



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS BIOLÓGICO DE LA EFICIENCIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
GRISES DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL
UBICADOS EN EL DISTRITO DE PITAL**

Informe de Proyecto Final de Graduación para optar por el grado académico de Licenciada en
Ingeniería Civil

Presenta

Raquel Alvarado Murillo

Directora de proyecto:

Ing. Nidia Cruz Zúñiga

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

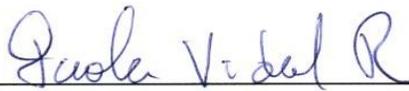
Febrero, 2023



Directora del proyecto: Ing. Nidia Cruz Zúñiga



Estudiante: María Raquel Alvarado Murillo



Asesor: Ing. Paola Vidal Rivera



Asesor: Ing. Ronald Aguilar Álvarez

Derechos de autor

Fecha: 2023, febrero.

La suscrita, **María Raquel Alvarado Murillo**, cédula 2-0753-0498, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B50324**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Análisis Biológico de la eficiencia para el tratamiento de aguas grises de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal ubicados en el distrito de Pital**, bajo la dirección de **la Ing. Nidia Zúñiga Cruz**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo de la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, Luis Manuel Alvarado Aguilar y Lusitania Murillo Phillips, que siempre han estado ahí para apoyarme tanto económicamente como emocional y espiritualmente. Ellos me enseñaron la importancia de la naturaleza en nuestras vidas y el amor y respeto que debemos tener hacia todos los seres vivos y hacia el recurso sagrado que representa el agua. Soy lo que soy por lo que ellos me han enseñado y eso no tiene precio ni comparación. Les amo con todo mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Gracias infinitas al universo que me ha brindado tantas oportunidades y bendiciones

A la Universidad de Costa Rica por brindarme el espacio para aprender y a tantos profesores que me apoyaron e inspiraron a lo largo de la carrera.

A la Escuela de Ingeniería Civil por facilitarme el espacio en el laboratorio de Ingeniería Ambiental para poder desarrollar las pruebas del proyecto.

A Erick Centeno por brindarme su tiempo y disponibilidad, siempre con la mejor actitud, para discutir y guiarme en temas relacionados al proyecto, infinitas gracias.

A Ronald Aguilar Álvarez por explicarme con tan buena disposición e inspirarme a investigar más sobre saneamiento de agua utilizando Humedales Artificiales.

A Nidia Cruz que me inspiró a continuar por el área de ambiental en esta carrera y abrió mis ojos a nuevas oportunidades más afines a lo que quiero hacer en mi vida, gracias.

A Paola Vidal por la buena disposición y guía en el uso del laboratorio y siempre con buena actitud para aclararme dudas.

A mi familia que siempre con buena actitud me ayudó en el proceso de muestreo y acarreo de muestras a la universidad, mi más profundo agradecimiento por el apoyo en este y todos los proyectos de mi vida.

A mis compañeros que estuvieron conmigo en todas las etapas de mi carrera, en especial a mis queridos amigos Roxana Salazar, Greivin Vásquez, Oscar Barrantes y Esteban Cordero por su infinito apoyo y sincera amistad.

A mi querido amigo Adriaan Baaijen por ayudarme con el acarreo de equipo y muestras al inicio del proyecto y por su infinito apoyo y amor a lo largo de toda la carrera.

A la organización Pital Verde, en especial a Juan Carlos Godínez y Hersson Ramírez por brindarme todo su apoyo y disponibilidad en la toma de muestras y facilitar datos relevantes.

A mi compañero y amigo Sebastian Sequeira que me facilitó el equipo tecnológico para terminar este proyecto de graduación cuando más lo necesité.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	4
1.1. Justificación.....	4
1.1.1. Problema específico	4
1.1.2. Importancia	5
1.2. Antecedentes teóricos y prácticos del problema	6
1.3. Objetivos.....	10
1.3.1. Objetivo General	10
1.3.2. Objetivos Específicos	10
1.4. Delimitación del problema.....	11
1.4.1. Alcance.....	11
1.4.2. Limitaciones.....	12
2. Descripción del área de estudio	13
2.1. Descripción breve del sistema existente	13
2.1.1. Situación de la comunidad.....	14
2.1.2. Tratamiento de aguas grises	15
2.1.3. Tratamiento de aguas negras	15
2.1.4. Descripción de los humedales artificiales	15
2.2. Caracterización de la Zona	17
2.2.1. Características climatológicas.....	17
2.2.2. Características geotécnicas.....	18
2.2.3. Características de la población	19
3. Marco teórico.....	20
3.1. Composición de las aguas residuales ordinarias	20
3.2. Niveles de tratamiento de las aguas residuales	22
3.2.1. Pretratamiento	22

3.2.2.	Tratamiento primario	23
3.2.3.	Tratamiento secundario	23
3.2.4.	Tratamiento terciario	24
3.3.	Humedales Artificiales	25
3.3.1.	Tipos de humedales artificiales	26
3.3.2.	Dimensionamiento de un HFSSH.....	32
3.4.	Normativa	44
3.5.	Determinaciones analíticas en el diseño de los HFSSH	47
3.5.1.	Caudales de diseño.....	47
3.5.2.	Concentración de Nitrógeno y fósforo total	49
3.5.3.	Eficiencia de remoción	50
3.6.	Cálculos estadísticos para el análisis de datos.....	52
3.6.1.	Media aritmética.....	52
3.6.2.	Mediana	53
3.6.3.	Desviación estándar.....	53
3.6.4.	Coeficiente de variación	54
3.6.5.	Medidas de posición relativa.....	55
4.	Metodología.....	56
4.1.	Recopilación de la información referente	57
4.2.	Toma de muestras y pruebas de laboratorio.....	57
4.3.	Análisis de los resultados	59
4.4.	Recomendaciones de mejora de diseño.....	59
5.	Resultados y discusión.....	61
5.1.	Visitas al sitio.....	61
5.2.	Eficiencias del sistema de tratamiento por HFSSH	65
5.2.1.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)	

5.2.2.	Nitrógeno y fósforo total (N_T y F_T).....	77
5.2.3.	Análisis del nitrógeno amoniacal, nitrito y nitrato.....	82
5.3.	Indicadores considerados para la modificación del diseño	87
5.3.1.	Pendiente de fondo	87
5.3.2.	Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).....	87
5.4.	Propuesta de rediseño para mejorar el sistema de los HA.....	88
5.4.1.	Sistema preliminar.....	88
5.4.2.	Diseño de los HFSSH para cada vivienda	90
5.5.	Análisis económico de la propuesta.....	88
5.6.	Análisis de precipitaciones	92
6.	Conclusiones y recomendaciones	93
6.1.	Conclusiones	93
6.2.	Recomendaciones	95
7.	Fuentes bibliográficas	97
8.	Anexos.....	104
8.1.	Proceso para la obtención de la cantidad de gramos de nitrógeno y fósforo presentes en los compuestos del nitrato, nitrito, amoniacal y fosfato.....	104
8.2.	Parámetros generales de diseño.....	107
8.2.1.	Población de diseño.....	107
8.2.2.	Caudal de diseño.....	107
8.3.	Aspectos generales de diseño para humedales artificiales.....	109
8.4.	Resumen resultados HA.....	110
8.5.	Desglose de costos.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las viviendas con HFSSH en Nuevo Pital	13
Figura 2. Ubicación de la comunidad Nuevo Pital	14
Figura 3. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento por HFSSH	16
Figura 4. Distribución de la precipitación en la Zona Norte de Costa Rica. 1961-1990.....	17
Figura 5. Órdenes de suelo de Costa Rica.....	18
Figura 6. Porcentaje de hogares con al menos una carencia según las NBI.....	19
Figura 7. Elementos básicos de un HAFS.....	27
Figura 8. Elementos básicos de un HFSSV	29
Figura 9. Elementos básicos de un HFSSH.....	31
Figura 10. K_{DBO} para HFSSH dependiendo de la temperatura.....	33
Figura 11. Requerimientos específicos por PE para HA para diferentes descargas	34
Figura 12. Recomendación para el sustrato en un HFSSH	36
Figura 13. Sistema de entrada utilizando tubo perforado sumergido	39
Figura 14. Sistemas de entrada	40
Figura 15. Sistemas de salida	41
Figura 16. Efecto de la configuración en la distribución de flujo en HA.....	42
Figura 17. Plantas utilizadas en los HFSSH.....	43
Figura 18. Promedio y mediana de una distribución de frecuencias.....	53
Figura 19. Diagrama de flujo del proyecto	56
Figura 19. Traslado de las muestras al laboratorio	58
Figura 20. Estado inicial del HFSSH y trampa de grasa de la vivienda A	62
Figura 21. Estado inicial del HFSSH y trampa de grasa de la vivienda B	63
Figura 22. Estado inicial del HFSSH y trampa de grasa de la vivienda C	64
Figura 23. Concentraciones y tendencia DBO vivienda A.....	68
Figura 24. Concentraciones y tendencia DBO vivienda B.....	69
Figura 25. Concentraciones y tendencia DBO vivienda C.....	70
Figura 26. Concentraciones y tendencia DQO vivienda A.....	71
Figura 27. Concentraciones y tendencia DQO vivienda B.....	72
Figura 28. Concentraciones y tendencia DQO vivienda Sólidos Suspendidos Totales (SST)...	73
Figura 29. Estado del sedimentador de la vivienda 2, visita Marzo.	74
Figura 30. Concentraciones y tendencia SST vivienda A.....	75

Figura 31. Concentraciones y tendencia SST vivienda B.....	76
Figura 32. Concentraciones y tendencia SST vivienda C.....	77
Figura 33. Concentraciones y tendencia Nt y Pt vivienda A.....	79
Figura 34. Concentraciones y tendencia Nt y Pt vivienda B.....	80
Figura 35. Concentraciones y tendencia Nt y Pt vivienda C.....	81
Figura 36. Ciclo de nitrificación – desnitrificación	82
Figura 37. Comportamiento del nitrógeno en la vivienda A.....	84
Figura 38. Comportamiento del nitrógeno en la vivienda B.....	85
Figura 39. Comportamiento del nitrógeno en la vivienda C.....	86
Figura 40. Sistema preliminar utilizado in situ	89
Figura 41. Sistema preliminar recomendado	90
Figura 42. Diseño de las biojardineras utilizado in situ	84
Figura 43. Vista en planta del sistema mecánico utilizado	85
Figura 44. Diseño de las biojardineras propuesto para vivienda A (7 habitantes).....	85
Figura 45. Diseño de las biojardineras propuesto para vivienda B y C (3 y 2 habitantes)	86
Figura 46. Distribución porcentual de los costos para el sistema de humedales artificiales ...	91

ÍNDICE DE ECUACIONES

[1].....	32
[2].....	35
[3].....	48
[4].....	48
[5].....	48
[6].....	48
[7].....	50
[8].....	51
[9].....	51
[10].....	52
[11].....	54
[12].....	54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características físicas principales de aguas domesticas	20
Cuadro 2. Principales características químicas para aguas domésticas.....	21
Cuadro 3. Características de los principales niveles de tratamiento de aguas residuales.....	24
Cuadro 4. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en alcantarillado sanitario y en un cuerpo receptor.....	44
Cuadro 5. Cálculo de Servicios Equivalentes según tipo de actividad a desarrollar	46
Cuadro 6. Dotaciones según tipo de población.....	47
Cuadro 7. Masa atómica de los elementos de estudio.....	49
Cuadro 8. Características de los métodos empleados para el análisis físico-químico de las muestras de agua	58
Cuadro 9. Identificación de las viviendas visitadas y las muestras.....	61
Cuadro 10. Personas representantes y habitantes por vivienda	61
Cuadro 11. Fechas de visitas al sitio.....	61
Cuadro 12. Límites parámetros estudiados según Normativa Nacional y Mexicana	65
Cuadro 13. Análisis estadístico de resultados DBO y DQO	66
Cuadro 14. Análisis estadístico de resultados SST	73
Cuadro 15. Análisis estadístico de resultados para el N_T	78
Cuadro 16. Comparación de la pendiente de fondo en los distintos diseños.....	87
Cuadro 17. Comparación de los TRH en los distintos diseños.	87
Cuadro 18. Dimensiones de los HA y los materiales utilizados según teoría	87
Cuadro 19. Dimensiones sugeridas por el Manual para la construcción y mantenimiento de biojardineras.....	87
Cuadro 20. Costos de materiales por vivienda.....	88
Cuadro 21. Costos de HA según habitantes con consumo de 120 l/p/d (ACEPESA).....	89
Cuadro 22. Costos de HA según habitantes con consumo de 200 l/p/d (ACEPESA).....	89
Cuadro 23. Ahorros incurridos en el proyecto según comparación de costos.....	90
Cuadro 24. Precipitaciones mensuales registradas para la estación ITCR San Carlos	92
Cuadro 25. Masa atómica de los compuestos estudiados	104
Cuadro 26. Masa molar de los compuestos estudiados	104
Cuadro 27. Valores efluente/afluente vivienda A para diciembre.....	105
Cuadro 28. Nitrógeno total obtenido	106

Cuadro 29. Fósforo total obtenido.....	106
Cuadro 30. Factores utilizados en el diseño	107
Cuadro 31. Resumen resultados caudales utilizados en el diseño.....	108
Cuadro 32. Caudal de diseño en m ³ /s	109
Cuadro 33. Concentraciones y sus valores estadísticos	109
Cuadro 34. Resumen parámetros utilizados en el diseño de los HFSSH	109
Cuadro 35. Resumen de las dimensiones obtenidas para cada HFSSH.....	110
Cuadro 36. Resumen general de los parámetros analizados para la vivienda A	110
Cuadro 37. Resumen general de los parámetros analizados para la vivienda B	111
Cuadro 38. Resumen general de los parámetros analizados para la vivienda C	111
Cuadro 39. Resumen de los resultados DBO para el periodo de análisis	112
Cuadro 40. Resumen de los resultados DQO para el periodo de análisis.....	112
Cuadro 41. Resumen de los resultados SST para el periodo de análisis	113
Cuadro 42. Resumen de los resultados nitrógeno total para el periodo de análisis.....	114
Cuadro 43. Resumen de los resultados fósforo total para el periodo de análisis	115
Cuadro 44. Resultados obtenidos con el medidor de multiparámetros	115
Cuadro 45. Desglose de costos según manual ACEPESA para un consumo de 200 l/p/d	116
Cuadro 46. Desglose de costos según manual ACEPESA para un consumo de 120 l/p/d	117

RESUMEN

En la actualidad, el tratamiento insuficiente de las aguas residuales es uno de los principales problemas que perjudican a una gran parte de nuestros ríos y mares, con efectos negativos sobre los ecosistemas tales como la disminución del oxígeno, la turbidez de las aguas, la pérdida significativa de biodiversidad, entre otros.

Para revertir esta, situación se requiere incrementar la investigación y desarrollar programas que promuevan tecnologías simples y de bajo costo, adecuadas a las condiciones sociales, económicas y ambientales de la población nacional. Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH) pueden ser una opción de tratamiento de bajo costo y efectividad adecuada para el tratamiento de aguas residuales domésticas de viviendas unifamiliares. La presente investigación evalúa un proyecto desarrollado en el cantón de San Carlos distrito Pital, donde un grupo de organizaciones han implementado humedales artificiales como tratamiento para las aguas grises producidas en algunas de las casas de esta localidad.

En este proyecto se estudiaron 3 de los primeros HFSSH construidos en dicha comunidad. Se compararon los resultados obtenidos con otros estudios realizados tanto dentro como fuera del país y se hace un análisis de la normativa nacional, con el fin de determinar si la calidad del efluente es suficiente para cumplir con parámetros de vertido o al menos significativa en función del costo del sistema como para valorar su uso como tratamiento secundario. Uno de los principales resultados de este estudio es la verificación de la capacidad de estos sistemas para generar una mejora en la calidad de las aguas grises provenientes del lavavajillas, la pila y la lavadora, además de servir como sistema de amortiguación de la contaminación que se desfoga en la Quebrada Pitalito.

Para evaluar la efectividad se realizó un análisis de los principales factores que influyen en las eficiencias de eliminación alcanzadas por los HFSSH, con el fin de optimizar su funcionamiento y proponer recomendaciones para la gestión y diseño de estos sistemas. El rango de eficiencias promedio de remoción obtenidas para el DBO fue de 60,09 a 79,13%, DQO de 65,42 a 82,00%, SST de 64,53 a 87,97%, Nt de 45,69 a 79,67% y para el Ft de 43,28 a 69,44%.

Palabras clave: Humedal Artificial de flujo subsuperficial horizontal, aguas grises, tratamiento individual de aguas residuales, parámetros de diseño, organización comunal.

ABSTRACT

Currently, the insufficient treatment of wastewater is one of the main problems that harm a large part of our rivers and seas, with negative effects on ecosystems such as the decrease in oxygen, the turbidity of the waters, the loss significant biodiversity, among others.

To reverse this situation, it is necessary to increase research and develop programs that promote simple and low-cost technologies, appropriate to the social, economic and environmental conditions of the national population. Horizontal subsurface flow constructed wetlands (HFSSH) may be a suitable low-cost and effective treatment option for the treatment of domestic wastewater from single-family homes. This research evaluates a project developed in the canton of San Carlos, Pital district, where a group of organizations have implemented artificial wetlands as a treatment for gray water produced in some of the houses in this town.

In this project, 3 of the first HFSSH built in the said community were studied. The results obtained are compared with other studies carried out both inside and outside the country and an analysis of the national regulations is made, in order to determine if the quality of the effluent is sufficient to comply with discharge parameters or at least significant depending on the cost of the system to assess its use as secondary treatment. One of the main results of this study is the verification of the capacity of these systems to generate an improvement in the quality of the gray water coming from the dishwasher, the sink and the washing machine, in addition to serving as a buffer system for the contamination that is generated and poured into Pitalito Creek.

To evaluate the effectiveness, an analysis of the main factors that influence the elimination efficiencies achieved by the HFSSH was carried out, in order to optimize their operation and propose recommendations for the management and design of these systems. The range of average removal efficiencies obtained for BOD was from 60.09 to 79.13%, for COD from 65.42 to 82.00%, for TSS from 64.53 to 87.97%, for Nt from 45.69 to 79.67% and for Ft from 43.28 to 69.44%.

KEYWORDS: Horizontal subsurface flow constructed Wetland, greywater, individual wastewater treatment, design parameters, community organization.

Acrónimos

UCR	Universidad de Costa Rica
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SS	Sólidos Sedimentables
PT	Fósforo total
NT	Nitrógeno Total
OD	Oxígeno Disuelto
pH	Potencial de Hidrógeno
CO	Carga Orgánica
Q	Caudal
QPD	Caudal Promedio Diario
QMD	Caudal Medio Diario
QMH	Caudal Máximo Horario
DOT	Dotación
HFSSH	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal
FR	Factor de Retorno
ACEPESA	Asociación Centroamericana para la Economía, Salud y el Ambiente
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PNSAR	Política Nacional de Saneamiento de Aguas Residuales
AyA	Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados
Decreto N° 38924-S	Reglamento para la calidad de Agua Potable
DE-33601-s-MINAE	Reglamento de Vertido y Reúso de las Aguas Residuales
001-SEMARNAT	Norma Oficial Mexicana AT-2021

1.Introducción

1.1. Justificación

1.1.1. Problema específico

El país ha tenido un fuerte desarrollo en los sistemas de potabilización y distribución del recurso hídrico, sin embargo, en el tema de tratamiento de aguas residuales se tiene un rezago importante (Ruiz, 2012). Por muchos años, no se le prestó la atención necesaria a este tema y se dio un mayor desarrollo de sistemas de tratamiento como los tanques sépticos y plantas de tratamiento pequeñas en condominios y urbanizaciones. Estas soluciones no resuelven el problema de manera integral, ya que una gran cantidad de aguas residuales siguen llegando a los ríos de nuestro país sin ninguna clase de tratamiento previo, generando impactos negativos en la sostenibilidad ambiental (Astorga, 2018).

Según Cubillo & Gómez (2017), los humedales artificiales también conocidos como humedales construidos, biofiltros o biojardineras (constructed wetlands, en inglés), representan sistemas orientados a la sostenibilidad ambiental en el tratamiento de aguas residuales.

Actualmente se está desarrollando un proyecto en el cantón de San Carlos, en el distrito Pital, específicamente en la urbanización Nuevo Pital, que nace como solución a la problemática de que en la actualidad las tuberías de aguas grises de las casas de la comunidad, se conectan al cordón de caño, y se dirigen y vierten directamente en la Quebrada Pitalito

La Asociación Pital Verde en conjunto con la Escuela de Ingeniería en Biosistemas, la Asociación de desarrollo de Pital y el Comité Vecinal de Nuevo Pital, han unido esfuerzos para la implementación de humedales artificiales como tratamiento para las aguas grises producidas en algunas de las casas de esta localidad. Se tiene como meta, disminuir los niveles de contaminación de las aguas grises vertidas y observar el comportamiento de los humedales artificiales como tratamiento para estas aguas.

Para poder lograrlo, desde enero del 2021 se empezó con la construcción del primer humedal artificial de flujo Subsuperficial horizontal (HFSSH) en la comunidad. La Vicerrectoría de Acción

Ciudadana de la Universidad de Costa Rica financió el proyecto con 5 millones de colones con los que se esperaba construir 50 HFSSH para finales del año 2022.

En este proyecto se estudiaron 3 de los primeros HFSSH construidos, con viviendas conformadas por distinto número de habitantes, esto para tener ejemplos de diferentes demandas volumétricas de aguas grises a tratar y así analizar el diseño actual en búsqueda de mejoras. Para la presente investigación se analizaron varios escenarios con el fin de conocer si se está logrando disminuir la cantidad de contaminación orgánica y otros parámetros en las aguas. Se analizaron como indicadores de eficiencia la DBO, DQO, sólidos suspendidos totales (SST), Nitrógeno total (NT), Fósforo total (PT), temperatura y potencial de hidrógeno (pH). Se parte de la premisa de que las biojardineras logran mejorar las condiciones de las aguas grises producidas, permitiendo a la Quebrada Pitalito eliminar de manera natural el resto de los componentes químicos y biológicos sin afectar la vida que en ella habita.

Los parámetros estudiados son analizados según el marco normativo vigente del sector de agua y saneamiento, utilizando como base comparativa el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales y también se toman valores máximos permisibles brindados por la normativa Mexicana, para tener un punto comparativo a nivel internacional. Además, se consultaron algunos trabajos de graduación y otros estudios desarrollados en el país, con el fin de adaptar los modelos a las variaciones climáticas del país (Alfaro et al, 2013; Aguilar, 2022; ASTEC, 2004; Revista, C 2013).

1.1.2. Importancia

De acuerdo con el Estado de la Nación del 2019, la cobertura de alcantarillado sanitario para el 2017 alcanzó el 14,4%, este valor es muy bajo en comparación con el promedio mundial que es del 60%. A pesar de que se tiene una cobertura nacional de aguas residuales de un 70,54% con tanque séptico, no todas las aguas residuales que se producen en las casas que cuentan con este sistema son tratadas, no todos los tanques sépticos fueron bien diseñados o puede que no exista una supervisión adecuada en el proceso de su construcción, operación y mantenimiento.

Normalmente en los tanques sépticos, se disponen solo las aguas negras o pardas, mientras que las aguas grises (cocina, ducha, lavamanos, lavado de ropa) se conducen al alcantarillado pluvial, el cual descarga en cuerpos de agua como ríos o quebradas sin ningún tratamiento previo (Ruíz, 2012).

El conocimiento y aplicación de nuevos sistemas de tratamiento de aguas residuales que sean de bajo costo de construcción y operación generarían un beneficio para el país en la disminución de los contaminantes que alcanzan los cuerpos de agua, en este caso la Quebrada Pitalito, lo cual incide en el aumento de la calidad de vida de futuras generaciones y otras especies. Es una opción aún más llamativa cuando las características del suelo no son ideales para drenaje, ya sea debido a la capacidad de infiltración, el nivel freático, riesgo de contaminación de aguas residuales, entre otros, o bien si se desea aprovechar para hacer reúso (Vidal, 2022).

Debido a los distintos estudios de laboratorio y de campo se han realizado, dando a conocer parámetros como la frecuencia de limpiezas, tipos de residuos que ingresan a los sistemas de tratamiento, costos de construcción, influencia del clima, entre otros, la base de datos sobre humedales artificiales ha crecido en los últimos años.

El presente estudio contribuye a la expansión de esta base de datos y ayuda a la comunidad a saber cómo se pueden mejorar los diseños de los humedales artificiales que se están fomentando, para que esta sea un ejemplo a seguir para otras comunidades similares.

1.2. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

La Política Nacional de Saneamiento de Aguas Residuales (PNSAR) brinda medidas con respecto al tema de saneamiento de las aguas residuales para cumplir con lo establecido en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Esta política establece que para el periodo del año 2017 al 2045 se va a contar con un plan de inversión de \$6 200 millones con el fin de impactar zonas urbanas, rurales y costeras.

En Costa Rica se ha tenido un avance muy importante en el tratamiento de aguas residuales con la implementación del Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José, por medio de la conclusión de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos, la

construcción del primer túnel urbano y emisario, y el inicio de la instalación de la red de alcantarillado sanitario (Astorga, 2018).

Sin embargo, el desarrollo de estos proyectos conlleva una importante inversión económica y su implementación en zonas urbanas no se espera realizar en un futuro cercano, he ahí la importancia de tomar en cuenta sistemas alternativos como lo son los humedales artificiales individuales (Cubillo & Gómez, 2017), buscando su desarrollo en zonas urbanas o rurales de media a baja densidad de población, ya que para zonas de alta densidad, al igual que los demás sistemas de saneamiento individual, se pueden tener problemas como por ejemplo la falta de espacio disponible. (Vidal, 2022)

A nivel nacional existen leyes, normativas y decretos vinculados al sector de agua y saneamiento, que permiten realizar el análisis de la eficiencia de los humedales artificiales. El Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales brinda límites recomendados para el efluente de los sistemas de tratamiento, que permiten medir la eficiencia de remoción de distintos parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST) y el potencial hidrógeno (pH).

En dicho reglamento, no se especifican los valores recomendados para el fósforo total en aguas domésticas, por lo cual para el análisis se utilizan el límite establecido para aguas industriales de dicho reglamento y se comparan con los indicados en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 en donde se establecen los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores. Esto para establecer una guía de estándares aceptables, ya que se considera que es importante conocer la cantidad de nutrientes vertidos debido a que estos modifican las condiciones del cuerpo receptor, en este caso la Quebrada Pitalito. Si se logra incluir un sistema de almacenamiento a la salida del sistema, se podría reutilizar el agua y no verterla.

Otros trabajos de investigación previos han estudiado el comportamiento de humedales artificiales desarrollados en el país, tanto en laboratorio con condiciones controladas, como en otros sitios a escala real y en condiciones no controladas (Alfaro et al, 2013; ASTEC, 2004; Revista, C 2013; Solano, Pérez y Alfaro 2013). Esto es de relevancia ya que se pueden comparar los resultados obtenidos cuando hay un mayor control, con los resultados de la presente investigación, en donde el manejo de los humedales artificiales está a cargo principalmente por los habitantes de las viviendas y los miembros de las organizaciones comunales.

Cubillo y Gómez (2017) se refieren a los humedales artificiales como sistemas eficientes de tratamiento de aguas residuales de bajo costo, con los cuales se pretende crear consciencia y despertar interés a nivel nacional, con el fin de incentivar a las comunidades y las instituciones a utilizar estos sistemas para el mejoramiento de la salud pública y los ecosistemas naturales. Este trabajo es de suma importancia ya que brinda conocimientos sobre el comportamiento de los humedales artificiales en las zonas más húmedas del país y en comunidades con ingresos reducidos.

Solano, Pérez y Alfaro (2013) presentan información sobre el funcionamiento del humedal artificial desarrollado en el Museo de Cultura Popular de la UNA. Buscan promover opciones tecnológicas simples y de bajo costo, adecuadas a las condiciones sociales, económicas y ambientales de cada población. También hablan de la importancia de la educación ambiental y sanitaria que se debe impartir a las comunidades mediante una perspectiva histórica del manejo del agua, con un humedal artificial como principal unidad didáctica. Dicho estudio presentó datos de remoción promedio de 93% para el caso del DBO, 95% para el DQO, 73% para el P-PO₄ y 95% para los sólidos sedimentables.

Venegas (2020) indica que se han estudiado diferentes tipos de plantas que alcanzaron altas eficiencias en la remoción de materia orgánica y otros elementos importantes de análisis. Se presentan porcentajes de remoción para plantas como las heliconias y lirios y un análisis de cómo estas plantas aprovechan los nutrientes para tener un mejor desarrollo. Es un punto comparativo importante, ya que en el proyecto de Pital, se han utilizado dos tipos de plantas, la primera conocida como AVECILLA (*Heliconia psittacorum*) y la Salvia Ornamental (*Salvia Leucantha*) de las cuales se va a comentar más adelante el comportamiento de remoción.

Otra investigación reciente (Rueda Morales, 2017) presenta datos del área requerida para humedales artificiales como sistema de tratamiento de uso comunitario, lo cual sirve como comparación al área requerida para el mismo sistema de uso implementado para una sola vivienda. Dicha investigación presentó costos de humedales artificiales para 6 viviendas, de las cuales se puede obtener el valor de cada una de ellas y así comparar si los materiales seleccionados en el proyecto de Nuevo Pital pueden ser mejorados o si presentan ventaja económica. Se muestran plantas utilizadas en los sistemas desarrollados que han dado resultados positivos en la remoción de materia orgánica de las aguas grises y que se han adaptado bien a las condiciones de alta humedad de los humedales artificiales.

Moncada (2011) analiza una biojardinera localizada en las oficinas de la Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente (ACEPESA), la cual da tratamiento a las aguas provenientes del lavaplatos de la cocina, esta recibe 3 pretratamientos antes de llegar al humedal artificial. Se hizo un muestreo en los meses de setiembre y octubre, los cuales se caracterizan por las altas precipitaciones en la GAM, brindando información útil que puede ser comparada con los muestreos programados para la época lluviosa de la Zona Norte en Nuevo Pital.

Para conseguir que el sistema sea sostenible, se debe definir primeramente que metas se desean alcanzar. Según Bernal y Cardona (2003), se le llama sistema sostenible al cual es capaz de asegurar un nivel adecuado de beneficios durante un largo periodo de tiempo, tomando en cuenta que hayan concluido el financiamiento y el aporte técnico y administrativo. Esto debe de ser considerado en la planificación de los humedales artificiales, ya que se busca que sean sistemas sostenibles.

Katukiza et all (2012) menciona que en zonas marginales se debe enfocar el saneamiento sostenible no solo al mejoramiento tecnológico, sino también considerar el costo, terreno y espacio, factibilidad técnica, que tenga aceptación social principalmente de sus usuarios, contribuir al mejoramiento de la salud y protección ambiental. En estas zonas, los principales factores que afectan a la sostenibilidad ambiental son los bajos ingresos en los hogares, accesibilidad limitada a las zonas, falta de títulos de propiedad y reconocimiento Municipal, estos mismos factores tienen influencia en la comunidad estudiada en la presente investigación.

Morel y Diener (2016) mencionan que las aguas grises, representan un 65% de las aguas residuales producidas en las casas que poseen inodoros con descarga de agua. Los HFSSH de la presente investigación tratan únicamente aguas grises, por lo que su tratamiento, representa el mejoramiento de un volumen importante de aguas residuales producidas, lo cual implica una mejora sustancial en la calidad de las aguas de los ríos y otros puntos de desfogue si se llegan a implementar en más comunidades a lo largo de Costa Rica y en el mundo.

1.3. **Objetivos**

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal desarrollados en la comunidad de Nuevo Pital con el fin de optimizar sus diseños.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la cantidad de materia orgánica, Nitrógeno, Fósforo y sólidos antes y después del sistema de tratamiento en cada uno de los tres humedales artificiales, mediante la toma de probetas de prueba in situ y análisis en laboratorio.
- Verificar si la eficiencia del sistema varía en época lluviosa y en época seca.
- Revisar la efectividad del diseño utilizado en estas biojardineras, para verificar si su efluente cumple con criterios máximos permitidos para el vertido de las aguas.
- Proponer medidas de mejora en el diseño en caso de ser necesario

1.4. **Delimitación del problema**

1.4.1. Alcance

El proyecto se desarrolló en la Provincia de Alajuela, cantón de San Carlos, distrito de Pital, en la comunidad de Nuevo Pital. Se analizaron únicamente tres de los humedales artificiales que actualmente están en funcionamiento. Las familias se conformaron por 6, 3 y 2 habitantes para los HFSSH identificados como 1, 2 y 3 respectivamente, esto con el fin de conocer si el funcionamiento estaba siendo adecuado y así se obtuvieron soluciones, ya que se utilizó el mismo diseño para todos los casos.

El periodo de muestreo empezó en septiembre del 2021 y finalizó en marzo del 2022. Según lo indicado por WEF (2014), los humedales de este tipo deben inspeccionarse dos veces al año los primeros tres años después de su construcción, por lo que el presente estudio sirve para tener una idea del comportamiento inicial de los HFSSH, sin embargo, se deben realizar más estudios cuando los humedales artificiales logren alcanzar la estabilización de sus procesos para saber si las condiciones analizadas se mantienen, si son similares o si cambian considerablemente.

En los ensayos de laboratorio se determinó el valor de DQO, DBO, sólidos totales (ST), sólidos sedimentables (SS), sólidos suspendidos totales (SST) Nitrógeno total (NT) y Fósforo total (PT). Utilizando el medidor de multiparámetros en el sitio se obtuvo la cantidad de oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH) y carga orgánica (CO) para cada uno de los puntos de muestreo.

El estudio buscó generar una idea de cómo se comportan los sistemas de tratamiento por humedales artificiales en comunidades de zonas con climas principalmente lluviosos para que la información pueda ser utilizada como guía en proyectos futuros.

