



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS)

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE ESTREPTOCOCOS
FECALES, COLIFORMES FECALES Y TOTALES DEL HUMEDAL
ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL DE LA PLANTA PILOTO AURORA II**

Inga. Andrea Rocío Vásquez Ruballos
Asesorada por el MSc. Ing. Zenón Much Santos

Guatemala, noviembre 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE ESTREPTOCOCOS
FECALES, COLIFORMES FECALES Y TOTALES DEL HUMEDAL
ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL DE LA PLANTA PILOTO AURORA II**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

INGA. ANDREA ROCÍO VÁSQUEZ RUBALLOS

ASESORADA POR EL MSC. ING. ZENÓN MUCH SANTOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS DE
INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS**

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL


EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE ESTREPTOCOCOS FECALES, COLIFORMES FECALES Y TOTALES DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUPERFICIAL DE LA PLANTA PILOTO AURORA II

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 15 de agosto 2011.



Inga. Andrea Rocío Vásquez Ruballos

Correo electrónico: rociovasquezruballos@gmail.com

Carné: 2269 21921 2001

Registro universitario: 1000 23973

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Guatemala, octubre 24 de 2017

M. Sc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos "ERIS"
Facultad de Ingeniería, USAC

Respetuosamente me dirijo a usted, informándole por
medio de la presente que he revisado el documento final
titulado:

**"Evaluación de la capacidad de remoción de
Estreptococos fecales, coliformes fecales y totales del
Humedal Artificial de Flujo Superficial de la Planta
Piloto Aurora II".**

Elaborado por la Ingeniera Andrea Rocío Vásquez
Ruballos, como parte de las modificaciones solicitadas por
la terna examinadora del Estudio Especial II y como
requisito para optar al grado académico de Maestro en
Ingeniería Sanitaria, mediante la presente me permito
informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto,
le comunico que dicho documento cuenta con mi
aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me
suscribo de usted,

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M. Sc. Ing. Zeñón Muñoz Sanja
Asesor del estudio



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos



ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRAULICOS - ERIS -
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA - USAC -

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados, CII
Ciudad universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C. A.

Tel. (502) 24188000,
Ext. 86212 y 86213
(502) 24189138
(502) 24189140

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt

Guatemala, 09 de noviembre de 2017

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos "ERIS"
Facultad de Ingeniería, USAC

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
ERIS

Respetuosamente les comunico que he revisado, en mi
calidad Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria, el
documento de Estudio Especial titulado:

**Evaluación de la capacidad de remoción de *Escherichia coli*
fecales, coliformes fecales y totales del Humedal Artificial de
Flujo Superficial de la Planta Piloto Aurora II**

Presentado por la estudiante de la maestría antes
mencionada,

Ingeniera Civil Andrea Rocío Vásquez Ruballos

Les manifiesto que la estudiante cumplió en forma
satisfactoria con los requisitos establecidos por la Escuela
Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –
ERIS- y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la
realización de su estudio.



Edificio de ERIS
Área de prefabricados Facultad de
Ingeniería
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Fax 86213 y 86212

Agradeciendo la atención a la presente, se suscribe de
ustedes,

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Dr. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria

Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC



El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, MSc. Ing. Zenón Much Santos y MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión de lingüística efectuada por la Licenciada En La Enseñanza Del Idioma Español y La Literatura Jessica Edith Melgarejo Monterroso colegiada No. 27,003, del trabajo de la estudiante Ing. Andrea Rocío Vásquez Ruballos, titulado:

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos
ERIS

Evaluación de la capacidad de remoción de *Estreptococos* fecales, coliformes fecales y totales del Humedal Artificial de Flujo Superficial de la Planta Piloto Aurora II

En representación de la comisión de admisión y otorgamiento de grado, procede a la autorización del mismo.

Guatemala, 14 de noviembre de 2017

IMPRÍMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos



ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRAULICOS - ERIS -
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA - USAC -

Edificio de ERIS
Área de prefabricados Facultad de
Ingeniería
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

www.ingenieria-usac.edu.gt

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Porque con tus infinitas bendiciones me guiaste una vez más para poder alcanzar, hoy, esta meta. A Ti sea la honra y gloria. “Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia” (Pr. 2:6).

Mi familia

Porque ustedes me impulsaron en cada paso que fue necesario, por eso hoy el mérito es de todos. Gracias totales.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Porque para Él no hay nada imposible. A Ti sea toda la honra y gloria.
- Mi esposo** David Aguilar, gracias mi amado esposo, porque cada día me motivas para ser una mejor persona y siempre tienes una palabra que me alienta para cumplir mis metas. Dios me bendice con tu existencia en mi vida.
- Mi familia** A mi madre Rosario Ruballos, por tu infinito apoyo en todo momento y por el valioso ejemplo de vida que me das. No existen palabras para describir mi eterna gratitud para contigo. Mi hermano Vasni, gracias porque tu sola presencia en mi vida me impulsa y motiva a salir adelante.
- ERIS** Por mi formación profesional. Gracias por los conocimientos adquiridos.
- Mis amigos** A mis compañeros y amigos por formar parte de esta nueva meta alcanzada. Gracias por apoyarme y brindarme siempre su valiosa amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	XI
OBJETIVOS	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XV
HIPÓTESIS	XVII
ANTECEDENTES	XIX
JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS	XXI
ALCANCES Y LIMITACIONES	XXIII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Humedales naturales	1
1.1.1. Humedales artificiales.....	2
1.1.1.1. Humedales artificiales de flujo	
superficial.....	3
1.1.1.2. Humedales artificiales de flujo	
subsuperficial.....	6
1.2. Organismos del agua residual	7
1.2.1. Organismos indicadores de contaminación	8
1.2.1.1. Grupo coliforme	8
1.2.1.2. Grupo estreptococos fecales	9
1.2.1.3. Determinación de estreptococos	
fecales, coliformes fecales y totales a	
través del NMP/100cm ³	10

1.3.	Relación entre los coliformes fecales y los estreptococos fecales	11
2.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
2.1.	Área de estudio.....	13
2.2.	Generalidades del humedal artificial de la planta piloto Aurora II	14
2.2.1.	Diseño y funcionamiento del humedal artificial de flujo superficial ubicado en la planta piloto Aurora II	14
2.3.	Cálculo del número de muestras a analizar	18
2.4.	Toma de muestras.....	19
2.4.1.	Procedimiento para la recolección de muestras	19
2.5.	Análisis de coliformes fecales y totales	20
2.5.1.	Prueba presuntiva.....	20
2.5.1.1.	Procedimiento para prueba presuntiva	21
2.5.2.	Prueba confirmativa	22
2.5.2.1.	Procedimiento para prueba confirmativa	23
2.6.	Análisis de estreptococos fecales.....	24
2.6.1.	Procedimiento para determinar estreptococos fecales.....	24
3.	RESULTADOS.....	27
3.1.	Resultado de coliformes totales y fecales	28
3.2.	Resultado de estreptococos fecales.....	30
3.3.	Resultado sobre la relación coliformes fecales/estreptococos fecales	31

4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	33
4.1.	Interpretación de resultados de coliformes fecales	33
4.1.1.	Análisis gráfico de remoción de coliformes fecales.....	34
4.2.	Interpretación de resultados de coliformes totales	34
4.2.1.	Análisis gráfico de remoción de coliformes totales ..	35
4.3.	Interpretación de resultados de estreptococos fecales	36
4.3.1.	Análisis gráfico de remoción de estreptococos fecales.....	36
4.4.	Interpretación de resultados de relación CF/EF	37
	CONCLUSIONES.....	39
	RECOMENDACIONES	41
	BIBLIOGRAFÍA	43
	APÉNDICES.....	45
	ANEXOS	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Humedal artificial de flujo superficial.....	3
2. Humedal artificial de flujo subsuperficial.....	7
3. Ubicación del área de estudio.....	13
4. Planta general de humedal artificial.....	16
5. Corte A – A'.....	17
6. Corte B – B'.....	17
7. Punto de entrada y salida del humedal.....	19
8. Tubos con diluciones y caldo lactosado	21
9. Prueba presuntiva.....	22
10. Prueba confirmativa	23
11. Prueba de estreptococos fecales.....	25
12. Entrada vrs. salida de coliformes fecales	34
13. Entrada vrs. salida de coliformes totales	35
14. Entrada vrs. salida de estreptococos fecales	36

TABLAS

I. Contribución per cápita estimada de microorganismos indicadores procedentes de seres humanos y algunos animales.....	11
II. Porcentaje de remoción de coliformes fecales	29
III. Porcentaje de remoción de coliformes totales	28
IV. Porcentaje de remoción de estreptococos fecales	30

GLOSARIO

Afluente	Flujo de agua que entra al sistema.
Coliformes fecales	Parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas, provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales de sangre caliente.
Depuración de aguas residuales	Reducción o eliminación de la contaminación.
Efluente	Agua que sale o abandona el sistema o ente generador.
Humedal	Sistema acuático natural o artificial, de agua dulce o salada, de carácter temporal o permanente, generalmente, en remanso y de poca profundidad.
LMP	Límite máximo permisible es el valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales y en aguas para reúso y lodos.

NMP

Número más probable en una muestra de agua de 100 cm³; es un método de medición del crecimiento microbiano que permite hallar el número de microorganismos viables (vivos y metabólicamente activos), estimación de densidades poblacionales.

Reúso

El aprovechamiento de un efluente, tratado o no.

**Tratamiento de
aguas residuales**

Cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

RESUMEN

El presente estudio tiene por objeto evaluar la capacidad de remoción de estreptococos fecales, coliformes fecales y totales del humedal artificial de flujo superficial de la planta piloto Aurora II, a través del análisis de muestras puntuales en la entrada y salida del humedal para determinar su calidad en vigor con lo establecido en el Acuerdo Gubernativo No. 236 – 2006. Además, determinar la relación de coliformes fecales/estreptococos fecales (CF/EF) y compararla con los valores típicos de carga microbiana, así como establecer actividades necesarias de operación y mantenimiento para un funcionamiento adecuado y los posibles reúsos que se le pueden dar a la misma, sin que esta represente un peligro para la salud pública.

El valor promedio obtenido a la salida de estreptococos fecales fue $2,78 \times 10^7$ NMP/100 cm³ que representa el 58 % de remoción, de coliformes fecales fue $5,78 \times 10^{10}$ NMP/100cm³ que representa el 98% de remoción y de coliformes totales fue $7,15 \times 10^{11}$ NMP/100cm³ que representa el 71 % de remoción, por lo tanto, es necesario implementar un tratamiento terciario para cumplir con el límite máximo permisible de coliformes fecales que se establece en el Acuerdo Gubernativo 236 – 2006. Para este caso, se recomienda continuar con la reutilización del efluente para riego agrícola en general como tratamiento terciario, según la clasificación, Tipo I, establecida en el artículo 35 de dicho acuerdo. La relación CF/EF obtenida fue de 11 000:1, lo cual difiere del valor típico de 4,4:1 obtenido de otras investigaciones similares.

