativa entre las medias de los resultados grasas y aceites de los puntos de muestreo 4 y 2 y 4 y 1.
- Su existe diferencia significativa entre las medias de los resultados de oxígeno disuelto [OD] de los puntos de muestreo 4y2, 3y2, 2 y 1.

4.7. Propuesta de un proceso de tratamiento terciario de aguas residuales para los afluentes del río Las Vacas

- Proceso de tratamiento

Bajo el criterio de clasificar los afluentes del río Las Vacas como agua de reúso tipo VI, según el artículo 35 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, mediante un proceso de tratamiento viable técnicamente y de bajo costo económico; se propone realizar un proceso combinado de autodepuración, humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal con lagunaje anaerobio y de maduración, el cual consta de las siguientes etapas:

- Pretratamiento (canal de entrada, rejillas, desarenador-desengrasador).
- Tratamiento primario (laguna anaerobia).
- Tratamiento secundario (humedal artificial de flujo sub-superficial).
- Tratamiento terciario (laguna de maduración).

Tabla XXXII. **Caudales del afluente**

Sitios de muestreo	Caudal promedio	
	M3/s	M3/día
Descarga colector colonia Covias zona 5	0,65	56,160,00
Descarga colector oriente colonia Los Ángeles zona 6	0,65	56,160,00
Descarga colector poniente Las Bugarvilias zona 6	0,7	60,480,00
Bajo puente antiguo las Bugarvilias	2,1	181 440,00

Fuente: elaboración propia.

- Nivel de tratamiento del afluente

Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 35, *Parámetros y límites máximos permisibles para reuso*, el agua residual para reuso deberá cumplir con los límites máximos permisibles del siguiente cuadro:

Tabla XXXIII. **Nivel de tratamiento del afluente**

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	$< 2 \times 10^4$
Tipo III	200	No aplica
Tipo IV	No aplica	$< 1 \times 10^5$
Tipo V	200	$< 1 \times 10^5$

Fuente: Ministerio de ambiente y Recursos NATurales. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Acuerdo Gubernativo 236-2006. p. 17.*

- Tratamiento tipo v: reuso recreativo: con restricciones en el aprovechamiento para fines recreativos en estanques artificiales donde el ser humano solo 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.

- Pretratamiento (canal de entrada, rejillas, desarenador -desengrasador)
 - Cálculo del diseño del canal de entrada a la depuradora

$$\text{Área transversal} = \frac{Q}{v} = \frac{2,1 \text{ m}^3/\text{s}}{0,6 \text{ m/s}} = 3,5 \text{ m}^2$$

Donde:

- v = velocidad
- Q = caudal medio
-

Ancho: 1,875 m

Alto: 1,875 m

Cálculo de la pendiente requerida para el canal de entrada con la ecuación de Manning:

$$v = \frac{Rh^{2/3}}{n} * S^{1/2}$$

Donde:

- Rh = radio hidráulico (m)
- n = factor de Manning
- S = pendiente del canal (m/m)

$$S = \frac{0,6 \frac{m}{s} * 0,014}{\left(\frac{3,5}{1,875 m + 1,875 m + 1,875 m} \right)^{2/3}} = 0,00013 \frac{m}{m} = 0,013 \% \text{ pendiente}$$

- Cálculo de diseño del desbaste o rejillas

Se usará un tamaño de rejilla fina, de limpieza manual, para el canal de entrada ($Q = 2,1 \text{ m}^3/\text{s}$ $v = 0,6 \text{ m/s}$; Dimensiones del canal: $1,87 \times 1,87 \text{ m}$; tendrá barrotes de $0,6 \text{ cm}$ de ancho y $1,2 \text{ cm}$ de separación; con una velocidad de paso en la rejilla de $0,8 \text{ m/s}$.

$$A_R = B_c \cdot \frac{L}{L + b} \cdot \left(1 - \frac{G}{100} \right)$$

Donde:

- AR: área útil del canal en la zona de la rejilla (m^2)
- Bc: ancho del canal (m)
- L: luz o espacio entre barrotes (m)
- B: ancho de los barrotes (m)
- G: grado de colmatación (usualmente se adopta un valor de 30 %)

$$A_r = 1,87m * \frac{0,012m}{0,012m + 0,006m} * \left(1 - \left(\frac{30}{100} \right) \right) = 0,875 \text{ m}^2$$

La profundidad en la zona de rejilla, manteniendo el mismo ancho del canal en la zona de rejilla, será:

$$P = Q \cdot \frac{b + L}{\left(1 - \frac{G}{100}\right) \cdot V_p \cdot L \cdot B_c}$$

Donde:

- P : profundidad en la zona de rejillas (m)
- Q : caudal de aguas residuales (m³/s)
- V_p : velocidad de paso entre la rejilla (m/s)

$$P = 2,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{0,006 \text{ m} + 0,012 \text{ m}}{(1 - 0,3) * 0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,012 \text{ m} * 1,875 \text{ m}} = 3 \text{ m}$$

La pérdida de energía generada por la rejilla (diferencia de altura de la lámina de agua antes y después del paso por la rejilla se puede calcular con esta expresión propuesta por Lozano-Rivas.

$$\Delta H = \frac{V_p^2}{9,1} = \frac{(0,8 \text{ m/s})^2}{9,1 \text{ m/s}^2} = 0,07 \text{ m} \text{ (pérdida de energía aceptable)}$$

El número de barrotes se puede calcular con la siguiente expresión:

$$N = \frac{B_R - L}{b + L}$$

Donde:

- N : número de barrotes
- B_R : ancho del canal en la zona de rejilla (m)

- L luz o espacio entre barrotes (m)
- b ancho de los barrotes (m)

$$N = \frac{1,875m - 0,012m}{0,006m + 0,012m} = 104 \text{ barrotes de } 1/2''$$

- Cálculo y diseño de canales desarenadores-desengrasadores para un caudal medio de 2,1 m³/s y un caudal máximo de 4 m³/s

Para este caudal, se proyectarán 4 canales de desarenado-desengrasado. Cada uno tratará 0,53 m³/s de agua residual. Se calcula el volumen requerido por cada unidad, tomando un tiempo de retención de 15 minutos.

$$V = Q \times TRH$$

$$V = 0,53 \frac{m^3}{s} \times 15 \text{ min} \times \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 472,5 m^3$$

Se tomó como valor de carga superficial (Cs) 35 m/h para estimar el área superficial de una unidad de desarenador-desengrasador con el caudal máximo.

$$As = \frac{Q_{max}}{Cs} = \frac{1 \frac{m^3}{s} * 3600s}{35 m/h} = 102,85 m^2$$

El área transversal de la unidad se calculó estimando una velocidad horizontal de flujo de 0,05 m/s como parámetro de diseño.

$$At = \frac{Q}{v} = \frac{1 m^3/s}{0,05 m/s} = 20 m^2$$

Longitud de una unidad de desarenador-desengrasador es:

$$L = \frac{V}{At} = \frac{472,5 \text{ m}^3}{20 \text{ m}^2} = 23,63 \text{ m}$$