1.4.2. Limitaciones

- En el estudio no se considera el análisis de patógenos y parásitos, ya que se trabaja únicamente con aguas grises que se espera no incluyan estos componentes.
- No se realiza una proyección de las poblaciones de las viviendas, ya que la situación social y económica de las familias no es igual ni fácil de predecir por los modelos convencionales de proyección.
- Al no contar con normativa nacional que indique parámetros máximos de la cantidad de nutrientes presente en las aguas residuales de tipo doméstica, se consulta normativa extranjera para realizar las comparaciones y conclusiones relevantes.
- El clima fue una limitante ya que en dos de las visitas al sitio no se logró realizar el muestreo debido a la persistencia de la lluvia, la cual alteraba las muestras, ya que los puntos de muestreo estaban a la intemperie y algunos bajo el nivel de suelo (estos puntos de muestreo se inundaban).
- Debido a la variabilidad en el uso del agua en las viviendas de estudio y a la dificultad en la comunicación con los miembros de la comunidad, se complica la medición del caudal experimental, por lo que se utiliza el valor recomendado en la Norma técnica para el diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial publicada por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados en el 2017.

2. Descripción del área de estudio

2.1. Descripción breve del sistema existente

El proyecto de investigación se desarrolla en la comunidad de Nuevo Pital ubicada en la provincia de Alajuela, distrito Pital. El proyecto estuvo orientado a la mejora en la calidad del agua que llega a la quebrada Pitalito, mediante la implementación de humedales artificiales. En la Figura 1 se muestra la ubicación de las viviendas estudiadas, identificadas como vivienda A, B y C y de la quebrada Pitalito.

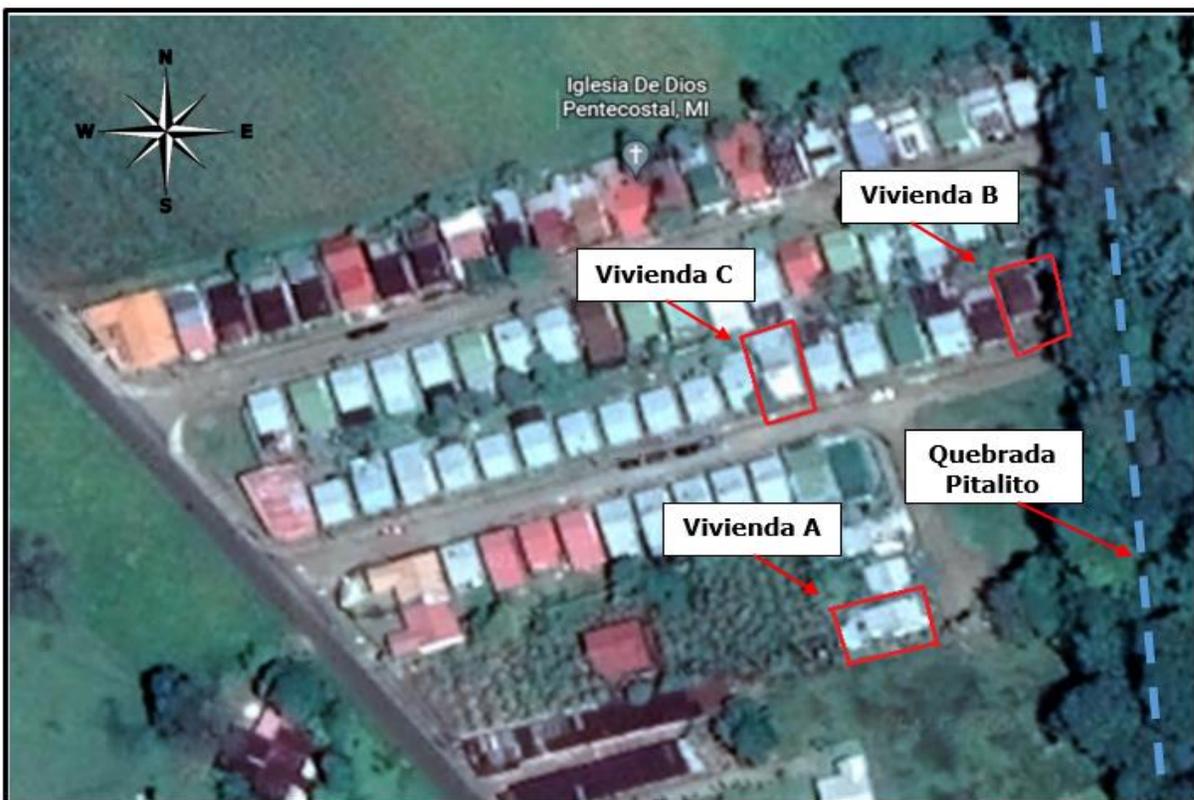


Figura 1. Ubicación de las viviendas con HFSSH en Nuevo Pital
Fuente: Modificado de Google earth, 2022

Como se observa, la quebrada define el límite este de la comunidad y se encuentra considerablemente cerca de la vivienda B. A esta quebrada llegan actualmente todas las aguas grises de la comunidad provenientes de la pila, el lavavajillas y la lavadora, las cuales se desfogan al cordón de caño y se conducen a la quebrada.

2.1.1. Situación de la comunidad

La comunidad de Nuevo Pital está ubicada al oeste del centro del pueblo de Pital, como se aprecia en la Figura 2. En esta comunidad se tienen construidas actualmente 77 viviendas, en donde la mayoría fueron construidas mediante el bono familiar de vivienda. Las familias son de escasos recursos económicos, por lo que la construcción de las biojardineras fue totalmente subsidiada por la organización Pital Verde y la Vicerrectoría de acción ciudadana de la Universidad de Costa Rica.



Figura 2. Ubicación de la comunidad Nuevo Pital
Fuente: Modificado de Google earth, 2022

La comunicación con los miembros de la comunidad fue complicada ya que las y los jefes de hogar no tenían conocimiento de ciertos sistemas, como por ejemplo la ubicación del sistema de tratamiento de aguas negras y tampoco quisieron brindar datos sobre el consumo de agua.

Los sistemas de humedales artificiales deben de recibir constante mantenimiento, el cual debe ser responsabilidad de los miembros de cada vivienda, lo cual no ocurrió en el proyecto, ya que en todos los meses de estudio no se dio ninguna limpieza del sistema primario. Se observó una falta de comunicación y organización entre los miembros de las viviendas y las organizaciones encargadas.

2.1.2. Tratamiento de aguas grises

Para el periodo de finalización de la actual investigación, se tenían instalados y en funcionamiento 4 humedales artificiales (HA). El resto de las 73 viviendas, no cuentan con ningún tipo de sistema de tratamiento para las aguas grises.

Se observó que ninguna de estas viviendas cuenta con separación de alimentos antes de lavar los platos, por lo que se pueden apreciar restos de comidas en los caños de la comunidad y en los puntos de desfogue a la quebrada. La mayoría de las pilas y lavavajillas son pilas rojas lujadas de una a dos bateas, las cuales cuentan con un orificio en una de las esquinas o en el centro y al final de la batea. Esto dificulta la implementación de mallas para la separación de los alimentos, ya que el orificio es pequeño y sin espacio en uno de los costados. Las viviendas con HA, tienen implementado uno o dos tanques continuos de 60 litros de capacidad, los cuales sirven como sedimentadores y trampas de grasa (ver Figura 3).

2.1.3. Tratamiento de aguas negras

Las viviendas cuentan con sistemas individuales de tanques sépticos para el tratamiento de las aguas negras producidas. La ubicación de dichos tanques es desconocida por los miembros de las viviendas al igual que el sistema de filtración utilizado. Debido a que la comunidad es un poco conflictiva, fue difícil obtener mayor información al respecto. En las visitas al sitio, no se logró percibir ningún mal olor proveniente de las aguas negras ni tampoco se identificaron sitios conflictivos del sistema de drenado de los tanques sépticos.

2.1.4. Descripción de los humedales artificiales

En total, para la finalización de este proyecto, se tenían instalados y en funcionamiento 4 humedales artificiales, los cuales fueron diseñados con las mismas dimensiones sin importar la cantidad de integrantes de las viviendas. De los 4 humedales, solo 3 fueron estudiados ya que el 4to humedal fue construido y puesto en funcionamiento para el mes de marzo del 2022 y la investigación terminó de recolectar muestras para ese mismo mes. Se tomaron muestras simples en los puntos de entrada y salida de los sistemas de humedales artificiales. En la Figura 42 se muestra el diseño utilizado in situ, con un largo de 6 m por un ancho de 0,6 m y una

profundidad que varía de 0,4 m al inicio a 0,45 m al final del sistema, lo cual define una pendiente de fondo de 0,83%.

Se utilizó piedra bola con dimensiones entre 75 - 150 mm en los costados de los humedales (ver Figura 42), tapas plásticas en el fondo del humedal y piedra quintilla con dimensiones aproximadas de 12,5 mm en la parte superior de los humedales. Sobre la piedra quintilla se sembraron dos tipos de plantas, AVECILLA (*Heliconia psittacorum*) y la salvia ornamental (*Salvia leucantha*), ver Figura 17.

Todos los humedales artificiales se ubican en un costado de las viviendas y cuentan con las mismas piezas mecánicas dentro del sistema, lo único que varía es la instalación mecánica que conduce el agua de la pila, el lavavajillas y la lavadora al sistema primario, ya que la ubicación de estos puntos variaba en cada una de las viviendas estudiadas.

En la vivienda C, se utilizó únicamente un estañón de 60 L como sistema primario, con el cual se tuvieron problemas de capacidad desde el inicio de la investigación. En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo del tratamiento de las aguas grises mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial HFSSH utilizado en el proyecto estudiado.

Las aguas de la pila y el lavavajillas se conectan y son conducidas al sistema primario, mientras que las aguas de la lavadora se conducen y desfogan directamente sobre el humedal, esto debido a que las descargas de la lavadora suelen ser grandes en comparación a las de la pila y el lavavajillas, y esto producía que el sistema primario rebalsara. El punto de entrada al sistema se encuentra a un nivel superior que el punto de salida esto permite que las aguas pasen por todo el sistema y salgan ya tratadas, en estos puntos se realizaron los muestreos.

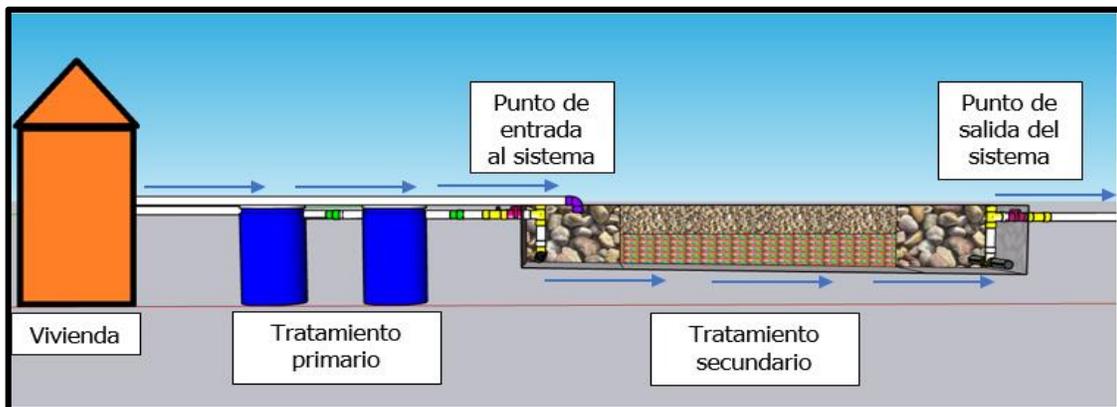


Figura 3. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento por HFSSH

2.2. Caracterización de la Zona

2.2.1. Características climatológicas

La región de la Zona Norte pertenece al régimen de precipitación del Caribe que es lluvioso todo el año, con una disminución relativa de las lluvias en los meses de febrero, marzo y abril. Presenta un solo periodo lluvioso que se inicia en mayo y finaliza en diciembre o enero. Durante los meses de fin y principio de año, el aporte de los frentes fríos es muy importante ya que pueden llegar a contribuir con un 6% del total anua, aproximadamente 195 mm de lluvia (Solano, J & Villalobos, R. 2005).

Como se puede observar en la Figura 1, el distrito de Pital se encuentra dentro de las zonas con mayor precipitación anual, alcanzando los 4500 mm por año.

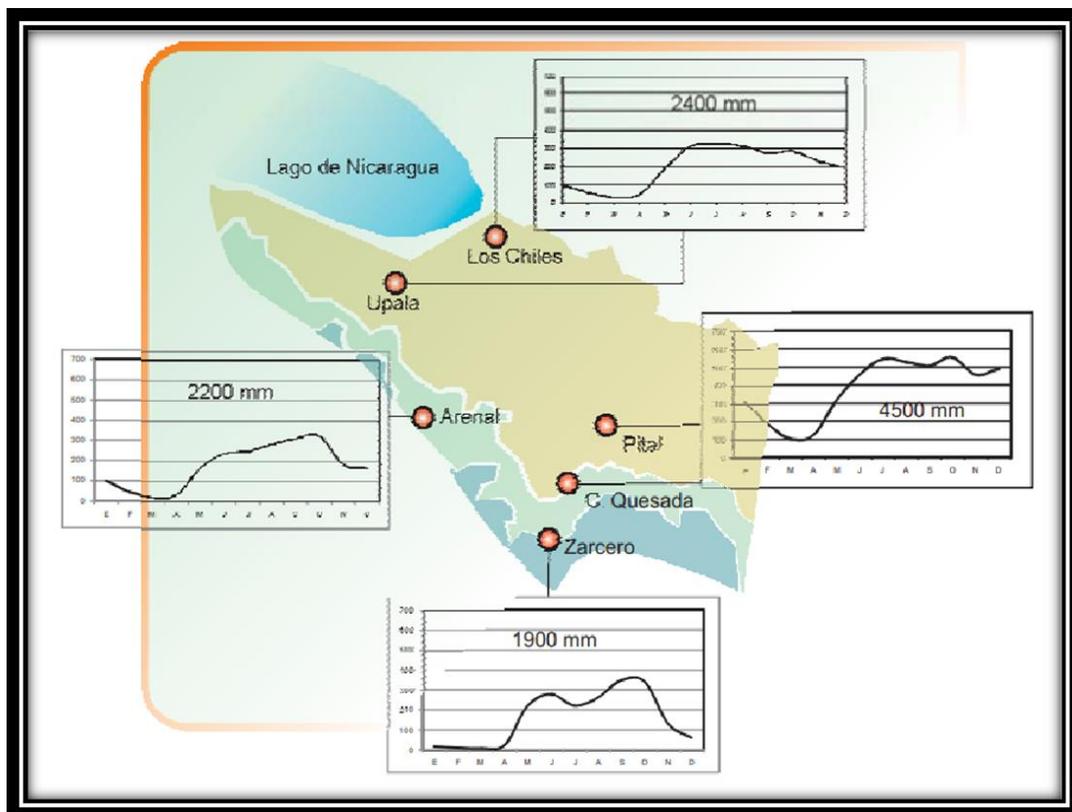


Figura 4. Distribución de la precipitación en la Zona Norte de Costa Rica. 1961-1990
Fuente: Solano, J et al (2005)

2.2.2. Características geotécnicas

Según Marín et al. (2010), el primer paso para implementar un sistema de tratamiento por humedales artificiales es conocer el tipo de suelo en el que se va a trabajar, ya que con esto se planifica si es necesario colocar una membrana impermeable o si es suficiente con la compactación de los suelos. La normativa nacional exige la colocación de barreras impermeables para cualquier sistema de tratamiento de AR, con excepción de que se trate de algún sistema de disipación de agua en suelo (drenaje).

De acuerdo con lo mostrado en el Mapa de Suelos de Costa Rica, en la zona de Pital se tiene presencia de suelos tipo Ultisoles, los cuales se caracterizan por ser formados bajo condiciones de clima tropical húmedo; son de color pardo rojizo oscuro y no muestran evidencias de saturación hídrica y suelos de tipo Inceptisol, que agrupan suelos planos, predominantemente arcillosos y muy húmedos. Adicionalmente se conoce que los suelos de esta zona se encuentran bajo la influencia de una capa freática fluctuante a poca profundidad (OEA, 1973).

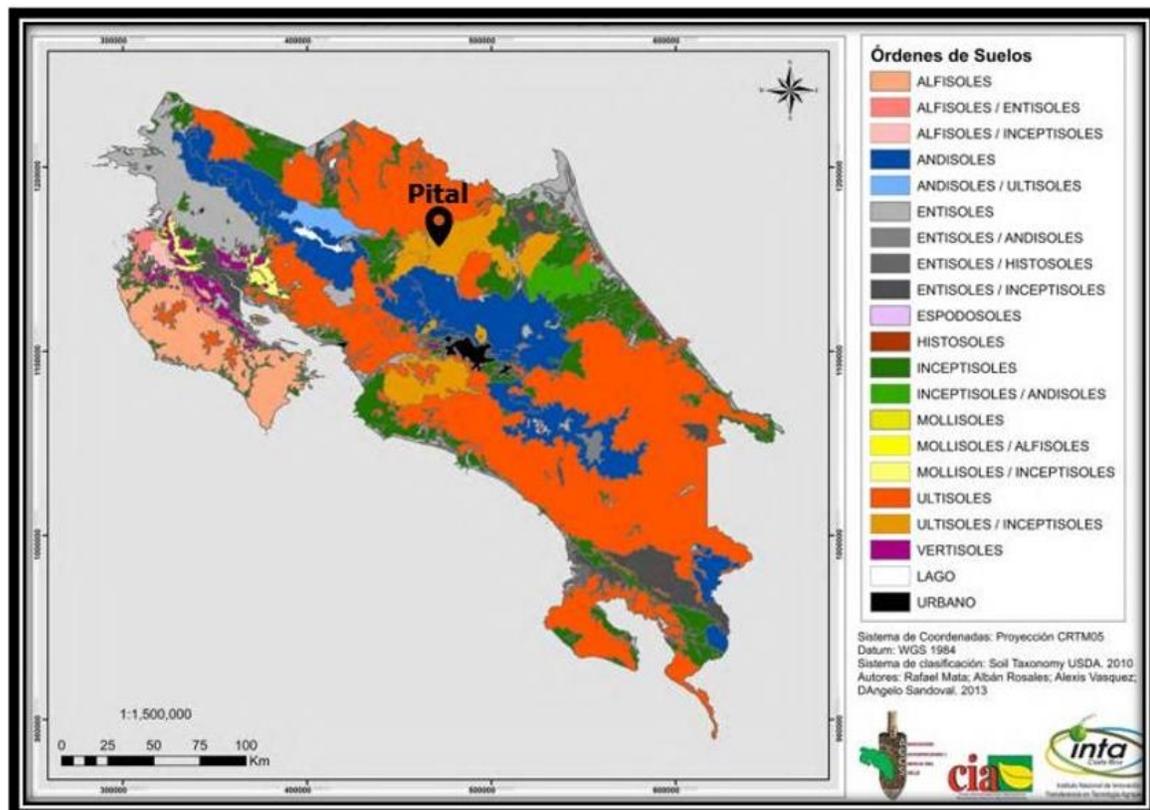


Figura 5. Órdenes de suelo de Costa Rica
Fuente: Mata, R., Vásquez, A., & Rosales, A. (2007)

2.2.3. Características de la población

La zona de estudio se encuentra en la provincia de Alajuela, en el distrito de Pital, el tercer distrito más grande de todo el cantón de San Carlos con un área de 375,43 km². Es una zona en crecimiento, cuyas actividades principales son la agricultura, ganadería y turismo. Tiene una población de 17 325 habitantes lo cual representa a un 11% de la población total del cantón (INEC, 2011).

En cuanto a características sociales, el porcentaje de hogares con jefatura femenina es del 24,7% mientras que la jefatura compartida corresponde al 7,6%. En la Figura 6 se muestra el mapa de San Carlos con el porcentaje de hogares con al menos una carencia según las Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) por unidad Geoestadística Mínima, en donde se ve claramente que en la mayoría del territorio del 50% o más de las viviendas tiene al menos una carencia. Esto es de importancia ya que se puede deducir que la posibilidad para las comunidades de pagar sistemas de tratamiento más complejos es reducida.

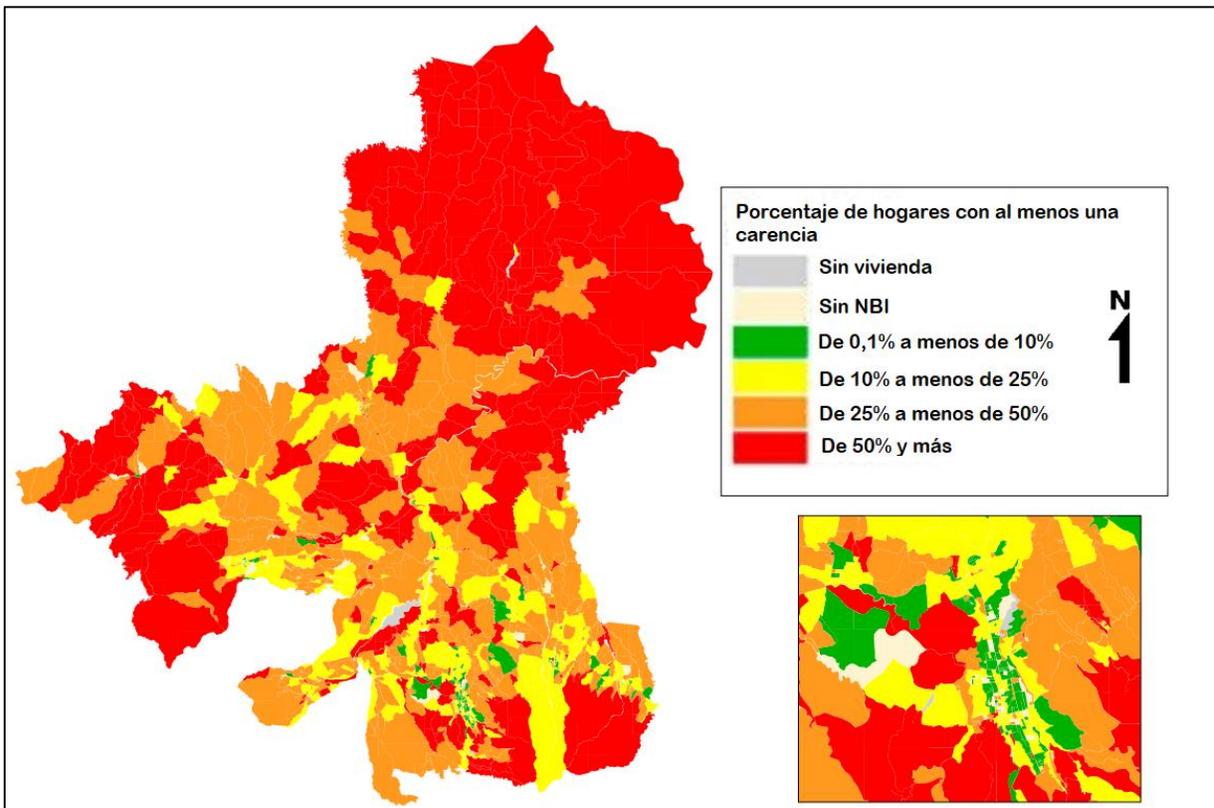


Figura 6. Porcentaje de hogares con al menos una carencia según las NBI.

Fuente: INEC, 2011.

3. Marco teórico

3.1. Composición de las aguas residuales ordinarias

En la mayoría de los procesos humanos se utiliza el recurso hídrico, en este proceso, se genera una gran cantidad de aguas residuales. El Reglamento de vertido y reúso de agua residual define como agua residual al agua que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes. Se tienen dos tipos de agua residual: ordinaria y especial. Las aguas residuales de tipo ordinario son las generadas por actividades domésticas del ser humano, ya sea en el uso de inodoros, duchas, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa, etc. Las aguas residuales de tipo especial son las de tipo diferente al ordinario.

Según Sperling (1996), los contaminantes presentes en aguas residuales se dividen en 3 grupos:

- Físicos: Se toman en cuenta sólidos que dependiendo del tamaño de partícula se dividen en suspendidos, disueltos o coloides. Algunas propiedades físicas son el color, turbidez, sabor, olor y temperatura. Un desglose de las principales características físicas se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características físicas principales de aguas domesticas

Parámetro	Descripción
Temperatura	<ul style="list-style-type: none">• Ligeramente más alto que en el agua potable• Variaciones según las estaciones de los años (más estable que la temperatura del aire)• Influye en la actividad microbiana• Influye en la solubilidad de los gases• Influye en la viscosidad del líquido
Color	<ul style="list-style-type: none">• Aguas residuales frescas: gris claro• Aguas sépticas: gris oscuro o negro
Olor	<ul style="list-style-type: none">• Aguas residuales frescas: olor aceitoso, relativamente desagradable• Aguas sépticas: mal olor (desagradable), debido al sulfuro de hidrógeno gas y otros subproductos de descomposición• Aguas residuales industriales: olores característicos
Turbiedad	<ul style="list-style-type: none">• Causado por una gran variedad de sólidos en suspensión• Aguas residuales más frescas o más concentradas: generalmente mayor turbiedad

Fuente: Modificado de Sperling (2007)

- Químicos: Incluyen parámetros como la alcalinidad, acidez, nitrógeno total, demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO). Un desglose de las principales características físicas se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Principales características químicas para aguas domésticas

Parámetro	Descripción
Sólidos Totales	<p>Suspendidos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parte de los sólidos orgánicos e inorgánicos que no son filtrables • Compuestos minerales, no oxidables por el calor, inertes, que son parte de los sólidos en suspensión • Compuestos orgánicos, oxidables por el calor, que forman parte de los sólidos en suspensión <p>Disueltos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parte de los sólidos orgánicos e inorgánicos que son filtrables. Normalmente se considera que tiene una dimensión inferior a 10–3 μm. • Compuestos minerales de los sólidos disueltos. • Compuestos orgánicos de los sólidos disueltos <p>Sedimentables</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parte de sólidos orgánicos e inorgánicos que sedimentan en 1 hora en un cono Imhoff. Indicación aproximada del asentamiento en un Tanque de sedimentación.
Materia Orgánica	<p>BOD_{5,20}</p> <ul style="list-style-type: none"> • Demanda de oxígeno bioquímico. Medido a los 5 días y 20 °C. Asociado a la fracción biodegradable de compuestos orgánicos carbonosos. medida del oxígeno consumido después de 5 días por los microorganismos en la estabilización bioquímica de la materia orgánica <p>DQO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Demanda química de oxígeno. Representa la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar químicamente el carbono materia orgánica. Utiliza agentes oxidantes fuertes bajo condiciones ácidas.
Total nitrógeno	<p>Amoníaco</p> <ul style="list-style-type: none"> • Producido en la primera etapa de la descomposición de orgánicos nitrógenos. <p>Nitrito</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etapa intermedia en la oxidación del amoníaco. Prácticamente ausente en las aguas residuales sin tratar. <p>Nitrato</p> <ul style="list-style-type: none"> • Producto final en la oxidación del amoníaco. Prácticamente ausente en las aguas residuales sin tratar.
Total fósforo	<p>El fósforo total existe en formas orgánicas e inorgánicas. Es un nutriente esencial en el tratamiento biológico de aguas residuales.</p> <p>Fósforo orgánico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Combinado con materia orgánica. <p>Fósforo inorgánico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ortofosfatos y polifosfatos.
pH	Indicador de la condición ácida o alcalina de las aguas residuales blandas. Una solución es neutra a pH 7. Procesos de oxidación biológica normalmente tienden a reducir el pH.

Fuente: Modificado de Sperling (2007)

- Biológicos: Referentes a la cantidad de microorganismos presentes en las aguas residuales, algunos son positivos en el proceso de tratamiento de estas aguas y otros pueden representar un peligro para la salud, como por ejemplo los coliformes fecales.

3.2. Niveles de tratamiento de las aguas residuales

Sperling (2017) menciona que en el diseño y planeamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales se debe tener clara la información pertinente a:

- Los estudios de impacto ambiental en el cuerpo receptor
- Los objetivos del tratamiento de las aguas
- El nivel de tratamiento y las eficiencias de remoción

Con base a lo anterior, se puede definir el nivel de tratamiento requerido para cada situación específica. El tratamiento de aguas residuales se clasifica de acuerdo con los niveles: preliminar o pretratamiento, primario, secundario y terciario.

3.2.1. Pretratamiento

El tratamiento preliminar o pretratamiento separa principalmente los sólidos dispersos gruesos de la fase líquida. En esta fase se prepara el afluente de aguas residuales para su posterior tratamiento, reduciendo o eliminando las características problemáticas de las aguas residuales que de otro modo podrían impedir la operación o aumentar indebidamente el mantenimiento de los sistemas y las bombas (si las hay) (UN-HABIT,2008).

Según Mihelcic & Zimmerman (2012), los principales sistemas de pretratamiento son:

- Filtración: Empleo de rejillas o mallas para la remoción de sólidos de tamaños superiores a los 10 mm.
- Tanques desarenadores: Mediante el efecto de la gravedad, se produce una separación de partículas de sólidos con gravedades específicas que varían entre 1,3 a 2,62. El tamaño de partícula determina el tiempo de retención hidráulica con la que se diseña el tanque.

- Flotación: Asenso de los contaminantes con densidades menores a la del agua, los cuales incluyen aceites, grasas, lubricantes, entre otros.
- Ecuilización o regulador de caudal: Evita variaciones significativas en el caudal que entra a las unidades de tratamiento posteriores mediante una unidad de retención que regula el caudal de entrada.

3.2.2. Tratamiento primario

Según Sperling (1996) el tratamiento primario busca la eliminación de sólidos sedimentables y sólidos suspendidos. Durante el proceso de sedimentación, los sólidos se dirigen al fondo del tanque por medio de diferencia de densidades, ahí son almacenados y deben ser incluidos en el proceso de mantenimiento para su remoción cada cierto tiempo, esto depende del tipo de agua residual que se trate.

El tratamiento primario remueve alrededor de 60% de los sólidos suspendidos (SST), 30% de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y 20% de fósforo (P). En esta etapa, el DBO y el fósforo removido se encuentran principalmente en forma particulada. Los sistemas primarios siempre deben de colocarse antes del sistema de humedal artificial, ya que si las partículas grandes entran al sistema, este acorta su vida útil y puede presentar problemas como acumulaciones de materia orgánica en los agujeros de los tubos, entre otros (Milheic & Zimmerman, 2012) .

En la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan humedales artificiales como tratamiento secundario o terciario, se ha dado principal enfoque a la implementación de dos tipos específicos de tratamiento preliminar: Tanque séptico y el Reactor deflector anaeróbico (fosa séptica mejorada).

3.2.3. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario se utiliza para disminuir los niveles de materia orgánica disuelta (DBO) resultantes del tratamiento primario, lo cual implica una alta demanda de oxígeno (Mihelcic & Zimmerman, 2012).

Algunos de los procesos de tratamiento secundario incluyen: lagunas de estabilización, lodos activados y sistemas de biomasa adherida. Los humedales de flujo subsuperficial horizontal se encuentran dentro de los sistemas de biomasa adherida, en los cuales se requiere de un sustrato o medio inerte en el cual la biomasa se adhiere y se mantiene en el sistema biológico. El agua pasa a través del medio filtrante y es depurada posteriormente (Murillo, 2017).

En el Cuadro 3 se pueden observar de manera resumida las características de los principales niveles de tratamiento para aguas residuales.

Cuadro 3. Características de los principales niveles de tratamiento de aguas residuales

Parámetro	Nivel de tratamiento		
	Pretratamiento	Primario	Secundario
Remoción de contaminantes	Sólidos gruesos	Sólidos sedimentables DBO partículas grandes	Sólidos no sedimentables DBO partículas finas DBO soluble Nutrientes Patógenos
Eficiencias de remoción	-	SST: 60-70% BOD: 25-40% Coliformes: 30-40%	SST: 65-95% DBO: 60-99% Coliformes: 60-99%
Mecanismos predominantes de tratamiento	Físico	Físico	Biológico
Usual cumplimiento de los estándares de descarga	No	No	Si
Aplicación	Aguas arriba de estaciones de bombeo Estaciones iniciales de tratamiento	Tratamientos parciales Etapas intermedias de sistemas de tratamiento más completos	Sistemas de tratamiento más completos (para materia orgánica principalmente)

Fuente: Modificado de Von Sperling (2007).

3.2.4. Tratamiento terciario

EL tratamiento terciario o también llamado tratamiento avanzado es definido como el nivel de tratamiento necesario, más allá del tratamiento secundario convencional, para la eliminación de constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención, como lo son los nutrientes, los compuestos tóxicos y los excesos de materia orgánica o sólidos en suspensión (Metcalf & Eddy, 1995). Un tren de tratamiento comúnmente utilizado está conformado por un sedimentador (tratamiento primario), humedal artificial (tratamiento secundario) y lagunas de maduración o humedales adicionales (tratamiento terciario) (Segura, 2017).

Algunos de los procesos u operaciones unitarias habitualmente empleadas en los tratamientos avanzados son la coagulación química, floculación y sedimentación seguida de filtración y carbono activado. Otros métodos menos comunes incluyen el intercambio iónico o la ósmosis inversa (Metcalf & Eddy, 1995).

3.3. **Humedales Artificiales**

Robbins et al (2014) define que los humedales artificiales (HA) o humedales construidos (CW, por sus siglas en inglés) son cuencas revestidas llenas de grava que albergan plantas y microbios. Esos se combinan para retener y degradar parcialmente los desechos orgánicos presentes en las aguas residuales de forma anaeróbica y aeróbica a través de la actividad microbiana.

Según Sperling (2007), los humedales artificiales se componen de cinco componentes principales: cuenca (cavidad), sustrato, vegetación, capa impermeabilizante y el sistema de disposición entrada/salida. Existen distintos tipos de configuraciones en el diseño de los humedales artificiales (Haberl, 1999) y se clasifican tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Forma de vida de los macrófitos dominantes (flotantes libres, emergentes, sumergidos)
- Patrón de flujo en los sistemas de humedales (flujo superficial de agua libre; flujo subterráneo: flujo horizontal y vertical)
- Tipo de configuraciones de las celdas de humedales (sistemas híbridos, de una etapa, de etapas múltiples)
- Tipo de aguas residuales a tratar
- Nivel de tratamiento de las aguas residuales (primario, secundario o terciario)
- Tipo de pretratamiento
- Estructuras de afluentes y efluentes
- Tipo de sustrato (grava, tierra, arena, etc.)
- Tipo de carga (carga continua o intermitente)

En cuanto a la remoción de nutrientes y otros parámetros en los HA las raíces de las plantas sumergidas proporcionan sustrato para los procesos microbiológicos y dado que la mayoría de las macrófitas (plantas que pueden vivir en terrenos inundados) pueden transmitir oxígeno de las hojas a las raíces, se presentan pequeñas zonas aeróbicas en la superficie de las raíces y los rizomas. El resto del medio sumergido de los HA de flujo subsuperficial tienden a carecer de oxígeno. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica del amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4 - \text{N}$) por nitrificación en los HA, pero aun así el sistema es efectivo en la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos, dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas (EPA, 2000).