Se deberán realizar las actividades descritas de operación y mantenimiento rutinarios, que incluyen el control hidráulico, limpieza de las estructuras de entrada y descarga, corte de la vegetación, inspección general, entre otras, para garantizar el buen funcionamiento del mismo.

INTRODUCCIÓN

“La importancia de los humedales ha variado con el tiempo. En el periodo carbonífero, es decir, hace más de 350 millones de años, cuando predominaban los ambientes pantanosos, los humedales produjeron y conservaron muchos combustibles fósiles (carbón y petróleo) de los que hoy dependemos. El progreso del conocimiento científico de los humedales ha puesto en evidencia bienes y servicios más sutiles y han sido descritos a la vez como los riñones del medio natural, a causa de las funciones que pueden desempeñar para la depuración del agua.”¹

“Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial, además interactúan con la atmósfera.”²

Los sistemas de tratamiento basados en humedales artificiales, representan una alternativa de bajo costo a los métodos convencionales de depuración para obtener la reducción de los niveles de contaminación en el agua. “La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo libre superficial (en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera), entre los que se incluyen las zonas pantanosas y praderas inundadas (todas principalmente con vegetación y macrófitas emergentes).”³

¹ LLAGAS CHAFLOQUE, Wilmer Alberto, & GUADALUPE GÓMEZ, Enrique. *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. p. 86.

² Ibid.

³ EPA. Folleto informativo de Tecnología de Aguas Residuales. “*Humedales de flujo libre superficial*”. p. 1.

OBJETIVOS

General

Evaluar la capacidad de remoción de estreptococos fecales, coliformes fecales y totales del humedal artificial de flujo superficial de la planta piloto Aurora II.

Específicos

1. Evaluar el funcionamiento del humedal artificial de flujo superficial en cuanto a la eficiencia de remoción de estreptococos fecales.
2. Evaluar el funcionamiento del humedal artificial de flujo superficial en cuanto a la eficiencia de remoción de coliformes fecales y totales.
3. Determinar la relación CF/EF del humedal artificial de flujo superficial y compararla con los valores típicos de carga microbiana de las aguas residuales.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de veces las aguas residuales se descargan hacia algún río, quebrada, entre otros. sin previo tratamiento. Luego, esta agua tiene usos diversos que incluyen uso público – urbano, agrícola, industrial, pecuario, entre otras. El consumo de agua contaminada con estreptococos fecales, coliformes fecales y totales tiene un impacto muy particular y una serie de efectos en el medio ambiente y la salud pública, ya que contienen una amplia gama de parásitos, bacterias y virus causantes de enfermedades. Estos pueden variar desde condiciones leves, como infecciones agudas del oído, hasta otras más graves que amenazan la vida como la fiebre tifoidea y hepatitis. Los gusanos parásitos y los patógenos bacterianos, tales como Salmonella, también se encuentran comúnmente en el agua que da positivo en la prueba que busca altos niveles de bacterias coliformes fecales.

La planta piloto Aurora II cuenta con varias unidades experimentales, que han servido para la investigación de procesos de tratamiento de las aguas residuales para los estudiantes de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Una de esas unidades es el humedal artificial, el cual está hecho para trabajar con dos tipos de flujo: superficial y subsuperficial, y se presume que tiene la capacidad de remover cierta cantidad de bacterias. Por ello, es importante conocer qué tan eficiente es desde ese punto de vista, ya que dichos parámetros son excelentes indicadores de la higiene del agua y alimentos.

El presente estudio se enfoca principalmente en la capacidad que tiene el humedal artificial para remover estreptococos fecales, coliformes fecales y totales, con lo que se pretende responder la siguiente interrogante: ¿Será posible que el humedal artificial de flujo superficial disminuya la cantidad de estreptococos fecales, coliformes fecales y totales?

HIPÓTESIS

El humedal artificial de flujo superficial construido en la planta piloto Aurora II, tiene la capacidad de remover coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos fecales.

ANTECEDENTES

“En Guatemala existen dos investigaciones sobre la evaluación de humedales artificiales realizadas por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) una en la planta San Miguel de la empresa Cementos Progreso S.A. localizada en el km 46,5 carretera al Atlántico, Sanarate, El Progreso, la cual fue construida en el año 2000,”⁴ y la otra en la planta piloto Aurora II, localizada en la zona 13 de la ciudad capital y construida en el 2010.

El humedal artificial en estudio, ubicado en la planta piloto Aurora II fue construido por el Ing. Jeovany Miranda Castañón, quien evaluó la capacidad de remoción de la DBO, demanda química de oxígeno (DQO), SST, nitrógeno y fósforo del flujo sub-superficial; sin embargo, no se cuenta con un análisis de remoción de estreptococos fecales, coliformes fecales y totales de flujo superficial.

“Estudios realizados a 27 sistemas de humedales artificiales de flujo superficial ubicados en los Estados Unidos, indican que son capaces de remover en promedio el 98% de coliformes fecales, valor que resulta confiable tomando en cuenta que las concentraciones de entrada resultan de magnitud 1×10^4 , dado a que toda descarga a humedales debe cumplir con los requisitos del permiso de descargas del Sistema Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes, por lo que normalmente se usan para tratamientos terciarios.”⁵

⁴ MIRANDA CASTAÑÓN, Jeovany Rudaman. *Diseño y construcción de humedales de flujo sub-superficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. p. 7.

⁵ EPA. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. “*Humedales de flujo libre superficial*”. p. 7.

En distintas partes del mundo se han diseñado instalaciones capaces de reproducir las características de los humedales naturales con el propósito de aprovechar el gran potencial depurador que poseen para el tratamiento de aguas residuales. En España, “la Gestión de Aguas del Levante Almeriense, S.A. (GALASA), desarrolló en 1997 el proyecto de investigación denominado: El uso de humedales artificiales en la depuración de aguas residuales. Para dicho proyecto se analizaron los parámetros de DBO, DQO, sólidos en suspensión (SS), nitrógeno total, fósforo total, temperatura y coliformes fecales, obteniendo reducciones de coliformes fecales del 97% (dos órdenes logarítmicos).”⁶

⁶ LAHORA, Agustín. *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería)*. p. 105.

JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS

El incremento desmedido de generación de aguas residuales, obliga a buscar y aplicar alternativas de tratamientos de depuración eficientes, autónomos y económicamente viables. Existen estudios que demuestran la efectividad de los humedales artificiales en la reducción de la materia orgánica, para transformar y asimilar nutrientes, retienen y eliminan sustancias tóxicas que, de otra manera, serían vertidas sin tratamiento alguno al medio ambiente. Sin embargo, hasta la fecha no se ha realizado un estudio en el cual se evidencie si el humedal artificial ubicado en la planta piloto Aurora II tiene la capacidad de disminuir las características biológicas que se encuentran en el agua, como estreptococos fecales, coliformes fecales y totales.

Al finalizar el estudio, se determinará la capacidad de remoción que tiene el humedal artificial de flujo superficial ubicado en la planta piloto Aurora II y, además, servirá de apoyo didáctico a los estudiantes afines a dicha investigación.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances

- El estudio está enfocado en la evaluación del funcionamiento del humedal artificial de flujo superficial en la remoción de características biológicas, como coliformes totales y fecales y estreptococos fecales.
- Determinar la relación CF/EF y compararla con los valores típicos de carga microbiana de las aguas residuales.
- Reúsos que se pueden dar al agua proveniente del humedal.
- Disminución y prevención de enfermedades por el consumo de agua contaminada con niveles altos de estreptococos fecales, coliformes fecales y totales.

Limitaciones

- El factor económico es una de las limitantes en la elaboración del presente estudio, ya que los recursos utilizados para la realización de los análisis de laboratorio son propios.
- El vaciado del humedal por el operador de la planta piloto, lo cual incide directamente en el ambiente de los microorganismos y consecuentemente impacta en la eficiencia del sistema.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Humedales naturales

A estos terrenos naturales se les conoce con muchos y muy variados nombres: ciénagas, pantanos, marismas, lagunas costeras, selvas bajas inundadas y otros más, pero el término que los engloba a todos es humedales.

“Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm con plantas emergentes como espadañas, carrizos, juncos y tul. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.”⁷

“En los humedales naturales crecen vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estas condiciones ambientales. Estos seres vivos, junto con procesos biológicos, físicos y químicos, son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y, en algunos casos, productos químicos tóxicos; por esta razón se ha llamado a los humedales “los riñones del mundo.”⁸

⁷ LARA BORRERO, Jaime Andrés. *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. p. 2.

⁸ Ibid. p. 99.

Del rendimiento de los humedales, en general, se puede decir que pueden tratar con eficiencia niveles altos de DBO, SST y nitrógeno (rendimientos superiores al 80%), así como niveles significativos de metales. No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo, que es mínima, en estos sistemas.

“Los humedales específicamente contruidos han recibido gran cantidad de nombres en las distintas partes del mundo donde han sido usados. La denominación más extendida es “Humedales Artificiales o Humedales Contruidos.”⁹

1.1.1. Humedales artificiales

“Los humedales artificiales tienen la finalidad de reproducir las características de los humedales naturales, los cuales poseen un gran potencial depurador para el tratamiento de aguas residuales.”¹⁰

“Los humedales artificiales son de superficie libre de agua, es decir, con espejo de agua; o de flujo sub-superficial sin espejo de agua. Los humedales artificiales se han utilizado en el tratamiento de aguas residuales municipales, para tratamiento secundario y avanzado, en el tratamiento de aguas de irrigación, para tratar lixiviados de rellenos sanitarios, en el tratamiento de residuos de tanques sépticos y para otros propósitos como desarrollar hábitats para crecimiento de valor ambiental.”¹¹

⁹ LAHORA, Agustín. *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos*. p. 99.