Profundidad útil de una unidad desarenador-desengrasador es:

$$P = \frac{V}{As} = \frac{472,5 \text{ m}^3}{102,85 \text{ m}^2} = 4,6 \text{ m}$$

Ancho de la unidad desarenador – desengrasador:

$$B = \frac{V}{P \times L} = \frac{472,5 \text{ m}^3}{4,6 \text{ m} \times 23,63 \text{ m}} = 4,35 \text{ m}$$

- Relación longitud/ancho = $\frac{23,63 \text{ m}}{4,35 \text{ m}} = 5/1$
- Relación profundidad/ ancho = $\frac{4,6 \text{ m}}{4,35 \text{ m}} = 1/1$

Para la proyección del área de desengrasado se adiciona un tercio más del ancho de la zona de desarenado, la cual estará separada por una pantalla, el ancho total de la unidad será:

$$B_{total} = B + \left(\frac{B}{3}\right) = 4,35 \text{ m} + \left(4,35 \frac{\text{m}}{3}\right) = 5,8 \text{ m}$$

El suministro de aire, asumiendo un valor de 1 m³ aire /h* m³ de tanque, será de:

$$\text{Aire suministrado} = Q_{\text{aire}} * V_{\text{unidad}} = 1 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{h} * \text{m}^3 \text{ tanque}} * 472,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire suministrado/unidad} = 472,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

- Diseño de laguna anaerobia (tratamiento primario)
 - Cálculo de tiempo de retención y volumen de laguna anaerobia

El diseño se basa en criterios de carga orgánica volumétrica y/o tiempos de retención. La carga orgánica volumétrica viene dada por:

$$\text{COV} = \text{Co} \frac{Q}{V}$$

Donde:

- COV: es la carga orgánica volumétrica (g DBO/m³*día)
- C_o: es la DBO5 influente (mg/L)
- Q: es el caudal (m³/día)
- V: el volumen de la laguna (m³).

De la expresión anterior, despejando el volumen se obtiene:

$$V = \text{Co} \frac{Q}{\text{COV}}$$

Para el cálculo de COV se utiliza la siguiente función de T.

$$\text{COV} = 10T + 100$$

La función anterior está diseñada para T entre 20 y 25 grados Celsius, para ello se utilizó una temperatura de diseño de 22 Celsius. A continuación, los resultados de los cálculos iniciales.

Tabla XXXIV. **Cálculo inicial de volumen y tiempo de retención**

Cálculo inicial volumen y tiempo de retención			
Parámetros	Símbolo	Medida	Unidades
Carga orgánica volumétrica	Cov	320	G/m ³ *día
Reducción DBO 5	Dbo5 red	64	%
Concentración DBO 5 inicial	Co	250	Ppm
Volumen de laguna anaerobia	V	141 750,00	M3
Tiempo hidráulico de retención	Thr	0,78125	Días

Fuente: elaboración propia.

No deben emplearse valores de TRH <1 d, debido al resultado de la ecuación anterior, el cual da un valor de menos de un día; debe usarse un valor de 2 días y recalcularse el volumen.

Tabla XXXV. **Diseño de laguna anaerobia**

Diseño de laguna anaerobia			
Parámetros	Símbolo	Medida	Unidades
Tiempo de residencia	T	2	Días
Volumen real	V	362 880,00	M3
Altura	H	5	M
Largo	L	360	M
Ancho	A	201,6	M

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Resultados de laguna anaerobia**

Resultados de laguna anaerobia			
Parámetros	Unidades	Influente	Elfuente
Dbo 5	Mg/l	250	125
Sólidos en suspensión	Mg/l	95	33,25
Nitrógeno	Mg/l	53	47,7
Fosforo	Mg/l	5,74	5,453
Coliformes fecales	Nmp/100 ml	4,30e+07	4,30e+07

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior muestra los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del efluente de la laguna anaerobia luego de 2 días de tiempo de retención. La carga de coliformes fecales no se reduce significativamente, por tanto, se procede a realizar el tratamiento secundario y terciario.

- Diseño del humedal (tratamiento secundario)
 - Cálculo de tiempo de retención y superficie del humedal en función de la eliminación de materia orgánica (DBO5), NO3 y sólidos en suspensión

Este método, desarrollado en 1995, emplea ecuaciones en las que se consideran las constantes de reacción (por unidad de volumen), dependientes de la temperatura.

- Cinética de reacción

$$\ln \frac{C_i}{C_e} = K_T * t$$

Donde:

- C_i : concentración del contaminante en el afluente (mg/L)
- C_e : concentración de diseño del contaminante en el efluente (mg/L)
- K_t : constante de reacción del contaminante en cuestión (d⁻¹)
- t : tiempo de residencia (días)

La constante K_t varía con la temperatura, la cual viene dada por la expresión:

$$K_T = K_R \theta^{T_w - T_r}$$

Donde:

- K_r : constante de reacción a la temperatura de referencia (d⁻¹)
- T_w : temperatura del agua considerada en el diseño (C) se suele emplear la temperatura media del mes más frío
- T_r : temperatura de referencia a la que se ha calculado el coeficiente θ , que suele ser 20 C y
- θ : Coeficiente de temperatura (adimensional): los valores de K_R y θ para cada tipo de contaminante en cuestión, se muestran a continuación

Tabla XXXVII. **Coefficiente de temperatura**

Material contaminante	Coefficiente temperatura	Constante de reacción estándar kr
Dbo5	1,06	1,104
No3	1,15	1
Solidos suspensión	1,105	1,052

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Muestra de cálculo de Kt para DBO5**

T media del mes más frio	Tw	17,7	Celsius
T referencia	Tr	20	Celsius

Fuente: elaboración propia.

$$K_T = 1,104 \text{ dia}^{-1} (1,06)^{17,5 \text{ C} - 20\text{C}}$$

$$K_T = 0,117 \frac{1}{\text{dias}}$$

- Muestra de cálculo tiempo de residencia para DBO5

$$\text{tiempo}(\text{dias}) = \frac{\ln\left(\frac{C_i}{C_e}\right)}{Kt} = \frac{\ln\left(\frac{125 \text{ ppm}}{75 \text{ ppm}}\right)}{0,117 \text{ dia}^{-1}} = 4,4 \text{ dias para reducccón de DBO5}$$

Teniendo en cuenta que el tiempo de residencia hidráulica viene definido por la relación entre el volumen ocupado por el agua en el humedal (volumen efectivo) y el caudal de alimentación al sistema, se tiene que:

$$t = \frac{V_f}{Q} = \frac{S \cdot h \cdot ps}{Q}$$

Donde:

- Vf: volumen efectivo del humedal (m3)
- Q: caudal de alimentación (m3/día)
- S: superficie del humedal (m2)
- h: profundidad de la lámina de agua (m)
- ps: porosidad del sustrato filtrante

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene la superficie necesaria del humedal artificial a construir.

$$S = \frac{Q * t}{h * ps} = \frac{Q}{Kt * h * ps} * Ln\left(\frac{Ci}{Ce}\right)$$

- Muestra de cálculo de superficie del humedal para DBO 5

$$S = \frac{Q * t}{h * ps} = \frac{181\,440 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 4,4\text{día}}{0,6\text{m} * 0,45} = 2\,925\,797,85\text{m}^2$$

$$S = L * A, \text{ Ancho} = \frac{2\,925\,797,85\text{m}^2}{1000\text{m}}$$

$$\text{Largo} = 1\,000\text{ m}$$

$$\text{Ancho} = 2\,925\text{ m}$$

- Parámetros de diseño del humedal

Para el cálculo del humedal se hizo un promedio del tiempo de retención de los contaminantes críticos en los afluentes.