La remoción de nitratos por desnitrificación biológica también puede ser muy efectiva dado que las condiciones anóxicas requeridas están siempre presentes y se cuenta con suficientes fuentes de carbono. La disponibilidad limitada de oxígeno en los HA de flujo subsuperficial disminuye la capacidad de remoción de amoníaco por nitrificación biológica. Los mecanismos disponibles de remoción del fósforo en todos los tipos de humedales artificiales también requieren largos periodos de retención para producir niveles bajos de fósforo a partir de agua residual doméstica típica (EPA, 2000).

Considerando los parámetros mencionados se pueden desarrollar distintos tipos de humedales artificiales, sin embargo, en el presente estudio se pone énfasis en los humedales de flujo subsuperficial horizontal.

3.3.1. Tipos de humedales artificiales

Los HA se dividen en tres tipos: de flujo superficial de agua libre, de flujo horizontal subsuperficial y de flujo vertical. Además, diferentes tipos de HA pueden ser combinados unos con otros (sistemas híbridos o combinados) para emplear las ventajas de los diferentes sistemas (Vymazal, 2011). Todos estos sistemas logran cierta eliminación de sólidos y materia orgánica, reducción de patógenos y, potencialmente, algo de absorción de nutrientes a través de las raíces de las plantas (Robbins et al, 2014).

Las principales diferencias de los sistemas de flujo subsuperficial respecto a los superficiales son: mayor capacidad de tratamiento (admiten mayor carga orgánica), bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de insectos, pero una menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible (García & Corzo, 2008).

- **Humedal artificial de flujo superficial de agua libre (HAFS)**

Los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS) son los más similares en apariencia a los humedales naturales (ver Figura 7). En estos sistemas el agua está directamente expuesta a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas (García & Corzo, 2008). Ya que estos sistemas imitan los humedales naturales, atraen a una amplia variedad de vida silvestre: insectos, moluscos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos (Kadlec & Wallace, 2009). Como el agua residual fluye a través del humedal, ésta es principalmente tratada mediante los procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación (Kadlec & Wallace, 2009).

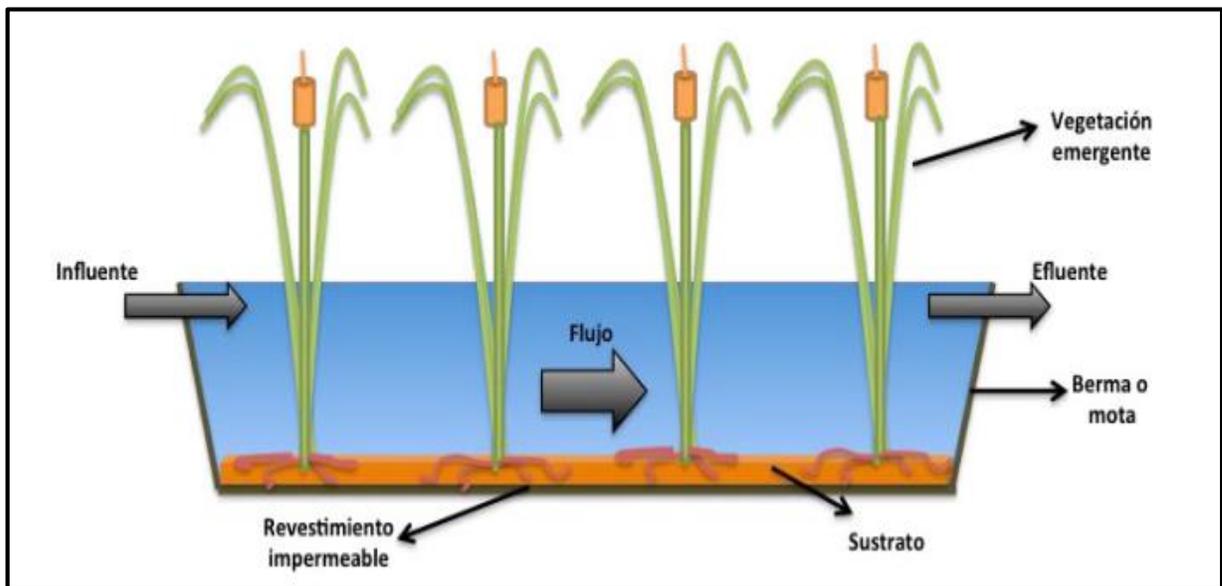


Figura 7. Elementos básicos de un HAFS
Fuente: Adaptado de Kadlec & Wallace, 2009

Algunas de las ventajas de este sistema según SSWM (2018) (Sustainable Sanitation and Water Management) son:

- Sistemas estéticamente agradables y pueden ser utilizados como hábitat por los animales
- Alta reducción de DBO y sólidos, eliminación moderada de patógenos
- Puede ser construida y reparada con materiales localmente disponibles
- No requiere energía eléctrica, lo que permite tener bajos costos de operación
- Ningún problema real con olores si se diseña y mantiene correctamente
- Bajo costos de operación

Y algunas desventajas serían:

- Favorece la reproducción de mosquitos
- Requiere un terreno grande
- Periodo inicial largo antes de poder trabajar con capacidad plena, ya que se debe esperar a que las macrófitas se aclimaticen y crezcan
- Requiere experiencia en diseño y construcción

- **Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (HFSSV)**

Estos humedales reciben las aguas a tratar en la superficie del sustrato poroso y éstas van infiltrándose hasta ser finalmente recogidas en el fondo del lecho mediante una red de drenaje (Langergraber et al., 2003).

Las aguas residuales son vertidas o dosificadas desde un punto más alto en la superficie (Ver Figura 8), utilizando un sistema mecánico de dosificación. La principal diferencia entre un humedal de flujo vertical y uno de flujo horizontal no es sólo la dirección de la trayectoria del flujo sino las condiciones aerobias (Tilley et al. 2018; Montiel, 2014).

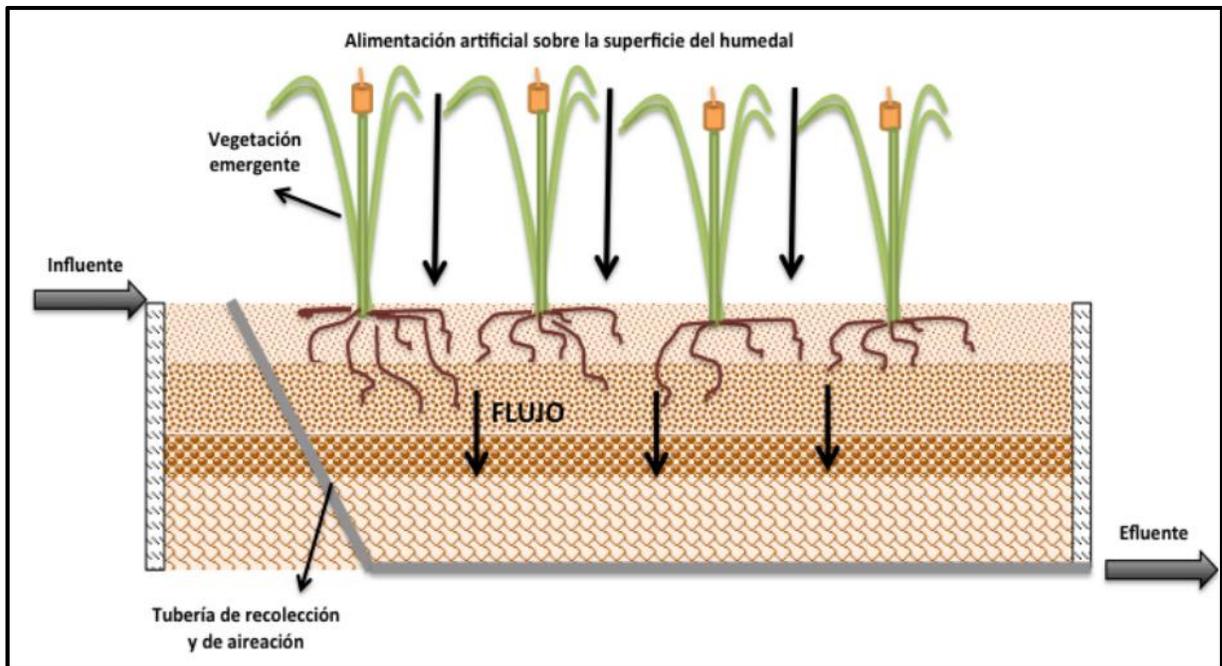


Figura 8. Elementos básicos de un HFSSV
Fuente: Adaptado de Kadlec & Wallace, 2009

En los humedales artificiales de flujo superficial vertical, la aplicación de agua se efectúa de forma intermitente para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias (CONAGUA 2015). Al dosificar de forma intermitente el humedal, mediante las descargas de aguas grises proveniente del uso del lavavajillas, la pila y la lavadora (de 4 a 10 veces al día), el filtro pasa por las etapas de saturado y no saturado, estimulando el suministro de oxígeno al agua contaminada, lo que hace posible la degradación microbiana aerobia y permite la eficiente remoción de contaminantes (Tilley et al. 2018)

Algunas de las ventajas de los HFV según SSWM son:

- Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos
- No tiene los problemas de mosquitos que existen en el humedal artificial de flujo superficial
- Capacidad de nitrificación debido a la transferencia de oxígeno adecuada
- Menos obstrucciones que en el HFSSH
- Requiere menos espacio que el HFSSH
- Bajos costos de operación

Y algunas desventajas serían:

- Requiere experiencia en el diseño y construcción, sobre todo para el sistema de dosificación
- Requiere mantenimiento más frecuente que en un HFSSH
- Puede necesitar una fuente constante de energía eléctrica
- Periodo inicial largo antes de trabajar capacidad plena
- No todos los repuestos y materiales están disponibles localmente

En los HFV se dan condiciones que permiten una adecuada transferencia de oxígeno, esto implica que los humedales de flujo vertical pueden generar nitrificación, pero la des-nitrificación es limitada ya que, en toda la profundidad del lecho, hay condiciones aeróbicas (García et al 2008).

- **Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH)**

Este sistema consta de un filtro horizontal que cuenta con el componente de plantas emergentes con extensivo sistema de raíces dentro del medio. El medio que sirve como filtro es por lo general grava, pero también se ha utilizado los suelos naturales, en este tipo de humedales artificiales la porosidad del medio filtrante tiene una relación directa con la degradación microbiana (Rodríguez, 1995). El agua fluye por gravedad, a través del sustrato donde entra en contacto con una mezcla de microorganismos facultativos que viven asociados al mismo y a las raíces de las plantas (Kadlec & Wallace, 2009). Estos humedales son diseñados de tal manera, que el nivel del agua siempre se encuentre por debajo de la superficie del sustrato.

Estos sistemas están compuestos por los siguientes elementos: una tubería de entrada, una capa de impermeabilización del fondo y de las paredes laterales (ya sea de arcilla o de un material sintético), el medio granular (o filtrante), vegetación emergente, bermas y una tubería de salida regulable que permite controlar el nivel del agua (García & Corzo, 2008; Kadlec & Wallace, 2009).

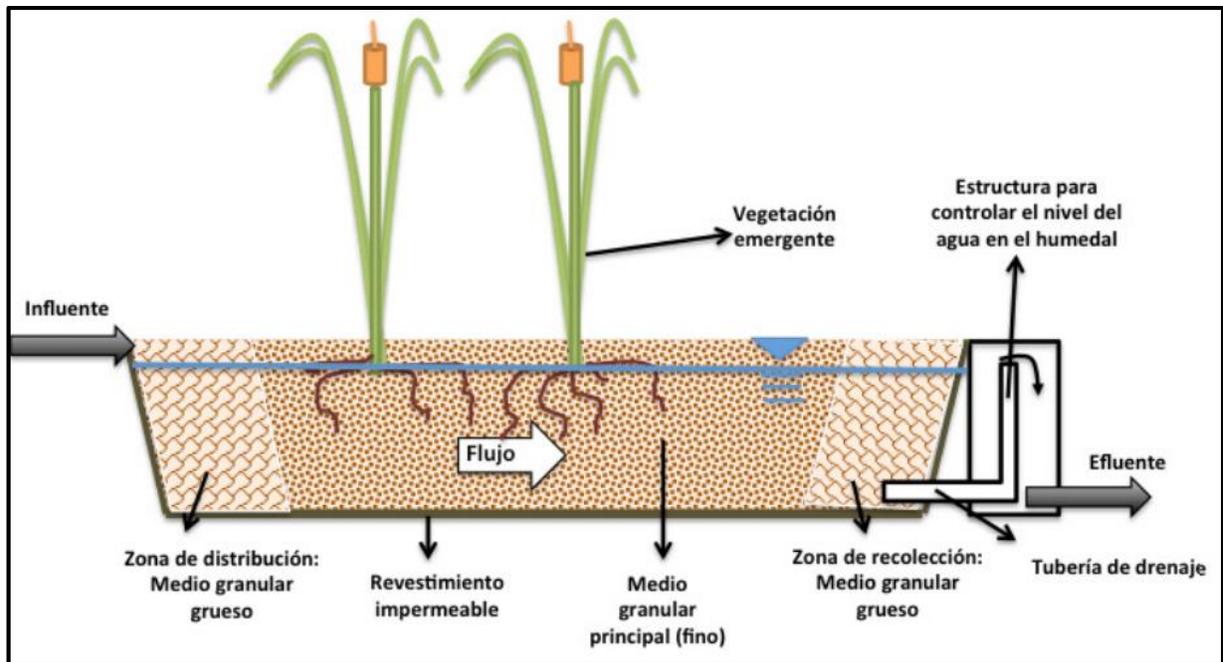


Figura 9. Elementos básicos de un HFSSH
Fuente: Adaptado de Kadlec & Wallace, 2009

Algunas de las ventajas de los HFSSH según SSWM son:

- Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos
- No tiene los problemas de mosquitos que existen en el humedal artificial de flujo superficial
- No requiere energía eléctrica
- Bajos costos de operación

Y algunas desventajas serían:

- Requiere un terreno grande
- Poca remoción de nutrientes
- Riesgo de obstrucciones, dependiendo del pretratamiento y el tratamiento primario
- Periodo inicial largo antes de trabajar a capacidad plena
- Requiere experiencia en diseño y construcción

El HFSSH es una buena opción cuando el costo de la tierra es bajo y está disponible. Como no se requiere energía eléctrica para su operación, puede ser una alternativa de saneamiento para las comunidades rurales que no cuentan con el servicio de energía eléctrica o si se requiere de

un costo bajo para su operación (CONAGUA, 2015). Los HFSSH no son apropiados para aguas domésticas sin tratar (aguas negras) ya que las obstrucciones son un problema común y, por lo tanto, el afluente debe estar bien asentado con tratamiento primario antes de desembocar en el humedal (Tilley et al. 2018)

3.3.2. Dimensionamiento de un HFSSH

En el diseño de un HFSSH, se debe tener en cuenta que el sustrato del humedal puede llenarse rápidamente con escombros, arena y sólidos de aguas residuales sin tratar, si estos materiales no se eliminan antes del humedal. Por lo tanto, se debe proporcionar un tratamiento primario para eliminar los sólidos sedimentables (UN-HABITAT, 2008).

Según Tilley et al. (2018) el diseño del área superficial del humedal depende del objetivo de tratamiento y de la calidad y la cantidad del afluente. La eficiencia de remoción del humedal es una función del área de superficie (largo por ancho), mientras que el área transversal (ancho por profundidad) determina el flujo máximo posible.

Generalmente se requiere una superficie de 5 a 10 m² por persona, tomando en cuenta las aguas grises y aguas negras (Tilley et al, 2018). Para términos de este estudio, solo se contabilizan las aguas grises del lavavajillas, la pila y la lavadora, por lo que el área requerida por persona va a ser considerablemente menor

3.3.2.1. Dimensionamiento basado en una ecuación

Los humedales artificiales pueden ser diseñados utilizando la ecuación [1] propuesta por Kickuth:

$$A_h = \frac{Q_d(\ln C_i - \ln C_e)}{K_{DBO}} \quad [1]$$

Donde:

- A_h : área superficial (m²)
- Q_d : caudal promedio diario (m³/d)
- C_i y C_e : concentración de entrada y de salida (mg/L)
- K_{DBO} : tasa de degradación (m/d)

En este caso, el valor dado a la constante de salida C_e es establecido por la normativa nacional, se define que la concentración de vertido permitida es de 50 mg/l. La tasa de degradación K_{DBO} depende de la temperatura y del tipo de humedal, y por lo general aumenta un 10% por cada °C. Se ha demostrado que la K_{DBO} aumenta con la edad del sistema (UN-HABITAT, 2008). La Figura 10 muestra la K_{DBO} para un HFSSH como dependencia de la temperatura.

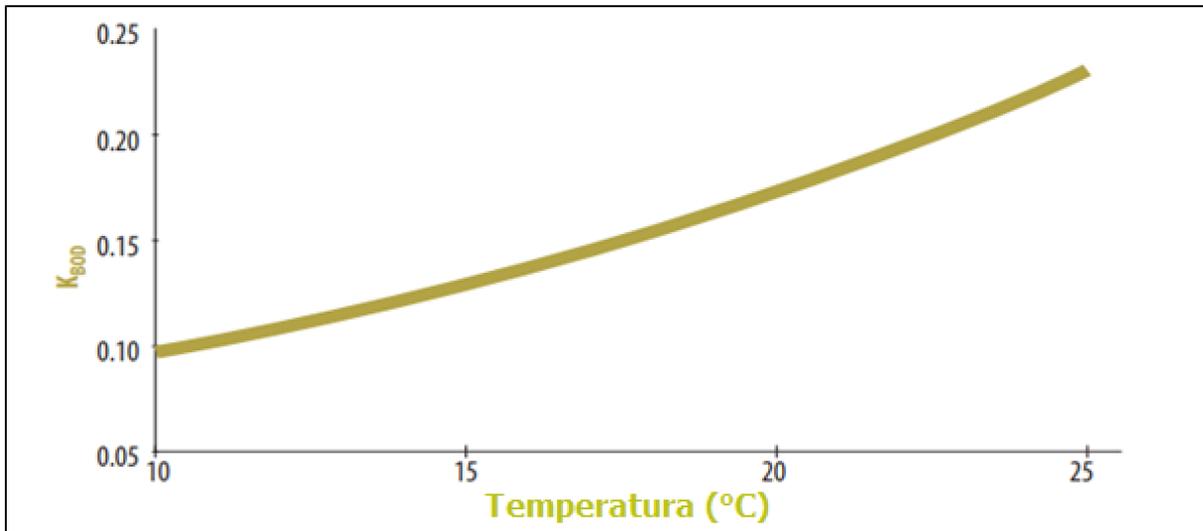


Figura 10. K_{DBO} para HFSSH dependiendo de la temperatura
Fuente: Modificado de UN-HABITAT, 2008.

En cuanto a la concentración de entrada, se deben realizar visitas al sitio, tomar las probetas y obtener su valor en el laboratorio. En algunos casos si no se cuenta con la disponibilidad de un laboratorio, se puede asumir un valor por persona de 40 gDBO/p/d y este se multiplica por la cantidad de personas que habitan la vivienda (Aguilar, 2019).

3.3.2.2. Dimensionamiento basado en un área específica requerida para una población equivalente

El requisito de área específica por población equivalente (PE) se cumple cuando existe uniformidad en la cantidad y calidad específicas de las aguas residuales. En general, las reglas empíricas sugeridas por varios trabajos pueden servir como cama segura (dependiendo de las condiciones climáticas). Es importante considerar que la inversión y costos tienden a ser más altos debido a los aspectos conservadores de este enfoque de diseño (UN-HABITAT, 2008).

Se puede observar en la Figura 11 que un requerimiento de área específica de 0.8 a 2 m²/per requerido de humedales construidos HF y un área específica de 0.3 a 1.5 m²/per para el Humedal VF.

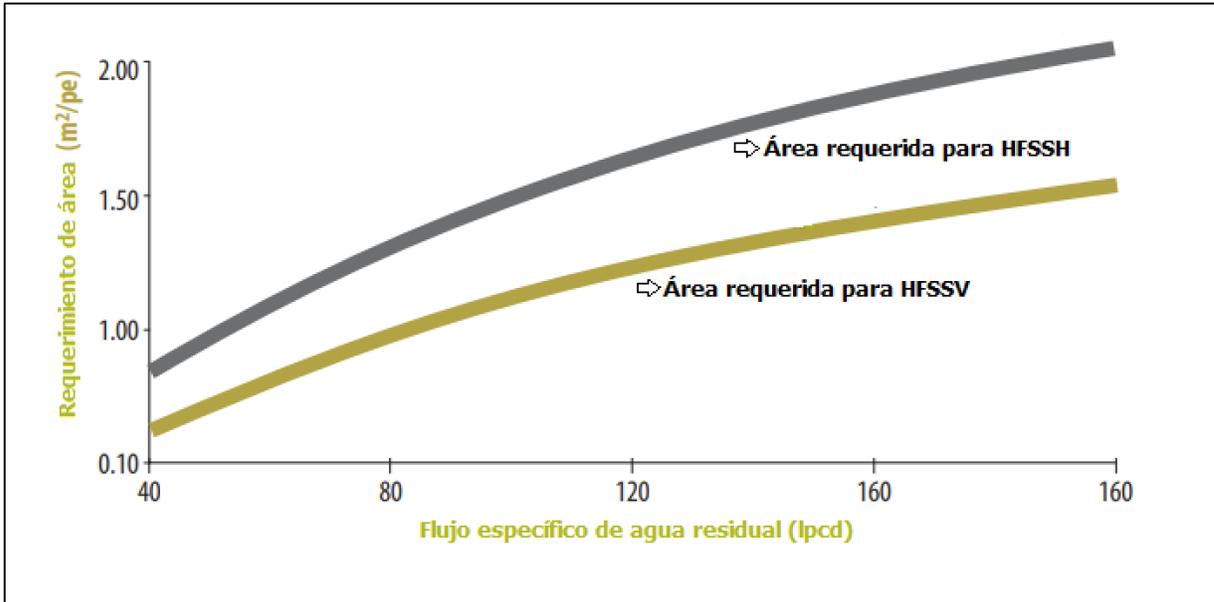


Figura 11. Requerimientos específicos por PE para HA para diferentes descargas
Fuente: Modificado de UN-HABITAT, 2008.

3.3.2.3. Profundidad

El espesor del lecho depende de la profundidad que puedan alcanzar las raíces de las macrófitas, pero un humedal de flujo subsuperficial típico presenta un espesor de lecho de 30 a 70 cm (CONAGUA 2015b). Sin embargo, el tiempo de retención hidráulica - TRH (tiempo las aguas residuales se retienen en el humedal) se debe considerar en la selección de la profundidad del humedal (UN-HABITAT, 2008).

La mayoría de los humedales HF en Europa proporcionan una profundidad de lecho de 60 cm (Cooper et al., 1996). En el Estados Unidos, los humedales HF se han diseñado comúnmente con lechos de 30 cm a 45 cm de profundidad (Steiner y Watson, 1993).

Un estudio experimental realizado en España mostró que los humedales HF someros con una profundidad media de 27 cm eran más efectivos que los humedales HF profundos con una profundidad de agua promedio de 50 cm. (García et al., 2004). Se recomienda utilizar una

profundidad media de 40 cm teniendo en cuenta la precipitación, que podría causar un flujo superficial (UN-HABITAT, 2008).

3.3.2.4. Sección transversal

El dimensionamiento del lecho se deriva de la ley de Darcy y debe proporcionar un flujo subterráneo a través de la grava en condiciones de flujo promedio. Dos suposiciones importantes han sido hecho al aplicar la fórmula: se puede usar gradiente hidráulico en lugar de pendiente, y la conductividad hidráulica se estabilizará en 10^{-3} m/s en el humedal establecido (UN-HABITAT, 2008). La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$A_c = \frac{Q_s}{K_f(dH/ds)} \quad [2]$$

Donde:

- A_c : área de la sección transversal (m^2)
- Q_s : caudal medio (m^3/s)
- K_f : conductividad hidráulica del lecho completamente desarrollado (m/s)
- dH/ds = pendiente de fondo (m/m)

Para gravas graduadas, normalmente se elige un valor de K_f de 1×10^{-3} a 3×10^{-3} m/s. En la mayoría de los casos, se utiliza dH/ds del 1%. No existe una regla estricta sobre el ancho óptimo del humedal, sin embargo, se recomienda que, si el ancho del humedal es mayor a 15 m, la celda del humedal debe dividirse para evitar un cortocircuito de las aguas residuales dentro del humedal (UN-HABITAT, 2008).

3.3.2.5. Material del medio filtrante

Como menciona UN-HABITAT (2008), el medio filtrante cumple varias funciones, ellos:

- Son material de enraizamiento para la vegetación
- Ayudan a distribuir/recolectar uniformemente el flujo en la entrada/salida
- Proporcionar un área de superficie para el crecimiento microbiano
- Filtran y atrapan partículas.

Las partículas muy pequeñas tienen una conductividad hidráulica muy baja y crean un flujo superficial. Las partículas muy grandes tienen una alta conductividad, pero tienen poca superficie mojada por unidad de volumen de hábitat microbiano. El medio grande y angular es enemigo de la propagación de raíces. Por lo que la mejora en el funcionamiento del medio filtrante radica en utilizar materiales de tamaño intermedio, generalmente caracterizados como gravas (UN-HABITAT, 2008).

Comúnmente, se usa como material filtrante grava pequeña, redonda y de tamaño uniforme (de 3 a 32 mm de diámetro) para llenar el lecho. Para limitar las obstrucciones, la grava debe estar limpia y libre de finos. También se puede usar arena, pero es más propensa a obstrucciones que la grava. En años recientes otros materiales de filtro alternativos, como PET (polietileno tereftalato), también se han usado con éxito (Tilley et al. 2018).

Se recomienda que el medio en las zonas de entrada y salida esté entre 40 y 80 mm de diámetro para minimizar la obstrucción y debe extenderse desde la parte superior hasta la parte inferior del sistema. Para la zona de tratamiento, no parece haber una clara ventaja en la eliminación de contaminantes con medios de diferentes tamaños en el rango de 10 a 60 mm (EPA, 2000). En la Figura 12 se puede observar la distribución del sustrato por tamaños recomendados.

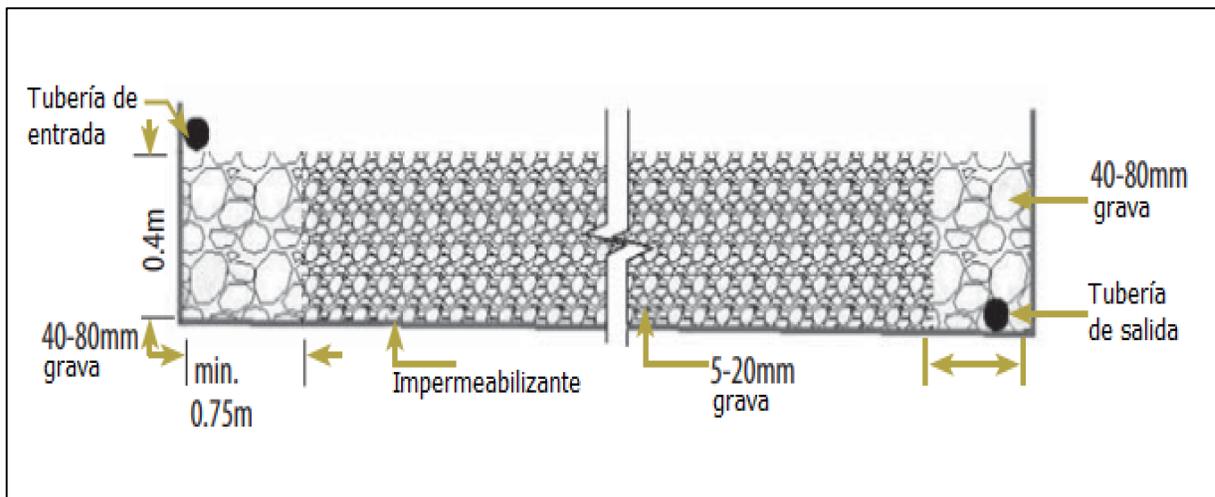


Figura 12. Recomendación para el sustrato en un HFSSH
Fuente: Modificado de UN-HABITAT, 2008.

3.3.2.6. Pendiente de suelo

La superficie superior del medio debe estar nivelada o casi nivelada para facilitar la siembra y la rutina de mantenimiento. En teoría, la pendiente del fondo debe coincidir con la pendiente del nivel del agua para mantener una profundidad de agua uniforme en todo el lecho (UN-HABITAT, 2008).

Un enfoque práctico es inclinar uniformemente el fondo a lo largo de la dirección del flujo desde la entrada hasta la salida para permitir un fácil drenaje cuando se requiere mantenimiento. No se han realizado investigaciones para determinar una pendiente óptima, pero se recomienda una pendiente de 0,5 a 1% para facilitar la construcción y un drenaje adecuado (CONAGUA 2015b).

3.3.2.7. Impermeabilización del suelo

Los humedales de flujo subterráneo que brindan tratamiento secundario deben revestirse para evitar el contacto directo entre las aguas residuales y las aguas subterráneas. Los revestimientos que se usan para los humedales son los mismos que se usan normalmente para los estanques (UN-HABITAT, 2008). Los suelos nativos se pueden usar para sellar los humedales si tienen un contenido de arcilla lo suficientemente alto como para conseguir la permeabilidad necesaria (Cooper, 1990).

Como guía general, las siguientes interpretaciones se pueden dar a los valores obtenidos para el coeficiente de permeabilidad obtenido in situ:

- $k > 10^{-6}$ m/s: el suelo es demasiado permeable y los humedales deben ser revestidos;
- $k > 10^{-7}$ m/s: puede ocurrir algo de filtración, pero no lo suficiente como para evitar que los humedales queden sumergidos;
- $k < 10^{-8}$ m/s: los humedales se sellarán naturalmente;
- $k < 10^{-9}$ m/s: no hay riesgo de contaminación de aguas subterráneas (si $k > 10^{-9}$ m/s y el agua subterránea se usa para suministros potables, es posible que se requieran estudios).

Algunos revestimientos sintéticos recomendados son: Cloruro de polivinilo (PVC), Polietileno (PE) y Polipropileno. También el suelo podría mezclarse con cemento Portland ordinario (8 kg/m²) para disminuir la permeabilidad del suelo y compactarse para sellar los humedales. Bentonita mezclada y compactada con los suelos nativos se ha utilizado en países desarrollados (UN-HABITAT, 2008).

Los revestimientos deben seleccionarse en función de su disponibilidad y rentabilidad. La preparación de la subrasante debajo del revestimiento es crucial para una instalación exitosa del revestimiento, la subrasante terminada no debe tener materiales que puedan perforar el revestimiento (UN-HABITAT, 2008).

3.3.2.8. Estructuras de entrada y salida

Las estructuras de entrada y salida se encargan de distribuir el flujo en el humedal, controlar la trayectoria del flujo a través el humedal y controlar la profundidad del agua. La estructura de entrada debe estar diseñada para minimizar el potencial de cortocircuito y obstrucción en los medios y maximizar la distribución uniforme del flujo, mientras que la estructura de salida debe estar diseñado para minimizar el potencial de cortocircuito, maximizar la recolección uniforme del flujo y permitir que el operador varíe el nivel de agua operativo y drene el lecho (UN-HABITAT, 2008).

- Estructura de entrada

Las estructuras de entrada en los humedales subterráneos incluyen colectores superficiales y subterráneos, como una tubería perforada, zanjas abiertas perpendiculares a la dirección del flujo, etc. Utilizar una sola entrada no sería adecuado para un humedal con celda ancha, ya que no sería posible lograr flujo uniforme a través de la celda (Tilley et al. 2018).

En general, los colectores perforados o ranurados que recorren todo el ancho del humedal se usan para las entradas. Tamaños de los colectores, diámetros de los orificios y espaciamiento son una función de la tasa de flujo de diseño (UN-HABITAT, 2008). Siempre que sea posible, el colector de admisión debe instalarse en una posición expuesta para permitir el acceso por el operador para el ajuste y mantenimiento del flujo (CONAGUA 2015b).

A continuación, se presentan tres configuraciones distintas para la estructura de entrada: tubo perforado sumergido, alimentación de gaviones y T giratoria. Estos sistemas se muestran gráficamente en la Figura 13 y Figura 14 respectivamente.