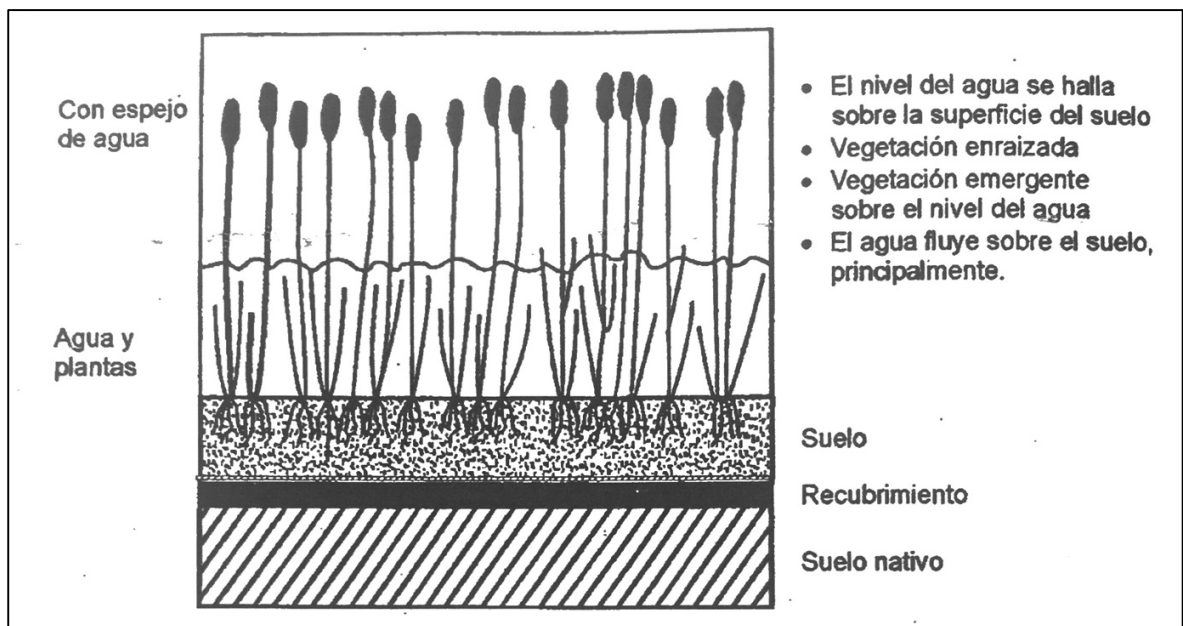
¹⁰ Ibid.

¹¹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 893.

1.1.1.1. Humedales artificiales de flujo superficial

Son sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera, con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. “El canal, cubierto con piedras, grava y tierra y vegetación emergente está inundada hasta una profundidad de 10 a 45 cm. Algunos humedales artificiales se construyen con revestimiento en material impermeable para impedir la percolación.”¹²

Figura 1. Humedal artificial de flujo superficial



Fuente: ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño.* p. 894.

¹² ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño.* p. 893

“Al fluir suavemente el afluente por el humedal se produce una remoción muy efectiva del material particulado en la sección inicial del sistema. Este material particulado, caracterizado como sólidos suspendidos totales (SST), contiene componentes con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO), distintos arreglos de nitrógeno total y fósforo total, y trazas de metales y compuestos orgánicos más complejos. La oxidación o reducción de esas partículas libera formas solubles de DBO, nitrógeno total y fósforo total al medio ambiente del humedal en donde están disponibles para la absorción por el suelo y la remoción por parte de las poblaciones microbianas y vegetales (tallos y raíces) activas a lo largo del humedal. Las reacciones químicas pueden provocar que otros elementos se precipiten. Los patógenos son eliminados del agua por la descomposición natural, la depredación de organismos superiores, sedimentación y radiación ultra violeta.”¹³

“La vegetación con sus tallos, hojas sumergidas y raíces sirve como medio de soporte de crecimiento bacterial, reduce el potencial de crecimiento de algas y oxigena. Un humedal de flujo superficial (con espejo de agua) permite remociones altas de DBO, SST, nitrógeno, metales y patógenos. La remoción aumenta con el tiempo de retención y con la temperatura. La remoción de DBO puede ser del 60 % al 80 % y de SST del 50 % al 90 %.”¹⁴

¹³ EPA. Folleto informativo de Tecnología de Aguas Residuales. “*Humedales de flujo libre superficial*”. p. 2.

¹⁴ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 894

“El oxígeno está disponible en la superficie del agua, en microzonas de la superficie de plantas vivas y en superficies de raíces y rizomas, lo cual permite que se produzca actividad aeróbica en el humedal. Se puede asumir, sin embargo, que la mayor parte del líquido en el humedal de flujo superficial es anóxico o anaeróbico. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica por nitrificación del amoníaco, aunque pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo con tiempos de retención suficientemente largos, pero los humedales de flujo superficial sí son efectivos en cuanto a la remoción de DBO, demanda química de oxígeno (DQO), SST. También Los metales son también removidos eficazmente y se puede esperar también una deducción de un orden de magnitud en coliformes fecales,”¹⁵ lo cual se verá con más detalle en los resultados obtenidos del presente estudio.

Estudios realizados en distintas partes del mundo, indican que los humedales artificiales de flujo superficial, también pueden producir bajas concentraciones de fósforo con tiempos de retención suficientemente largos, así como reducir coliformes fecales en un orden de magnitud. “En Estados Unidos se evaluaron 27 sistemas de humedales de flujo superficial, en los cuales se obtuvo un resultado promedio de remoción de coliformes fecales del 98 %.”¹⁶ En Colombia, España y Barcelona se han obtenido eficiencias de remoción de coliformes fecales similares entre el 97 % y 98 %.

Es importante pre-tratar las aguas residuales para prevenir un exceso de acumulación de sólidos y de basura. Una vez en el humedal, las partículas más pesadas se sedimentan, eliminando así los nutrientes sujetos a ellas.

¹⁵ EPA. Folleto informativo de Tecnología de Aguas Residuales. “*Humedales de flujo libre superficial*”. p. 2.

¹⁶ Ibid. p. 7.

1.1.1.2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial

“Son considerados reactores biológicos tipo “proceso biopelícula sumergida”. El agua entra por uno de sus extremos y se reparte, atravesando la zona de grava gruesa y arena sembrada con vegetación emergente. En el otro extremo, el agua es recogida en el fondo. El nivel máximo se regula de manera que no aflore la lámina de agua y se mantenga unos centímetros por debajo de la grava, haciendo invisible el humedal.”¹⁷

“Al igual que los humedales de flujo superficial, ambos pueden utilizar el mismo tipo de vegetación y las profundidades de estos humedales descritos no suele exceder los 0,60 m y para facilitar el trasiego del agua en el humedal de flujo sub-superficial, debe ser construido con una leve pendiente en el fondo (de 0 a 0,5 %), pero manteniendo en lo posible condiciones hidráulicas de flujo laminar. Los lechos deben ser aislados del suelo subyacente para evitar la contaminación de suelos y de las aguas subterráneas.”¹⁸

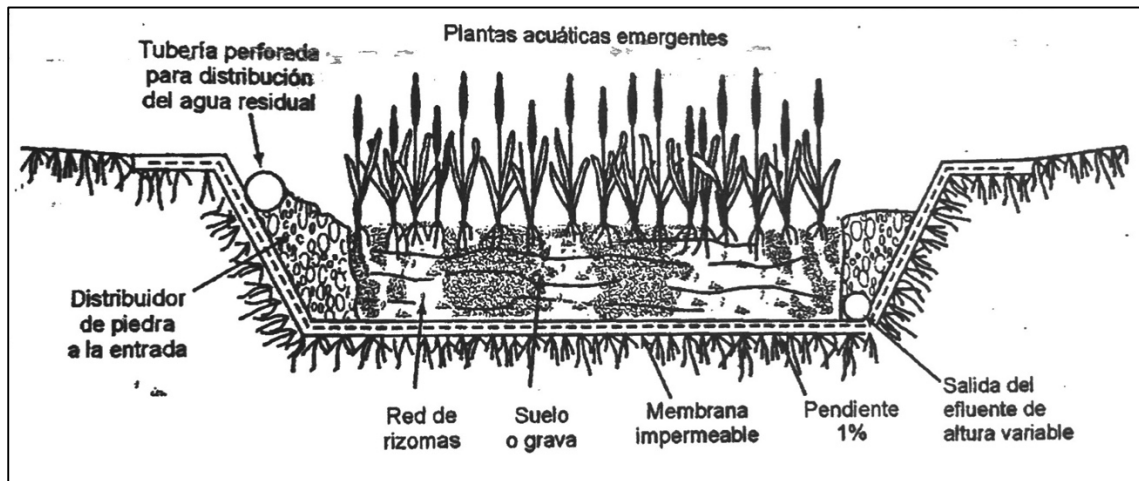
“En contraste con los humedales de flujo superficial o con espejo de agua, los humedales de flujo sub superficial tienen menores requerimientos de área y carecen de problemas de olores y de mosquitos. Como desventaja, sin embargo, se tiene un costo mayor por el medio de grava y riesgo de taponamiento.”¹⁹

¹⁷ LAHORA, Agustín. *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos*. p. 101.

¹⁸ A. ARIAS, Carlos / BRIX, Hans. *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. p. 20.

¹⁹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 898.

Figura 2. Humedal artificial de flujo subsuperficial



Fuente: ROMERO ROJAS, Jarito Alberto. *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño.* p. 899.

1.2. Organismos del agua residual

“Los principales organismos encontrados en el agua se clasifican, de acuerdo con sus características celulares. De todos los organismos de la biosfera, las criaturas más pequeñas, aquellas que deben verse como ayuda del microscopio, llamadas microorganismos, realizan actividades ambientales esenciales como captar energía del sol y ejecutar etapas de los ciclos del carbono, del oxígeno, del nitrógeno y de otros elementos indispensables para la biota. Su importancia radica, además, en su existencia en residuos humanos, en su patogenicidad, en su uso como indicadores de contaminación y en su función como ejecutores del tratamiento biológico.”²⁰

²⁰ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño.* p. 189.

1.2.1. Organismos indicadores de contaminación

“Entre los organismos indicadores de contaminación del agua se pueden mencionar los coliformes, coliformes fecales, klebsiella, escherichia coli, estreptococos fecales y clostridium perfringens. Las bacterias constituyen el grupo más importante de microorganismos en el tratamiento de aguas residuales.”²¹ Por lo que realizar un análisis bacteriológico del agua es vital en la prevención de enfermedades, como resultado de la contaminación del agua.

1.2.1.1. Grupo coliforme

“Los coliformes son un grupo de bacterias que incluye los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*. Por constituir un grupo muy numeroso, 2×10^{11} organismos por persona por día, en los excrementos humanos, se usan como indicadores de contaminación, por organismos patógenos, en el agua. El hecho de que los *Aerobacter* y ciertos *Escherichia* pueden crecer en el suelo, no permite afirmar siempre que la presencia de coliformes la cause la contaminación fecal. Sin embargo, en aguas de consumo humano la presencia de coliformes se usa como el indicador de contaminación, puesto que el agua no debe tener contacto con el suelo. En aguas residuales se usa el ensayo de coliformes fecales, como indicador de contaminación, los cuales constituyen los mejores indicadores de la presencia posible de patógenos.”²²

“El grupo coliformes incluye las bacterias de forma bacilar, aeróbicas y facultativas anaeróbicas, Gram-negativas, no formadoras de esporas, las cuales fermentan la lactosa con formación de gas en un periodo de 48 horas a 35°C.”²³

²¹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 191.