Tabla XXXIX. **Parámetros críticos de diseño para determinación de tiempo de retención en humedal**

Variables de diseño	Unidades	Db _o 5	No ₃	Sólidos suspendidos
C inicial	Mg/l	125	47,7	33,25
C final	Mg/l	75	20	20
Kr	D-1	1,104	1	1,052
	Adimensional	1,06	1,15	1,105
Kt	D-1	0,117	0,115	0,116
Tiempo retención hidráulico (días)		4	8	4

Fuente: elaboración propia.

Tiempo promedio de retención humedal = 5 días

Luego se procedió a realizar el cálculo de las medidas de diseño del humedal, en función de las ecuaciones anteriores

Tabla XL. **Diseño humedal artificial subsuperficial**

Diseño humedal artificial sub-superficial (hafss)			
Parámetro	Símbolo	Medida	Unidades
Tiempo de retención	T	5	Días
Caudal de alimentación	Q	181 440,00	M ³ /día
Volumen efectivo humedal	V _f	983 582,03	M ³
Profundidad lamina agua	H	0,6	M
Porosidad sustrato filtrante	Ps	0,45	(ps)
Conductividad hidraulica	Cd	98 400,00	M/d
Superficie humedal	S	3 642 896,42	M ²
Longitud	L	3 642,90	M
Ancho	A	1 000,00	M
Sustrato filtrante	Grava gruesa	128	Mm

Fuente: elaboración propia.

A continuación, la muestra de cálculo para la calidad de agua del efluente del humedal

- Ecuaciones para cálculo de parámetros críticos en efluente

$$CHS = 100 \left(\frac{Q}{S} \right) \frac{cm}{dia} \text{ Carga hidraulica superficial}$$

$$SS = SSi (0,1058 + 0,0011TRH) \text{ Solidos en suspensión}$$

$$Ce = Ci \exp\left(-\frac{Kp}{TRH}\right) \text{ Fosfotor, Nitrogeno y DBO5}$$

$$Ce = \left(\frac{Ci}{(1 + t * Kt)^n} \right) \text{ Coliformes Fecales}$$

- Muestra de cálculo, sólidos en suspensión (SS) en el efluente del humedal

$$CHS = 100 * \frac{Q}{S} = 100 * \frac{181\ 440}{3\ 642\ 896,42} = 4,98 \frac{cm}{dia}$$

- Muestra de cálculo sólidos en suspensión (SS) en el efluente del humedal

$$SS = SSi (0,1058 + 0,0011TRH)$$

$$SS = 95 (0,1058 + 0,0011(4,98)) = 3,7 \text{ mg/L}$$

Tabla XLI. **Resultados efluente del humedal**

Parámetros	Unidades	Resultado			% remoción
		Afluente	Efluente	Esperado	
Dbo 5	Mg/l	125	72,3	75	42 %
Sólidos en suspensión	Mg/l	33,25	3,7	20	89 %
Nitrógeno	Mg/l	47,7	27,6	20	42 %
Fósforo	Mg/l	5,453	3,2	3,5	42 %
Coliformes fecales	Nmp/100 ml	4,30e+07	4,86e+06	1,00e+03	89 %

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla de resultados, los coliformes fecales tienen una reducción de 89 %; sin embargo, no se logra el resultado esperado; por tal razón, se procedió realizar la combinación del método con laguna de maduración para terminar la reducción de los agentes patógenos en el efluente del humedal.

- Diseño de laguna de maduración (tratamiento terciario)
 - Cinética de reacción

$$Ne = \frac{Ni}{1 + kb * t}$$

Donde:

- Ne: NMP coliformes fecales/100 ml en el efluente de la laguna
- Ni: NMP coliformes fecales/100 ml en el influente de la laguna
- Kb: constante de velocidad para eliminación de coliformes
- d: tiempo de residencia en la laguna (días)

Para calcular el tiempo de residencia en la laguna se necesita calcular la constante de velocidad, la cual viene dada por la siguiente ecuación:

$$K_b = 2.6 (1.19^{T-20})$$

En donde (T) es temperatura media del agua (Celsius)

- Muestra de cálculo de K_b

$$K_b = 2,6 (1,19^{22\text{ C} - 20\text{C}})$$

$$K_b = 3,68 \text{ dia}^{-1}$$

Debido a la elevada concentración de coliformes fecales en el efluente del humedal, si se diseña una sola laguna de maduración el tiempo de residencia sobrepasa los 365 días para alcanzar la concentración esperada; por lo tanto, se realizó el diseño de 3 lagunas de maduración en serie. Lo cual reduce el tiempo de residencia total significativamente y se alcanza la concentración deseada en un tiempo aceptable.

- Muestra de cálculo del tiempo de residencia, laguna núm. 1

$$t = \frac{4,86E6 - 2,80E5}{3,68 * 2,80E5} = 4 \text{ dias}$$

- Muestra de cálculo del tiempo de residencia, laguna núm. 2

$$t = \frac{2,80E5 - 1,67E4}{3,68 * 1,67E4} = 4 \text{ dias}$$

- Muestra de cálculo del tiempo de residencia, laguna núm. 3

$$t = \frac{1.67E4 - 1.0E3}{3.68 * 1.0E3} = 4 \text{ dias}$$

Tabla XLII. **Resultados de diseño 3 lagunas de maduración en serie para eliminación de coniformes fecales**

Diseño laguna de maduración no.1			
Parámetro	Símbolo	Medida	Unidades
Coliformes fecales influente	Ci	4,86e+06	Nmp/100 ml
Coliformes fecales efluente	Cf	2,80e+05	Nmp/100 ml
Constante de velocidad	Kb	3,68	D-1
Tiempo de residencia	T	4	Días
Volumen de laguna	Vf	806 020,41	M3
Ancho	A	806,42	M
Longitud	L	1 000,00	M
Profundidad	H	1	M

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Resultados de diseño 3 lagunas de maduración en serie para eliminación de coniformes fecales núm. 2**

Diseño laguna de maduración no.2			
Parámetro	Símbolo	Medida	Unidades
Coliformes fecales influente	Ci	2,80e+05	Nmp/100 ml
Coliformes fecales efluente	Cf	1,67e+04	Nmp/100 ml
Constante de velocidad	Kb	3,68	D-1
Tiempo de residencia	T	4	Días
Volumen de laguna	Vf	776 962,67	M3
Ancho	A	776,96	M
Longitud	L	1 000,00	M
Profundidad	H	1	M