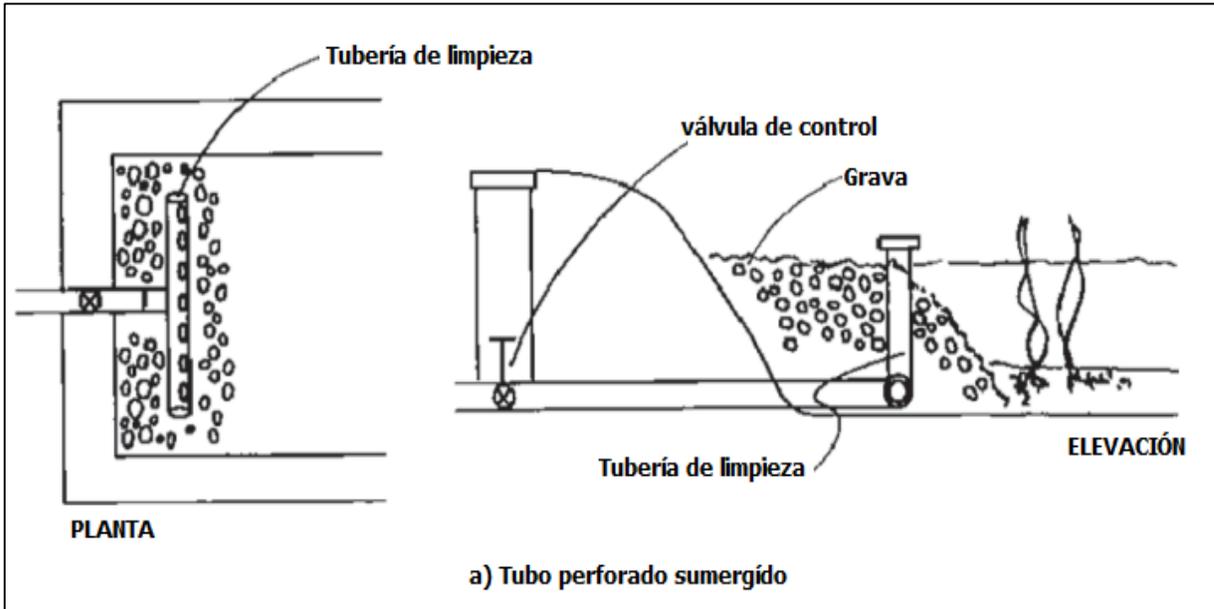


Figura 13. Sistema de entrada utilizando tubo perforado sumergido
Fuente: Modificado de EPA, 2000

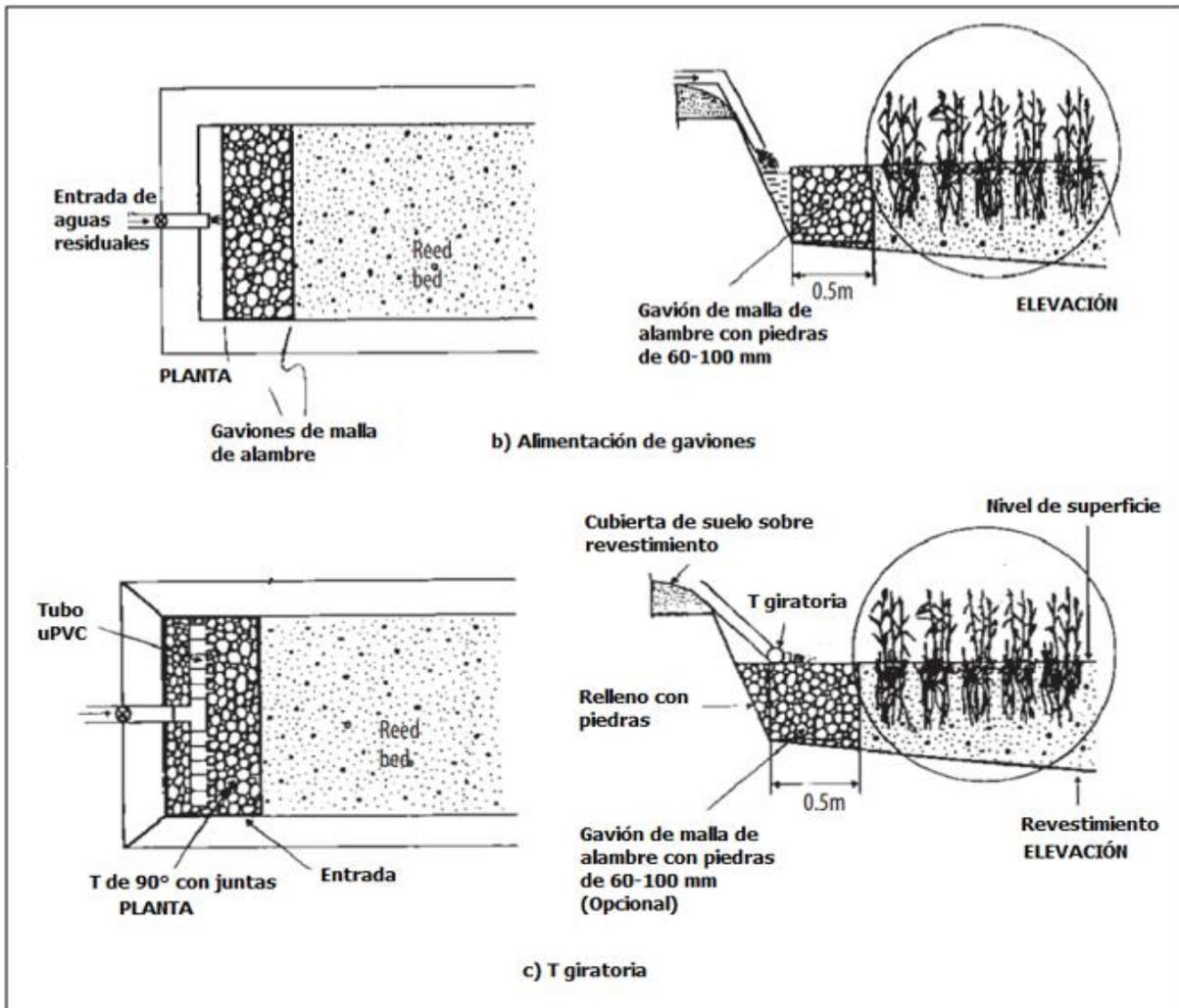


Figura 14. Sistemas de entrada
Fuente: Modificado de EPA, 2000

- Estructura de salida

Las estructuras de salida ayudan a controlar el flujo uniforme a través del humedal, así como la profundidad operativa. El nivel del agua en el humedal debe mantenerse de 5 a 15 cm por debajo de la superficie para garantizar el flujo subsuperficial (Tilley et al. 2018).

Un colector subsuperficial perforado conectado a una salida ajustable ofrece la máxima flexibilidad y confiabilidad como dispositivos de salida para humedales de flujo subterráneo. Esto puede ser un vertedero o compuerta ajustable, una serie de registros de parada o un codo giratorio (UN-

HABITAT, 2008). En la Figura 15 se muestran tres tipos de sistemas de salida: vertedero ajustable, seccional intercambiable y el arreglo de codo de 90°.

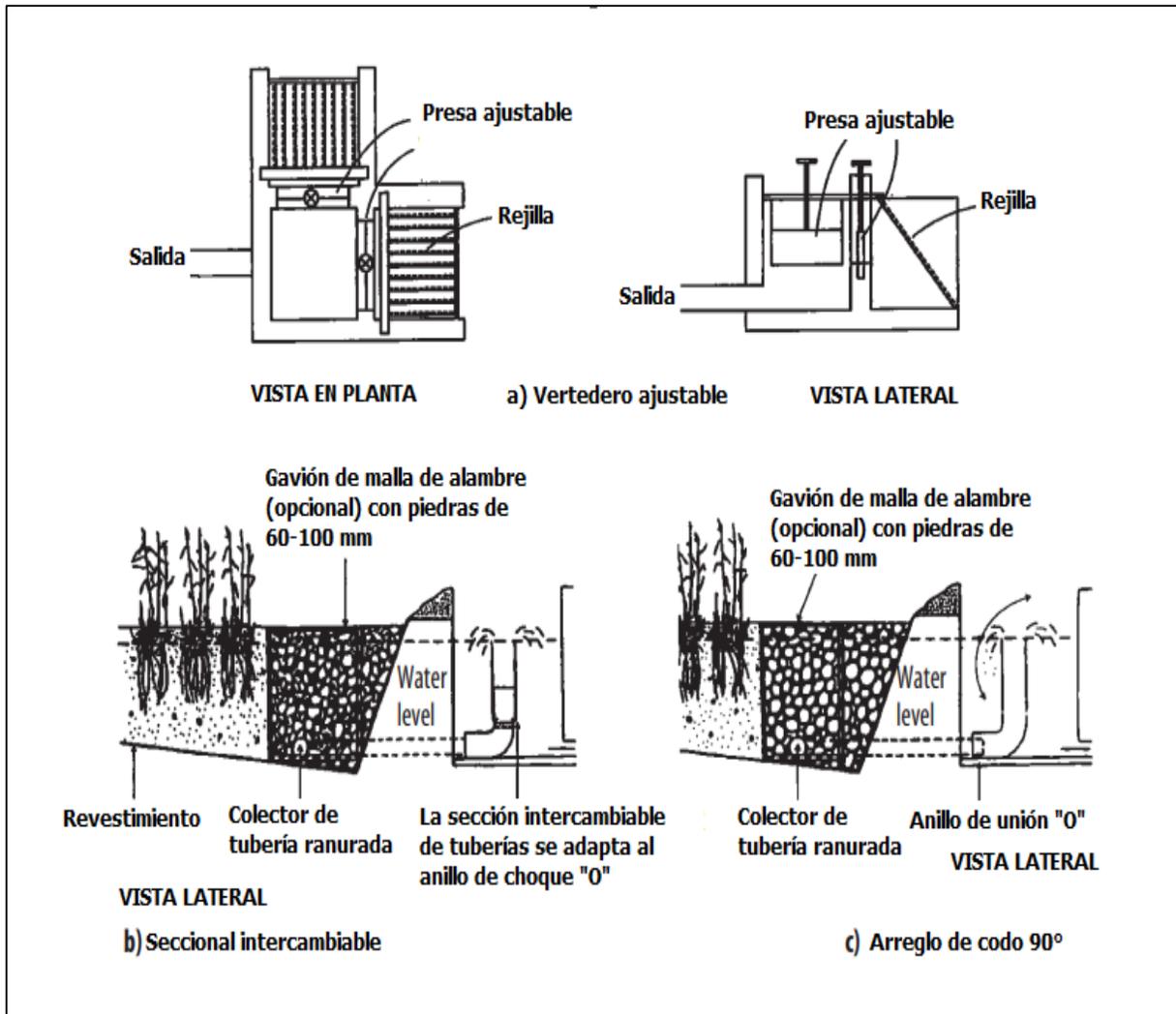


Figura 15. Sistemas de salida
Fuente: Modificado de EPA, 2000

Para sistemas pequeños de HFSSH, una alternativa económica para los dispositivos de salida es el uso de tubos de plástico flexibles que se pueden mantener en posición mediante una cadena o una cuerda, con el fin de controlar el nivel del agua (UN-HABITAT, 2008).

En la Figura 16 se muestran 4 tipos de configuraciones para el diseño de las entradas y salidas en los HA y como esto influencia la distribución del flujo de aguas dentro del sistema.

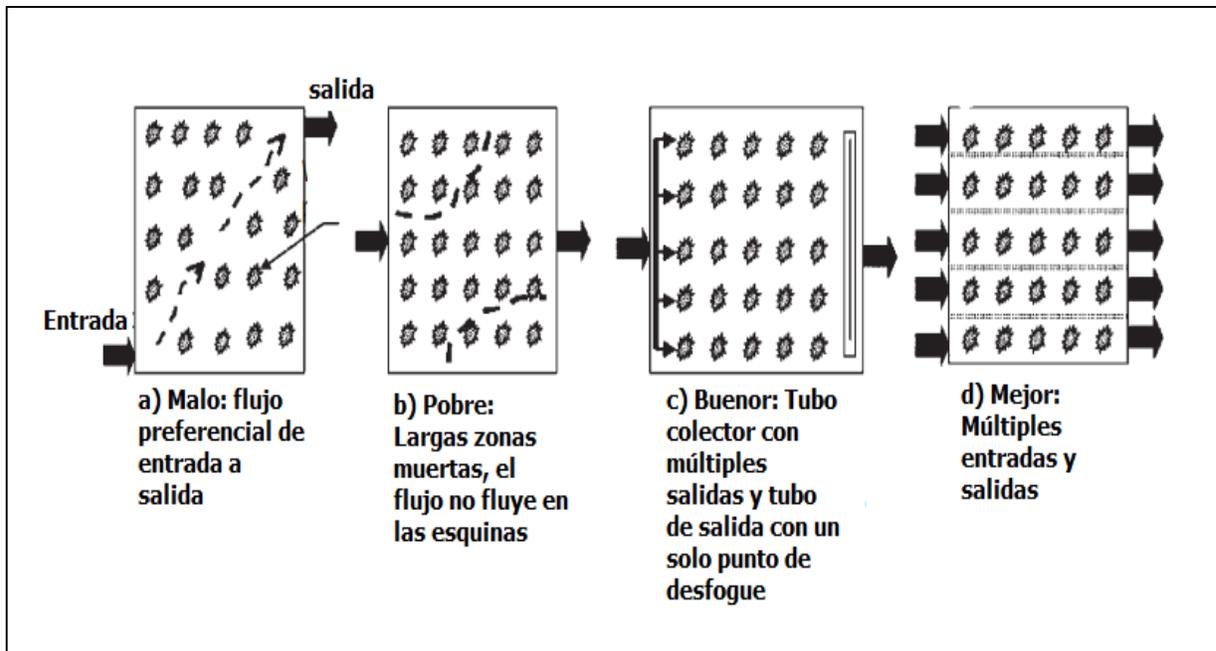


Figura 16. Efecto de la configuración en la distribución de flujo en HA
Fuente: Modificado de U.S.D.A, 2002.

3.3.2.9. Vegetación

La vegetación y su hojarasca son necesarios para el desempeño exitoso de los humedales construidos y contribuyen estéticamente a la apariencia del HA. Según UN-HABITAT (2008), en la selección de la vegetación que se plantará en los HA se debe tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Aplicación de especies macrófitas localmente dominantes
- Penetración profunda de la raíz, rizomas fuertes y raíz fibrosa maciza
- Densidades considerables de biomasa o de tallos para lograr la máxima translocación de agua y asimilación de nutrientes
- Área de superficie máxima para poblaciones microbianas
- Transporte eficiente de oxígeno a la zona de la raíz para facilitar la oxidación de metales tóxicos reducidos

La escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica ha utilizado dos tipos de plantas en los proyectos más recientes de HA que han tenido resultados positivos, estas

son: Avecilla (*Heliconia psittacorum*) y la salvia ornamental (*Salvia leucantha*) mostradas en la Figura 17.



Figura 17. Plantas utilizadas en los HFSSH

Durante la primera temporada de crecimiento, es importante eliminar las malas hierbas que puedan competir con la vegetación de humedal plantada. El mantenimiento también debe garantizar que no crezcan árboles en el área, ya que las raíces pueden dañar el revestimiento (TILLEY et al. 2018). La siembra se debe realizar cuando ya se haya introducido agua a los lechos (CONAGUA 2015b).

3.3.2.10. Operación y mantenimiento

El funcionamiento efectivo a largo plazo de los humedales artificiales depende del adecuado mantenimiento y control del sistema. Las actividades de mantenimiento deben centrarse en garantizar que el tratamiento primario sea eficaz para reducir la concentración de sólidos en las aguas residuales antes de que entren al humedal. Con el tiempo, la grava se obstruirá con sólidos acumulados y biopelícula bacteriana. El material de filtro en la zona de entrada requiere ser reemplazado al menos cada 10 años (TILLEY et al. 2018).

También debe tenerse en cuenta que es mejor utilizar al menos dos celdas paralelas en lugar de una sola celda de humedal por la facilidad en la operación y mantenimiento del humedal. El uso de una salida ajustable, que es recomendado para mantener un gradiente hidráulico adecuado en el lecho, también puede tener importantes beneficios en la operación y mantenimiento del humedal (UN-HABITAT, 2008). Las actividades de mantenimiento son sencillas pero importantes para garantizar el adecuado funcionamiento del humedal y la eficiente remoción de contaminantes.

3.4. Normativa

En el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales se debe tomar en cuenta la reglamentación pertinente en cada país. Estas reglamentaciones brindan parámetros que permiten orientar el diseño y verificar el cumplimiento de las características esperadas para el vertido de las aguas residuales tratadas a un cuerpo receptor.

En el caso de Costa Rica, el Reglamento de Vertido y Reúso de las Aguas Residuales (DE-33601-s-MINAE) brinda los parámetros para el adecuado manejo de las aguas residuales vertidas en el territorio nacional. En el Artículo 18 y 20 se muestran los límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en alcantarillados sanitarios y cuerpos receptores, respetivamente. En el Cuadro 4 se muestran los límites a cumplir en el país.

Cuadro 4. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en alcantarillado sanitario y en un cuerpo receptor

Parámetro	Alcantarillado sanitario	Cuerpo receptor
DBO ₅ (mg/l)	300	50
DQO (mg/l)	750	150
Sólidos suspendidos (mg/l)	300	50
Sólidos sedimentables (ml/l)	5	1
Grasas/aceites (mg/l)	50	30
Potencial hidrógeno (pH)	Entre 6 a 9	Entre 5 a 9
Temperatura (°C)	Entre 15 a 40	Entre 15 a 40

Fuente: Modificado de Reglamento DE-33601-s-MINAE

A nivel nacional, no se tienen establecidos los límites para los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo en el vertido de aguas residuales domésticas, por lo cual se consulta la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT AT-2021, en donde se establecen los límites permisibles para estos parámetros. Para el vertido en ríos el agua residual debe cumplir con un valor promedio diario de 30 mg/l para el Nitrógeno total y de 18 mg/l para el fósforo, según dicha norma.

También se cuenta con el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (DE-39887-s-MINAE) el cual tiene como objetivo la protección de la salud pública y del ambiente mediante la gestión racional y ambientalmente adecuada de las aguas residuales. En este reglamento se establecen ciertos requisitos como permisos de ubicación y de construcción para estos sistemas.

En el artículo 5 se establece que para humedales artificiales el retiro a linderos de propiedad debe ser de 20 m. En el artículo 9 se menciona que se exceptúa de la aplicación de los retiros establecidos, cuando el sistema se localice dentro de una propiedad bajo el régimen de propiedad horizontal. Lo anterior es de relevancia ya que, si se quiere considerar hacer un sistema centralizado, se debe tomar en cuenta los retiros establecidos en dicha ley, mientras que los sistemas individuales no.

En la Norma Técnica para Diseño y Construcción de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, Saneamiento y Pluvial (2021), se detallan los pasos a seguir para determinar parámetros como la población de diseño, caudales de diseño y capacidades del sistema.

La norma indica que la población de diseño se calcula a partir del número de unidades habitacionales involucradas en el proyecto multiplicado por el factor de hacinamiento, el cual corresponde al valor que se obtiene del último censo de población del distrito. En caso de que el proyecto contemple unidades que no son habitacionales, se aplica el cálculo "Unidad de consumo equivalente (UCE) o Servicios equivalentes (SE)" según el Cuadro 5.

Cuadro 5. Cálculo de Servicios Equivalentes según tipo de actividad a desarrollar

Tipo de actividad del nuevo desarrollo	Unidades de cálculo	Unidad de consumo equivalente (UCE) o Servicios equivalentes (SE) *
Hoteles, Moteles	Habitación	Un servicio Equivalente por cada 3 Unidades de Cálculo
Escuelas, colegios o centros de educación y capacitación	centros de educación y capacitación Estudiante	Un servicio Equivalente por cada 25 Unidades de Cálculo
Bodegas, industrias o centros de acopio, almacenamiento y distribución	Metro cuadrado de área de parcela o predio (incluyendo parqueos y áreas verdes, excluyendo áreas de protección de ríos y quebradas)	Un servicio Equivalente por cada 500 Unidad de Cálculo
Restaurantes, sodas Bares y similares	Metro cuadrado de área de parcela o predio. (incluyendo parqueos y áreas verdes, excluyendo áreas de protección de ríos y quebradas)	Un servicio Equivalente por cada 100 Unidad de Cálculo
Locales comerciales, Centros comerciales, oficinas administrativas y bancarias (industrial o general)	Metro cuadrado de área de parcela o predio incluyendo parqueos y áreas verdes, excluyendo áreas de protección de ríos y quebradas	Un servicio Equivalente por cada 200 Unidad de Cálculo
Parcelamiento agrícola con frente a calle pública	Metro cuadrado del área de parcela	Un servicio Equivalente por cada 500 Unidades de Cálculo
Parcelamiento agrícola con frente a servidumbre	Metro cuadrado del área de parcela	Un servicio Equivalente por cada 5000 Unidades de Cálculo
Centros de recreación, turísticos o club campestre	Metro cuadrado de área de parcela o promedio (incluyendo parqueos y áreas verdes, excluyendo áreas de protección de ríos y quebradas)	Un servicio Equivalente por cada 200 unidades de Cálculo

Fuente: Norma técnica, 2021

Esta norma también indica que en caso de que la actividad a desarrollar no esté dentro de la clasificación indicada en el Cuadro 5, se debe entregar al AyA una propuesta para el cálculo de servicios equivalentes, aportando la documentación referente.

En el caso de los proyectos individuales, la norma no indica el procedimiento a seguir para calcular la población de diseño, sin embargo, ya conoce el número de habitantes por vivienda en la presente investigación, se utiliza dicho valor para el diseño de los HFSSH.

Además, se establece que en los sistemas de tratamiento de aguas residuales se debe presentar para la aprobación del diseño, un plan de contingencias ante situaciones que afecten la operación continua del sistema y el mantenimiento, específicamente en los siguientes casos:

- Fallo de energía eléctrica
- Obstrucción en algún dispositivo
- Cambio de partes o componentes o de la totalidad de sistema, tanto en el caso de los sistemas domiciliarios como cuando se utilice uno general en el condominio.

Esto ya que no se permiten rebales de aguas residuales en este tipo de sistemas. Adicionalmente, se debe presentar un programa de mantenimiento preventivo y correctivo.

A pesar de los humedales artificiales mejoren la calidad de las aguas grises que se disponían sin tratamiento previo, se debe considerar que se tienen sistemas irregulares y es importante lograr la regulación de estos procesos.

3.5. **Determinaciones analíticas en el diseño de los HFSSH**

Se realizan determinaciones analíticas tanto de parámetros de diseño de los HFSSH, como de los procesos realizados para obtener los valores de relevancia de las pruebas de laboratorio. En este último punto, se incluyen la determinación del Nitrógeno y el Fósforo total.

3.5.1. Caudales de diseño

Se considera, para el cálculo del caudal promedio diario de agua potable, las siguientes dotaciones netas que varían según el tipo de población, estas incluyen un factor por subregistro, los valores se muestran en el Cuadro 6 a continuación:

Cuadro 6. Dotaciones según tipo de población

Dotaciones	l/p/d
Poblaciones rurales	170
Poblaciones urbanas	200
Poblaciones costeras	225
Área Metropolitana	200

Fuente: Norma Técnica, 2021.

Según la norma nacional mencionada, el caudal promedio de agua residual, tipo ordinario, se debe calcular aplicando la siguiente fórmula:

$$Q_{paro} = FR * Q_{pap} \quad [3]$$

Dónde:

- Q_{paro} : Caudal promedio de agua residual tipo ordinario
- FR: Factor de retorno (0,80)
- Q_{pap} : Caudal promedio diario de agua potable

Para obtener el Q_{pap} se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{pap} = \frac{P * DOT}{86400} \quad [4]$$

Donde:

- Q_{pap} : Caudal promedio diario de agua potable (l/s)
- P: Población o habitantes
- DOT: dotación (l/p/d)

Si se desean conocer los caudales máximos de diseño, ya sea el caudal máximo diario (QMD) y/o el caudal máximo horario (QMH) para aguas residuales, se utilizan las ecuaciones [5] y [6] mostradas a continuación:

$$QMD = Q_{paro} * FMD \quad [5]$$

$$QMH = Q_{paro} * FMH \quad [6]$$

Donde:

- QMD: Caudal Máximo Diario (l/s)
- QMH: Caudal Máximo Horario (l/s)
- Q_{paro} : Caudal promedio de agua residual tipo ordinario
- FMD: Factor Máximo Diario (1,2)
- FMH: Factor Máximo Horario (1,8)

3.5.2. Concentración de Nitrógeno y fósforo total

En los análisis de laboratorio se realizan las pruebas de nitrito, nitrato, amoniacal y fósforo. Tanto el valor del nitrógeno como del fósforo se presentan en compuestos, por lo que los datos obtenidos por prueba se deben de procesar en búsqueda de obtener el nitrógeno y el fósforo total, valores que se pueden comparar con la normativa. Primero se debe definir la masa atómica de los elementos presentes en los compuestos obtenidos, estos valores se obtienen de la tabla periódica y se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Masa atómica de los elementos de estudio

Elemento	Masa atómica (g/mol)
H	1
N	14
P	31
O	16

Fuente: Chang, R. 2013

Seguidamente se define la masa molar por compuesto. La masa molar también conocida como masa fórmula o peso molecular corresponde a la cantidad de masa de un mol de partículas, átomos o moléculas y su unidad de medida es el gramo por mol. En un compuesto la masa molar es igual a la suma del peso o masa atómica de sus átomos multiplicados por la cantidad de moléculas presentes (Chang, R. 2013). Un ejemplo para la obtención de la masa molar del nitrito (NO_2^-) se muestra a continuación:

Compuesto	Fórmula	Masa molar (g/mol)
NO_2	$1 \text{ mol N} * 14 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{N} + 2 \text{ mol O} * 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{O} = 46 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ de } \text{NO}_2$	46

Para obtener la concentración de cada elemento presente en los compuestos, se utiliza la siguiente fórmula:

$$[E] = (RL) * \frac{1}{Mm} * Mec * Ma \quad [7]$$

Donde:

- [E]: Concentración del elemento (mg/L)
- RL: Resultado obtenido en el laboratorio (mg/L)
- Mm: Masa molar del compuesto (g/mol)
- Mec: Moles del elemento presentes en el compuesto (mol)
- Ma: Masa atómica del elemento (g/mol)

Si se desea conocer más sobre este tema, se puede consultar en anexos el procedimiento realizado para obtener las concentraciones de los compuestos estudiados.

3.5.3. Eficiencia de remoción

La mayoría de los constituyentes de la calidad del agua se pueden producir y remover en un sistema de tratamiento, y en ocasiones se desconoce el aporte individual de cada uno de estos factores porque solo se tienen valores medidos de las concentraciones de afluentes y efluentes. En este caso, sólo se puede inferir la reducción global de la concentración del constituyente y no se puede inferir nada sobre el equilibrio entre la producción y la eliminación (Sperling et al. 2020). En la presente investigación, se hace muestreo únicamente del afluente y el efluente por lo que los valores reportados representan valores globales.

La eficiencia de remoción de un determinado constituyente en una planta de tratamiento o unidad de tratamiento se reporta frecuentemente como el porcentaje (%) de eficiencia de eliminación (Sperling et al. 2020).

La eficiencia de remoción viene dada por el conocido concepto descrito en la siguiente fórmula:

$$E = \frac{C_{entrada} - C_{salida}}{C_{entrada}} = 1 - \frac{C_{salida}}{C_{entrada}} \quad [8]$$

Donde:

- E: eficiencia de remoción
- $C_{entrada}$: Concentración en la entrada
- C_{salida} : Concentración en la salida

Si se desea expresar la eficiencia de remoción en porcentaje, se debe multiplicar el valor obtenido con la ecuación [8] por 100:

$$E = \left(\frac{C_{entrada} - C_{salida}}{C_{entrada}} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{C_{salida}}{C_{entrada}} \right) \times 100 \quad [9]$$

Las unidades de concentración deben ser las mismas para la $C_{entrada}$ y para la C_{salida} , estas son expresadas comúnmente en: mg/L, g/m³ y µg/L. En el caso de los HA, normalmente se debe considerar la influencia de la pérdida de agua que ocurre ya sea por evapotranspiración o evaporación, sin embargo, al no tener disponibles los valores de los caudales de entrada y salida, no se conoce la diferencia en las cargas, por lo cual en este estudio no se toman en cuenta estas pérdidas.

A partir de la ecuación [9], se pueden tener las siguientes situaciones con respecto a la eficiencia de remoción:

- Si $C_{entrada} = 0 \rightarrow E(\%) = \text{error}$ (no se puede tener denominador cero)
- Si $C_{salida} = 0 \rightarrow E(\%) = 100$
- Si $C_{salida} < C_{entrada} \rightarrow E(\%) > 0$
- Si $C_{salida} = C_{entrada} \rightarrow E(\%) = 0$
- Si $C_{salida} > C_{entrada} \rightarrow E(\%) < 0$

El caso en el que la eficiencia de remoción sea igual a cero, se indica que se tiene un incremento en la concentración debido a un crecimiento o producción del parámetro analizado dentro del

proceso de tratamiento. Sperling et al (2020) también menciona que cuando se obtienen valores de las concentraciones de afluentes y efluentes, solo se pueden hacer inferencias sobre la reducción general en la concentración entre la entrada y la salida.

Sin embargo, a menos que se realicen estudios específicos, no se puede decir si hubo remoción y producción simultáneas del constituyente en el sistema de tratamiento, y si la reducción obtenida es simplemente el resultado del efecto combinado de los factores en el balance de masa (producción: término positivo; remoción: término negativo). En un balance de masa amplio de constituyentes en un sistema de tratamiento, se podría pensar en el concepto de conversión: algunos constituyentes pueden convertirse en otros, y, mientras se extraen (o consumen), pueden convertirse en otro constituyente que se produciría (Sperling et al, 2020).

3.6. Cálculos estadísticos para el análisis de datos

Se calculan los valores medios, máximos y mínimos, las desviaciones estándar y los coeficientes de variación (CV) para cada una de las viviendas en cada uno de los muestreos. Además se determinan los mismos parámetros contabilizando todos los valores para obtener una idea más generalizada de las eficiencias y concentraciones del sistema de tratamiento.

3.6.1. Media aritmética

La media aritmética de una muestra de una muestra de n mediciones x_1, x_2, \dots, x_n es el promedio de las mediciones. Una serie de mediciones individuales viene dada por:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [10]$$

Donde:

- x = media aritmética de la concentración del constituyente
- n = número de observaciones
- x_i : concentración media del constituyente durante el i -ésimo periodo de tiempo.

3.6.2. Mediana

Según Mendenhall & Sincich (1988), la mediana de una muestra de n mediciones x_1, x_2, \dots, x_n es el número del medio cuando las mediciones están dispuestas en orden ascendente (o descendente), es decir, el valor de x ubicado de manera que la mitad del área bajo la curva de distribución de frecuencias quede a su izquierda y la mitad del área que se encuentra a su derecha.

En la Figura 18 se puede observar la interpretación del promedio y de la mediana para una distribución de frecuencias típica encontrada en cuerpos de agua y en monitoreos en plantas de tratamiento.

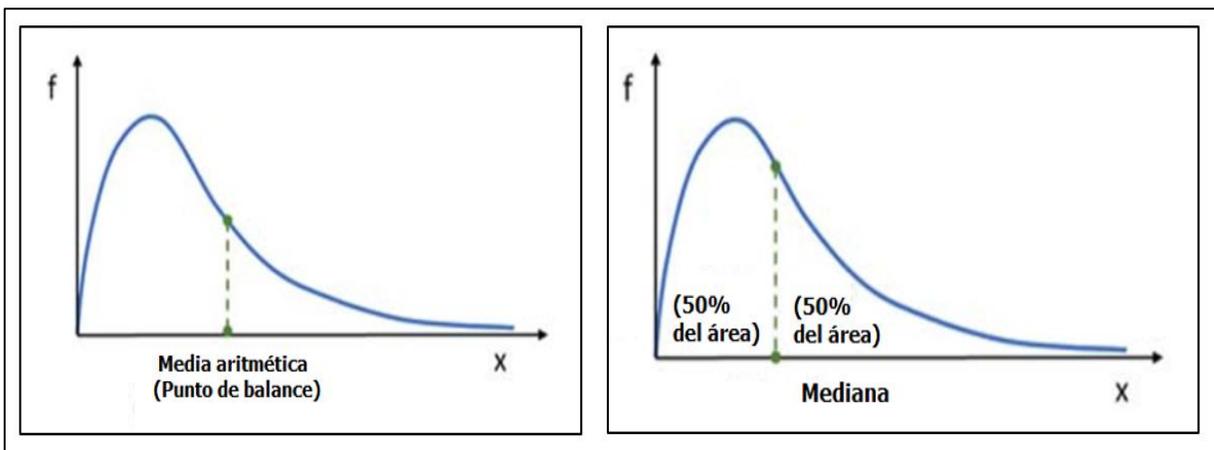


Figura 18. Promedio y mediana de una distribución de frecuencias
Fuente: Modificado de Sperling, 2020.

Conocer la variabilidad de los datos alrededor del valor central de las muestras viene dado por las medidas de variación o dispersión. Entre las cuales se encuentra la desviación estándar y el coeficiente de variación.

3.6.3. Desviación estándar

La desviación estándar es un indicador de que tan dispersos están los datos de una muestra con respecto a la media. A mayor valor de desviación estándar, mayor dispersión en los datos. En el caso de sistemas de tratamiento de aguas residuales, la desviación estándar tiende a ser

alta debido a la heterogeneidad de los datos, donde es normal encontrar valores mayores a 100 en algunos parámetros como los SST (Sperling et al, 2020). Se utiliza la siguiente ecuación para calcular el valor de la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{x})^2 + (X_2 - \bar{x})^2 + \dots + (X_n - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad [11]$$

Si se conocen los valores de la media y la desviación estándar de un conjunto de datos, se pueden definir los siguientes intervalos en la función de densidad de probabilidad normal:

- Intervalo entre $\bar{x} \pm 1s \cong 68\%$ de los datos son representados en este intervalo
- Intervalo entre $\bar{x} \pm 2s \cong 95\%$ de los datos son representados en este intervalo
- Intervalo entre $\bar{x} \pm 3s \cong 99\%$ de los datos son representados en este intervalo

3.6.4. Coeficiente de variación

Se utiliza el coeficiente de variación (CV) cuando se desea comparar la variabilidad o dispersión de dos o más muestras (iguales o diferentes variables), el cual se obtiene como resultado de la división entre la desviación estándar y la media (Mendenhall & Sincich, 1988).

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{\text{Desviación estandar}}{\text{Media aritmética}} \quad [12]$$

El coeficiente de variación puede ser expresado como un valor relativo (utilizando la ecuación [12]) o multiplicado por 100 para ser expresado como porcentaje (%). Se debe tener en cuenta que el CV puede ser mayor que 100% en caso de que la desviación estándar sea mayor que la media, lo que no es poco frecuente en sistemas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en variables que tienen un amplio rango de variación (Sperling et al, 2020).

3.6.5. Medidas de posición relativa

La forma más habitual de informar las posiciones relativas es utilizando el concepto de percentiles. Un percentil es una medida de la posición relativa de una unidad de observación en relación con todas las demás. El percentil (p^{th}) tiene al menos p % de los valores por debajo de ese punto y al menos $(100 - p)$ % de los valores por encima de él (Mendenhall & Sincich, 1988). Los percentiles utilizados con mayor frecuencia en la caracterización de una muestra son:

- Percentil 25, significa que el 25 % de los datos tienen un valor menor o igual a este valor. Llamado primer cuartil (Q1).
- Percentil 50, significa que el 50% de los datos tienen un valor menor o igual a este valor. Llamado segundo cuartil (Q2). Es lo mismo que la mediana.
- Percentil 75, significa que el 75% de los datos tienen un valor menor o igual a este valor. Llamado tercer cuartil (Q3).