²² Ibid. p. 193.

²³ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del Agua*. p. 217.

“La *Escherichia Coli* es la bacteria indicadora por excelencia del grupo coliforme fecal, debido a su presencia permanente en la flora intestinal del hombre y de los animales de sangre caliente. Por lo tanto, la presencia de coliformes en aguas superficiales indica contaminación proveniente de residuos humanos, animales o erosión del suelo separadamente, o de una combinación de las tres fuentes. Aunque no es posible distinguir entre coliformes de origen humano o animal, existe un ensayo especial para diferenciar entre coliformes fecales y coliformes del suelo.”²⁴

1.2.1.2. Grupo estreptococos fecales

“El género *Streptococcus* es un grupo heterogéneo de bacterias esféricas grampositivas que forman pares o cadenas durante el crecimiento. Algunos forman parte de la microflora normal humana, otros se relacionan con importantes enfermedades humanas atribuibles a una sensibilización hacia ellos. La clasificación de los estreptococos se ha establecido tomando en consideración la morfología de la colonia, las reacciones hemolíticas y bioquímicas, la resistencia a factores físicos y químicos y finalmente a sus características ecológicas.”²⁵

“El número de estreptococos puede, en ocasiones, ser mayor que el de los coliformes. Por lo general son menos abundantes porque mueren rápidamente fuera del huésped. Su presencia en el agua es indicadora de contaminación reciente. Los Enterococos *S. faecalis* y *S. faecium* son miembros específicamente de origen humano, del grupo de los estreptococos fecales, los cuales exhiben una supervivencia mejor en aguas de mar.”²⁶

²⁴ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del Agua*. p. 218

²⁵ MARCHAND PAJARES, Edgard Orlando. *Microorganismos indicadores de la calidad de consumo humano en Lima Metropolitana*. p. 14.

²⁶ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 191.

“Los Enterococos son diferenciados de otros estreptococos fecales por su habilidad de crecer en medios como 6,5 % de cloruro de sodio, a pH 9,6, a 10 °C y a 45 °C. Debido a su resistencia a estos factores que permiten un mayor tiempo de supervivencia, son considerados como indicadores de contaminación fecal antigua en contraste con la presencia de coliformes que indican contaminación fecal reciente.”²⁷

“El uso de estreptococos fecales como indicadores de contaminación fecal del agua de consumo humano no es reciente. En 1928, Green luego de un estudio prolongado concluyó que *Streptococcus faecalis* tenía un mayor significado sanitario que *Escherichia Coli*. Los estreptococos fecales han sido utilizados con los coliformes fecales para diferenciar la contaminación fecal del hombre de otros animales de sangre caliente.”²⁸

1.2.1.3. Determinación de estreptococos fecales, coliformes fecales y totales a través del NMP/100 cm³

“En el análisis bacteriológico es importante conocer no solamente que los organismos están presentes sino también determinar su número más probable por unidad de volumen en el agua. El número más probable de organismos coliformes en una muestra de agua es la densidad más probable en producir un resultado particular. Este valor se obtiene de tablas, así como los límites inferior y superior con 95 % de exactitud.”²⁹

²⁷ MARCHAND PAJARES, Edgard Orlando. *Microorganismos indicadores de la calidad de consumo humano en Lima Metropolitana*. p. 14.

²⁸ Ibid.

²⁹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del Agua*. p. 218.

1.3. Relación entre los coliformes fecales y los estreptococos fecales

“Se ha observado que las cantidades de coliformes y estreptococos fecales descargados por los seres humanos son significativamente diferentes de las cantidades descargadas por los animales. Por consiguiente, se ha propuesto que la relación entre los coliformes fecales (CF) y los estreptococos fecales (EF) contenidos en una muestra puedan emplearse para determinar el origen de la contaminación humana o animal de un agua. En la Tabla I se muestran los valores típicos de la relación CF/EF tanto para los desechos humanos como para los diferentes animales. Para el caso de los animales domésticos, esta relación se mantiene por debajo de 1.0, mientras que para el caso de los seres humanos se halla por encima de 4,0.”³⁰

Tabla I. **Contribución per cápita estimada de microorganismos indicadores procedentes de seres humanos y algunos animales**

Animal	Densidad de indicador media/g de heces		Contribución media/cápita · 24 h		
	Coliformes fecales 10 ⁶	Estreptococos fecales 10 ⁶	Coliformes fecales 10 ⁶	Estreptococos fecales 10 ⁶	Relación CF/EF
Gallina	1,3	3,4	240	620	0,4
Vaca	0,23	1,3	5.400	31.000	0,2
Pato	33,0	54,0	11.000	18.000	0,6
Hombre	13,0	3,0	2.000	450	4,4
Cerdo	3,3	84,0	8.900	230.000	0,04
Oveja	16,0	38,0	18.000	43.000	0,4
Pavo	0,29	2,8	130	1.300	0,1

Fuente: METCALF & EDDY. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización.* p. 115.

³⁰ METCALF & EDDY, *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización.* p. 114.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Área de estudio

La evaluación del humedal artificial de flujo superficial se realizó en la planta piloto Aurora II, localizada en la parte final de la diagonal 26, No. 20 – 56, colonia Aurora II, zona 13 de la ciudad capital. Su localización cartográfica está dada por las coordenadas: $14^{\circ}34'43,55\text{N}$ $90^{\circ}32'10,73\text{O}$, entre las cotas 1520 y 1550 msnm.

Figura 3. Ubicación del área de estudio



Fuente: colonia Aurora II, zona 13 Guatemala. <https://earth.google.com>. Consulta: junio 2012.

2.2. Generalidades del humedal artificial de la planta piloto Aurora II

El humedal artificial en estudio ubicado al inicio de la planta piloto Aurora II, actualmente, recibe el afluente directamente de la descarga, sin ningún tratamiento previo, por lo que es necesario realizar análisis del agua residual para poder determinar la calidad de la misma.

2.2.1. Diseño y funcionamiento del humedal artificial de flujo superficial ubicado en la planta piloto Aurora II

El diseño y construcción del humedal contempló las consideraciones antes mencionadas en lo que se refiere a la impermeabilización para evitar la contaminación del subsuelo o agua subterránea con las aguas residuales y vegetación, utilizando plantas locales adaptadas a las condiciones del sitio.

“Funciona bajo un proceso de flujo superficial y sub-superficial, con un periodo de retención hidráulica de 4 días y el material vegetal utilizado es el tul (*Thypha spp*), el cual descansa sobre un lecho de piedra de diámetro entre 3” y 4”, las cámaras de los humedales poseen un área de 4 m² cada una, para un total de 12 m², manteniendo una relación de 4:1 según diseño.”³¹

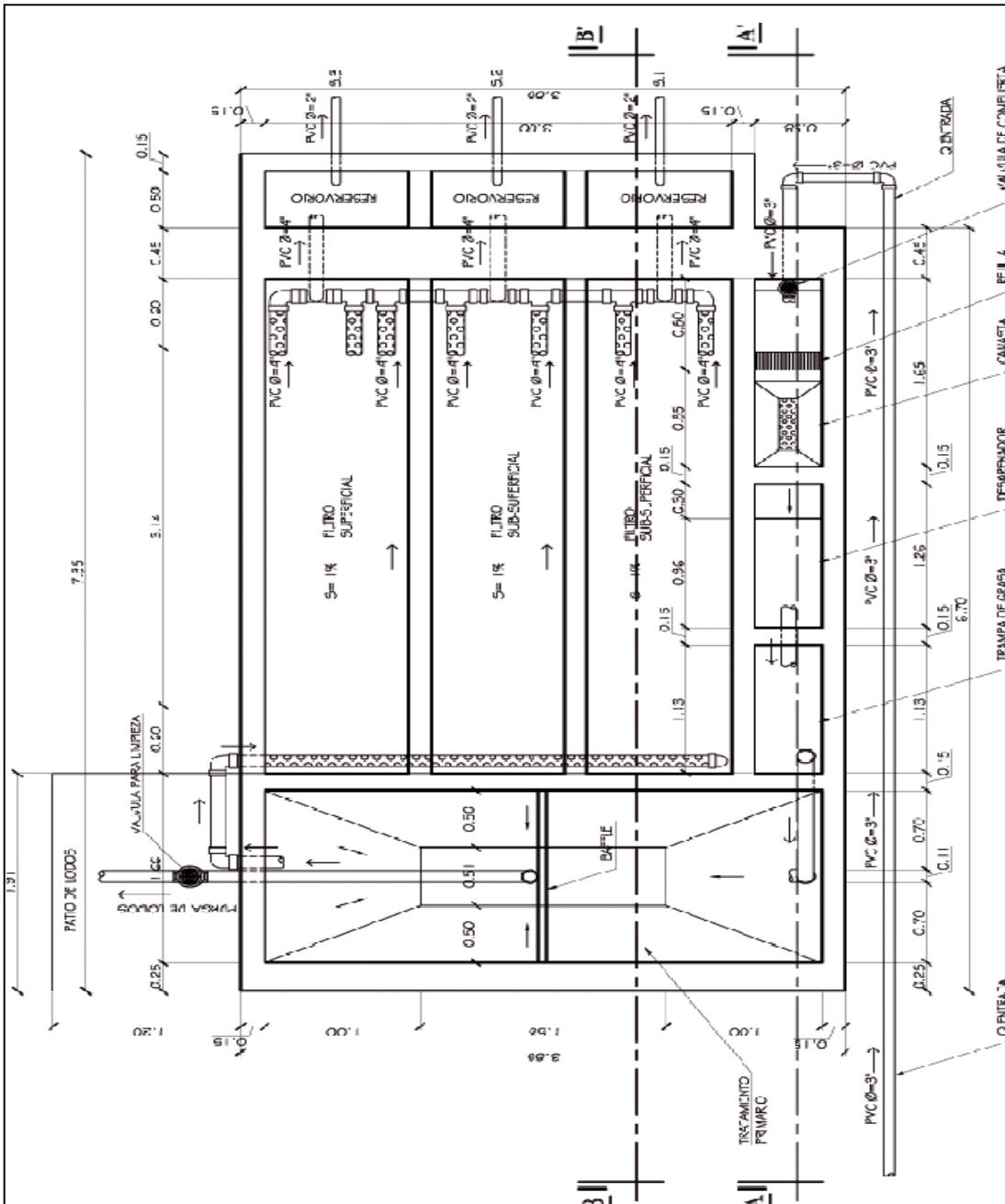
³¹ MIRANDA CASTAÑON, Jeovany Rudaman. *Diseño y construcción de humedales de flujo sub-superficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas.* p. 22.