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Resultados de diseño 3 lagunas de maduración en serie para eliminación de coniformes fecales núm. 3**

Diseño laguna de maduración no.3			
Parámetro	Símbolo	Medida	Unidades
Coliformes fecales influente	Ci	1,67e+04	Nmp/100 ml
Coliformes fecales efluente	Cf	1,00e+03	Nmp/100 ml
Constante de velocidad	Kb	3,68	D-1
Tiempo de residencia	T	4	Dias
Volumen de laguna	Vf	773 687,21	M3
Ancho	A	773,69	M
Longitud	L	1 000,00	M
Profundidad	H	1	M

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Los parámetros fisicoquímicos DBO5, nitrógeno total y sólidos en suspensión superan los límites máximos permisibles en las descargas de los colectores de aguas residuales del área metropolitana del país hacia el río Las Vacas; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se comprueba que sí existe contaminación fisicoquímica significativa en las descargas
2. Los parámetros microbiológicos coliformes fecales y totales superan los límites máximos permisibles en las descargas de los colectores de aguas residuales del área metropolitana del país hacia el río Las Vacas; por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se comprueba que sí existe contaminación microbiológica significativa en las descargas.
3. Los parámetros fisicoquímicos medidos en el punto de confluencia de las 3 descargas no superan los niveles de contaminación de las mismas; por tanto, se acepta la hipótesis nula con excepción de la contaminación microbiológica que sí supera el nivel de coliformes respecto a las descargas 2 y 3.
4. Con base en la caracterización fisicoquímica y microbiológica, el análisis de índice de calidad de agua (ICA) califica el afluente en el punto de confluencia como agua mala con una calificación de 34,27 puntos, las descargas tienen un punteo de 26,35 puntos; por tanto, se rechaza la hipótesis nula puesto que sí es significativa la contaminación de las descargas.

5. La media aritmética de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en las 3 descargas superan los parámetros medidos en el punto de confluencia; por tanto, se rechaza la hipótesis nula.
6. Con la prueba de Tukey se determinó que existe diferencia significativa entre los parámetros fisicoquímicos de los puntos 4 y 3 para el color, 4-2 y 4-1 para las grasas y aceites y 4 y 2, 3 y 2 y 2 y 1 para el oxígeno disuelto. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna puesto que sí varían significativamente entre las descargas y el punto de confluencia.
7. La descarga con mayor foco de contaminación según ICA es la de Covías zona 5, puesto que esta agua debajo a la confluencia con los afluentes provenientes del río Negro y Santa Rosita; por tanto, se acepta la hipótesis nula puesto que el este punto tiene el mayor ICA.
8. Los coliformes se reducen de $1,42 \text{ E}+08$ a $1,0\text{E}+03$ mediante el proceso combinado propuesto de humedal con lagunaje anaerobio y de maduración. Comparado con los tratamientos convencionales, su construcción y operación es de bajo costo económico; involucra los 3 tipos de tratamiento, primario, secundario y terciario; evita la proliferación de plagas de mosquitos en el ambiente y contaminación de malos olores por la descomposición de la materia orgánica en la sub-superficie del suelo; se aprovecha la extensión de terreno superficial para otras actividades es un proceso más eficiente que las lagunas. Estas últimas son necesarias para reducir la contaminación patógena hasta los límites establecidos y a un costo más bajo que los humedales. Por tanto, se comprueba la hipótesis alterna respectivamente planteada.

RECOMENDACIONES

1. Dar continuidad a la toma de datos fisicoquímicos y microbiológicos por parte de instituciones que velan por el cuidado del medio ambiente puesto que se puede ampliar la investigación y con ello alimentar la curva para mejorar la calidad de vida de los habitantes que viven en áreas aledañas a la cuenca del río Las Vacas.
2. Realizar la investigación en distintos puntos de muestreo en los meses establecidos y rectificar el comportamiento de los afluentes con el fin de facilitar el análisis y la comprensión de los datos que a la institución encargada de realizar el tratamiento de aguas residuales.
3. Establecer una mayor cantidad de puntos de muestreo dentro de la cuenca del río Las Vacas que abarque desde su nacimiento hasta su confluencia con el río Motagua, con el fin de evaluar el comportamiento a lo largo de toda la cuenca y tener la capacidad total para realizar proyecciones de una planta de tratamiento para dicho cuerpo de agua.
4. Para el análisis de la calidad de agua del río Las Vacas, se propone que al menos se realicen un análisis de laboratorio al año, en época seca y lluviosa para evaluar su comportamiento según la precipitación. Con el fin de retroalimentar las proyecciones de tratamiento de los afluentes y mejorar la calidad de vida de las comunidades aledañas al cauce.
5. El beneficio económico se verá reflejado en las comunidades aledañas al cauce del río, puesto que gastarán menos en consultas médicas;

también, se tendrá menos conglomeración de personas en los centros de salud de esas regiones que son contaminadas por los afluentes en estudio.

6. Este estudio deberá ser tomado como una guía para la planificación e implementación de un estudio de prefactibilidad y factibilidad para el diseño y la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales de esta índole.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARCOS, P. A. *Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua*. Dinamarca: McGraw-Hill, 2005. 210 p.
2. AMSA. *Autoridad para Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlan*. [En línea]. <<http://www.amsa.gob.gt/noticias/plantalacerra>>. [Consulta: 17 de septiembre de 2018].
3. Barbosa. *Análisis de oxígeno disuelto en río Las Vacas*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 252 p.
4. CANOSA, Aroldo. *Indicadores bacteriológicos de eutrofización en los embalses de Chuza, Neusa y Tominé, y en la laguna de Chingaza*. Colombia: Fundación Universidad de Bogotá, 1995. 193 p.
5. CATHALAC. *UNEM*. [en línea]. <http://www.cep.unep.org/meetings-events/5th-lbs-istac/5th_lbs_istac_documents/cathalac-2009-adaptacion-al-cambio-climatico-para.pdf/view>. [Consulta: 20 de septiembre de 2018].
6. EDBERG Sergio; LE CLERO Hugo; ROBERTSON John. *Natural protection of spring and well drinking water against surface microbial contamination. II. Indicators and monitoring parameters for parasites*. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1999. 120 p.

7. Environment Agency. *Standing Committee of Analysts, the microbiology of drinking water - part 1 - water quality and public health, methods for the examination of waters and associated materials*. Estados Unidos: Environment Agency, 2002. 102 p.
8. ESPAÑA, Mariel. J. *Aguas negras amenazan a la ciudad de Guatemala, EDOM fué olvidado*. Guatemala: Publicado en periódico La Hora, 2010. 14 p.
9. GARCÍA, H.O. *Cuantificación de la calidad del agua del río Villalobos en época seca y 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 Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2002. 193 p.
10. GODFREE, Andrew; KAY, Daniel; WYER, Marc. *Faecal streptococci as indicator of fecal contamination in water*. Estados Unidos: Journal of Applied microbiology. Symposium Supplement, 1997. 291 p.
11. Hernández, Esteban. *Análisis de contaminantes emergentes de tipo farmacéutico (acetaminofeno, cafeína, dexketoprofeno, diclofenaco sódico, fenilefrina e ibuprofeno) en el agua del río las vacas (municipio de guatemala) y río villalobos (municipio de amatitlán)*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1998. 291 p.
12. IARNA, Franklin. *Agua en Guatemala*. [En línea]. <http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/2/2_4.htm>. [Consulta: 24 de septiembre de 2018].