4. Metodología

La metodología a seguir para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura :

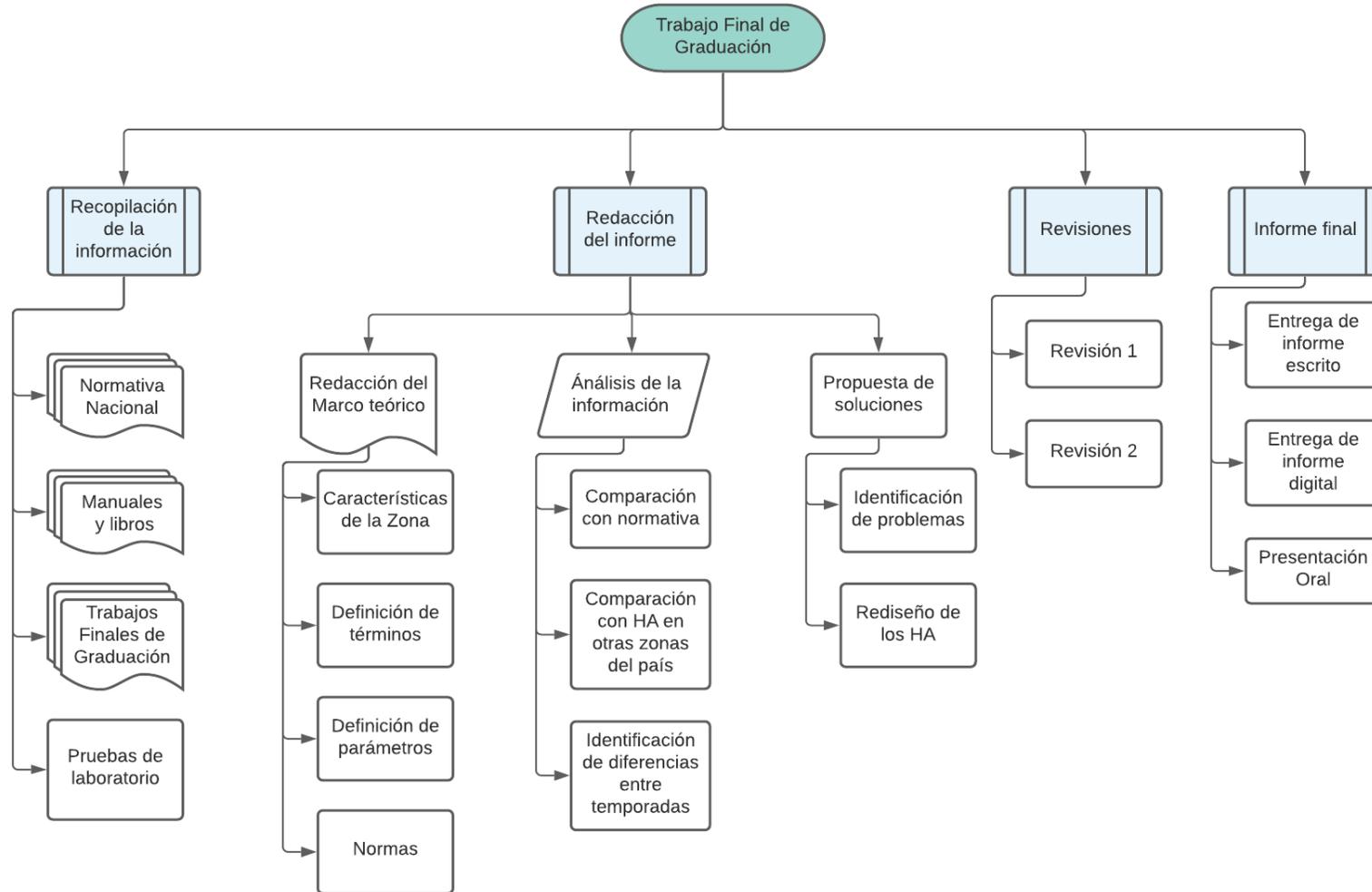


Figura 19. Diagrama de flujo del proyecto

4.1. Recopilación de la información referente

En esta etapa se recopiló la información teórica pertinente, incluyendo revisión de conceptos sobre el funcionamiento y aplicación de los humedales artificiales, tanto en el país como en el mundo. Se hace una revisión de la normativa nacional e internacional en donde se definen los límites máximos permitidos para los parámetros de interés.

Además del análisis de trabajos finales de graduación realizados en otras zonas del país para comparar las eficiencias, las cuales dependen del área de construcción, técnicas empleadas, materiales utilizados, entre otros parámetros. Se incluye información sobre estudios realizados a nivel mundial en donde se comparan factores de relevancia, como por ejemplo la eficiencia de algunas plantas en la remoción de nutrientes y el comportamiento de los humedales en distintas épocas del año.

4.2. Toma de muestras y pruebas de laboratorio

La primera visita al sitio se realizó el 16 de setiembre del 2021 en donde un miembro de la Asociación Pital Verde explicó a la comunidad el proyecto de investigación a realizar y se visitaron las 3 viviendas con HFSSH a estudiar.

Para la caracterización y análisis de las muestras tomadas en campo en cada HFSSH se realiza la toma de probetas de 2L, una en la entrada y otra en la salida del sistema, con lo que se tuvieron 6 probetas en total por cada visita al sitio, esto cuando todos los HFSSH se encontraban en funcionamiento. En dos de las visitas se tuvo en funcionamiento un solo HFSSH por lo que se realizó el muestreo y se obtuvieron únicamente 2 probetas.

Las probetas se conservaron en condiciones de temperaturas menores o igual a los 20 °C en el traslado al laboratorio utilizando dos hieleras medianas y cubriendo las muestras con hielo, como se muestra en Figura 19. En el laboratorio se guardaron dentro de los enfriadores disponibles hasta que se realizaron las pruebas pertinentes. Se realizaron 7 visitas al sitio desde Setiembre hasta Marzo, sin embargo, en los meses de noviembre y febrero, en los días de

visita se tuvieron condiciones climáticas de fuertes lluvias por lo cual la toma de muestras no se realizó.



Figura 19. Traslado de las muestras al laboratorio

Con las probetas en el laboratorio, se procedió a realizar las pruebas para la determinación de los parámetros de interés. En la prueba de Nitrato, nitrito y nitrógeno amoniacal se utilizó el colorímetro DR/700 de la marca HACH y en la prueba de fósforo se utilizó el espectrómetro portable DR1900 de la misma marca. En todos los casos los reactivos utilizados fueron de la marca PERMACHEM REAGENTS. Para la realización de estos procedimientos se siguieron los lineamientos de los métodos mostrados en el Cuadro 8 mostrado a continuación:

Cuadro 8. Características de los métodos empleados para el análisis físico-químico de las muestras de agua

Parámetro	Método
SST	APHA 2540D
N-NH4	ISO 7150/1
N-NO2	APHA 4500-NO2
N-NO3	APHA 4500-NO3
P-PO43-	APHA 4500-P
DQO	APHA 5220
DBO	APHA 5210

Para la determinación del DBO se utilizó el equipo HATCH BODTrak, además de utilizaron pastillas de hidróxido de sodio e imanes los cuales mantuvieron en movimiento el agua de las probetas por los 5 días que duró el análisis, como se explica en el procedimiento APHA 5220. En la determinación del DQO se hizo uso del espectrofotómetro marca ORION AQUAMATE 8000. Se diluyó 1 ml de muestra en el reactivo dicromato de potasio HR+ de la marca HACH.

En la obtención del Nitrógeno total se procedió a realizar un análisis de los valores obtenidos tanto de nitrito, nitrato y amoniacal. En este caso se calculó la cantidad de nitrógeno en cada compuesto y se sumó para obtener el valor total, el mismo procedimiento se realizó para la obtención del fósforo total, los procedimientos seguidos se pueden consultar en anexos, Parámetros generales de diseño.

4.3. Análisis de los resultados

Para el análisis de los resultados se ordenó la información en cuadros comparativos en donde se muestran los valores de entrada y salida de las muestras de las aguas residuales obtenidos para cada HFSSH en las viviendas estudiadas, con esto se procedió a obtener la eficiencia de cada sistema para los diferentes periodos de análisis.

Mediante el uso de gráficos se logró observar de manera más simple el comportamiento de los humedales en el periodo de estudio. Se obtuvo la media, la mediana, la desviación estándar y el coeficiente de variación; valores utilizados para medir el comportamiento de los parámetros analizados en los HFSSH y la dispersión de los mismos.

4.4. Recomendaciones de mejora de diseño

Con forme se fueron realizando las visitas al sitio, se encontraron distintos factores que hacen que el funcionamiento de los HFSSH se vea afectado. El primer problema que se observó fue que, si se conectaba el desagüe de las aguas jabonosas de la lavadora al sistema preliminar de trampa de grasa y desarenador, estos sistemas sobrepasan su capacidad y el agua se rebasa, por lo que se modifica el diseño inicial y se separan las aguas jabonosas de las provenientes de la pila y el lavavajillas.

Se observa que la limpieza de los sistemas preliminares debe ser más continua ya que las aguas residuales que ingresan vienen con altos contenidos de materia orgánica los cuales disminuyen la eficiencia en la remoción ya que no se tiene suficiente tiempo de retención para que los sólidos suspendidos y las grasas puedan separarse de manera adecuada.

Pese a las recomendaciones brindadas por el Ingeniero Ronald Aguilar, el diseño de los sedimentadores y las trampas de grasa se realizó por parte de los dueños de las casas en estudio de manera inadecuada, por lo que se procede a presentar el diseño utilizado in situ versus el diseño recomendado en la parte de análisis de resultados en este documento.

Se observó que al final del tratamiento, no se tuvo un adecuado sistema de medición, ya que no se dejaron puntos de muestreo, por lo que se realizaron las mediciones de manera incomoda, lo cual generó problemas en la rapidez de la toma de probetas y además, se promovió la contaminación de las mismas debido a que algunas muestras se tomaron de la salida al caño.

5. Resultados y discusión

5.1. Visitas al sitio

Se trabajó con tres viviendas clasificadas con las letras A, B y C en las cuales se tomaron muestras a la entrada (afluente) y la salida (efluente), las cuales se identificaron tal como se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Identificación de las viviendas visitadas y las muestras

Vivienda	Muestra entrada	Muestra salida
A	M1	M2
B	M3	M4
C	M5	M6

La cantidad de habitantes por vivienda se muestran en el Cuadro 10 a continuación:

Cuadro 10. Personas representantes y habitantes por vivienda

Vivienda	Habitantes
A	6
B	3
C	2

En total se realizaron 5 visitas al sitio, las cuales se muestran por fecha en el Cuadro 11. El inicio de los muestreos fue en setiembre del 2021 y finalizó en marzo del 2022. En los meses de noviembre y febrero no se logró la toma de las probetas debido a que se presentaron fuertes aguaceros.

Cuadro 11. Fechas de visitas al sitio

Visita al sitio	Fecha
1	16 de setiembre del 2021
2	26 de octubre del 2021
3	05 de diciembre del 2021
4	19 de enero del 2022
5	05 de marzo del 2022

En las visitas se tomaron las muestras de entrada en el sedimentador y las de salida en el tubo que se encuentra al final de todo el sistema de la biojardinera, el cual desfoga en el caño. En la Figura 20, Figura 21 y Figura 22 se muestran las biojardineras y el estado del sedimentador y/o la trampa de grasa para la vivienda A, B y C respectivamente.

La vivienda A cuenta con dos estañones de 60 litros cada uno, en donde el primero sirve como trampa de grasas y el segundo como sedimentador, ambas etapas son preliminares. En la Figura 20 se tiene el estado inicial de este HFSSH, se puede observar que desde el inicio de la investigación la trampa de grasas para esta vivienda tiene altos niveles de materia orgánica acumulada.



Figura 20. Estado inicial del HFSSH y trampa de grasa de la vivienda A

La vivienda B tiene un diseño general bastante similar al de la vivienda A, utilizando dos estañones de la misma capacidad que funcionan como sistema preliminar (ver Figura 21). En este caso se tiene más espacio libre a los lados del humedal lo cual permite una mayor facilidad para la toma de muestras y para el mantenimiento del sistema.

El estado de la trampa de grasas y del sedimentador al inicio se encuentra en mejores condiciones en comparación a la vivienda A con menor materia orgánica suspendida visible acumulada.

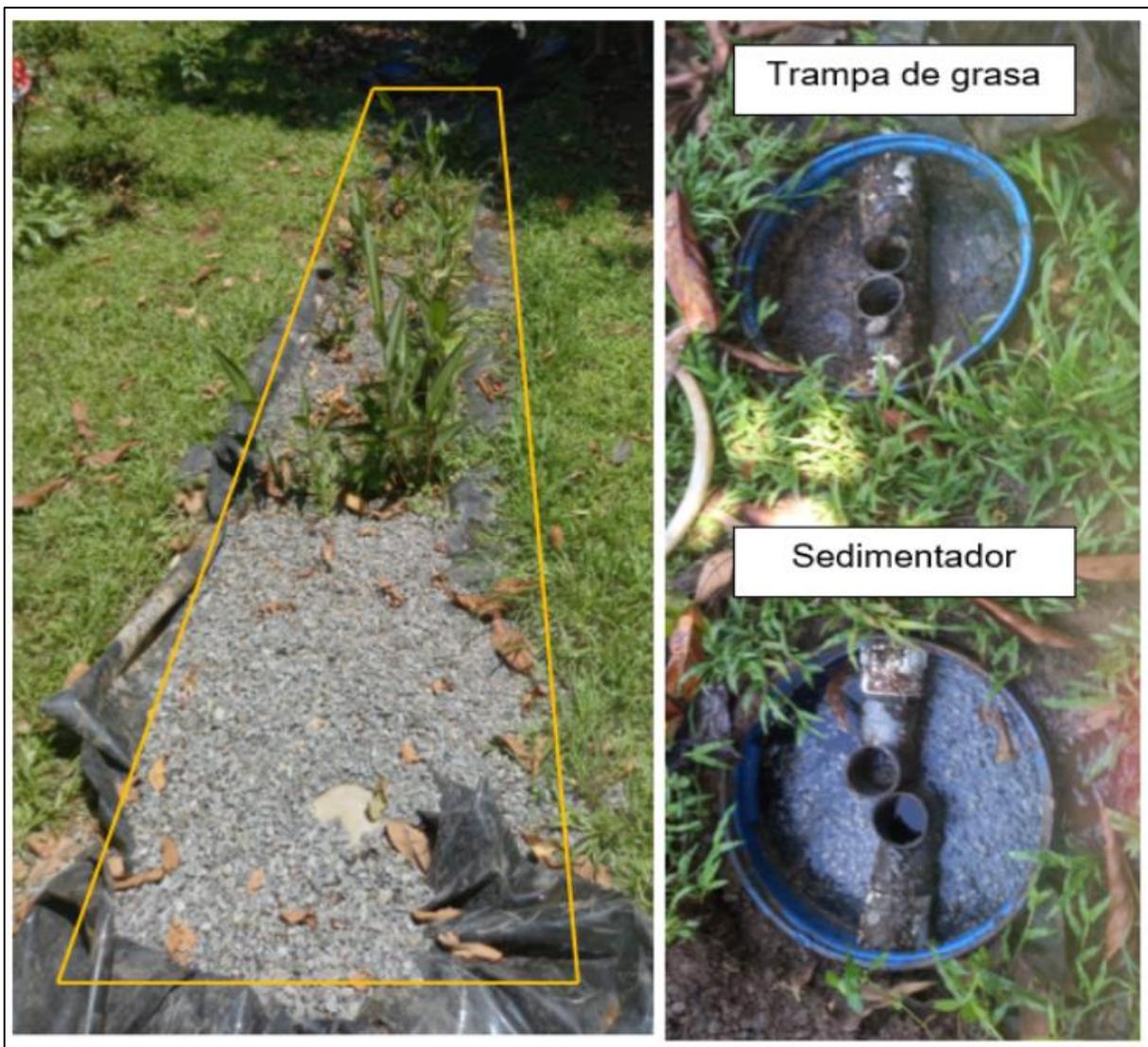


Figura 21. Estado inicial del HFSSH y trampa de grasa de la vivienda B

En el caso de la vivienda C, solo se tiene un estañón de 60 litros como sistema preliminar, el cual, como se observa en la Figura 22, en la primera visita tiene poca acumulación visible de sólidos suspendidos. La señora encargada del hogar en la vivienda C, sembró distintas plantas a las brindadas por la Asociación Pital Verde, las cuales se encontraron en buena condición.



Figura 22. Estado inicial del HFSSH y trampa de grasa de la vivienda C

5.2. Eficiencias del sistema de tratamiento por HFSSH

La eficiencia de los HFSSH se calculó para cada uno de los parámetros analizados en el laboratorio: DBO_{5,20}, DQO, SST, Nt y Pt obtenidos mediante muestras simples. Se utilizan gráficos para comparar las eficiencias obtenidas para cada una de las viviendas y se hace una comparación en conjunto con las concentraciones del efluente para tener una comprensión más completa sobre el rendimiento del sistema y de lo dictado por normativa.

La interpretación de lo que es una eliminación suficiente o insuficiente depende de la eficiencia especificada en estándares legales o valores objetivo deseados establecidos para cada planta de tratamiento (Sperling et al, 2020).

Los valores obtenidos del análisis de laboratorio se compararon con la normativa Nacional y la Mexicana, cuando esta aplicó. Los límites establecidos por cada una de estas normativas se muestran en el Cuadro 12. La normativa nacional se mencionó en todos los parámetros estudiados mientras que la normativa mexicana sirvió como complemento para el análisis de los nutrientes, en este caso, el nitrógeno total y el fósforo total.

Cuadro 12. Límites parámetros estudiados según Normativa Nacional y Mexicana

Normativa comparación		
Parámetro	Nacional	Mexicana
DBO _{5,20} (mg/l)	50	-
DQO (mg/l)	150	180
SST (mg/l)	50	72
Fosfatos (mg/l)	25	-
Ptotal (mg/l)	-	18
Ntotal (mg/l)	50	30
pH	5 a 9	6 a 9

Fuente: Modificado de: Reglamento DE-33601-s-MINAE & NOM-001-SEMARNAT AT-2021

Los valores obtenidos in situ para el pH se mantuvieron en un rango de 6,62 a 7,01 con variaciones muy pequeñas y temperaturas que van de los 26,01 a 26,54 °C, manteniendo estos valores dentro de lo establecido por normativa (Ver Cuadro 44 en anexos).

5.2.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Como menciona Sperling (2007), las aguas residuales tienen una gran heterogeneidad en su composición, por lo que depende de la materia orgánica que ingresa al sistema y este puede variar, por ejemplo, con la correcta separación de los desechos antes del sistema o de la composición química de los alimentos consumidos y depositados en el sistema a través del lavavajillas. En el Cuadro 13 se muestran los resultados promedio obtenidos para el DBO y DQO, tanto en el afluente como en el efluente para cada vivienda.

Cuadro 13. Análisis estadístico de resultados DBO y DQO

Vivienda	Proceso		DBO			DQO		
			Media	S*	CV (%)	Media	S*	CV (%)
Vivienda A	Tamaño de muestra		4			4		
	Afluente (entrada)	(mg/l)	211,25	93,46	44,24	308,56	188,90	61,22
	Efluente (salida)	(mg/l)	74,50	46,49	62,41	106,71	73,40	68,79
	Eficiencia de remoción	(%)	63,20	17,60	27,84	54,74	30,48	55,69
Vivienda B	Tamaño de muestra		5			5		
	Afluente (entrada)	(mg/l)	246,80	94,24	38,18	335,70	119,10	35,48
	Efluente (salida)	(mg/l)	98,50	80,60	81,83	100,56	52,99	52,69
	Eficiencia de remoción	(%)	63,66	30,87	48,49	70,49	22,22	31,52
Vivienda C	Tamaño de muestra		3			3		
	Afluente (entrada)	(mg/l)	266,75	142,12	53,28	375,58	199,23	53,05
	Efluente (salida)	(mg/l)	55,67	38,42	69,02	67,59	29,32	43,38
	Eficiencia de remoción	(%)	61,89	46,58	75,26	73,71	25,19	34,18

* (S) Hace referencia a la desviación estándar.

Es importante resaltar que en el caso DQO, el valor tanto del afluente como del efluente siempre fue mayor al obtenido para el DBO en los mismos puntos, lo cual concuerda con lo esperado para estos parámetros según se indica en teoría.

Se pudo observar que, en promedio, los HFSSH tienen una eficiencia de remoción del DBO que osciló en un rango de 61,89% a 63,66% y para el DQO se tuvo una eficiencia en el rango de 54,74% a 73,71%. En comparación con los valores presentados por Alfaro et al (2013), en donde se analizó un solo HFSSH en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional, con una eficiencia de remoción del 93% para el DBO y del 95% para el DQO, se tiene una disminución notable de la eficiencia esperada, ya que, según valores teóricos, las eficiencias

de remoción tanto para el DBO como el DQO se encuentran sobre el 90%. Cabe resaltar que las condiciones tanto climáticas como de mantenimiento en el sistema realizado en el Museo, son bastante distintas, ya que en este, las condiciones son sumamente controladas. En el caso de los HFSSH ubicados en el Barrio Nuevo Pital, se tiene un mantenimiento mucho menor de los sistemas preliminares, además de que los mismos no están diseñados siguiendo recomendaciones teóricas, lo que disminuye su eficiencia y puede llegar a saturar y bloquear parte del sistema.

La cantidad de muestras tomadas *in situ* en la vivienda C, fue menor ya que, en el mes de setiembre se encontró fuera de funcionamiento por malos olores y en el mes de marzo se tuvo un problema con el funcionamiento de la trampa de grasa, ya que superó su capacidad, las aguas se salieron del tanque y se empozaron en los alrededores, de ahí nace la necesidad de replantear el tamaño de los estañones utilizados como sistema preliminar, por unos con doble capacidad (120 litros). El tanque de 60 litros, además, requiere una limpieza más frecuente, la cual no se dio por parte de los miembros de la comunidad, ni tampoco por los miembros de las organizaciones a cargo de la construcción de los humedales. El diámetro de los estañones con menor capacidad, hace que los tubos utilizados para conducir el agua en la entrada y salida, queden muy cerca los unos de los otros, haciendo que el sistema de sedimentación y trampa de grasas no funcione adecuadamente.

La vivienda A muestra una mayor relación entre sus datos, con un coeficiente de variación (CV) para la eficiencia de remoción de DBO del 27,84%, lo cual se puede interpretar como una estabilidad mayor en la remoción de este parámetro si se compara a las otras viviendas. La vivienda C tuvo el mayor CV debido a que en el mes de diciembre (ver Figura 25, muestreo 3) el valor obtenido para la concentración en el afluente y el efluente fue casi la misma, esto debido a que la cantidad de materia orgánica que entró al sistema fue muy reducida, porque este fue alimentado solo con las aguas provenientes de la pila (normalmente no ingresan restos de comida, solo lavan algunas prendas a mano), sin embargo en las demás muestras, se tuvieron remociones altas de 85% y 92%, en estos casos, las aguas del lavavajillas y la lavadora también alimentaron al sistema.

La vivienda B presentó una disminución en la remoción para el mes de marzo, sin embargo, los meses anteriores tuvo remociones altas que alcanzan el 93%. La concentración del DBO en el efluente para la vivienda A (ver Figura 23), en los primeros dos muestreos es superior al

valor normado, sin embargo, se tuvo una reducción considerable si se compara con los valores obtenidos en el afluente, que antes de existir este sistema de tratamiento estas aguas desfogaban directamente a la Quebrada Pitalito.

Se puede apreciar que en los últimos muestreos se tienen concentraciones por debajo del valor normado (50 mg/l), haciendo notar que el sistema con el paso del tiempo logra una estabilización de sus procesos, efecto que se esperaba debido al aumento de la biopelícula en el material de medio filtrante, la cual ayuda a descomponer la materia orgánica, cabe resaltar que se debe dar mantenimiento al sistema, ya que puede darse una acumulación excesiva. En el muestreo 4, se observa que, aunque se tuvo un aumento en la concentración del afluente con respecto al muestreo 3, la concentración de efluente logra cumplir con la normativa.

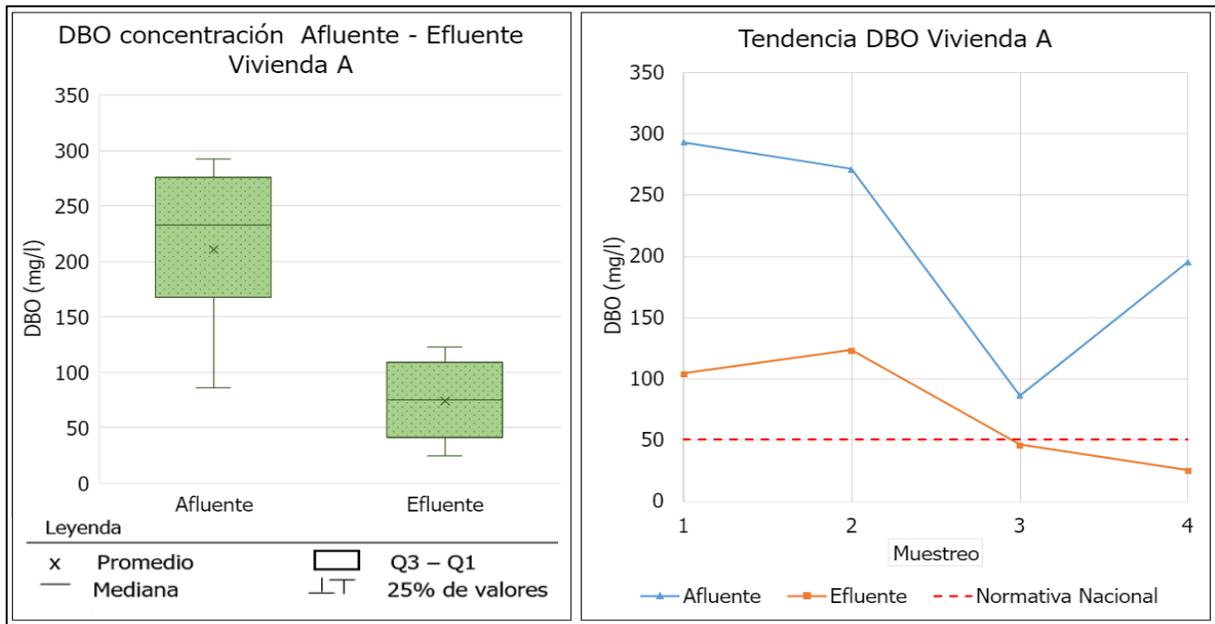


Figura 23. Concentraciones y tendencia DBO vivienda A

Para la vivienda B, se tiene que en promedio la eficiencia de remoción de DBO fue de 70,49% con una mediana de 75,46% con valores extremos que van de 91,63% para el muestreo 2 y 39,40% para el muestreo 5, similar al caso de la vivienda A en cuanto a la variabilidad de los datos. Como se indicó al inicio de este apartado, las razones por las que el DBO puede variar, son la gran heterogeneidad en la composición de las aguas que ingresan al sistema (Sperling, 2007), aunque también, se puede deber a la acumulación de materia orgánica en la parte final del sistema, lo cual aumenta el valor de DBO y disminuye la eficiencia. En la Figura 24, se

observa que en el muestreo 2 se tiene una disminución considerable de la concentración del DBO comparando la muestra del afluente con la del efluente y se cumple con la normativa, sin embargo, en los muestreos siguientes, se tiene un aumento en la concentración que supera el valor normado para el efluente. Esto se puede deber a problemas en el sistema preliminar, teniendo una notable saturación en la trampa de grasa y sedimentador y un mantenimiento casi nulo. Nótese que en el muestreo 1, solo se tomó la probeta en la entrada del sistema, debido a que en setiembre, se estaban realizando modificaciones en el humedal y las aguas se conducían directamente al cordón de caño.

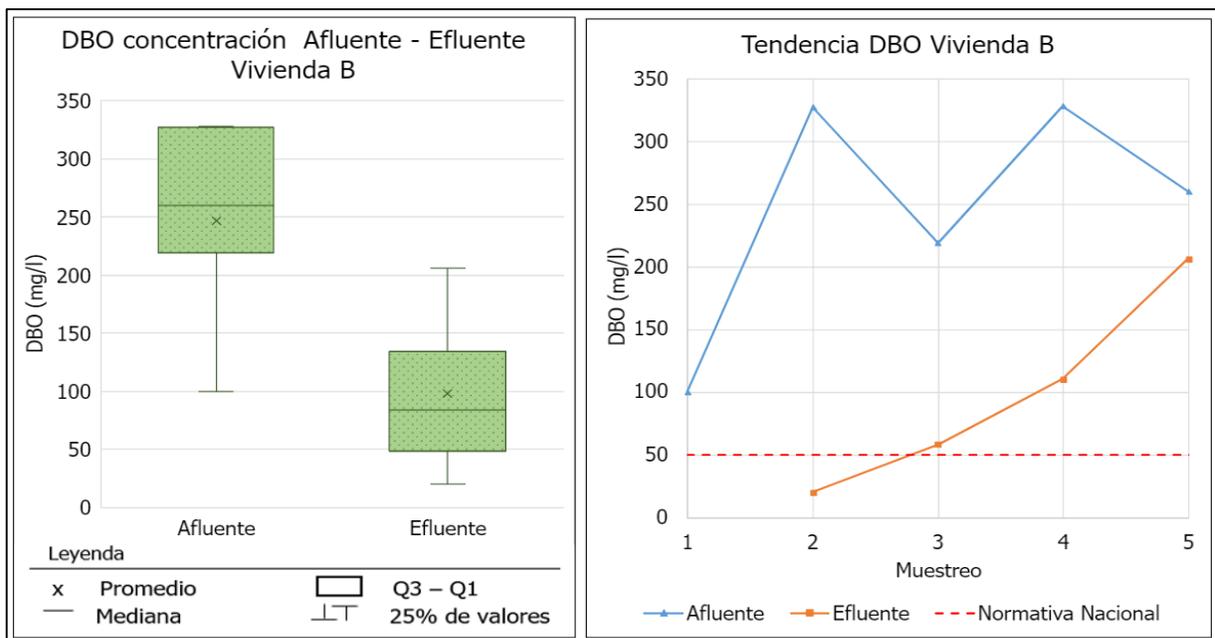


Figura 24. Concentraciones y tendencia DBO vivienda B

La vivienda C en promedio tiene una eficiencia de remoción de DBO del 73,71% y una mediana de 80,81%, con un valor máximo de 94,59% obtenido en el mes de enero (muestreo 4) y el mínimo de 45,73% en octubre (muestreo 2). Como se muestra en la Figura 25, en dos de los muestreos se obtuvo una concentración menor a la normada, representando un porcentaje de remoción de 85,25% para el muestreo 2 y de 92,17% para el muestreo 4.

En el mes de diciembre (muestreo 3), para la vivienda C, el porcentaje de remoción fue muy pequeño, de tan solo un 8,26%; como indica Metcalf & Eddy (1995), la carga de DBO máxima horaria puede variar hasta alcanzar valores de 3 o 4 veces el valor de la carga mínima de DBO

en un mismo período de 24 horas, por lo que se podría considerar este caso como posible justificación a dicho valor. Esto ejemplifica la variación que pueden tener los parámetros dentro de los HFSSH y la necesidad de realizar muestreos en puntos medios de la línea de tratamiento de los humedales.

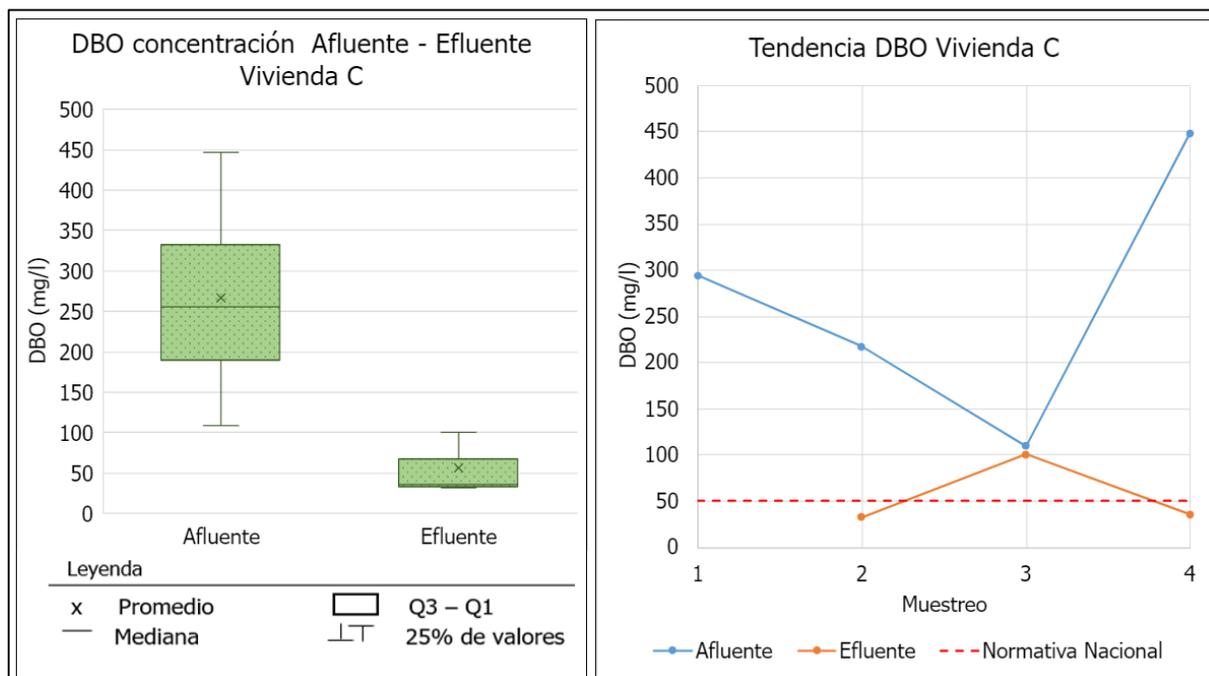


Figura 25. Concentraciones y tendencia DBO vivienda C

En cuanto a los valores de DQO, la vivienda A muestra la menor eficiencia promedio, con un valor de 54,74% mientras que la vivienda C presenta un valor promedio de 73,71% siendo esta la mayor (ver Cuadro 13). Es importante considerar que la vivienda C tiene menor cantidad de datos debido a lo explicado anteriormente y esto genera una mayor incertidumbre en el valor general de remoción. La vivienda B tuvo una eficiencia media de 70,49%, valor similar al mostrado para la vivienda C.