“El funcionamiento del mismo está conformado por los siguientes procesos:

- Pre-tratamiento: su función principal es la remoción de sólidos gruesos, por medio de la rejilla la cual posee un ángulo de inclinación, que conecta a la canasta de recolección, posteriormente el caudal pasa al área del desarenador, luego a una trampa de grasa y se conduce hacia el tratamiento primario.
- Tratamiento primario: posee un sedimentador con una estructura cónica con su respectiva pantalla, que permite una mayor eficiencia en la sedimentación de sólidos, con una altura para sedimentar lodos.
- Tratamiento secundario: dos unidades de flujo sub-superficial y una unidad de flujo superficial.
- Patio de lodos.³²

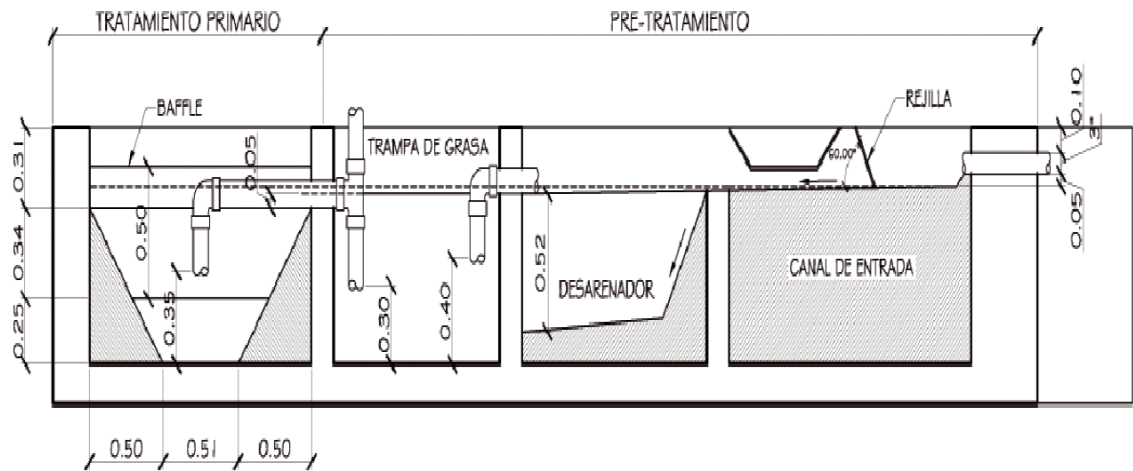
³² MIRANDA CASTAÑÓN, Jeovany Rudaman. *Diseño y construcción de humedales de flujo sub-superficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas.* p. 26.

Figura 4. Planta general de humedal artificial



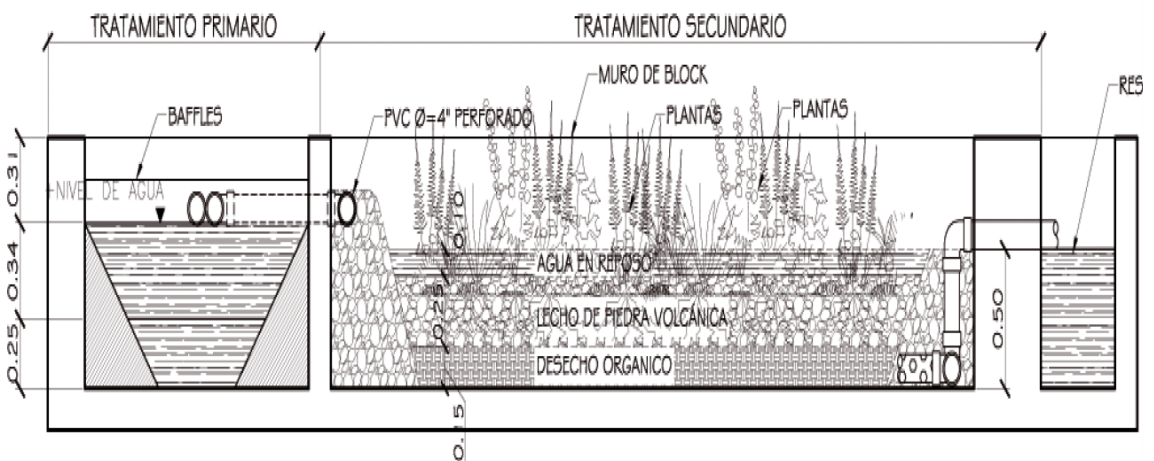
Fuente: MIRANDA CASTAÑÓN, Jeovany. Estudio Especial "Diseño y construcción de humedales de flujo sub-superficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas". p. 22.

Figura 5. Corte A – A’



Fuente: MIRANDA CASTAÑÓN, Jeovany. Estudio Especial "Diseño y construcción de humedales de flujo sub-superficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas". p. 21.

Figura 6. Corte B – B’



Fuente: MIRANDA CASTAÑÓN, Jeovany. Estudio Especial "Diseño y construcción de humedales de flujo sub-superficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas". p. 21.

2.3. Cálculo del número de muestras a analizar

Para determinar la cantidad de muestras por analizar se utilizó el método estadístico de *Spiegel Murray*.

Bajo el contexto de muestra compuesta por 24 horas, el universo de muestras es de 365. Debido al origen del agua, que proviene de la colonia Aurora II (500 casas), se prevé uniformidad de la calidad del agua a lo largo de todo el tiempo, por lo que se tomará una muestra puntual como equivalente a una muestra compuesta, para seleccionar el número de días (n) de muestreo dentro del universo de días año (N) con un error estándar (Se^2) menor de 0,05 al 98 % de confiabilidad (p).

$$S^2 = p(1 - p) = 0,98(1 - 0,98) = 0,0196$$

$$Se = \sigma^2 = 0,052 = 0,0025$$

$$n' = \frac{S^2}{\sigma^2} = \frac{0,0196}{0,0025} = 7,84$$

$$n = \frac{n'}{1 + n'/N} = \frac{7,84}{1 + 7,84/365} = 7,68 \approx 8$$

Para efectos de este estudio, y por criterio del investigador, se recolectaron 11 muestras en cada uno de los puntos de muestreo (entrada y salida).

2.4. Toma de muestras

Los principales puntos de muestreo se realizaron en la entrada y salida del respectivo humedal de flujo superficial.

Figura 7. Punto de entrada y salida del humedal



Fuente: elaboración propia.

2.4.1. Procedimiento para la recolección de muestras

Se recolectaron 100 mililitros de agua por cada una de las muestras por analizar, en frascos plásticos previamente esterilizados. Luego, se identificaron y se llevaron al laboratorio. El tiempo transcurrido entre la recolección y el análisis no debe exceder las 24 horas; dentro de lo posible, se mantienen las muestras a la temperatura de recolección o a bajas temperaturas y lejos de la luz. Lo ideal es realizar el análisis una hora después de la recolección, como se llevó a cabo en este caso.

2.5. Análisis de coliformes fecales y totales

Para realizar el análisis de coliformes fecales y totales a través de pruebas presuntivas y confirmativas, se empleó la técnica de los tubos múltiples de fermentación.

2.5.1. Prueba presuntiva

“La prueba presuntiva se basa en incubar a 35 °C durante 48 horas los tubos de caldo lactosado que contienen la muestra y luego de transcurrido el tiempo se procede a contar el número de cultivos (tubos) que presentaron gases en las tres diluciones consecutivas, estos son considerados como positivos, y señalan que la prueba resulta ser presuntiva, pero no confirmativa (lo cual indica la presencia de coliformes totales y/o fecales) para iniciar posteriormente la realización de la prueba confirmativa.”³³

El material requerido para la realización de la prueba presuntiva se lista a continuación:

- Muestra de agua
- Mechero de alcohol
- Pipetas graduadas estériles
- Tubos estériles con agua peptonada para dilución
- Tubos con caldo lactosado

³³ Manual de prácticas de laboratorio. *Microbiología del Agua*. p. 38.

2.5.1.1. Procedimiento para prueba presuntiva

Se empleó la prueba de 15 tubos. En la primera muestra se examinaron 5 tubos los cuales contienen una campana Durham, con porciones de 1×10^{-6} ml, 5 tubos con porciones de 1×10^{-7} ml y 5 tubos con porciones de 1×10^{-8} ml de la muestra por analizar en caldo lactosado. Debido a que era evidente que el agua se encontraba muy contaminada, se analizaron porciones de 1×10^{-8} ml 1×10^{-9} ml y 1×10^{-10} ml para diluir las muestras y obtener resultados que puedan ser interpretados más adecuadamente. Las diluciones se hicieron a través de pipetas colocando las porciones de muestra en los tubos con agua estéril para obtener las diluciones deseadas, las cuales se deben homogenizar por medio de agitación con pipeta por 25 veces; ya con las diluciones hechas se sembraron los tubos de caldo lactosado, teniendo el cuidado de flamear al tapar y destapar cada tubo.

Figura 8. Tubos con diluciones y caldo lactosado



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Prueba presuntiva**



Fuente: elaboración propia.

2.5.2. Prueba confirmativa

Se deben someter a prueba confirmativa todos los tubos de caldo lactosado que mostraron fermentación en la prueba presuntiva. En caldo EC (para determinar E. Coli) y en caldo verde brillante (para determinar coliformes totales).

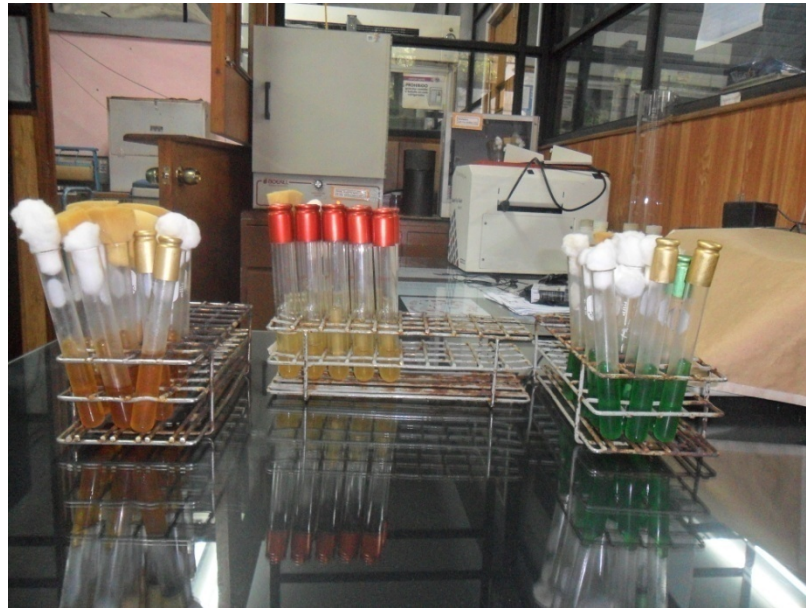
A continuación, se detalla el material utilizado para la prueba confirmativa:

- Tubos de fermentación con caldo lactosado positivos de la prueba presuntiva.
- Tubos de fermentación con caldo bilis – lactosa – verde brillante.
- Mechero.
- Asa de siembra.