13. Ingenieria, Q. *El portal de referencia para ingenieros químicos*. [en línea]. <<http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/5-desafios-ingenieria-quimica>>. [Consulta: 27 de septiembre de 2018].
14. _____. *El portal de referencia para ingenieros químicos*. [en línea]. <<http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/5-desafios-ingenieria-quimica>>. [Consulta: 28 de septiembre de 2018].
15. INSIVUMEH. *INSIVUMEH*. [en línea]. <<http://www.insivumeh.gob.gt/folletoshidro.html>>. [Consulta: 29 de septiembre de 2018].
16. Instituto Nacional de Estadística. *Población en Guatemala (demografía)*. [en línea]. <<http://www.ine.gob.gt/np/poblacion/index.htm>>. [Consulta: 30 de septiembre de 2018].
17. KOTT Y., Ben Ari; H, VINOUR Lory. *Coliphages survival as viral indicator in various wastewater quality effluents*. Estados Unidos: Pro Wat Tech, 1978. 192 p.
18. M, S. D.; HERRERA, Kenet. *Determinación de Vibrio cholerae, Salmonella sp y Shigella sp, en las principales descargas de aguas residuales de la ciudad de Guatemala, antes y despues de irradialos con Cobalto 60*. Guatemala: Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas, 1997. 210 p.
19. MONTES, Federico. *Ecología y enseñanza rural*. Colombia: In Estudio FAO Montes. 2005. 187 p.

20. MOORE Jean; HEANEY Neil; MILLAR Braum; CROWE Manuel; ELBORN Jackye. *Incidence of Pseudomonas aeruginosa in recreational and hydrotherapy pools*. Estados Unidos: Commun Dis Public Health, 2002. 291 p.
21. OLIVA, Bars Elyss; CALLEJAS, Bito Ceasar; PÉREZ, Juan F. *Caracterización. fisicoquímica y bacteriológica de las aguas del río Las Vacas*. Guatemala: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 2001. 219 p.
22. OROZCO, Annie. *Río Motagua se encuentra en abandono*. Guatemala: Prensa Libre, 2009 34 p.
23. PÉREZ, Gabriel. *Ciclo hidrológico.com*. [en línea]. <http://www.ciclohidrologico.com/procesos_del_agua>. [Consulta: 3 de octubre de 2018].
24. PERLMAN, Huwgs. *USGS, Water science school*. [en línea]. <<http://water.usgs.gov/edu/watercycleevaporation.html>>. [Consulta: 5 de octubre de 2018].
25. PITAN, E. *Contaminación del río Motagua genera reclamo por Honduras*. Guatemala: Prensa Libre, 2016. 34 p.
26. PRESCOTT, L. M. *Microbiología*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1999. 183 p.
27. ROLIM Samael. *Sistemas de lagunas de estabilización*. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 370 p.

28. JEAGGER, Eren. *Metodos de analisis de aguas en vertidos industriales. aceite y grasa total, recuperable. método de extracción con embudo de separación.* [en línea]. <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0007087#.V_06v-XhBdg>. [Consulta: 7 de octubre de 2018].
29. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). [en línea]. <<http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2016-water-and-jobs/>>. [Consulta: 9 de octubre de 2018].
30. US Army Corps of Engineers, Mobile District, & Topographic Engineering Center. *Water Resources Assesment of Guatemala.* United States: United States Southern Command, 2000. 201 p.

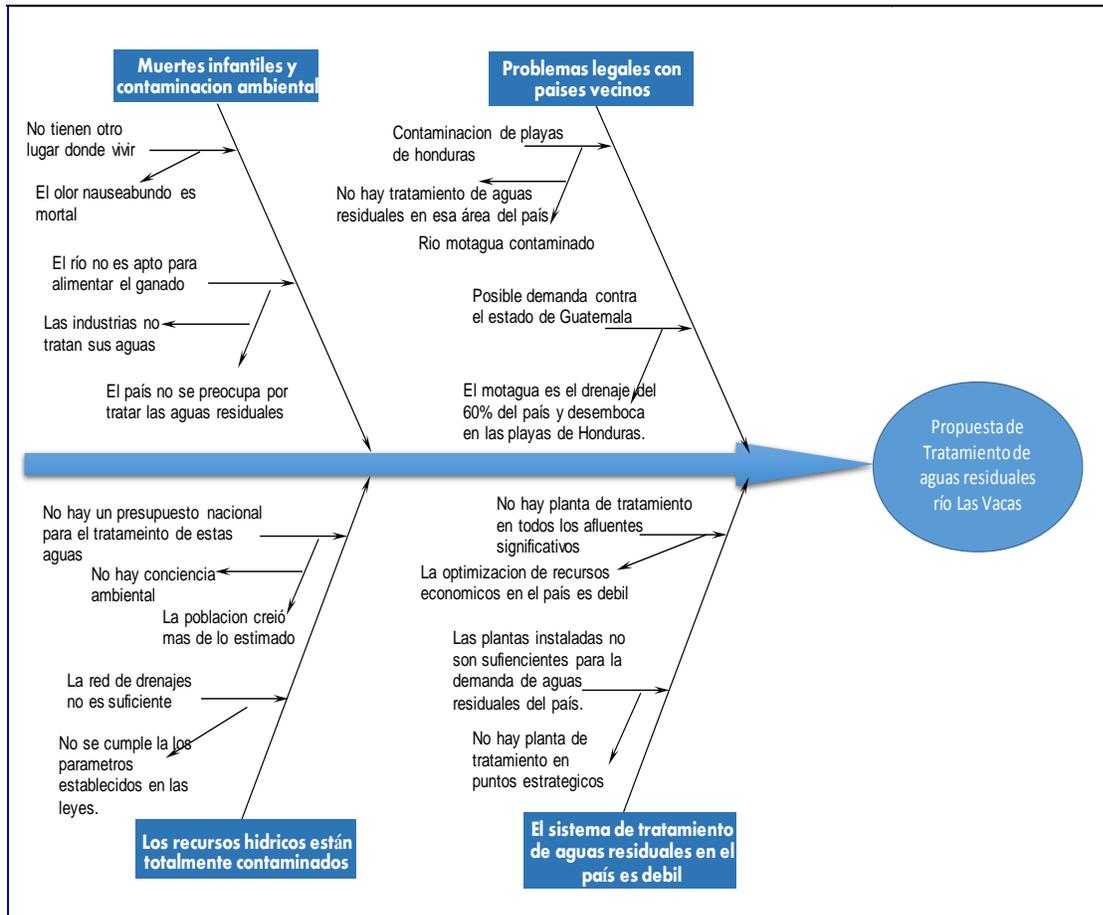
APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos

Ingeniería Química	Química	Química Ambiental	Conocimiento sobre leyes y acuerdos de aguas residuales
		Química 4	realización de informes y conocimiento de las propiedades del agua
		Análisis cuantitativo	formas de determinar cuantitativamente los parámetros del agua
		Análisis cualitativo	Estudio de la química del agua
Operaciones unitarias		Balance de Masa y Energía IQ-1	Cuantificación de los recursos utilizados en un proceso
		Flujo de Fluidos	Manejo Industrial de fluidos
		Transferencia de calor IQ-3	Calculo de Balances de energía en equipos de intercambio de calor
		Transferencia de masa IQ-4	Transferencia de materia, se aplica en el tratamiento de aguas. (intercambio iónico)
Fisicoquímica		Termodinámica 3	Ciclos de Energía, transformación de la energía en procesos naturales e industriales
		Termodinámica 4	Equilibrio Líquido-Vapor real
		Cinética de Procesos Químicos	Calculo y diseño de reactores
Complementaria		Laboratorio de Ingeniería Química 1	Control de procesos en planta
		Ingeniería de la Producción	Diseño, control y optimización de procesos en plantas industriales.
		Procesos Químicos Industriales	Tipos de tratamientos de aguas residuales
		Diseño de Plantas	Estudio de prefactibilidad del proyecto y diseño de la planta
		Diseño de Equipo	Diseño del equipo para la planta de tratamiento
Ciencias básicas y complementarias		Técnicas de estudio e investigación	investigación de todo el proyecto
		Ingeniería Económica	Viabilidad económica y financiera, optimización de costos
		Estadística 1	Análisis de datos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2 Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Recopilación de datos de muestreos fisicoquímicos y microbiológicos**

Bajo puente antiguo buganvilias			15/11/2016	27/02/2017	Lmp
Item	Parámetro	Unidades	Muestreo 1	Muestreo 2	
1	Coliforme fecal	Nmp/100 ml	2,40e+08	4,30e+07	1,00e+07
2	Coliforme total	Nmp/100 ml	2,40e+08	4,30e+07	1,00e+07

Descarga colector poniente buganvilias			15/11/2016	27/02/2017	Lmp
Item	Parámetro	Unidades	Muestreo 1	Muestreo 2	
1	Coliforme fecal	Nmp/100 ml	4,30e+07	1,50e+08	1,00e+07
2	Coliforme total	Nmp/100 ml	4,30e+07	1,50e+08	1,00e+07

Colector oriente col. Los ángeles z.6			15/11/2016	27/02/2017	Lmp
Item	Parámetro	Unidades	Muestreo 1	Muestreo 2	
1	Coliforme fecal	Nmp/100 ml	9,30e+07	4,30e+07	1,00e+07
2	Coliforme total	Nmp/100 ml	9,30e+07	4,30e+07	1,00e+07

Descarga col. Covias z.5			15/11/2016	27/02/2017	Lmp
Item	Parámetro	Unidades	Muestreo 1	Muestreo 2	
1	Coliforme fecal	Nmp/100 ml	2,40e+08	9,30e+07	1,00e+07
2	Coliforme total	Nmp/100 ml	2,40e+08	9,30e+07	1,00e+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Puntos de recolección de muestras**

Punto 1	Bajo puente antiguo Buganvilias
Punto 2	Descarga colector poniente Buganvilias
Punto 3	Colector oriente col. Los Ángeles z.6
Punto 4	Descarga Covias regulador de caudal z.15

Continuación del apéndice 4.

Resultados 15/11/2016						
Item	Parámetro	Unidades	Punto 4	Punto 3	Punto 2	Punto 1
1	Dbo 5	Mg/l	80	250	190	160
2	Dqo	Mg/l	210	570	440	340
3	Fósforo total	Mg/l	4,6	6	5,2	3,5
4	Nitrógeno total	Mg/l	34	60	53	36
5	Color	Pt-co	150	430	340	200
6	Sólidos en suspensión	Mg/l	100	270	230	140
7	Aceites y grasas	Mg/l	7,8	12	15	17
8	Ph	Escala log	7,2	7,3	7,3	7,3
9	Temperatura	Celsius	19	19	19	19
10	Material flotante	Presente/ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
11	Od	%	17	20	10	20
Resultados 27/02/2017						
Item	Parámetro	Unidades	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
1	Dbo 5	Mg/l	54	160	200	120
2	Dqo	Mg/l	170	360	400	270
3	Fósforo total	Mg/l	2,4	5,5	5,6	3,7
4	Nitrógeno total	Mg/l	25	43	37	28
5	Color	Pt-co	140	300	370	260
6	Sólidos en suspensión	Mg/l	90	150	200	700
7	Aceites y grasas	Mg/l	5,5	12	20	20
8	Ph	Escala log	7,2	7	7,3	7,2
9	Temperatura	Celsius	20	20	20	21
10	Material flotante	Presente/ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
11	Od	%	16,2	22,4	8,4	24

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Cálculo del índice de calidad del agua [ICA] para el río Las Vacas