Los porcentajes de remoción de DQO esperados, según el proyecto ASTEC (2004), oscilan entre 75% y 86%, en este caso, los valores obtenidos para los porcentajes de remoción en la vivienda B y C se acercan al límite inferior de este estudio, mientras que la vivienda A tuvo una disminución considerable en su eficiencia de remoción debido a la mala separación y a la composición de los residuos antes de entrar al sistema. Cabe resaltar que, en esta vivienda, cuando llovía fuerte, el área del humedal se inundaba, lo cual altera la composición de las

aguas dentro del sistema de tratamiento, llegando a diluir las concentraciones de los componentes estudiados. Para determinar de manera más específica el comportamiento del DQO y las causas de su variación, se deben realizar muestreos intermedios en los humedales, lo cual se sale del alcance de este estudio ya que se buscaba verificar la eficiencia del sistema considerando únicamente los muestreos en un punto inicial y uno final.

En la Figura 26 se puede observar el comportamiento de la vivienda A en cuanto al DQO. En los primeros dos muestreos se tiene una disminución en la concentración apenas superior al valor normado, que en este caso es de 150 mg/l según normativa nacional, sin embargo, la disminución de la concentración en el primer muestreo fue del 67,41%.

Para los últimos dos muestreos se tiene una disminución importante de este parámetro, cumpliendo con el valor normado. Cabe resaltar que en el último muestreo realizado en enero para esta vivienda, donde se alcanzó una eficiencia de remoción de 91,90%, siendo esta la más alta para esta vivienda (en el Cuadro 40 en anexos se muestran los porcentajes de remoción de DQO por mes para todas las viviendas estudiadas). Se observa en el gráfico de bigotes, que se tiene una concentración de datos más marcada en la salida que en la entrada del sistema, con valores extremos más cercanos a la media.

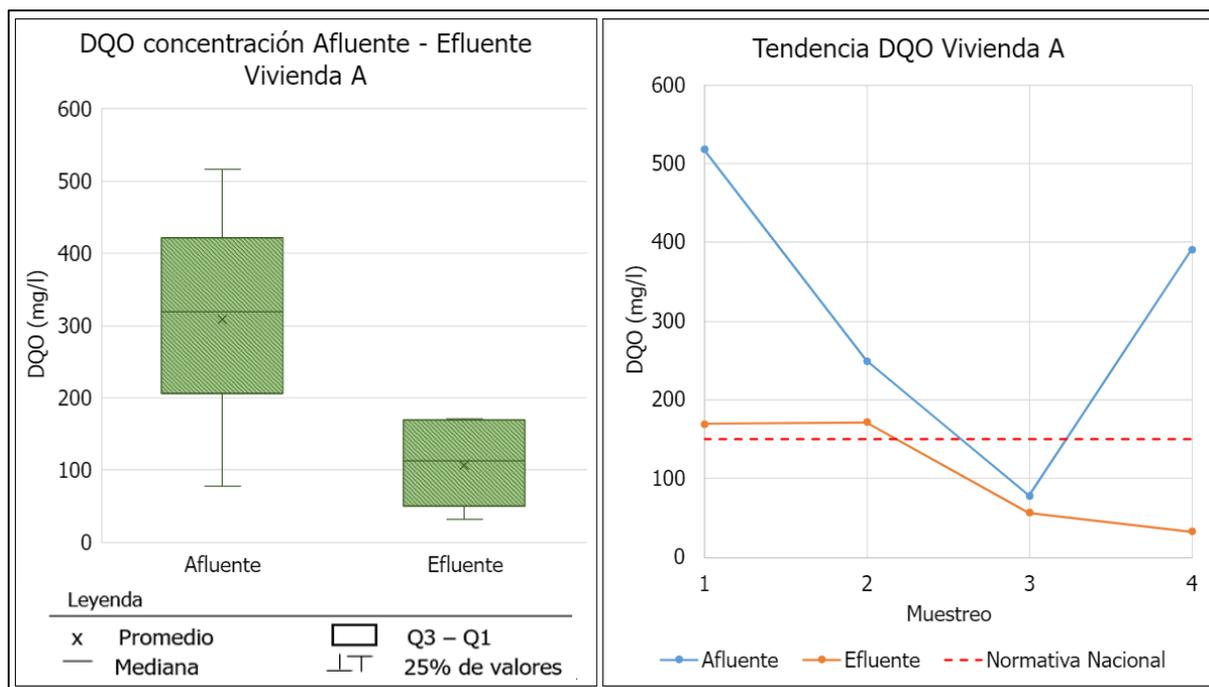


Figura 26. Concentraciones y tendencia DQO vivienda A

En la vivienda B ocurre el mismo comportamiento (ver Figura 27), con una concentración de valores para el efluente entre los 100 mg/l a los 157 mg/l con valor mínimo de 29,44 mg/l, representando el mayor porcentaje de disminución de 91,63% obtenido en el muestreo 2. Con excepción del límite superior alcanzado en el efluente (157 mg/l) se logró cumplir con el valor dictado por la normativa, y de igual manera, se supera una única vez por una cantidad casi despreciable de 7 mg/l.

En esta vivienda, la ubicación del humedal, permitía que las aguas de lluvia fluyeran hacia el cordón de caño y no se acumularan en el área del sistema de tratamiento, disminuyendo la probabilidad de dilución de los compuestos en estudio. Además, esta vivienda está conformada por tres habitantes, lo que generaba una carga hidráulica y una variabilidad menor en la composición de las sustancias que ingresan al sistema de la vivienda A.

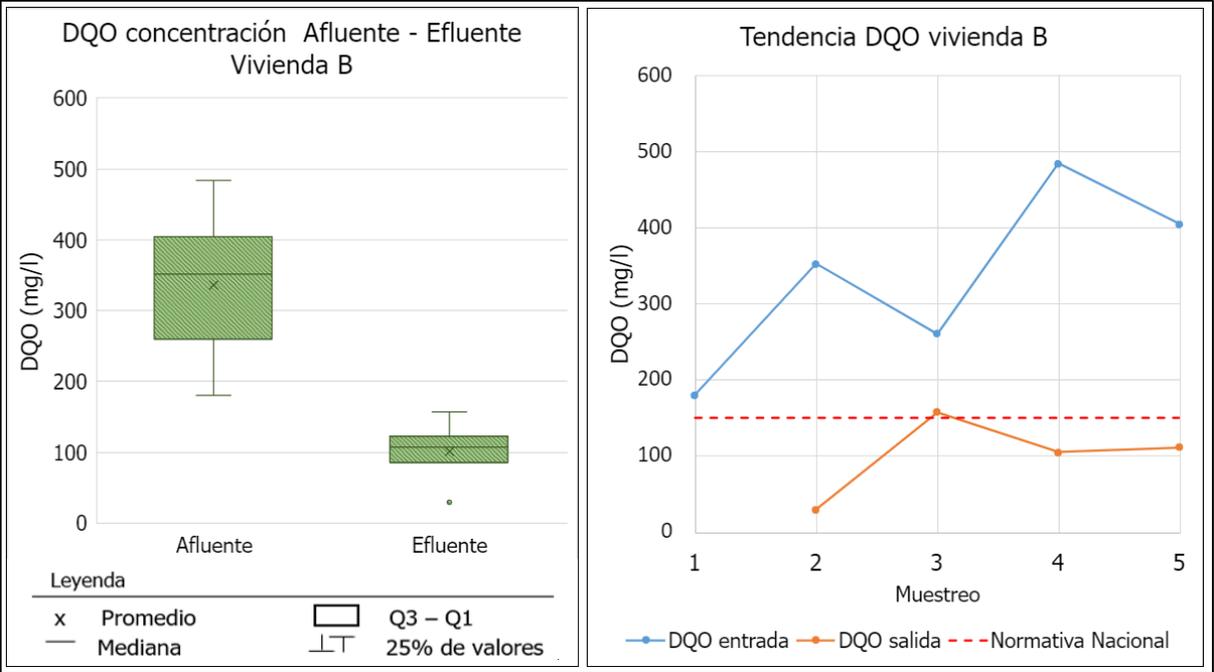


Figura 27. Concentraciones y tendencia DQO vivienda B

La vivienda C, presenta el mayor porcentaje de disminución obtenido, con un 94,59% en el muestreo 4 (ver Figura 28). En este caso, todas las concentraciones obtenidas son inferiores al valor normado cumpliendo las expectativas de tratamiento.

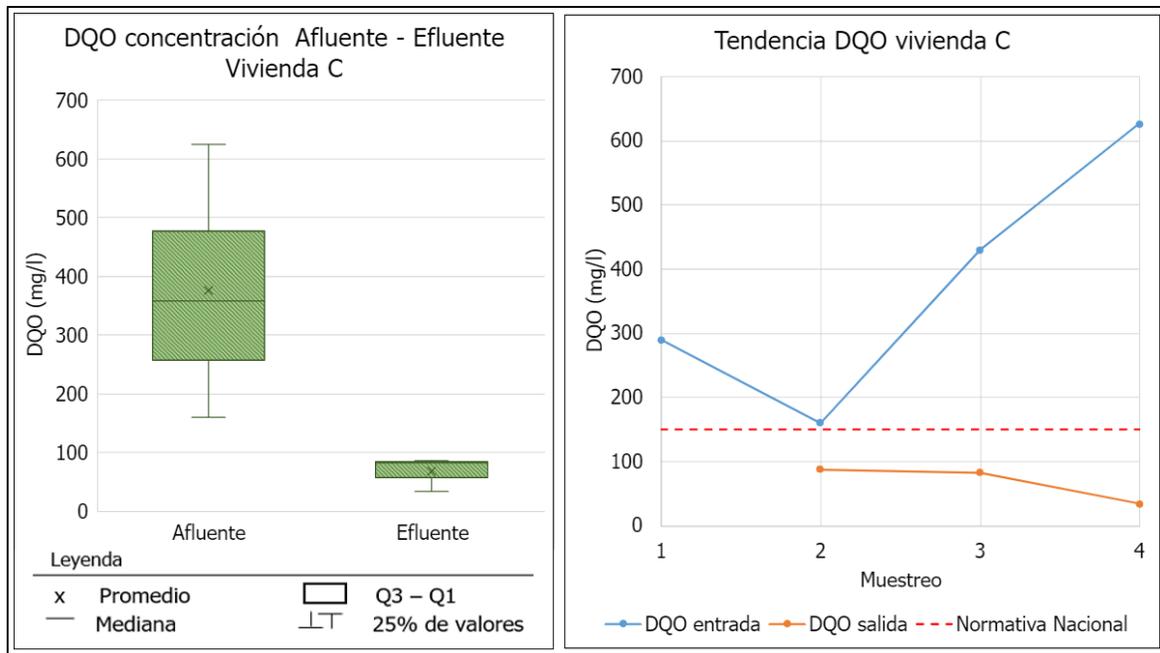


Figura 28. Concentraciones y tendencia DQO vivienda Sólidos Suspendedos Totales (SST)

La concentración de SST en el agua de entrada osciló entre 272,50 y 602,94 mg/l, valores correspondientes a la vivienda C y la vivienda B respectivamente. En el caso de la vivienda A, se obtuvo un valor promedio de 332,50 mg/l como se muestra en el Cuadro 14. La alta variabilidad encontrada para todas las viviendas en los valores de SST, podría responder a la variedad en el tipo y cantidad de materia orgánica que llega a los HFSSH.

Cuadro 14. Análisis estadístico de resultados SST

Vivienda	Proceso		SST		
			Media	S	CV
Vivienda A	Tamaño de muestra		4		
	Afluyente (entrada)	(mg/l)	332,50	294,55	88,59
	Efluyente (salida)	(mg/l)	40,00	25,82	64,55
	Eficiencia de remoción	(%)	81,36	21,13	25,97
Vivienda B	Tamaño de muestra		4		
	Afluyente (entrada)	(mg/l)	602,94	449,15	74,49
	Efluyente (salida)	(mg/l)	138,68	161,00	116,09
	Eficiencia de remoción	(%)	82,93	12,37	14,92
Vivienda C	Tamaño de muestra		3		
	Afluyente (entrada)	(mg/l)	272,50	161,94	59,43
	Efluyente (salida)	(mg/l)	96,67	72,34	74,84
	Eficiencia de remoción	(%)	55,80	48,54	86,98

* (S) Hace referencia a la desviación estándar.

En cuanto a la concentración de SST en la salida de los HA, se tiene en promedio, una variación que va de 40 a 138 mg/l. Según la normativa nacional, el valor permitido de desfogue es de 50 mg/l, el cual se alcanzó únicamente para la vivienda A según los valores promedios, sin embargo, se logra una reducción de SST considerable, más notable para la vivienda B. La eficiencia de remoción fluctuó entre los 50,80% y 82,93%, para la vivienda C y A respectivamente.

En la vivienda A habitan 7 personas, siendo esta la vivienda de estudio con más habitantes, los cuales depositan los restos de comida casi sin separar, directamente en la pila, generando una alta producción de materia orgánica con partículas grandes, incluyendo frijoles, arroz, huesos, entre otros. Esto generó una cantidad de sólidos que saturaron el sistema primario con rapidez, y evidenciando una falla en el sistema por mala operación de sus propietarios. La misma situación ocurre en el caso de la vivienda B, en la cual se tiene el aporte de aguas grises de 3 habitantes. En esta vivienda se observó una inadecuada separación de los alimentos antes del lavado de la vajilla y utensilios de cocina. Inclusive se logró observar restos de empaques que se filtraron al sistema primario, como se puede observar en la Figura 29.



Figura 29. Estado del sedimentador de la vivienda 2, visita Marzo.

La concentración de SST para la vivienda A varían entre los 140 y 770 mg/l, con una media de 332,50 mg/l. Como se puede observar en la Figura 30, la variación de los datos en el efluente es considerablemente menor que en el afluente. En el primer muestreo se obtuvo la mayor concentración de SST y una eficiencia de remoción que alcanzó el 93,51%, dando como resultado una concentración en el efluente de 50 mg/l, lo cual además de cumplir con la normativa, refleja un buen funcionamiento del sistema. En general los valores del efluente se mantuvieron cercanos al valor normado, con excepción del muestreo 2, en donde se obtiene una concentración de 70 mg/l. En el último muestreo se logra alcanzar la mayor eficiencia de remoción con un 94,44% y una concentración de SST de 10 mg/l.

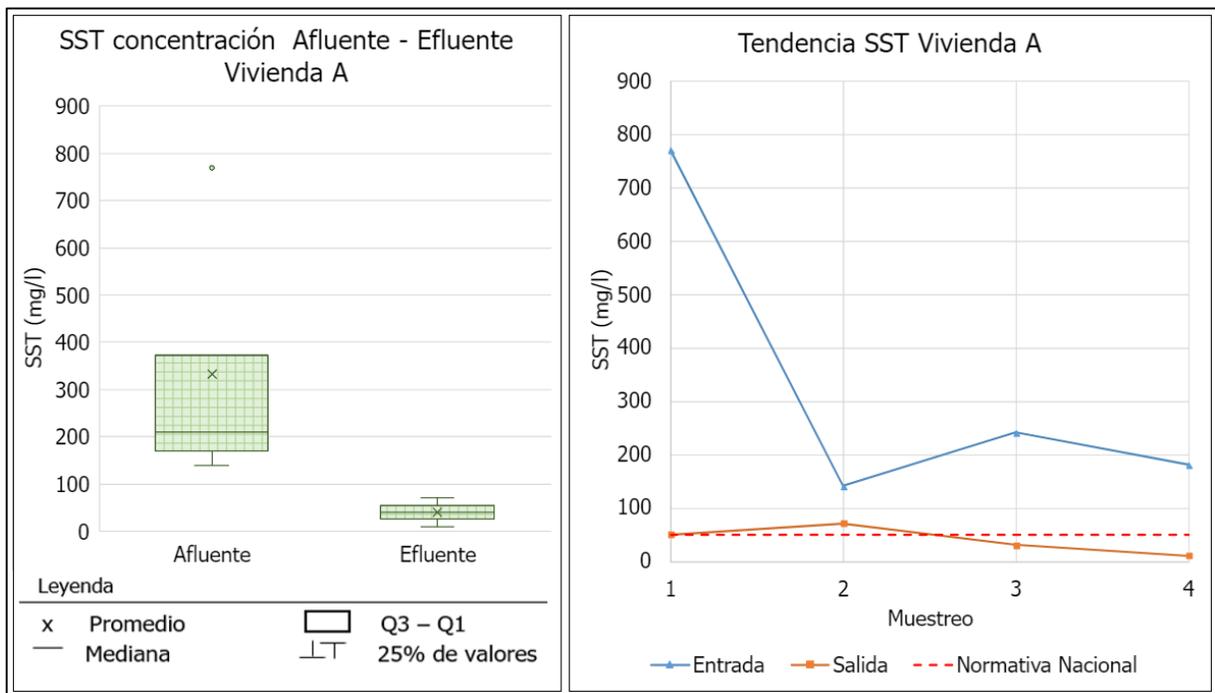


Figura 30. Concentraciones y tendencia SST vivienda A

Para la vivienda B, la concentración de SST en el afluente alcanzó valores mucho más altos que los normalmente encontrados en estudios que utilizan el mismo sistema de HFSSH en el país y en la teoría en general, donde se observan valores que alcanzan los 200 mg/l (Oliver, 2017; Moncada, 2011). Se tienen valores máximos de 1110 y 1000 mg/ en el afluente, en esos casos se realizó la prueba de laboratorio tres veces para corroborar los resultados. En este caso, el sistema primario se encontraba totalmente saturado, por lo que en el tercer muestreo

se realiza una limpieza de la capa superior de sólidos, ya que la obtención de las muestras fue complicada de realizar. Cabe resaltar que en el siguiente muestreo a la limpieza del sistema primario, se observa una reducción considerable en la concentración de SST (ver Figura 31).

Los valores obtenidos en el efluente oscilan de los 50 a los 380 mg/l, en donde el valor máximo mencionado representó un 65,77% de remoción, mientras que el mínimo un 95% de remoción, obtenido en el muestreo 3. En el muestreo 4 se alcanza una remoción del 83,78% y una concentración en el efluente de 60 mg/l, la cual supera al valor normado, sin embargo, refleja una remoción considerable de los sólidos que normalmente se desfogon en el cuerpo receptor.

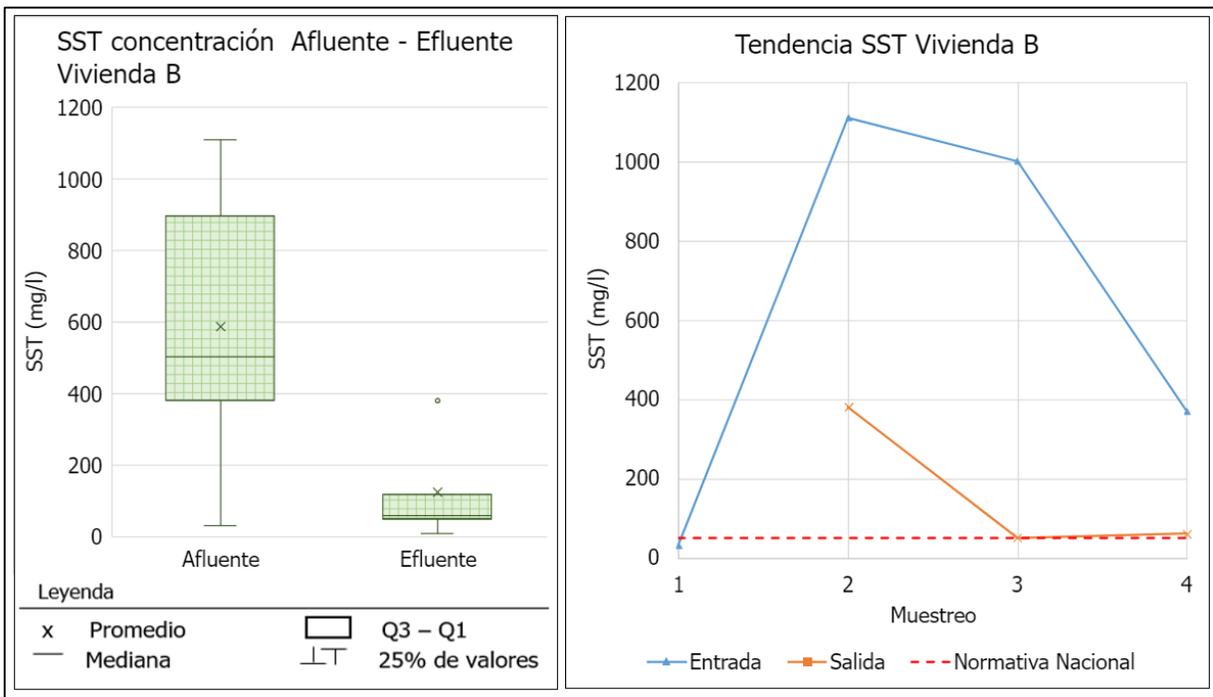


Figura 31. Concentraciones y tendencia SST vivienda B

La vivienda C mostró concentraciones de SST en el afluente que oscilan entre 160 y 510 mg/l, con una media de 272,50 mg/l. En este sistema, para el último muestreo (ver Figura 32) se tiene una concentración de entrada igual a la de salida, con un valor de 180 mg/l. Para este sistema, se obtuvo el problema de que solo se utilizó un estañón de 60 litros como sistema preliminar, el cual, además de generar malos olores, se saturó rápidamente, lo cual pudo haber generado una obstrucción del medio filtrante y un paso de sólidos hasta el punto final del tratamiento.

Las concentraciones en el efluente oscilaron entre 50 y 180 mg/l, con una media de 96,67 mg/l. La eficiencia de remoción más alta alcanzada, se presenta en el muestreo 4, con un valor de 88,24 mg/l y una concentración en el efluente de 60 mg/l, superando el valor normado de 50 mg/l pero, al igual que la vivienda B, se tiene una reducción considerable de los sólidos que salen del sistema al punto de desfogue.

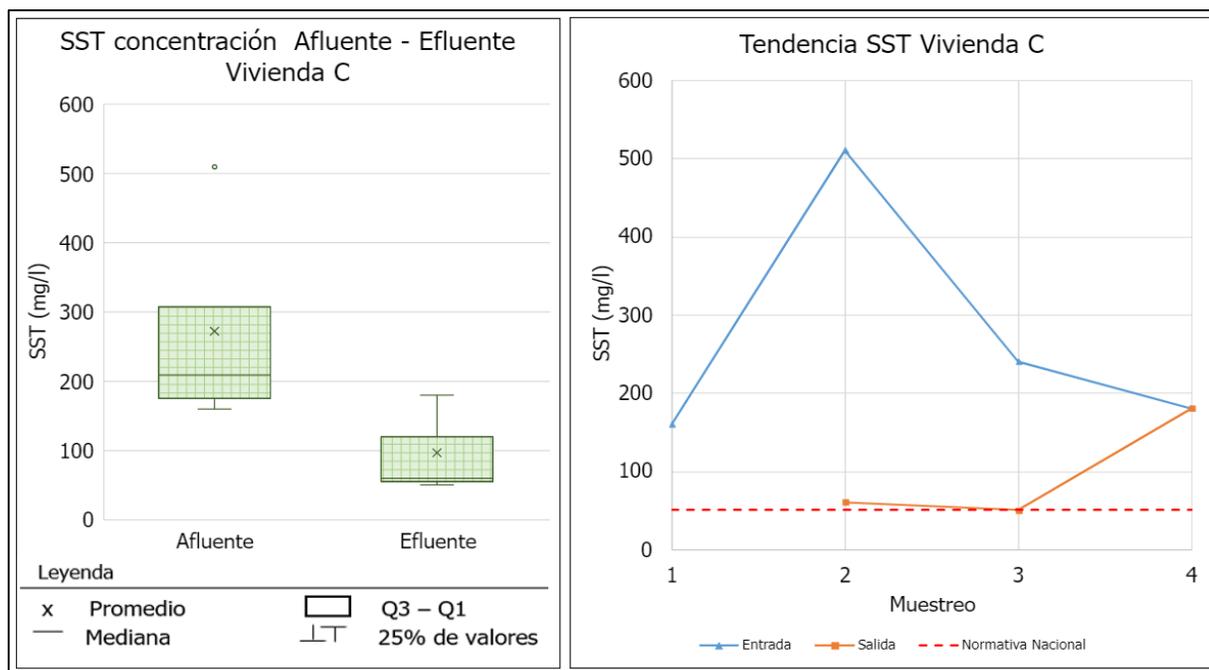


Figura 32. Concentraciones y tendencia SST vivienda C

5.2.2. Nitrógeno y fósforo total (N_T y F_T)

El nitrógeno fue medido en el laboratorio como nitrógeno amoniacal, nitrito y nitrato, con lo que posteriormente, se procede a calcular el aporte específico del elemento nitrógeno en cada compuesto y se suman para obtener el nitrógeno total (ver procedimiento en anexos 8.1. al final de este documento).

En el Cuadro 15 se muestra la concentración media de nitrógeno total obtenida para cada vivienda en el afluente y efluente, además de la eficiencia de remoción. Las concentraciones en el afluente oscilan entre 9,66 y 21,78 mg/l, eficiencias de remoción altas de acuerdo con lo esperado según el proyecto ASTEC (21%-39%) presentando remociones promedio de 65,04%, 56% y 82,05 para la vivienda A, B y C respectivamente.

Cuadro 15. Análisis estadístico de resultados para el N_T

Vivienda	Proceso		N _T		
			Media	S	CV
Vivienda A	Tamaño de muestra		4		
	Afluente (entrada)	(mg/l)	21,78	22,53	103,46
	Efluente (salida)	(mg/l)	5,85	6,42	109,69
	Eficiencia de remoción	(%)	65,04	30,26	46,52
Vivienda B	Tamaño de muestra		4		
	Afluente (entrada)	(mg/l)	9,66	5,46	56,52
	Efluente (salida)	(mg/l)	5,25	3,24	61,75
	Eficiencia de remoción	(%)	56,00	16,13	28,81
Vivienda C	Tamaño de muestra		3		
	Afluente (entrada)	(mg/l)	19,40	19,90	102,61
	Efluente (salida)	(mg/l)	3,94	2,49	63,12
	Eficiencia de remoción	(%)	82,05	8,45	10,30

Se puede observar que la variabilidad en la entrada fue mayor a la de salida, debido a la acumulación de materia orgánica en la parte inicial y a la heterogeneidad de las aguas que ingresan al sistema, esto es de esperarse, con coeficientes de variación significativamente mayores en el afluente, siendo más notable en el caso de la vivienda C. La normativa nacional indica que la concentración permitida de nitrógeno total en el desfogue a un cuerpo de agua superficial para industrias es de 50 mg/l, en este caso, los valores obtenidos tanto en el efluente como en el afluente son inferiores al normado.

Cabe resaltar que como la normativa solo brinda la concentración permitida para industrias, que suele ser considerablemente mayor a la de residencias, se compara con la normativa mexicana que incluye las aguas domésticas. El valor permitido según esa normativa es de 30 mg/l, sin embargo, ocurre la misma situación, tanto en la entrada como en la salida, los valores permanecen inferiores al límite permitido.

En el caso de la vivienda A, la mayor concentración de nitrógeno total en el afluente se presentó en el mes de octubre (muestreo 2), con un valor de 53,70 mg/l, el cual sobrepasa los niveles permitidos tanto en la norma nacional como en la mexicana. Cabe resaltar que para este mes, se logró una eficiencia de remoción del 71,62% con lo que se obtuvo un valor de salida de 15,24 mg/l, representando una disminución considerable de N_T en el agua.

El mayor porcentaje de remoción para la vivienda A se observó en el mes de enero, en donde la concentración de nitrógeno en la entrada fue de 21,78 mg/l mientras que la salida 2,16 mg/l, con lo que se obtiene un porcentaje de remoción del 90%.

En cuanto al comportamiento del Fósforo, en todos los HFSSH se tiene una concentración de fósforo total considerablemente menor a la del nitrógeno total, como se puede observar en la Figura 33, Figura 34 y Figura 35. En el caso de las concentraciones del fósforo, debido a problemas con disponibilidad de reactivos en el laboratorio, se lograron realizar únicamente 3 muestreos para la vivienda A, por lo que se recomienda realizar más estudios sobre el comportamiento de este compuesto, sin embargo, se puede observar que en todos los muestreos, el valor obtenido es inferior al valor presentado en la normativa mexicana de 18 mg/l. Se indica también el valor permitido a nivel nacional de la concentración de fosfatos, el cual es de 25 mg/l.

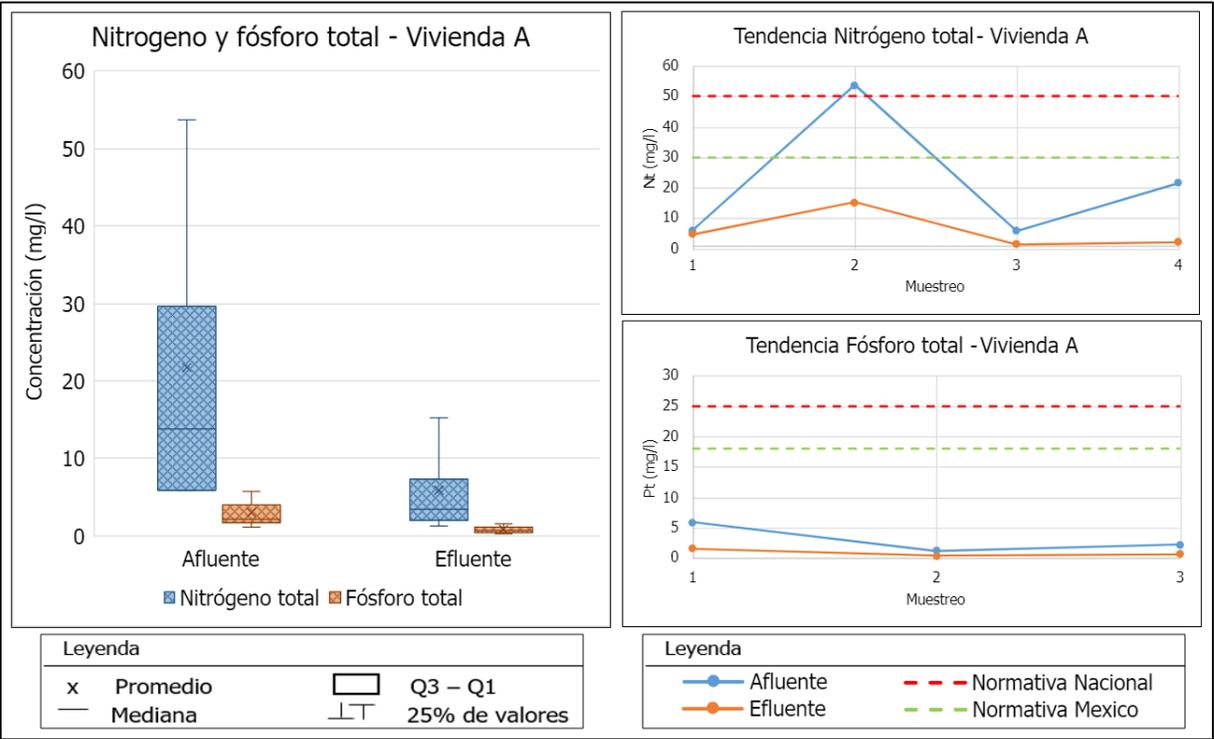


Figura 33. Concentraciones y tendencia Nt y Pt vivienda A

La vivienda B, presentó concentraciones menores para el nitrógeno (ver Figura 34) en donde la concentración es inferior a la permitida, tanto en la entrada como en la salida del HFSSH. La

concentración máxima alcanzada en el afluente fue de 15,91 mg/l y en el efluente de 9,32 mg/l, ambas obtenidas para el mes de octubre (muestreo 2), con lo que se tiene una eficiencia de remoción del 42,08%. La eficiencia de remoción más alta alcanzada para esta vivienda fue del 78% en el mes de diciembre (muestreo 3) logrando una concentración del efluente de 1,60 mg/l.

En el caso del fósforo total, se tiene un valor de concentración máxima de 5,84 mg/l, y se cumple lo mismo que en el caso anterior, donde todas las concentraciones son inferiores a los valores normados. La eficiencia positiva de remoción máxima alcanzada para el fósforo fue de 71,51% en el mes de enero (muestreo 1). En el mes de diciembre (muestreo 2) ocurre una remoción negativa, con una concentración de entrada de 0,33 mg/l de fósforo y en la salida 0,82 mg/l, con lo que se tiene una remoción de -150%. El comportamiento del fósforo es complejo, por lo que, para conocer las razones de su variabilidad, se deberían realizar varios muestreos a lo largo del sistema y observar la transformación de los compuestos, lo cual estaba fuera del alcance del presente estudio.

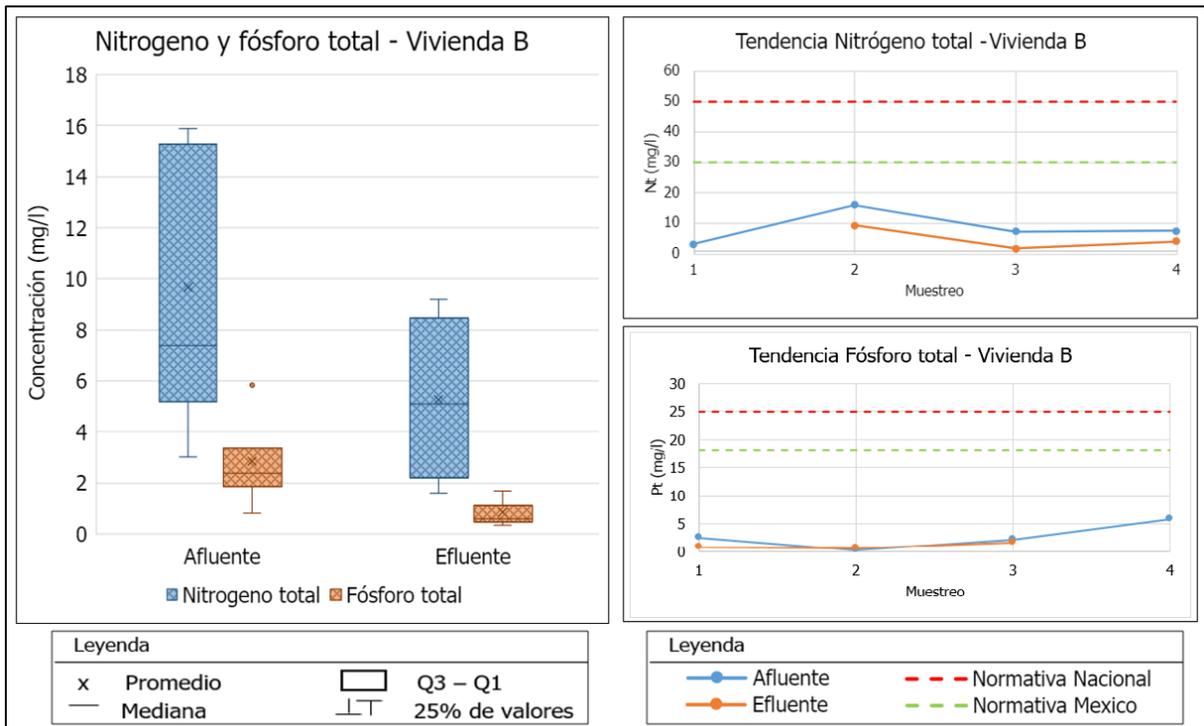


Figura 34. Concentraciones y tendencia Nt y Pt vivienda B

La vivienda C (ver Figura 35) mostró una concentración máxima de nitrógeno total de 48,29 mg/l presente en el mes de octubre (muestreo 2), cercana al valor máximo permitido por la normativa nacional de 50 mg/l y superior al permitido por la normativa mexicana de 30 mg/l. En octubre, la eficiencia de remoción fue la más alta con un valor de 87,34%, lo que representa una concentración en la salida de 6,11 mg/l, valor que cumple con lo establecido en ambas normativas. Las concentraciones en el efluente presentan un comportamiento más estable que en el afluente, y todos los valores presentados cumplen con la normativa.