2.5.2.1. Procedimiento para prueba confirmativa

Se toma material y se traspasa un “asa” o una gota de cada uno de los tubos con gases de la prueba presuntiva a un tubo de verde brillante siguiendo la técnica de flameo al abrir y cerrar los tubos. En cada traspaso el asa debe flamearse al rojo vivo para evitar la contaminación inexacta de los tubos por confirmar. Se repite el procedimiento para los tubos de EC. Para la determinación de EC se incuba durante 24 horas a 44,5 °C y para VB se incuba durante 48 horas a 35 °C; nuevamente. Luego de transcurrido el tiempo se detecta la producción de gas.

Figura 10. Prueba confirmativa



Fuente: elaboración propia.

La cantidad de coliformes fecales y totales resultantes en cada una de las muestras se determina anotando el número de tubos confirmativos positivos procedentes de las siembras en su respectivo orden, los cuales se buscan en tablas “Número más probable (NMP) de coliformes por cada 100 ml de muestra” y se determina el NMP/cm³ que corresponda.

2.6. Análisis de estreptococos fecales

Para determinar la cantidad de estreptococos, como Enterococos *E. faecium* y Enterococos *E. faecalis* se utilizó el método Enterolert y se utilizaron los siguientes materiales:

- Recipiente esterilizado para toma de muestra de 100 ml.
- Medio de cultivo (Enterolert)
- Dispositivo Quany – Tray
- Sellador
- Incubadora a 35°C

2.6.1. Procedimiento para determinar estreptococos fecales

En el recipiente de 100 ml que contiene la muestra de agua por analizar se agrega un sobre del medio de cultivo para Enterolert. Luego, se vierte esa mezcla del reactivo y muestra directamente dentro del dispositivo Quanti – Tray, evitando tocar la lengüeta metálica. Se coloca el dispositivo Quanti – Tray lleno sobre el dispositivo de goma del sellador, orientando el lado de las celdas (plásticas) hacia abajo, de manera que encaje en el porta dispositivo. Se sella el dispositivo y se incuba de 24 a 48 horas a una temperatura de 35 °C. Luego de transcurrido el periodo de incubación, el indicador contenido en el reactivo emite fluorescencia cuando el estreptococo lo metaboliza y ayuda a la revelación del resultado una lámpara UV para su lectura.

Figura 11. **Prueba de estreptococos fecales**



Fuente: elaboración propia.

Se procede al conteo de todas las celdas positivas y, de igual manera que en la determinación de coliformes, se acude a las tablas “IDEXX Quanti – Tray */2000 Tabla, número más probable” para determinar el resultado.

3. RESULTADOS

En las tablas II, III, IV y V se pueden observar los resultados de estreptococos fecales, coliformes totales y fecales del humedal artificial de flujo superficial, así como la relación obtenida de CF/EF. En dichas tablas, se detallan los valores de entrada y salida del humedal, porcentaje de remoción de cada parámetro y valores estadísticos como el promedio, máximo, mínimo y desviación estándar.

3.1. Resultado de coliformes totales y fecales

Tabla II. Porcentaje de remoción de coliformes totales

REMOCIÓN DE COLIFORMES TOTALES				
No. muestra	Dimensional	Entrada	Salida superficial	Porcentaje de remoción
1	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,21E+11	90,79
2	NMP/100cm ³	2,40E+12	3,30E+10	98,63
3	NMP/100cm ³	2,40E+12	1,60E+12	33,33
4	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,00E+10	99,17
5	NMP/100cm ³	2,40E+12	1,40E+10	99,42
6	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,40E+12	0,00
7	NMP/100cm ³	1,60E+12	2,40E+12	*---
8	NMP/100cm ³	2,40E+10	1,48E+11	*---
9	NMP/100cm ³	1,60E+12	3,45E+11	78,44
10	NMP/100cm ³	2,40E+12	1,40E+10	99,42
11	NMP/100cm ³	3,45E+11	2,40E+12	*---
Indicadores Estadísticos				
Promedio	NMP/100cm ³	2,40E+12	7,15E+11	70,22
máximo	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,40E+12	99,42
mínimo	NMP/100cm ³	2,40E+12	1,40E+10	0,00
Desviación estándar	NMP/100cm ³	0,00E+00	1,03E+12	42,92

Fuente: elaboración propia.

NOTA: (*---) El agua sale con más coliformes totales que con las que entra.

Para efectos de obtener resultados representativos, no se tomaron en cuenta los resultados a partir de la muestra 6.



Resultados obtenidos después del mantenimiento.

Tabla III. **Porcentaje de remoción de coliformes fecales**

REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES				
No. muestra	Dimensional	Entrada	Salida superficial	Porcentaje de remoción
1	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,21E+11	90,79
2	NMP/100cm ³	2,40E+12	6,00E+09	99,75
3	NMP/100cm ³	2,40E+12	8,40E+10	96,50
4	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,00E+09	99,92
5	NMP/100cm ³	2,40E+12	1,00E+10	99,58
6	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,40E+10	99,00
7	NMP/100cm ³	1,75E+11	5,42E+11	*---
8	NMP/100cm ³	2,40E+10	8,40E+10	*---
9	NMP/100cm ³	1,75E+11	4,00E+10	77,14
10	NMP/100cm ³	4,00E+10	1,20E+10	70,00
11	NMP/100cm ³	3,20E+10	2,40E+12	*---
Indicadores Estadísticos				
Promedio	NMP/100cm ³	2,40E+12	5,78E+10	97,59
máximo	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,21E+11	99,92
mínimo	NMP/100cm ³	2,40E+12	2,00E+09	90,79
Desviación estándar	NMP/100cm ³	0,00E+00	8,55E+10	3,56

Fuente: elaboración propia.

NOTA: (*---) El agua sale con más coliformes fecales que con las que entra.

Para efectos de obtener resultados representativos, no se tomaron en cuenta los resultados a partir de la muestra 6.



Resultados obtenidos después del mantenimiento.

3.2. Resultado de estreptococos fecales

Tabla IV. Porcentaje de remoción de estreptococos fecales

REMOCIÓN DE ESTREPTOCOCOS FECALES				
No. muestra	Dimensional	Entrada	Salida superficial	Porcentaje de remoción
1	NMP/100cm ³	7,95E+07	2,78E+07	65,03
2	NMP/100cm ³	9,21E+08	2,81E+07	96,95
3	NMP/100cm ³	4,27E+07	3,59E+07	15,93
4	NMP/100cm ³	4,60E+07	1,87E+07	59,35
5	NMP/100cm ³	1,34E+08	3,59E+07	73,17
6	NMP/100cm ³	3,22E+07	2,02E+07	37,27
7	NMP/100cm ³	6,05E+07	4,46E+07	26,28
8	NMP/100cm ³	4,25E+07	2,31E+07	45,65
9	NMP/100cm ³	3,59E+07	2,81E+07	21,73
10	NMP/100cm ³	6,35E+07	1,58E+07	75,12
11	NMP/100cm ³	3,05E+07	1,81E+07	40,66
Indicadores Estadísticos				
Promedio	NMP/100cm ³	2,09E+08	2,78E+07	57,95
máximo	NMP/100cm ³	9,21E+08	3,59E+07	96,95
mínimo	NMP/100cm ³	3,22E+07	1,87E+07	15,93
Desviación estándar	NMP/100cm ³	3,51E+08	7,37E+06	28,28

Fuente: elaboración propia.

NOTA: Para efectos de obtener resultados representativos, no se tomaron en cuenta los resultados a partir de la muestra 6.



Resultados obtenidos después del mantenimiento.

3.3. Resultado sobre la relación coliformes fecales/estreptococos fecales

Tabla V. **Relación de coliformes fecales/estreptococos fecales**

RELACION COLIFORMES FECALES/ESTREPTOCOCOS FECALES			
No. muestra	Coliformes fecales	Estreptococos fecales	CF/EF
1	2,40E+12	7,95E+07	30 188,68
2	2,40E+12	9,21E+08	2 606,43
3	2,40E+12	4,27E+07	56 206,09
4	2,40E+12	4,60E+07	52 173,91
5	2,40E+12	1,34E+08	17 937,22
6	2,40E+12	3,22E+07	74 534,16
7	1,75E+11	6,05E+07	2 892,56
8	2,40E+10	4,25E+07	564,71
9	1,75E+11	3,59E+07	4 874,65
10	4,00E+10	6,35E+07	629,92
11	3,20E+10	3,05E+07	1 049,18
Promedio	2,40E+12	2,09E+08	11 474,10

Fuente: elaboración propia.