PUNTO NO.1	parametro	fecha 1	fecha 2	MEDIA S	DESV STA	CV	wi	SI fecha 1	SI fecha 2	wi * Si (1)	wi * Si (2)
DBO 5	1	80	54	64.48	18.38	29%	0.1	2	2	0.20	0.20
DQO	2	210	170	187.89	28.28	15%				0.00	0.00
Fosforo Total	3	5	2.4	3.15	1.56	49%	0.1	15	24	1.47	2.36
Nitrogeno Total	4	34	25	28.81	6.36	22%	0.1	23	31	2.33	3.14
Color	5	150	140	144.83	7.07	5%				0	0
Solidos en suspension	6	100	90	94.74	7.07	7%	0.08	84	85	6.74	6.79
Aceites y grasas	7	8	5.5	6.45	1.63	25%				0.00	0.00
pH	8	7	7.2	7.20	0.00	0%	0.12	92	92	11.06	11.06
Temperatura	9	19	20	19.49	0.71	4%	0.1	83	79	8.31	7.86
Material Flotante	10	0	0.0001	0.00	0.00	0%				0	0
Oxigeno Disuelto	11	17	16.20	16.59	0.57	3%	0.17	10.21	9.75	1.74	1.66
Coliformes fecales	13	2.40E+08	4.30E+07	7.29E+07	1.39E+08	191%	0.15	0.04	0.14	0.01	0.02
coliformes totales	14	2.40E+08	4.30E+07	7.29E+07	1.39E+08	191%					
PUNTO NO.2	parametro	fecha 1	fecha 2	MEDIA S	DESV STA	CV	wi	SI fecha 1	SI fecha 2	wi * Si (1)	wi * Si (2)
DBO 5	1	250	160	195.12	63.64	33%	0.1	2	2	0.20	0.20
DQO	2	570	360	441.29	148.49	34%				0.00	0.00
Fosforo Total	3	6	5.5	5.74	0.35	6%	0.1	9.33	10.79	0.93	1.08
Nitrogeno Total	4	60	43	50.10	12.02	24%	0.1	6	16	0.62	1.57
Color	5	430	300	353.42	91.92	26%				0.00	0.00
Solidos en suspension	6	270	150	192.86	84.85	44%	0.08	57	78	4.56	6.28
Aceites y grasas	7	12	12	12.00	0.00	0%				0.00	0.00
pH	8	7.3	7	7.15	0.21	3%	0.12	93	89	11.18	10.62
Temperatura	9	19	20	19.49	0.71	4%	0.1	83.13	78.63	8.31	7.86
Material Flotante	10	0.0001	0.0001	0.00	0.00	0%				0.00	0.00
Oxigeno Disuelto	11	20	22.4	21.13	1.70	8%	0.17	12.01	13.59	2.04	2.31
Coliformes fecales	13	4.30E+07	1.50E+08	6.68E+07	7.57E+07	113%	0.15	0.14	0.06	0.02	0.01
coliformes totales	14	4.30E+07	1.50E+08	6.68E+07	7.57E+07	113%				0.00	0.00
PUNTO NO.3	parametro	fecha 1	fecha 2	MEDIA S	DESV STA	CV	wi	SI fecha 1	SI fecha 2	wi * Si (1)	wi * Si (2)
DBO 5	1	190	200	194.87	7.07	4%	0.1	2	2	0.20	0.20
DQO	2	440	400	419.05	28.28	7%				0.00	0.00
Fosforo Total	3	5.2	5.6	5.39	0.28	5%	0.1	11.93	10.46	1.19	1.05
Nitrogeno Total	4	53	37	43.58	11.31	26%	0.1	9	21	0.89	2.07
Color	5	340	370	354.37	21.21	6%				0.00	0.00
Solidos en suspension	6	230	200	213.95	21.21	10%	0.08	65	70	5.18	5.62
Aceites y grasas	7	15	20	17.14	3.54	21%				0.00	0.00
pH	8	7.3	7.3	7.30	0.00	0%	0.12	93	93	11.18	11.18
Temperatura	9	19	20	19.49	0.71	4%	0.1	83.13	78.63	8.31	7.86
Material Flotante	10	0.0001	0.0001	0.00	0.00	0%				0.00	0.00
Oxigeno Disuelto	11	10	8.4	9.13	1.13	12%	0.17	6.37	5.48	1.08	0.93
Coliformes fecales	13	9.30E+07	4.30E+07	5.88E+07	3.54E+07	60%	0.15	0.08	0.14	0.01	0.02
coliformes totales	14	9.30E+07	4.30E+07	5.88E+07	3.54E+07	60%				0.00	0.00
PUNTO NO.4	parametro	fecha 1	fecha 2	MEDIA S	DESV STA	CV	wi	SI fecha 1	SI fecha 2	wi * Si (1)	wi * Si (2)
DBO 5	1	160	120	137.14	28.28	21%	0.1	2	2	0.20	0.20
DQO	2	340	270	300.98	49.50	16%				0.00	0.00
Fosforo Total	3	3.5	3.7	3.60	0.14	4%	0.1	19.76	18.93	1.98	1.89
Nitrogeno Total	4	36	28	31.50	5.66	18%	0.1	22	29	2.16	2.86
Color	5	200	260	226.09	42.43	19%				0.00	0.00
Solidos en suspension	6	140	700	233.33	395.98	170%	0.08	80	-215	6.39	-17.20
Aceites y grasas	7	17	20	18.38	2.12	12%				0.00	0.00
pH	8	7.3	7.2	7.25	0.07	1%	0.12	93	92	11.18	11.06
Temperatura	9	19	21	19.95	1.41	7%	0.1	83.13	73.55	8.31	7.36
Material Flotante	10	0.0001	0.0001	0.00	0.00	0%				0.00	0.00
Oxigeno Disuelto	11	20	24	21.82	2.83	13%	0.17	12.01	14.72	2.04	2.50
Coliformes fecales	13	2.40E+08	9.30E+07	1.34E+08	1.04E+08	78%	0.15	0.04	0.08	0.01	0.01
coliformes totales	14	2.40E+08	9.30E+07	1.34E+08	1.04E+08	78%				0.00	0.00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Análisis de varianza y prueba de tukey**

- Hipótesis nula

El promedio de cada parámetro no varía entre los 4 grupos.

- Hipótesis alterna

El promedio en al menos 1 grupo si varía respecto de los 3 grupos restantes.

- Significacia 5 %
- Confiabilidad 95 %
- F crítica 6,59

Parámetros	Valor f	Valor p	Acepta (hi)
Dbó 5	6,12	0,06	No
Dqo	4,66	0,09	No
Fósforo total	4,20	0,10	No
Nitrógeno total	2,55	0,19	No
Color	8,29	0,03	Sí
Sólidos en suspensión	0,89	0,52	No
Aceites y grasas	12,23	0,02	Sí
Ph	0,67	0,62	No
Temperatura	0,14	0,93	No
Material flotante			
Oxígeno disuelto	22,09	0,01	Sí
Coliformes fecales	0,42	0,75	No
Coliformes totales	0,42	0,75	No

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Demanda bioquímica de oxígeno DBOS**

Origen de las variaciones	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F crítica
Entre grupos	24 053,5	3	8 017,83	6,12	0,056	6,59
Dentro de los grupos	5 238	4	1 309,50			
Total	29 291,5	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	134	67	338
Descarga colector poniente Buganvilias	2	410	205	4 050
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	390	195	50
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	280	140	800

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Demanda química de oxígeno DQO**

Origen de las variaciones	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F crítica
Entre grupos	91 300	3	30 433,33	4,66	0,085	6,59
Dentro de los grupos	26 100	4	6 525			
Total	117 400	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	380	190	800
Descarga colector poniente Buganvilias	2	930	465	22 050
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	840	420	800
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	610	305	2 450

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Fósforo total**

Origen de las variaciones	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F crítica
Entre grupos	8,33	3	2,77	4,20	0,099	6,59
Dentro de los grupos	2,645	4	0,66125			
Total	10,97	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	7	3,5	2,42
Descarga colector poniente Buganvilias	2	11,5	5,75	0,125
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	10,8	5,4	0,08
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	7,2	3,6	0,02

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Nitrógeno total**

Origen de las variaciones	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F crítica
Entre grupos	661	3	220,33	2,55	0,19	6,59
Dentro de los grupos	345	4	86,25			
Total	1 006	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	59	29,5	40,5
Descarga colector poniente Buganvilias	2	103	51,5	144,5
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	90	45	128
Descarga covias regulador de caudal z.15	2	64	32	32

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Color

Origen de las variaciones	Suma Cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F critico
Entre grupos	66 837,5	3	22 279,16	8.29	0,034	6.¿,59
Dentro de los grupos	10 750	4	2 687,5			
Total	77 587,5	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	290	145	50
Descarga colector poniente Buganvilias	2	730	365	8 450
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	710	355	450
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	460	230	1 800