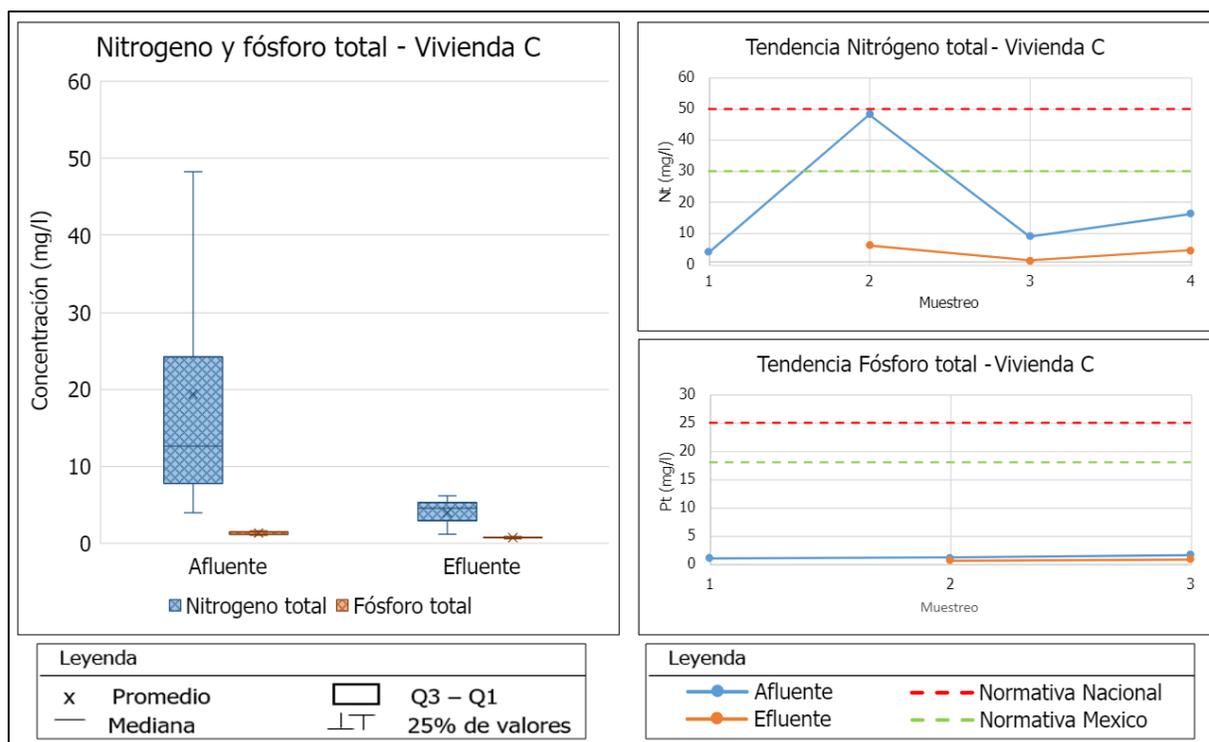


Figura 35. Concentraciones y tendencia Nt y Pt vivienda C

El papel de las plantas en el ciclo tanto del fósforo como del nitrógeno puede variar según la literatura consultada. En general, se considera que para sistemas que operan con bajas cargas (Menor de 10-20 g m⁻² año⁻¹ (Vymazal, 2007)), la cantidad de F asimilado por las plantas (del orden de 0.1-4 g m⁻² año⁻¹) puede ser significativa, mientras que en sistemas muy cargados puede no ser significativa (Kadlec, 2005a).

En el caso de la vivienda C, con mayor variedad de plantas y menor carga hidráulica, la concentración de fosforo fue la menor (ver Figura 35), siendo esto un indicador de que la cantidad de fosforo asimilado por las plantas fue significativo, lo cual corresponde con la teoría

mencionada por Vymazal (2007), aunque también puede darse debido a la dilución de las aguas que entran al sistema.

Nairn & Mitsch (2000), tratando agua del río Olentangy (EEUU), no encontraron diferencias significativas en la eliminación de P entre un humedal vegetado y otro que no, mientras que Tanner et al. (1995) encontró mejores eliminaciones de P en los humedales vegetados (un porcentaje inferior al 8% del P eliminado pudo ser atribuido al almacenamiento de este nutriente en la biomasa vegetal).

5.2.3. Análisis del nitrógeno amoniacal, nitrito y nitrato

El comportamiento del nitrógeno total es difícil de predecir, ya que varía dependiendo de factores como la cantidad de oxígeno, materia que ingresa al sistema, entre otros (Metcalf & Eddy, 1995). El ciclo del nitrógeno dentro del humedal consiste principalmente de dos procesos: nitrificación y desnitrificación, tal como se muestra en la Figura 36, en donde la nitrificación se caracteriza por la presencia de oxígeno y la desnitrificación por su ausencia.

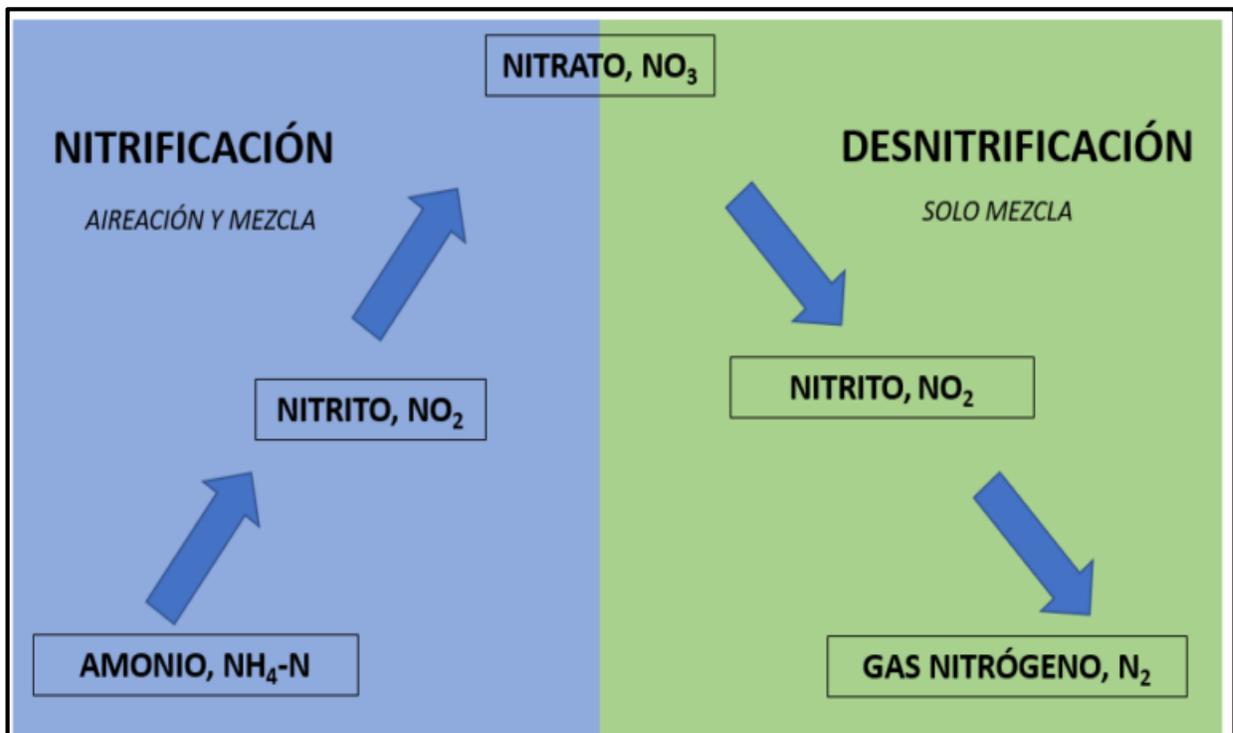


Figura 36. Ciclo de nitrificación – desnitrificación
Fuente: Azcoitia, 2012.

El amonio o nitrógeno amoniacal es una de las principales formas del nitrógeno que se pueden encontrar en la mayoría de aguas residuales y debido a que juega un papel principal en la degradación de las condiciones ambientales de los humedales, reducir la concentración de amonio es el factor limitante que dirige el diseño de humedales para el tratamiento de aguas residuales (Kadlec y Knight, 1995).

El nitrito es una forma del nitrógeno que se encuentra en un estado de oxidación intermedio entre el amonio y el nitrato. Precisamente debido a esta condición de estado intermedio es químicamente inestable y puede encontrarse en la mayoría de humedales en concentraciones muy pequeñas. Niveles apreciables de nitritos en un humedal son síntoma de que en el humedal se está produciendo una asimilación incompleta del nitrógeno (Kadlec y Knight, 1995), comportamiento que no se da en ninguno de los humedales, como se puede observar en la Figura 37, Figura 38 y la Figura 39, donde la mayor concentración para el nitrito fue de 0,6 mg/l, tanto para la vivienda B y C. Esto es un indicador de una asimilación completa del nitrógeno.

En la Figura 37 se puede observar el comportamiento del amoniaco, el nitrito y nitrato en el HFSSH de la vivienda A. En el primer muestreo realizado en setiembre, el valor del amonio fue de 0,3 mg/l tanto en la entrada como en la salida, valor bajo en comparación al nitrato. Para el mismo muestreo se tiene un valor de nitrato el cual disminuyó de 17 a 15 mg/l, mientras que el nitrito 0,09 a 0,06 mg/l.

Según el decreto N.º 38924-S, se establece un límite máximo permisible de nitrógeno total para agua potable de 25 mg/L, por lo que concentraciones cercanas a este valor no representan problemas en el funcionamiento del HA ni en los cuerpos de desfogue, por lo que en la mayoría de los puntos, el nitrato tuvo una influencia positiva en el humedal, ya que siendo la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en los humedales, es químicamente estable y puede servir como nutriente esencial para el crecimiento de las plantas (Kadlec y Knight, 1995).

Un exceso de nitrato, como el observado en el muestreo 2 de 125 mg/l, puede llevar a una eutrofización (exceso de nutrientes) en la superficie del agua. Conocer la presencia de nitritos y nitratos en el agua es importante en tanto que ambos son tóxicos para los niños (Kadlec y Knight, 1995), y en caso de que se desee reutilizar las aguas provenientes del humedal, se debe conocer que la cantidad de nitrato no sea excesiva.

En el muestreo 3, se tiene una concentración de nitrógeno amoniacal de 1,10 mg/l en la entrada y 0,30 mg/l en la salida. Los valores de nitrito y nitrato también estuvieron bajo las concentraciones aceptables para este muestreo. En el caso del muestreo 4, se observa una reducción importante en el nitrógeno amoniacal, mientras que el nitrito tuvo un incremento, lo cual se ve influenciado por el proceso de nitrificación del amonio y de la desnitrificación del nitrato, el cual también disminuyó. En este caso, se tendría un comportamiento que indica una asimilación completa del nitrógeno, en donde se tuvo mayor nitrificación (mayor presencia de oxígeno) que desnitrificación.

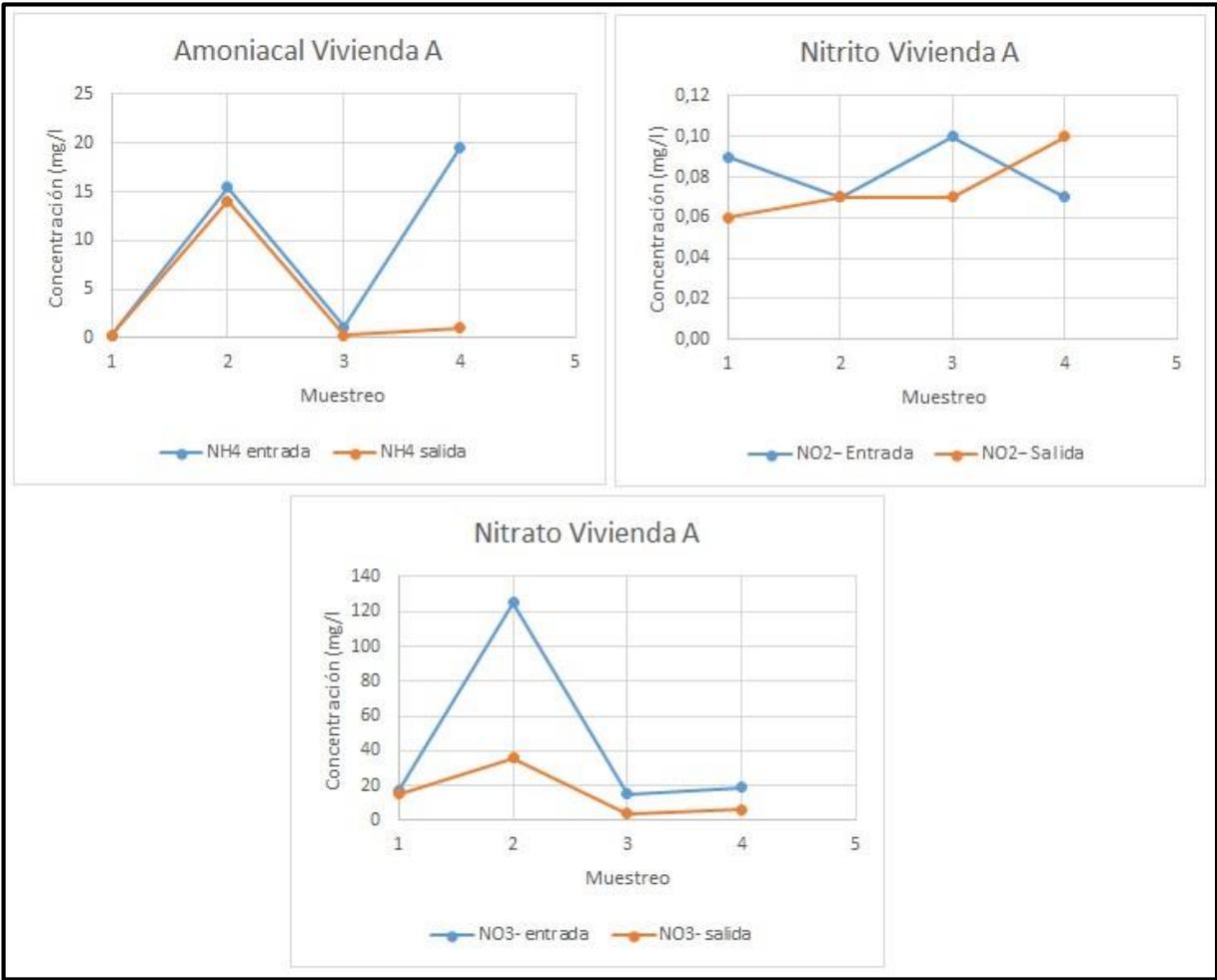


Figura 37. Comportamiento del nitrógeno en la vivienda A

El comportamiento del ciclo del nitrógeno en la vivienda B, mostrado en la Figura 38 varía considerablemente del observado en la vivienda A. Se tiene una concentración inicial del nitrógeno amoniacal pequeña que no varía demasiado hasta el último muestreo, en donde la

concentración inicial fue de 103,00 mg/l y la final de 30 mg/l. El nitrito como se mencionó, no alcanza valores preocupantes, se mantiene bajo el máximo permitido para agua potable según reglamentación nacional de 1 mg/l.

El comportamiento del nitrato también se mantiene bajo los límites permitidos para agua potable por lo que no representa una amenaza para el sistema. Cabe recalcar que en el muestreo 2, la cantidad de nitrato fue superior en el efluente y la concentración de nitrito aumentó considerablemente en comparación a los demás muestreos, por lo que en este mes se pudo observar una asimilación incompleta del hidrógeno, con aportes mayores del proceso de nitrificación.

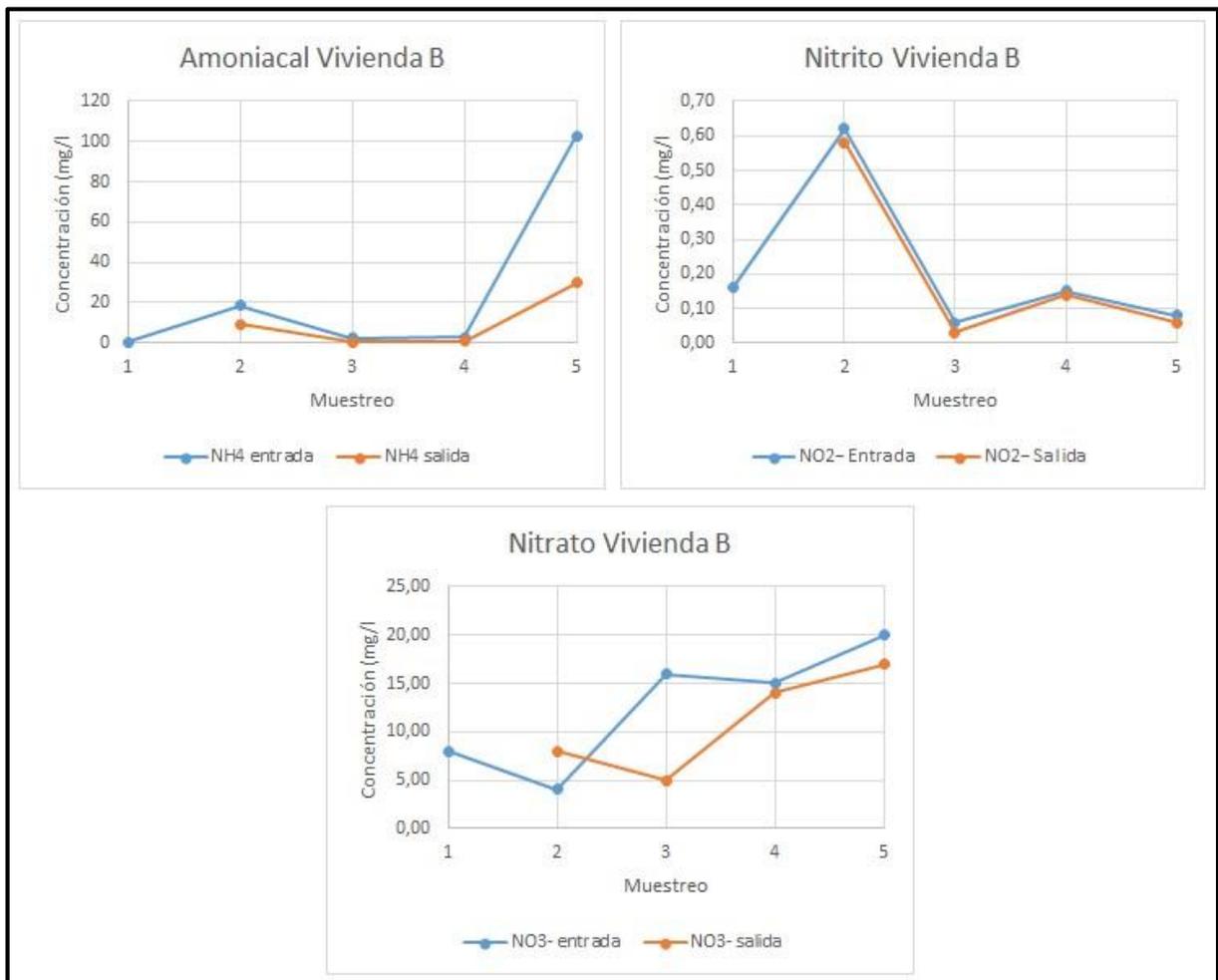


Figura 38. Comportamiento del nitrógeno en la vivienda B

El comportamiento de la vivienda C es similar al de la vivienda A tanto para el nitrógeno amoniacal como para el nitrato, el nitrito por otro lado, se asimila más al de la vivienda B. Como en todos los casos, en el primer muestreo, se tiene una concentración baja de nitrógeno amoniacal, el cual aumenta considerablemente en el afluente para el muestreo 2 con una disminución del 87% en el efluente. Se tiene un aumento tanto para el nitrito como para el nitrato, con una eliminación nula para el nitrito y una reducción del 84% para el nitrato.

Esto indica que se tuvo presente el proceso de nitrificación del amoniaco transformándolo a nitrito y el proceso de desnitrificación, transformando en nitrato en nitrito, el cual se transformó en nitrógeno orgánico. El aporte del amoniaco y del nitrato compensado por la transformación a nitrógeno orgánico, es un indicativo de una asimilación completa dentro del sistema.

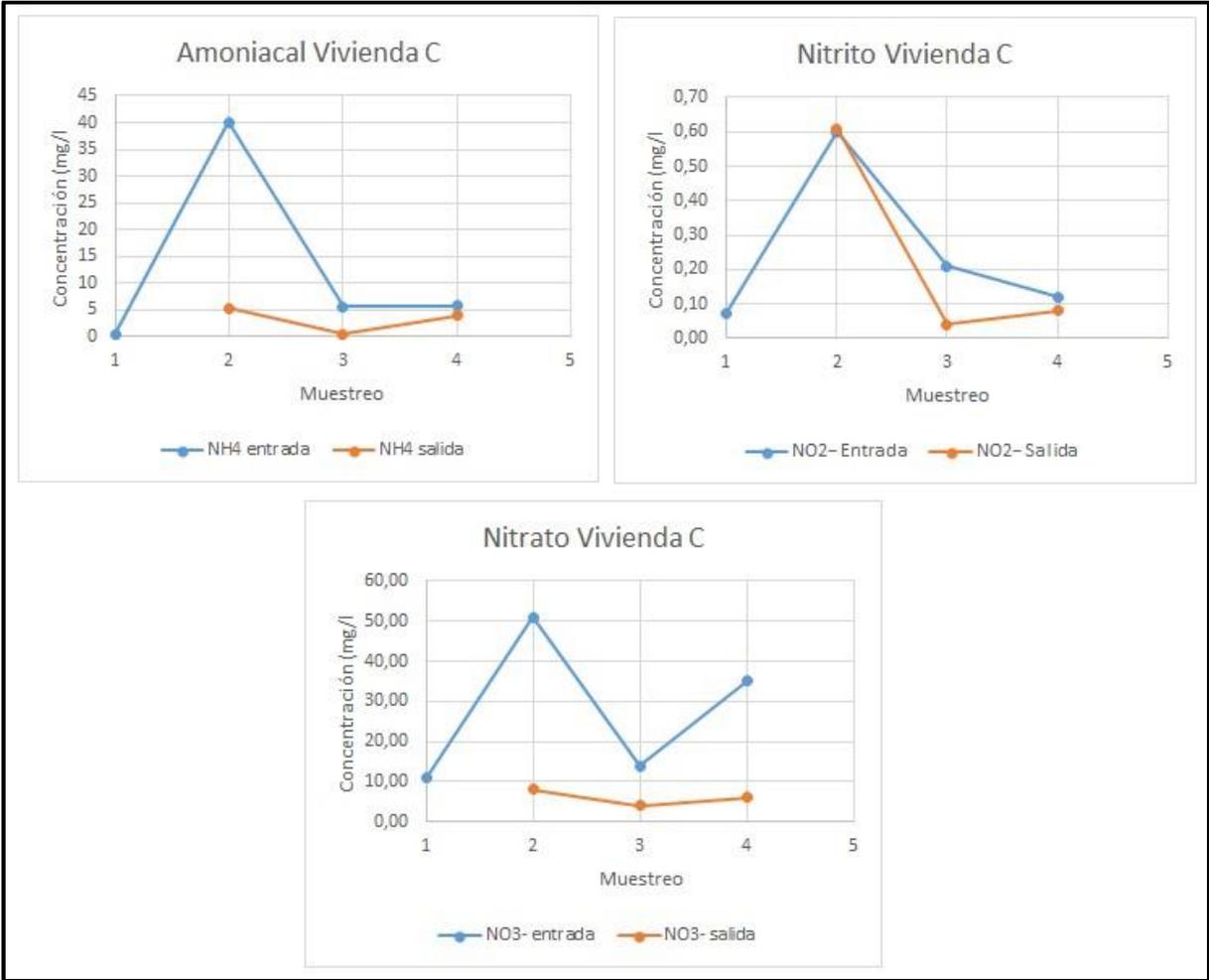


Figura 39. Comportamiento del nitrógeno en la vivienda C

5.3. Indicadores considerados para la modificación del diseño

5.3.1. Pendiente de fondo

Los HFSSH estudiados fueron construidos con las mismas dimensiones, por lo que la pendiente de fondo es constante, tal como se muestra en el Cuadro 16 para el diseño utilizado *in situ*. En el caso de la vivienda A, en el diseño teórico no se modifica la longitud total y la pendiente de fondo se mantiene. Para la vivienda C, el valor obtenido sobrepasa considerablemente los valores recomendados (CONAGUA recomienda pendientes de 0,5 al 1%) por lo tanto, se toma el mismo valor del diseño propuesto para la vivienda B, con una pendiente de 1,25%.

Cuadro 16. Comparación de la pendiente de fondo en los distintos diseños

Pendiente de fondo	Vivienda A	Vivienda B	Vivienda C
Diseño utilizado <i>in situ</i>	0,83%		
Diseño teórico	0,83%	1,25%	2,50%
Diseño propuesto	0,83%	1,25%	

5.3.2. Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulico calculado para cada una de las viviendas se muestra en el Cuadro 17, en donde se muestran los TRH obtenidos para el diseño original utilizado *in situ* y para el diseño propuesto. En el diseño utilizado *in situ*, se tienen TRH altos para la vivienda B y la vivienda C (ACEPESA recomienda TRH de 3 a 5 días) los cuales disminuyen en el diseño propuesto y se acercan a los valores recomendados en teoría. Se toma el mismo TRH en la vivienda B y C debido a la adaptación por la pendiente, como se explicó anteriormente.

Cuadro 17. Comparación de los TRH en los distintos diseños.

TRH (d)	Vivienda A	Vivienda B	Vivienda C
Diseño utilizado <i>in situ</i>	5,51	11,03	16,54
Diseño teórico	4,6	6,13	4,6
Diseño propuesto	4,6	6,13	

Con estos valores definidos, se determina que el diseño teórico cumple con las recomendaciones teóricas de diseño.

5.4. **Propuesta de rediseño para mejorar el sistema de los HA**

Se busca que el funcionamiento de los sistemas sea el más eficiente posible y por ende que el mantenimiento sea más simple y con menor frecuencia. Se toman en consideración las características económicas de la zona de estudio, en donde el ingreso por vivienda es reducido. Algunos de los materiales utilizados fueron donados, contando los estañones de 60 litros y las tapas plásticas, por lo que los cambios propuestos, toman en cuenta que la comunidad pueda conseguir estos materiales de igual manera y se compara con otros análisis que si incluyen estos procesos.

5.4.1. Sistema preliminar

Según lo observado en las visitas al sitio, la capacidad del sistema preliminar es insuficiente para la carga hidráulica que recibe, por lo que se requiere de limpiezas constantes las cuales no han sido programadas ni calculadas por las personas encargadas. El Manual para la construcción y mantenimiento de biojardineras (2010), recomienda que las limpiezas de los sistemas preliminares se realicen cada 8 días, y en el proyecto en estudio, para los 7 meses de muestreos, no se realizaron limpiezas del sistema preliminar. Ya que se busca que el funcionamiento de los sistemas sea el más eficiente posible y por ende que el mantenimiento sea más simple y con menor frecuencia, la inclusión de las limpiezas periódicas es primordial, además de educar a la población en la correcta separación de los residuos sólidos antes de lavar.

En la Figura 40 se muestra el tipo de sistema preliminar utilizado in situ para todos los HFSSH. En este tipo de configuración, se tiene el problema de que las partículas sólidas no tienen el tiempo suficiente para poder sedimentar y la eficiencia del sistema es muy baja en comparación a lo esperado. Se utilizan únicamente dos tubos T en la entrada y la salida, los cuales se encuentran en la parte superior de los estañones, por lo que al formarse la capa de sólidos y grasas en la parte superior, cuando ingresa una carga alta de agua al sistema, estos sólidos se mezclan y tiene un alto porcentaje de paso a los HFSSH, generando obstrucciones y reduciendo la eficiencia esperada. (Aguilar, 2022).

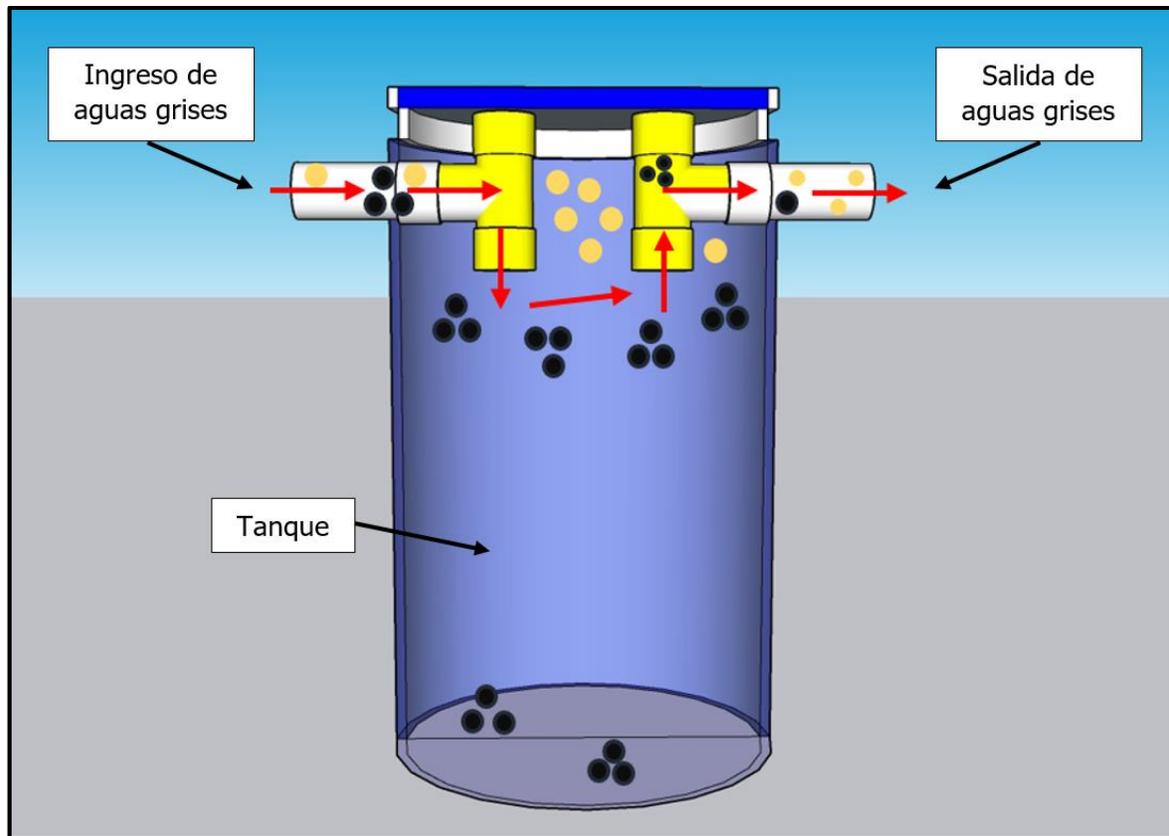


Figura 40. Sistema preliminar utilizado in situ

Por lo que se propone la configuración del sistema preliminar mostrada en la Figura 41, en donde se utilizan 2 tubos T en la parte superior, en la entrada se coloca un tubo de 2 pulgadas de aproximadamente 40 cm de longitud, mientras que en la salida se reduce la longitud a 30 cm. Esta diferencia de longitudes permite que los sólidos presentes en el agua que entra al sistema, tengan tiempo de sedimentar y ocurra una mejor separación entre las grasas y los sólidos, permitiendo que el agua que sale del sistema preliminar tenga la reducción de sólidos y materia orgánica esperada (Aguilar, 2022).