4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

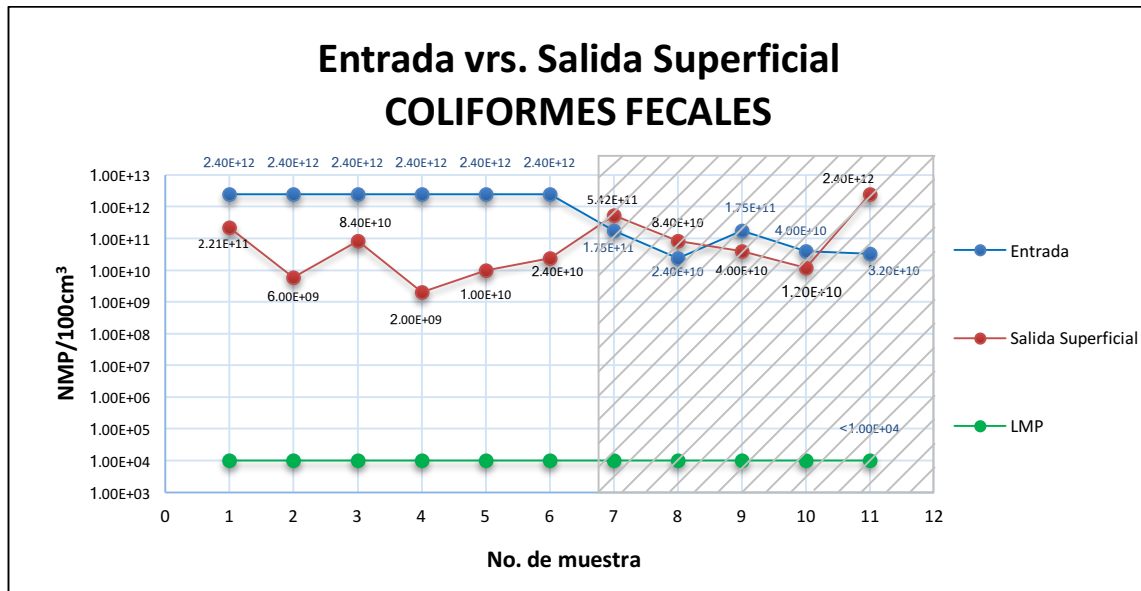
4.1. Interpretación de resultados de coliformes fecales

Se puede observar en la gráfica de la figura 14, que en los resultados obtenidos de la muestra número 1 a la 6 se logran reducciones de 1 a 3 logaritmos, los cuales representan valores de porcentaje de remoción arriba del 90 % (tabla II), mientras que los resultados obtenidos de la muestra número 7 a la 11 se encuentran aún más contaminadas y con valores de porcentaje de remoción inferiores (tabla II), reduciendo solamente 1 logaritmo y bajando la eficiencia de remoción en un 25 % promedio, debido a que se vieron afectadas directamente por el vaciado del humedal por parte del operador para darle mantenimiento a la planta. Esto impactó en la eficiencia del sistema, debido a la desestabilización del ambiente de los microorganismos, pues si bien es necesario al menos unos meses para que la vegetación y los microorganismos del sustrato alcancen nuevamente un desarrollo óptimo.

A pesar de obtener un valor de porcentaje de remoción promedio de 97,59 % equivalente a $5,78 \times 10^{10}$ NMP/100cm³, los resultados finales se encuentran fuera del límite máximo permisible ($<1 \times 10^4$) establecido en el Acuerdo Gubernativo No. 236 – 2006.

4.1.1. Análisis gráfico de remoción de coliformes fecales

Figura 12. Entrada vrs. salida de coliformes fecales



Fuente: elaboración propia.

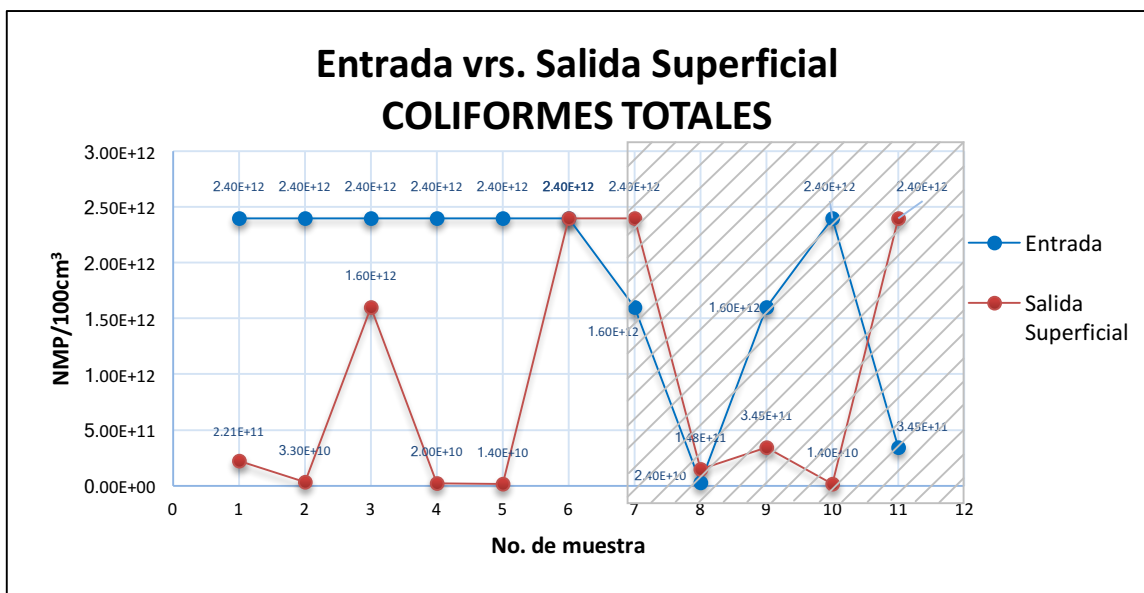
4.2. Interpretación de resultados de coliformes totales

Los resultados que se observan en la figura 15, indican que todos los valores de salida, en general, no fueron constantes, mostrando un comportamiento similar a los coliformes fecales en las muestras iniciales de la 1 a la 5 donde se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción (tabla III) a excepción de la muestra 6 donde no se obtuvo ninguna remoción. Esto puede ser consecuencia de haber sido tomada en horas pico, considerando que el agua proviene de un residencial, la cultura de los usuarios, el día y hora en que se tomó la muestra, la probabilidad de que fuera una hora pico es alta, factor que influyó negativamente en la eficiencia de remoción.

Las muestras de la 7 a la 11 (figura 15), también se afectaron por el vaciado realizado por el operador para su mantenimiento. Las muestras 7, 8 y 11 salieron más contaminadas que a la entrada y las muestras 9 y 10 obtuvieron porcentajes de remoción del 70 % aproximadamente. Se obtuvo una desviación estándar de $\pm 42,92 \%$, la cual no es representativa para efectos del control de este parámetro ya que los valores resultantes son bastante altos.

4.2.1. Análisis gráfico de remoción de coliformes totales

Figura 13. Entrada vs. salida de coliformes totales



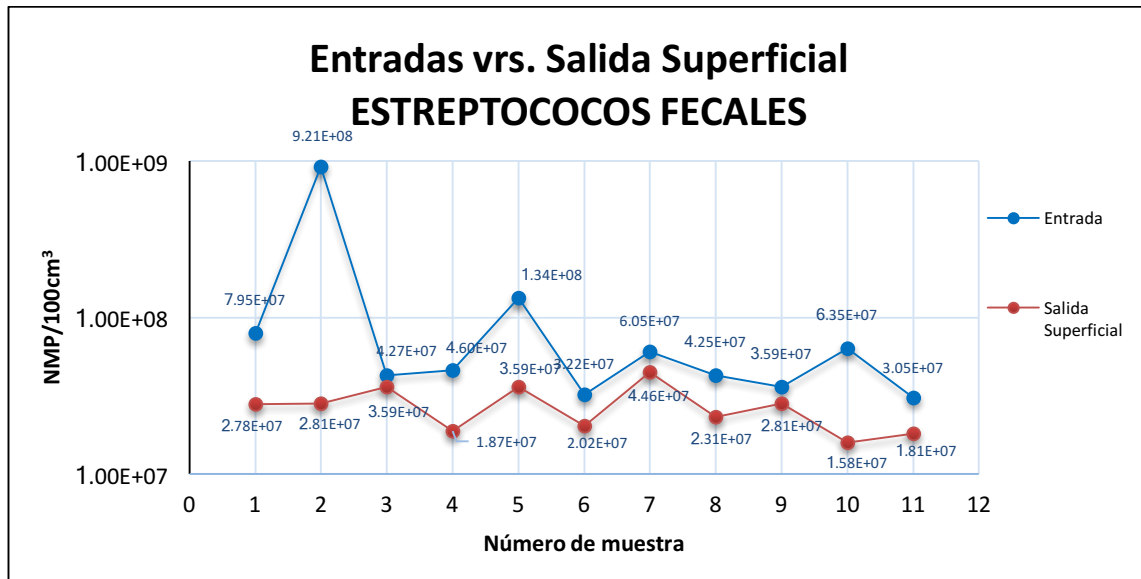
Fuente: elaboración propia.

4.3. Interpretación de resultados de estreptococos fecales

En la gráfica (figura 16) se observa que los valores a la salida del humedal se mantuvieron en un rango de $1,87 \times 10^7$ a $3,59 \times 10^7$ NMP/100 cm^3 , con un promedio de porcentaje de remoción de 57,95 %, un valor máximo de remoción de 96,95 % y un mínimo de 15,93 %. Tomando en cuenta que el agua que recibe el humedal proviene de un conjunto de viviendas, la cultura de los usuarios, el día y la hora en que se tomaron las muestras 2 y 5, la probabilidad de que fuera una hora pico es alta. Por ello, muestra los valores más altos a la entrada del humedal; sin embargo, todos los valores de salida son constantes, lo cual indica que el humedal es eficiente en cuanto a su remoción, pues no importando la cantidad que ingrese de estreptococos, finalmente el sistema se colmata dejando pasar siempre la misma cantidad a la salida.

4.3.1. Análisis gráfico de remoción de estreptococos fecales

Figura 14. Entrada vrs. salida de estreptococos fecales



Fuente: elaboración propia.

4.4. Interpretación de resultados de relación CF/EF

Con base en la literatura consultada, la relación CF/EF (tabla I) es de 4,4 (4,4:1). Sin embargo, para el presente estudio, la relación obtenida fue de 11 000:1, la cual pudo ser afectada por varios factores, entre ellos que las muestras no fueron tomadas directamente en el punto de origen, ya que la derivación del caudal que ingresa al humedal es solo una fracción del caudal total generado, al pasar por determinada distancia y tiempo se pierden sólidos suspendidos en el trayecto afectando la concentración original de microorganismos, además “los estreptococos son menos abundantes que los coliformes fecales ya que mueren rápidamente fuera del huésped.”³⁴

³⁴ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. p. 191.

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos del agua tratada por el humedal artificial de flujo superficial demuestran que se cumple con la hipótesis de este estudio, indicando que el mismo es capaz de remover un 70 % de coliformes totales, un 98 % de coliformes fecales y un 57 % de estreptococos fecales en promedio.
2. La remoción de estreptococos fecales oscila en el rango de 16 % a 97 % de acuerdo a los resultados obtenidos, encontrándose un valor promedio de 58 % de eficiencia de remoción.
3. Los coliformes fecales presentan una eficiencia de remoción mayor de 90 % en la mayoría de las muestras analizadas, los valores a la salida se mantienen en un rango de $2,00 \times 10^9$ a $2,21 \times 10^{11}$ NMP/100 cm³, pero este resultado no cumple con el valor permisible ($<1 \times 10^4$) establecido en el Acuerdo Gubernativo No. 236 – 2006.
4. Los coliformes totales presentan una eficiencia de remoción promedio de 70 %, una desviación estándar de ± 43 % no representativa debido a la alta cantidad de coliformes presentes, un porcentaje máximo de remoción de 99,42 % y un mínimo de 0,00 % debido a que el agua sale más contaminada que a la entrada.
5. La relación CF/EF obtenida en el presente estudio fue de 11 000:1, la cual difiere del valor típico de 4,4:1 obtenido de la literatura.