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Sólidos en suspensión

Origen de las variaciones	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F critico
Entre grupos	109 700	3	36 566,66	0,89	0,52	6,59
Dentro de los grupos	164 500	4	41 125			
Total	274 200	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	190	95	50
Descarga colector poniente Buganvilias	2	420	210	7 200
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	430	215	450
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	840	420	156 800

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Aceites y grasas

Origen de las variaciones	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Entre grupos	180,13	3	60,044	12,22	0,017	6,59
Dentro de los grupos	19,645	4	4,91			
Total	199,77	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	13,3	6,65	2,645
Descarga colector poniente Buganvilias	2	24	12	0
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	35	17,5	12,5
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	37	18,5	4,5

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Ph

Origen de las variaciones	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Entre grupos	0,025	3	0,0083	0,66	0,612	6,59
Dentro de los grupos	0,05	4	0,0125			
Total	0,075	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	14,4	7,2	0
Descarga colector poniente Buganvilias	2	14,3	7,15	0,045
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	14,6	7,3	0
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	14,5	7,25	0,005

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. Temperatura

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Entre grupos	0,375	3	0,125	0,14	0,93	6,59
Dentro de los grupos	3,5	4	0,875			
Total	3,875	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	39	19,5	0,5
Descarga colector poniente Buganvilias	2	39	19,5	0,5
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	39	19,5	0,5
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	40	20	2

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. Oxígeno disuelto

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Entre grupos	206,78	3	68,92	22,09	0,0059	6,59
Dentro de los grupos	12,48	4	3,12			
Total	219,26	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	33,2	16,6	0,32
Descarga colector poniente Buganvilias	2	42,4	21,2	2,88
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	18,4	9,2	1,28
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	44	22	8

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Coliformes fecales**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados libertad</i>	<i>Promedio cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,17e+16	3	3,91e+15	0,4207	0,748	6.59
Dentro de los grupos	3,71e+16	4	9,29e+15			
Total	4,89e+16	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	283 000 000	141 500 000	1,9405e+16
Descarga colector poniente Buganvilias	2	193 000 000	96 500 000	5,7245e+15
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	136 000 000	68 000 000	1,25e+15
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	333 000 000	166 500 000	1,0805e+16

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Coliformes totales**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados libertad</i>	<i>Promedio cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,17E+16	3	3,91E+15	0,4207	0,748	6,59
Dentro de los grupos	3,71E+16	4	9,29E+15			
Total	4,89E+16	7				

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Bajo puente antiguo Buganvilias	2	283 000 000	141 500 000	1,9405e+16
Descarga colector poniente Buganvilias	2	193 000 000	96 500 000	5,7245e+15
Colector oriente col. Los Ángeles z.6	2	136 000 000	68 000 000	1,25e+15
Descarga Covias regulador de caudal z.15	2	333 000 000	166 500 000	1,0805e+16

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. Prueba de tukey

- Demanda bioquímica de oxígeno 5

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	147,4
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	1 309,5
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		-138	-128	-73
Punto 2			10	65
Punto 3				55
Punto 4				

- Demanda bioquímica de oxígeno 5

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	329,0
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	6 525
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		-275	-230	-115
Punto 2			45	160
Punto 3				115
Punto 4				

- Fósforo total

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	3,3
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	0,66125
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		-2,25	-1,9	-0,1
Punto 2			0,35	2,15
Punto 3				1,8
Punto 4				

- Nitrógeno total

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	37,8
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	86,25
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		-22	-15,5	-2,5
Punto 2			6,5	19,5
Punto 3				13
Punto 4				

Continuación del apéndice 19.

- Color

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	211,1
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	2 687,5
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		-220	-210	-85
Punto 2			10	135
Punto 3				125
Punto 4				

- Sólidos en suspensión

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	826.0
Multiplicador	5.76
Cuad. Err med	41125
n grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		-115	-120	-325
Punto 2			-5	-210
Punto 3				-205
Punto 4				

- Aceites y grasas

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	9,0
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	4,91125
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		-5,35	-10,85	-11,85
Punto 2			-5,5	-6,5
Punto 3				-1
Punto 4				

- Ph

Parametros de tukey	
Dif. Hon. Sig	0,5
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	0,0125
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		0,05	-0.1	-0,05
Punto 2			-0,15	-0,1
Punto 3				0,05
Punto 4				

Continuación del apéndice 19.

- Temperatura

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	3,8
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	0,875
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		0	0	-0,5
Punto 2			0	-0,5
Punto 3				-0,5
Punto 4				

- Oxígeno disuelto

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	7,2
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	3,12
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		-4,6	7,4	-5,4
Punto 2			12	-0,8
Punto 3				-12,8
Punto 4				

- Coliformes fecales

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	3,93e+08
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	9,29588e+15
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		4,50e+07	7,35e+07	-2,50e+07
Punto 2			2,85e+07	-7,00e+07
Punto 3				-9,85e+07
Punto 4				

- Coliformes totales

Parámetros de tukey	
Dif. Hon. Sig	3,93e+08
Multiplicador	5,76
Cuad. Err med	9,29588e+15
N grupos	2

Comparación	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Punto 1		4,50e+07	7,35e+07	-2,50e+07
Punto 2			2,85e+07	-7,00e+07
Punto 3				-9,85e+07
Punto 4				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Cuadro de resumen prueba de tukey**

Parámetros	Color	Grasa y Aceite	OD
Dif. Hon. Sig	211,1	9	7,2
punto 4-3	220	5,35	4,6
punto 4-2	210	10,85	7,4
punto 4-1	85	11,85	5,4
punto 3-2	10	5,5	12
punto 3-1	135	6,5	0,8
punto 2-1	125	1	12,8

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Recopilación de datos para análisis de Anova y Tukey**

Parámetro	P4	P3	P2	P1
DBO5	80	250	190	160
	54	160	200	120
DQ	210	570	440	340
	170	360	400	270
Fósforo total	5	6	5,2	3,5
	2	5,5	5,6	3,7
Nitrógeno total	34	60	53	36
	25	43	37	28
Color	150	430	340	200
	140	300	370	260
Sólidos Suspensión	100	270	230	140
	90	150	200	700
Aceites y grasas	8	12	15	17
	6	12	20	20
pH	7	7,3	7,3	7,3
	7	7	7,3	7,2
Temperatura	19	19	19	19
	20	20	20	21
Material flotante	0	0	0	0
	0	0	0	0
Oxígeno Disuelto	17	20	10	20
	16	22,4	8,4	24
Coliformes Fecales	2,40E+08	4,30E+07	9,30E+07	2,40E+08
	4,30E+07	1,50E+08	4,30E+07	9,30E+07
Coliformes Totales	2,40E+08	4,30E+07	9,30E+07	2,40E+08
	4,30E+07	1,50E+08	4,30E+07	9,30E+07

Fuente: elaboración propia.