6. La eficiencia de remoción de coliformes fecales y totales en las muestras 7 a la 11 se vieron afectadas por el vaciado total del humedal, realizado por el operador para darle mantenimiento al sistema, debido a que no se cuenta con equipo de bombeo para remover los lodos.

RECOMENDACIONES

1. Determinar, a través de un estudio especial, cuál es la máxima capacidad de remoción de coliformes que tiene una tecnología de humedal, analizando variables como el tiempo de retención y tipo de vegetación, determinando, así, si existen condiciones con las que se pueda obtener una eficiencia que cumpla con el Acuerdo Gubernativo No. 236 -2006.
2. Promover la reutilización del agua proveniente del humedal artificial de flujo superficial, solamente para el riego por goteo de áreas verdes. Con ello se estará reduciendo el consumo de agua potable para dichos fines, y de esta manera, se contribuye con la preservación del ambiente.
3. Implementar equipo de bombeo en el humedal artificial en estudio para evacuación de lodos, evitando así alteraciones en la eficiencia del sistema por el vaciado total del mismo en ausencia de dicho equipo.
4. Para minimizar los errores debidos a las diferentes tasas de mortalidad de los microorganismos, las muestras no deberán tomarse en lugares aguas abajo más allá de la distancia correspondiente a 24 horas de tiempo de flujo desde la teórica fuente de contaminación. Realizar un mínimo de 2 recuentos para cada muestra y considerar únicamente como útiles para la determinación de la relación CF/EF los recuentos de coliformes obtenidos a 44 °C.

5. Realizar actividades de operación y mantenimiento rutinarios, que incluyan el control hidráulico y de profundidad del agua, limpieza de las estructuras de entrada y descarga, corte de la vegetación e inspección general, para garantizar el buen funcionamiento del mismo.

6. Reportar cualquier descarga de desechos tóxicos o grandes descargas de aguas negras, ya que pueden ocasionar cambios en las características del agua y causar la muerte de los microorganismos y plantas que viven en el humedal.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARIAS I., Carlos A. / BRIX, Hans. *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia, 2003. 24 p.
2. LARA BORRERO, Jaime Andrés. *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España, 1999. 114 p.
3. LAHORA, Agustín. *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: la Edar de los gallardos (Almería)*. Vera, Almería, España. 112 p.
4. LLAGAS CHAFLOQUE, Wilmer Alberto, & GUADALUPE GÓMEZ, Enrique. *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. 86 p.
5. MIRANDA CASTAÑÓN, Jeovany Rudaman. *Diseño y construcción de humedales de flujo sub-superficial en la Planta Piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Estudio Especial. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 50 p.

6. MUCH, SANTOS, Zenón. *Manual de Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria*. Material de apoyo para el laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 55 p.

7. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del Agua*. 3ª. ed. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. 485 p.

8. COMPENDIO DE SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS DE SANEAMIENTO. *Humedal Artificial de flujo superficial libre*. [en línea].
< <http://alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t5.html> > [consulta: enero 2017].

APÉNDICES

Apéndice 1. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.1

1	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
Dilución						
1x10 ⁻⁸	5	5	5	5	5	5
1x10 ⁻⁹	5	4	5	4	5	4
1x10 ⁻¹⁰	5	2	5	2	5	2
		NMP	2,40E+12	2,21E+11	2,40E+12	2,21E+11

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería

Apéndice 2. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.2

2	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
Dilución						
1x10 ⁻⁸	5	4	5	1	5	4
1x10 ⁻⁹	5	4	5	1	5	3
1x10 ⁻¹⁰	5	5	5	1	5	1
		NMP	2,40E+12	6,00E+09	2,40E+12	3,30E+10

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 3. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.3

3	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
1x10 ⁻⁸	5	5	5	5	5	5
1x10 ⁻⁹	5	5	5	1	5	5
1x10 ⁻¹⁰	5	4	5	3	5	4
		NMP	2,40E+12	8,40E+10	2,40E+12	1,60E+12

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 4. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.4

4	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
1x10 ⁻⁸	5	3	5	1	5	3
1x10 ⁻⁹	5	3	5	0	5	2
1x10 ⁻¹⁰	5	3	5	0	5	2
		NMP	2,40E+12	2,00E+09	2,40E+12	2,00E+10

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 5. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.5

5	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
1x10 ⁻⁸	5	2	5	1	5	2
1x10 ⁻⁹	5	2	5	2	5	2
1x10 ⁻¹⁰	5	2	5	2	5	2
		NMP	2.40E+12	1.00E+10	2.40E+12	1.40E+10

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 6. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.6

6	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
1x10 ⁻⁸	5	5	5	3	5	5
1x10 ⁻⁹	5	5	5	4	5	5
1x10 ⁻¹⁰	5	5	5	1	5	5
		NMP	2.40E+12	2.40E+10	2.40E+12	2.40E+12

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 7. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.7

7	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
1x10 ⁻⁸	5	5	5	5	5	5
1x10 ⁻⁹	5	5	3	5	5	5
1x10 ⁻¹⁰	4	5	3	2	4	5
		NMP	1.75E+11	5.42E+11	1.60E+12	2.40E+12

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 8. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.8

8	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
1x10 ⁻⁸	3	5	3	5	3	5
1x10 ⁻⁹	4	2	4	1	4	2
1x10 ⁻¹⁰	4	4	1	3	1	4
		NMP	2.40E+10	8.40E+10	2.40E+10	1.48E+11

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 9. **Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.9**

9	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
1x10 ⁻⁸	5	5	5	4	5	5
1x10 ⁻⁹	5	4	3	4	5	4
1x10 ⁻¹⁰	5	4	3	1	4	4
		NMP	1.75E+11	4.00E+10	1.60E+12	3.45E+11

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 10. **Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.10**

10	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
1x10 ⁻⁸	5	2	4	2	5	2
1x10 ⁻⁹	5	3	4	3	5	3
1x10 ⁻¹⁰	5	2	1	0	5	1
		NMP	4.00E+10	1.20E+10	2.40E+12	1.40E+10

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 11. Resultado de coliformes fecales y totales de la muestra no.11

11	RESULTADOS DE PRUEBA PRESUNTIVA COLIFORMES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES FECALES		RESULTADOS DE PRUEBA CONFIRMATIVA COLIFORMES TOTALES	
	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial	Entrada	Salida Superficial
Dilución						
1x10 ⁻⁸	5	5	4	5	5	5
1x10 ⁻⁹	4	5	2	5	4	5
1x10 ⁻¹⁰	4	5	2	5	4	5
		NMP	3.20E+10	2.40E+12	3.45E+11	2.40E+12

Fuente: elaboración propia. Realizados en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Ala Tabarini Molina”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Apéndice 12. Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 1

1	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1x10 ⁻⁴	Entrada	Salida Superficial
Grandes	32	13
Pequeños	17	11
NMP	79.5E+07	2.78E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 2**

2	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	49	14
Pequeños	37	10
NMP	9.21E+08	2.81E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 3**

3	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	16	18
Pequeños	19	11
NMP	4.27E+07	3.59E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 4**

4	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	15	9
Pequeños	23	8
NMP	4.6E+07	1.87E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 5**

5	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	38	21
Pequeños	27	7
NMP	1.34E+08	3.59E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 6**

6	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	12	11
Pequeños	16	7
NMP	3.22E+07	2.02E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 7**

7	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	25	24
Pequeños	18	9
NMP	6.05E+07	4.46E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 8**

8	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	23	18
Pequeños	9	1
NMP	4.25E+07	2.31E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 9**

9	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	18	14
Pequeños	11	10
NMP	3.59E+07	2.81E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 10**

10	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	28	12
Pequeños	15	2
NMP	6.35E+07	1.58E+07

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Resultado de estreptococos fecales de la muestra no. 11**

11	ESTREPTOCOCOS FECALES	
Dilución 1×10^{-4}	Entrada	Salida Superficial
Grandes	14	12
Pequeños	12	4
NMP	3.05E+07	1.81E+07

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Manual de Operación y Mantenimiento**

Aunque pareciera que los humedales trabajan por sí mismos, requieren un mínimo de mantenimiento. Con una correcta operación y el mantenimiento adecuado se pretende garantizar el buen funcionamiento del humedal artificial de flujo superficial, ya que ayudará al operador a identificar problemas tempranos y le proporcionará datos para mejorar el rendimiento del sistema. A continuación, se enlistan actividades enfocadas a los factores más importantes para el rendimiento del tratamiento que son necesarias para poder llevar un control adecuado tanto en la operación como en el mantenimiento del humedal.

De estructura y vegetación

- “El control hidráulico y de profundidad del agua requiere un ajuste periódico para asegurar que el agua se está moviendo a través de todas las partes del humedal, que el aumento de residuos no bloquee caminos de flujo y que no se desarrollen áreas de estancamiento que aumentan la probabilidad de mosquitos.
- Limpieza periódica de las estructuras de entrada (rejilla y canasta).
- Retirar las natas que se forman en el tanque de sedimentación.³⁵

³⁵ LARA BORRERO, Jaime Andrés. *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. p. 95.

- “Los lodos producidos deben ser removidos con frecuencia establecida según los SST que ingresan al sistema y se debe comprobar periódicamente el buen estado de las bombas.
- Control de la vegetación cada mes, cortar y retirar las varas y hojas de la vegetación que se encuentren muertas, de no hacerse, los sólidos en pudrición podrían contribuir al azolvamiento del mismo.
- Controlar regularmente el color y olor del efluente del humedal, que da información importante acerca de la calidad y el funcionamiento del lecho.
- Limpieza semanal a las tuberías de desfogue para evitar que el humedal pueda inundarse y derramarse, debido a la obstrucción de varas u hojas muertas que puedan interferir en la salida del sistema.”³⁶

Eficiencia general

Se deben recolectar y analizar periódicamente muestras, para proporcionar al operador un mejor entendimiento del desempeño del humedal y una base para hacer ajustes de ser necesario, todo ello en base a los límites establecidos en el Acuerdo Gubernativo No. 236 – 2006.

A la hora de realizar los análisis de laboratorio es muy importante hacerlo en días y temporadas representativas de generación de agua, así como la preservación adecuada de las muestras y la correcta aplicación de los métodos de ensayo, para evitar alteraciones y garantizar la veracidad de los resultados.

³⁶ LARA BORRERO, Jaime Andrés. *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. p. 95.