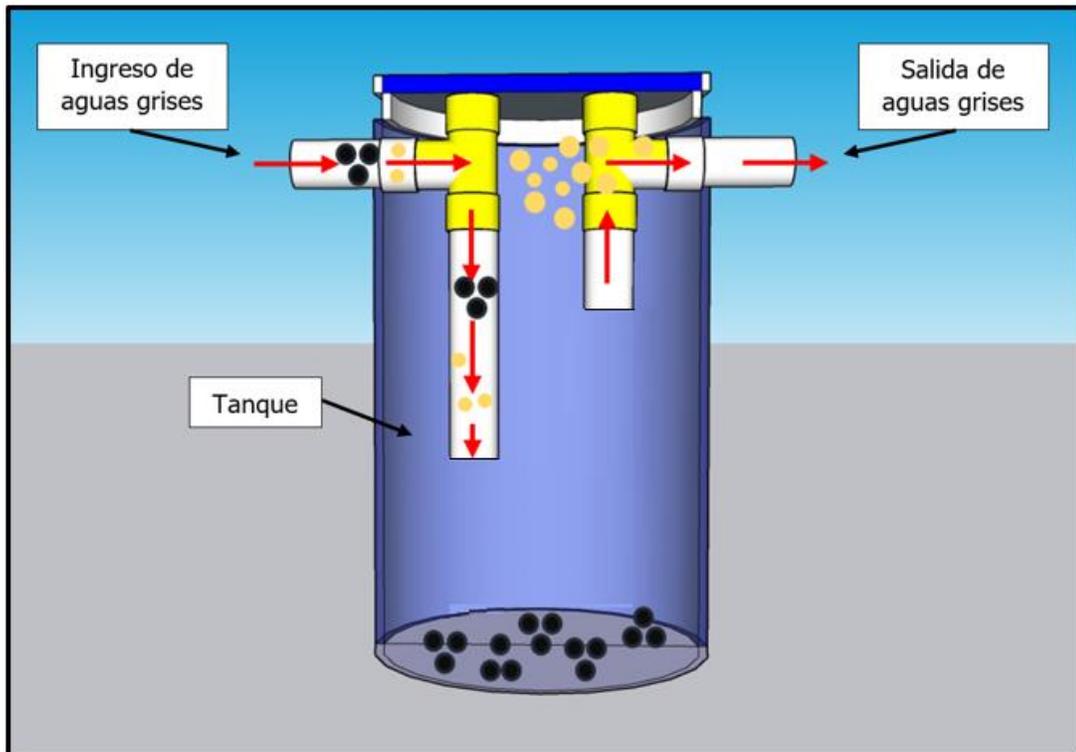


Figura 41. Sistema preliminar recomendado

5.4.2. Diseño de los HFSSH para cada vivienda

En los casos analizados se utilizó un único diseño en todos los HA construidos in situ aunque la cantidad de habitantes en cada vivienda varía. Mediante el cálculo del caudal aportado por cada vivienda, tomando en cuenta el aporte específico de cada una de ellas, se logró determinar que la vivienda A cumple con las dimensiones utilizadas in situ, mientras que las viviendas B y C, pueden tener una reducción en las dimensiones sin afectar la eficiencia del sistema, esto acompañado de la mejora en el sistema preliminar sugerida. Las dimensiones de altura y ancho no se modifican en los diseños propuestos, el cambio se da en la longitud del sistema y de las subpartes que lo conforman. El ancho en todos los diseños se mantiene en 0,5 m.

En la Figura 42 se muestra el diseño utilizado in situ, con un largo de 6 m por un ancho de 0,6 m y una profundidad que varía de 0,4 m al inicio a 0,45 m al final del sistema, lo cual define una pendiente de fondo de 0,83%. La longitud utilizada para colocar la piedra bola (10 a 30 cm de diámetro) al inicio y final del sistema es de 0,50 m, mientras que para las tapas plásticas y la piedra quinta (12 mm de diámetro) es de 5 m, logrando una longitud total de 6 m.

El tipo de planta utilizada para sembrar sobre los HFSSH es la AVECILLA (*Heliconia psittacorum*), la cual es plantada únicamente en la sección central, sobre la piedra quinta. Las tapas plásticas se utilizan con el fin de reducir la cantidad de material a comprar y proporcionar reutilización del plástico. Estas tapas se obtuvieron por medio de una campaña realizada por la organización comunal Pital Verde, en donde se solicitó en el distrito de Pital, en varios puntos estratégicos como pulperías y centros educativos que se guardaran para este proyecto. Esto es de relevancia, ya que además de las ventajas económicas y ambientales, se logra involucrar a más miembros de la comunidad en el proyecto, ayudando a generar conciencia en estos temas.

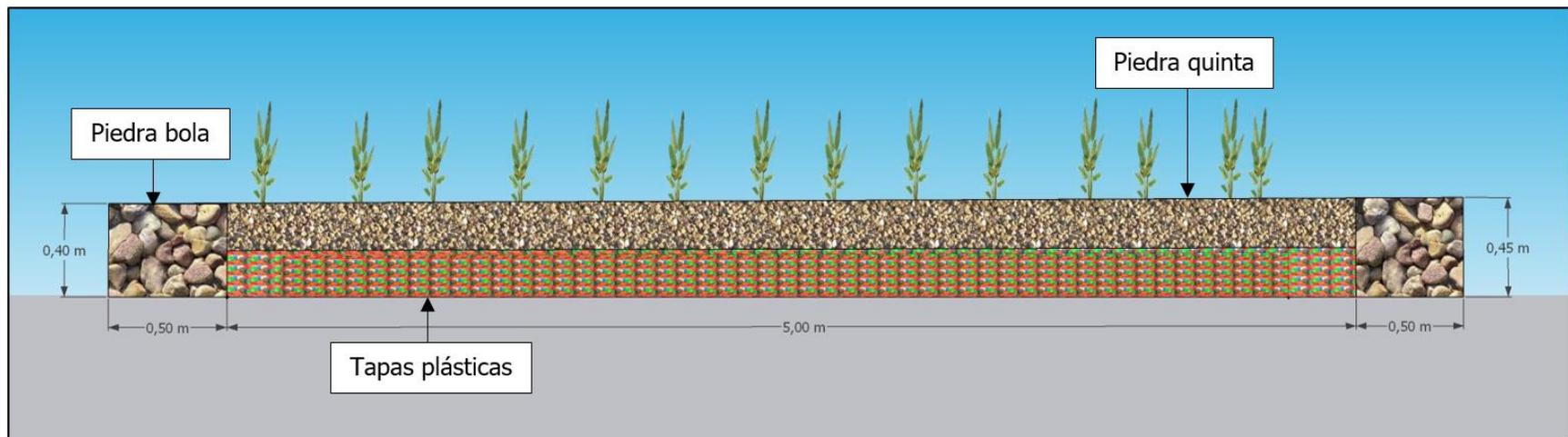


Figura 42. Diseño de las biojardineras utilizado in situ

Al inicio del proyecto, cuando se construyeron los HFSSH, las aguas del lavavajillas, la pila y la lavadora estaban todas conectadas a un mismo tubo, el cual llevaba las aguas grises al sistema primario. Debido a un problema de rebase de las aguas jabonosas por su alto caudal, se procede a separar los sistemas de desagüe de la pila y el lavavajillas, del sistema de desagüe de la lavadora, llevando a estas últimas aguas residuales al sistema de HFSSH directamente (ver Figura 43).

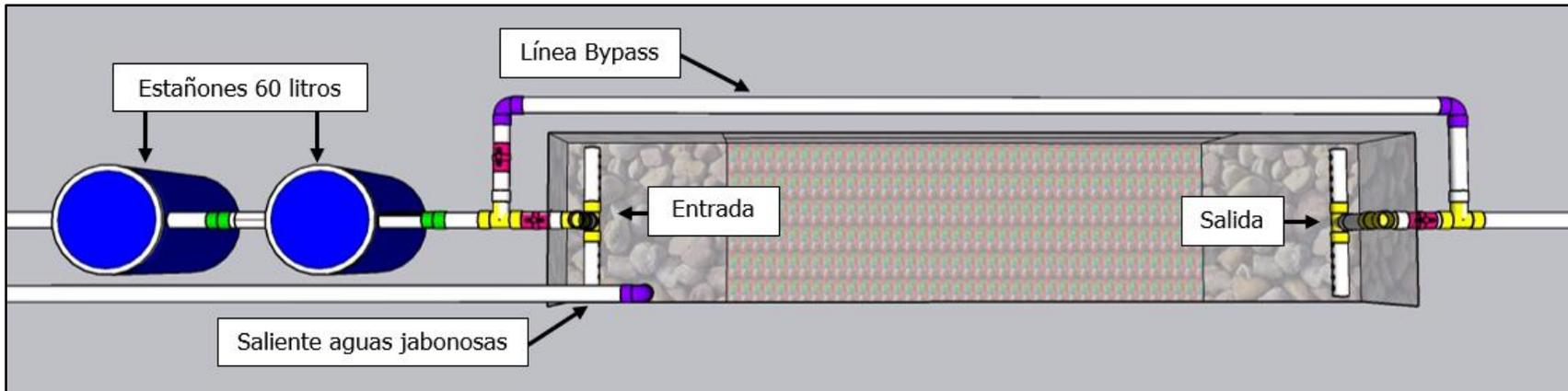


Figura 43. Vista en planta del sistema mecánico utilizado

Este sistema de separación de aguas jabonosas se mantiene en el diseño propuesto. En general el sistema mecánico sugerido es exactamente igual al utilizado in situ, ya que se ve un buen funcionamiento, con excepción del sistema primario. En la Figura 44 se puede observar el diseño propuesto para la vivienda A con 7 habitantes.

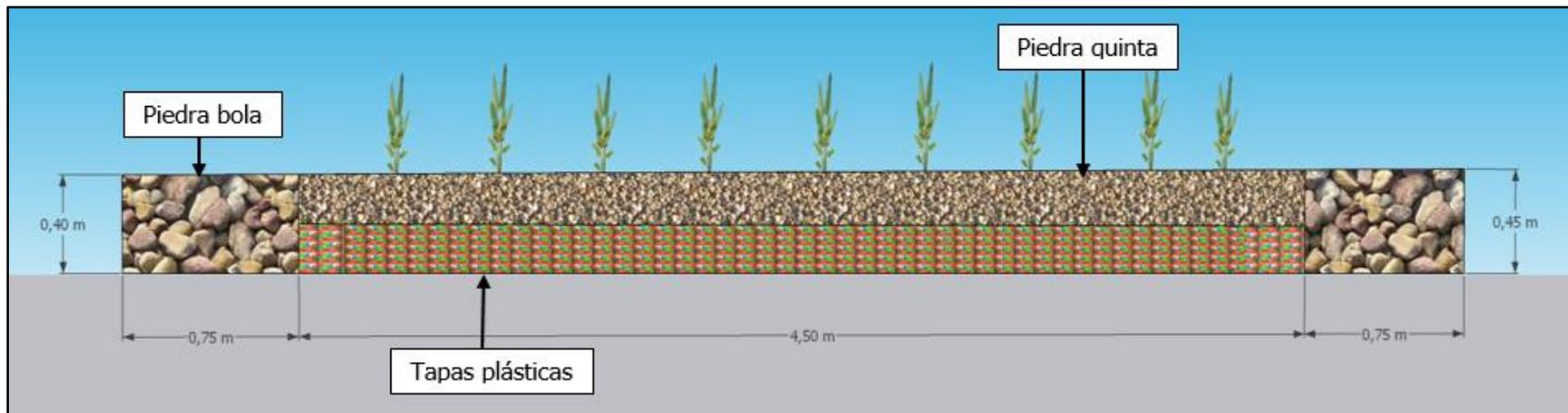


Figura 44. Diseño de las biojardineras propuesto para vivienda A (7 habitantes)

En el caso de la vivienda A, la longitud sigue siendo de 6 m y el cambio se da principalmente en el volumen utilizado de piedra bola, ya que la longitud lateral se cambia de 0,50 m a 0,75 m, esto siguiendo recomendaciones teóricas (UN-HABITAT, 2008). La profundidad sigue los mismos valores, varía de 0,4 m al inicio a 0,45 m al final del sistema, lo cual define una pendiente de fondo de 0,83%.

Para la vivienda B y C, se obtuvieron parámetros de diseño muy similares (más detalle del cálculo en anexos) por lo cual se propone el mismo diseño para ambas viviendas, el cual se muestra en la Figura 45. La longitud total obtenida fue de 4 m, se utilizan 0,75 m de piedra bola al inicio y al final y 2,5 m de la longitud corresponden a tapas plásticas en la parte inferior (a media altura) y el resto piedra quinta.

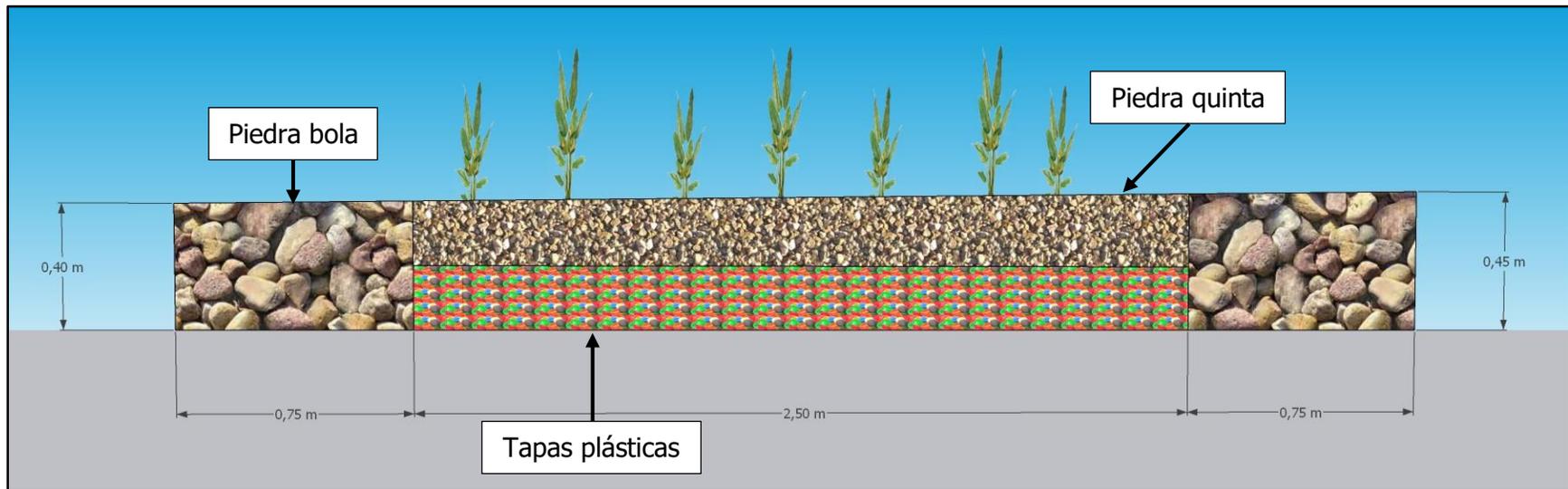


Figura 45. Diseño de las biojardineras propuesto para vivienda B y C (3 y 2 habitantes)

Un resumen de las dimensiones a utilizar en los diseños sugeridos se muestra en el Cuadro 18. Se puede observar que el diseño de la vivienda B y C son iguales, como se mencionó anteriormente, y el ancho (W) se conserva en todos los diseños.

Cuadro 18. Dimensiones de los HA y los materiales utilizados según teoría

Parámetro	Vivienda A	Vivienda B	Vivienda C
Área crítica (m ²)	3		2
W (m)	0,5		0,5
Hi (m)	0,4		0,4
Hf (m)	0,45		0,45
L (m)	6		4
L1 (m)	4,5		2,5
L2 (m)	0,75		0,75
Pendiente de fondo (%)	0,83%		1,25%
Volumen (m ³)	1,35		0,90

El Manual (ACEPESA, 2010) tiene recomendaciones de dimensiones según los habitantes y su consumo de agua (Ver Cuadro 19)

Cuadro 19. Dimensiones sugeridas por el Manual para la construcción y mantenimiento de biojardineras

Dimensión	Número de personas y consumo de agua					
	4 personas 200 l/p/d	4 personas 120 l/p/d	7 personas 200 l/p/d	7 personas 120 l/p/d	10 personas 200 l/p/d	10 personas 120 l/p/d
W (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Hf (m)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Hi (m)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
L (m)	5	4	9	6	13	8
L1 (m)	4	3,2	7,2	4,8	10,4	6,4
L2 (m)	0,5	0,4	0,9	0,6	1,3	0,8
e (m)	0,05	0,04	0,09	0,06	0,13	0,08

Fuente: ACEPESA, 2010.

La medida "L" mostrada en el Cuadro 19, corresponde a la longitud total de la biojardinera, se divide en tramos L1y L2. Hay dos tramos cortos del mismo tamaño (L2) y un tramo largo central (L1). Los tramos de longitud L2 son para colocar en ellos piedra gruesa y en el tramo central de la longitud L1 se coloca la piedra de menor tamaño. El valor "e" indica la diferencia de altura entre el tubo de entrada y el de salida. (ACEPESA, 2010).

En general, la diferencia entre las dimensiones obtenidas según la teoría y las propuestas por el manual son significativamente diferentes, considerando una dotación de diseño de 170 l/p/d para el proyecto en estudio. Se puede estar sobredimensionando las unidades, lo cual incurre

en un gasto económico mayor. Para comunidades con un ingreso bajo es de suma importancia considerar la mayoría de los aspectos para disminuir los costos sin afectar el funcionamiento del sistema, además de tomar en cuenta el espacio disponible para la construcción del sistema.

5.5. Análisis económico de la propuesta

La determinación de los costos de un sistema de tratamiento de este tipo son cruciales para valorar su factibilidad y las implicaciones para los posibles usuarios. Los costos incurridos en la construcción de los humedales artificiales se muestran en el Cuadro 20, donde se detallan para cada una de las viviendas. Estos costos fueron proporcionados por el Ingeniero Ronald Aguilar, quien fue el encargado, por parte de la Vicerrectoría de Acción Ciudadana de la Universidad de Costa Rica, de manejar los fondos disponibles para este proyecto.

Cuadro 20. Costos de materiales por vivienda

Material	Número de habitantes y consumo de agua		
	Vivienda A	Vivienda B	Vivienda C
	6 hab 170 l/p/d	3 hab 170 l/p/d	2 hab 170 l/p/d
PVC tubo sani 2" 50mm 6m	₡12 718,42	₡12 718,42	₡12 718,42
PVC adap hembra 2" 50mm presión	₡5 740,89	₡5 740,89	₡2 870,44
PVC Te 2" 50mm s32.5 p.d	₡13 241,97	₡11 770,64	₡8 827,98
PVC tapón hembra sani 2" 50mm p.g	₡1 841,42	₡1 841,42	₡1 841,42
PVC codo 2" 50mm g45 s32.5	₡0,00	₡0,00	₡4 260,58
PVC codo 2" 50mm g90 s32.5	₡6 038,79	₡3 019,39	₡2 012,93
PVC reducción 3x2" s32.5	₡0,00	₡0,00	₡2 012,92
Llave bola PVC 2 50mm	₡26 799,81	₡26 799,81	₡26 799,81
Llave bola PVC lisa 2" tapa azul	₡7 458,54	₡7 458,54	₡7 458,54
Adaptador macho PVC pres 50mm (2")	₡4 841,94	₡4 841,94	₡2 420,97
Agregado piedra quintilla	₡10 053,59	₡5 585,33	₡5 585,33
Agregado piedra bola/bruta	₡6 164,14	₡6 164,14	₡6 164,14
Cubierta plástica geomembrana negra	₡4 784,08	₡3 270,48	₡3 270,48
Costo total	₡99 683,58	₡89 210,98	₡86 243,95

Fuente: Aguilar, 2022.

La diferencia en los costos entre las viviendas estudiadas, se da principalmente en los sistemas de tubos y elementos utilizados para canalizar las aguas grises hasta los humedales. En el caso de la vivienda A, la lavadora y el lavavajillas se encontraban a mayor distancia, por lo que se requirió de la compra de más elementos.

El Manual (ACEPESA ,2010) muestra con detalle los elementos que recomiendan en la construcción de humedales artificiales. Mediante un análisis económico, se determinó el costo total de los humedales según la cantidad de personas y el consumo de agua. En el Cuadro 21 se muestra el costo para 4, 7 y 10 personas con un consumo de 120 l/p/d. En el proyecto de Nuevo Pital, el diseño de las biojardineras se realiza tomando en cuenta una dotación de 170 l/p/d, por lo que también se incluye en el Cuadro 22, los costos para la misma cantidad de personas, pero con un consumo de 200 l/p/d.

Cuadro 21. Costos de HA según habitantes con consumo de 120 l/p/d (ACEPESA)

Proceso	4 personas 120 l/p/d	7 personas 120 l/p/d	10 personas 120 l/p/d
Tratamiento primario	₡123 290,00	₡131 290,00	₡151 290,00
Biojardinera	₡205 793,58	₡267 763,43	₡330 249,25
Unidad de salida del agua	₡28 950,00	₡30 950,00	₡35 950,00
Mano de obra	₡72 786,39	₡121 310,65	₡169 834,91
Costo total por unidad	₡430 819,97	₡551 314,08	₡687 324,16

Fuente: Modificado de ACEPESA, 2010

Cuadro 22. Costos de HA según habitantes con consumo de 200 l/p/d (ACEPESA)

Proceso	4 personas 200 l/p/d	7 personas 200 l/p/d	10 personas 200 l/p/d
Tratamiento primario	₡123 290,00	₡143 290,00	₡143 290,00
Biojardinera	₡249 749,48	₡364 653,21	₡486 192,91
Unidad de salida del agua	₡28 950,00	₡33 950,00	₡33 950,00
Mano de obra	₡121 310,65	₡194 097,04	₡242 621,30
Costo total por unidad	₡523 300,13	₡735 990,25	₡906 054,21

Fuente: Modificado de ACEPESA, 2010

Según el Manual (ACEPESA, 2010), si el sistema se construye de dimensiones menores a las realmente necesitadas, la eficiencia será menor. Se recomienda un tiempo de retención de 3 a 5 días, ya que se tendrán sistemas más eficientes, donde el agua que sale será de mejor calidad, se debe tomar en consideración que ese tiempo de retención mayor significa mayores dimensiones y por ende mayores costos de construcción.

Como en el proyecto de Nuevo Pital lo que se requiere es una mejora de la calidad de las aguas, pero estas no están siendo reutilizadas, el sobredimensionamiento solo incurre en un aumento de los costos, lo cual no es deseado debido al presupuesto limitado con el que se trabaja.

En el Cuadro 23, se muestra el ahorro que se ha tenido en el proyecto en estudio si se compara con los costos mostrados en el Cuadro 21 y Cuadro 22. El ahorro se da principalmente porque los tanques utilizados son de menor tamaño (tratamiento primario), no se tiene un sistema a la salida para verificar la calidad del agua ni para almacenarla (unidad de salida del agua) y la mano de obra fue gratis, ya que el trabajo fue realizado por los integrantes de la comunidad (mano de obra). En proyectos similares que no cuenten con estas características, los costos del Cuadro 23, deben ser tomados en cuenta.

Cuadro 23. Ahorros incurridos en el proyecto según comparación de costos

Proceso	4 personas 120 l/p/d	7 personas 120 l/p/d	10 personas 120 l/p/d
Unidad de salida del agua	∅28 950,00	∅30 950,00	∅35 950,00
Mano de obra	∅72 786,39	∅121 310,65	∅169 834,91
Tratamiento primario	∅76 000,00	∅84 000,00	∅104 000,00
Ahorro total	∅177 736,39	∅236 260,65	∅309 784,91
Proceso	4 personas 200 l/p/d	7 personas 200 l/p/d	10 personas 200 l/p/d
Unidad de salida del agua	∅28 950,00	∅33 950,00	∅33 950,00
Mano de obra	∅121 310,65	∅194 097,04	∅242 621,30
Tratamiento primario	∅76 000,00	∅96 000,00	∅96 000,00
Ahorro total	∅226 260,65	∅324 047,04	∅372 571,30

El detalle de los elementos tomados en cuenta en los cuadros de costos según el Manual (ACEPESA, 2010), se muestran en el Cuadro 45 y el Cuadro 46 en la parte de Desglose de costos de los anexos. En la Figura 46 se puede apreciar mejor cual es el aporte económico de cada una de las etapas requeridas para el correcto funcionamiento de un HA.



Figura 46. Distribución porcentual de los costos para el sistema de humedales artificiales

Se puede observar que el costo en sí de la biojardinera es del 50% del total de la inversión, ya que otros costos importantes son la mano de obra y el sistema primario, de los cuales depende el adecuado funcionamiento del sistema, además de la inclusión de una unidad de salida que permita monitorear las aguas resultantes del tratamiento.

Cubillo y Gómez (2017) incluyen en su análisis de costos los servicios técnicos profesionales que equivalen a $\$540\,000$ colones por HFSSH, los cuales también deben ser tomados en cuenta en proyectos nuevos. En el caso del proyecto actual, el conocimiento técnico fue brindado por el Ingeniero Ronald Aguilar, por lo que este costo no fue incluido. Ya que los costos totales en la implementación de estos sistemas pueden representar un problema para familias de clase media y baja, la unión de instituciones que ejecutan trabajos de investigación con comunidades, o iniciativas colectivas comunales que tengan interés de llevar a cabo estos sistemas promueven el desarrollo de los mismos.

5.6. Análisis de precipitaciones

De acuerdo con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), se tienen en total 4 estaciones meteorológicas en San Carlos, las cuales corresponden a: Comando Los Chiles (Centro), Upala (Las Brisas), ITCR San Carlos y San Vicente (Ciudad Quesada). Se analizaron las distancias desde estos puntos a la comunidad de Nuevo Pital y la altitud a la que se encontraban. Tomando en cuenta que la comunidad de Nuevo Pital se encuentra a una altitud de 157 msnm, se selecciona la estación meteorológica de ITCR San Carlos para la obtención de los datos de precipitación, los cuales se muestran en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Precipitaciones mensuales registradas para la estación ITCR San Carlos

Muestreo	Fecha	Fecha de registro estación TEC	Altitud (msnm)	Lluvia mensual (mm)	Días con lluvia (mm)
1	16 / 09 / 2021	Setiembre	170	424	28
2	26 / 10 / 2021	Octubre		194,8	13
3	05 / 12 / 2021	Diciembre		216,8	20
4	19 / 01 / 2022	Enero		48,2	14
5	05 / 03 / 2022	Marzo		105,4	4

Fuente: Modificado de los registros meteorológicos del IMN, 2021-2022.

Comparando la cantidad de lluvia que se precipitó en la zona en las fechas de interés, no se logra determinar que esta influya de manera directa en la alteración de las eficiencias obtenidas para los HFSSH. Tanto el DBO, DQO, SST y los nutrientes, presentan comportamientos que fluctúan independientemente de si se tuvo un mes con alta precipitación a como si la precipitación fue mínima, como en el caso del mes de enero, por lo que se requiere de mayores estudios de la precipitación para poder definir si esta variable climática afecta realmente las eficiencias de los sistemas de tratamiento por humedales artificiales.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Observando la calidad de las aguas en los puntos de entrada y comparándolos con los puntos de salida, se percibe un cambio notorio en el color del agua, ya que disminuye la turbidez, una disminución en los malos olores y en la cantidad de sólidos flotantes y sedimentables. Se determina una mejora significativa, por lo que basándose en el marco del derecho al saneamiento y en búsqueda de la protección a la salud y los ecosistemas, es clave continuar brindando y mejorando las estrategias para la gestión de aguas residuales en la comunidad de Nuevo Pital.

Con respecto a las eficiencias obtenidas, para los parámetros de estudio se tuvo que el DBO osciló en un rango del 60,09 a 79,13%, el DQO de 65,42 a 82,00%, para los SST de 64,53 a 87,97%, el Nt de 45,69 a 79,67% y para el Ft de 43,28 a 69,44%. En general, las eficiencias de los humedales se encuentran en un rango aceptable, sin embargo, se recalca que se debe mejorar el sistema primario y brindar un buen mantenimiento del mismo.

En cuanto a las condiciones climáticas, no se logra determinar una relación entre la cantidad de lluvia y la eficiencia de los HFSSH. Sin embargo, en algunos de los casos, la dilución de las aguas dentro de la biojardinera debido a la lluvia, podrían explicar que los valores de entrada y salida variaron significativamente de un mes a otro. Se observa que para lograr determinar si existe influencia directa del clima, ya sea por precipitaciones o cambios de temperatura, se deben realizar muestreos más seguidos, y no mensuales, ya que la información no es suficiente. La zona presenta temperaturas y humedades altas, lo cual brinda las condiciones ideales para la implementación y funcionamiento de los humedales artificiales.

En la mayoría de los casos, con el paso del tiempo se logran acercar o alcanzar los valores normados en el efluente de los HFSSH, lo cual concuerda con la teoría que indica que con el tiempo el sistema desarrolla la biopelícula que se encarga de descomponer la materia orgánica. Cabe recalcar que si no se mejora el tratamiento preliminar, el sistema de HA puede llegar a sobresaturarse, provocando el efecto contrario y disminuyendo la capacidad de tratamiento. En los casos que no se alcanza el valor normado, la disminución de los parámetros estudiados

es notable, lo cual demuestra una mejora en las condiciones del agua que se desfoga a la Quebrada Pitalito.

Se observó que en el caso DQO, el valor tanto del afluente como del efluente siempre fue mayor al obtenido para el DBO en los mismos puntos, lo cual concuerda con lo esperado para estos parámetros según se indica en teoría.

Al comparar la eficiencia de remoción con otros estudios realizados en el país, el DBO y el DQO tuvieron remociones menores a las esperadas. Se observó una relación de la disminución de estas eficiencias con el mal funcionamiento y mantenimiento de los sistemas de tratamiento preliminares, en los cuales la capacidad de los tanques de 60 litros utilizados como sistema preliminar, no da abasto a la carga hidráulica y orgánica que recibe el sistema en ninguna de las viviendas analizadas.

Como este sistema de tratamiento no requiere energía eléctrica, puede ser una alternativa de saneamiento para las comunidades rurales que no cuentan con suministro de energía eléctrica o les sea de utilidad este ahorro energético.

De las plantas utilizadas, la Avecilla (*Heliconia psittacorum*) fue la que tuvo mayor adaptación a las condiciones climáticas de la zona y de los humedales. La Salvia ornamental (*Salvia leucantha*) presentó problemas de adaptación, por lo que se continua utilizando únicamente la Avecilla en los proyectos posteriores.

La opción de reutilizar las aguas tratadas por los humedales artificiales no se considera de utilidad por el momento, ya que no se tiene un buen sistema de recuperación ni distribución de las mismas, además, se requiere de educar a la población para que haya más vinculación con el proceso de mantenimiento de los humedales, ya que en la actualidad no se tiene tanto interés por parte de los miembros de los hogares que cuentan con los HA.

6.2. **Recomendaciones**

En proyectos en los que el mantenimiento de los sistemas de saneamiento son impulsados por organizaciones comunales, se requiere de una comunicación continua y atenta entre los líderes comunales y los vecinos encargados del mantenimiento de sus sistemas de tratamiento, para lo cual se puede sacar provecho de los medios tecnológicos como WhatsApp en los que se promueve una comunicación más directa y abierta con todos los miembros de la comunidad, además de las redes sociales en las que se puede compartir información relevante sobre estos sistemas.

Promover la implementación de sistemas de tratamiento individuales como los HFSSH en comunidades con características similares a Nuevo Pital, ya que se observó que se genera un impacto importante en la calidad de las aguas residuales que desfogan en los cuerpos de agua, reflejándose en una mejora en uno de los problemas actuales que más requieren atención en el país, el tratamiento de las aguas residuales y la calidad de las mismas en el punto final de desfogue.

Fomentar mediante programas de acompañamiento, ya sean brindados por las municipalidades o por universidades como la Universidad de Costa Rica, voluntariados, trabajos comunales, capacitación no formal, la formación de capacidades en los miembros de la comunidad, para que ellos después sensibilicen a las comunidades cercanas.

Es importante educar a la población sobre la correcta separación de los residuos orgánicos de las aguas grises que se dirigen a los humedales artificiales, ya que esto mejora considerablemente el funcionamiento y vida útil de sistema. Brindar los recursos y medios para que esto suceda sirve de motivación para que las familias se involucren en este proceso. Con los residuos orgánicos resultantes de esta separación se puede producir compost el cual se usa para el mejoramiento de los suelos o ya sea como abono a las plantas ornamentales o alimenticias.

La unión comunal y de instituciones públicas y gubernamentales, que ayuden con la construcción y financiamiento, facilita el desarrollo de este tipo de sistemas de tratamiento, ya que el costo total del sistema representa un impedimento para las familias con bajos recursos, por lo que se incita a las comunidades a organizarse y buscar asesoría en temas de tratamiento

de agua con sistemas individuales por humedales artificiales, además de contactar a instituciones como la Universidad de Costa Rica o las municipalidades y empresas, que sirvan como soporte económico y técnico.

Continuar con la implementación de las tapas plásticas como material de relleno, ya que ayuda a disminuir dicho material del medio sin causar un daño colateral y promover el reciclaje de las mismas. La Ing. Paola Vidal indicó en una entrevista realizada para la presente investigación, que en un estudio anterior efectuado en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica, se utilizaron tapas plásticas como parte del filtro en humedales artificiales, y se logró determinar que en la parte interna de las tapas (el plástico más suave utilizado normalmente como sello) no se desarrolla la capa de biomasa necesaria para el desarrollo de bacterias que ayudan en el proceso de degradación de la materia orgánica, por lo que se recomienda retirar este plástico (es un proceso simple) de las tapas antes de utilizarlas como material de relleno.

Debido a las dificultades encontradas en la toma de datos al final del sistema de tratamiento por humedales artificiales, se aconseja la implementación de una unidad de salida de agua apta para mediciones, en donde se coloque un estañón que almacene el agua tratada y la dirija al cordón de caño para su posterior disposición o que la canalice a otro sitio específico dentro de la propiedad del beneficiario para su aprovechamiento, ya sea en el riego de plantas o limpieza de aceras, entre otras ideas. Además de incluir puntos de muestreo medios para poder medir el funcionamiento dentro del sistema de tratamiento. Se recomienda que los puntos de muestreo se encuentren en zonas en donde se puedan realizar las tomas aunque se presenten condiciones lluviosas.

Los compuestos del nitrógeno son los constituyentes más preocupantes presentes en el agua residual debido a su papel en la eutrofización, su alteración en el contenido de oxígeno del agua residual y su toxicidad para los invertebrados acuáticos y especies de vertebrados terrestres, por lo que se recomienda incorporar el límite de desfogue en cuerpos de agua, para el nitrógeno, dentro de la normativa nacional para evitar daños en los ecosistemas.

En proyectos futuros, se recomienda realizar análisis de patógenos, SAAM, Grasas y aceites que son impactantes para el humedal y los cuerpos receptores y relevantes en aguas grises, tanto en las muestras de las aguas residuales del afluente que alimenta al humedal como en el efluente, para asegurar que no se tengan amenazas de este tipo en las aguas residuales.

7. Fuentes bibliográficas

- (AWWA), A. (2006). *Fundamentals and Control of Nitrification in Chloraminates Drinking Water Distribution Systems - Manual of Water Suplly Practices, M56 (1era Edición)*.
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFCNCDWDD/fundamentals-control/fundamentals-control> .
- (AYA), I. y., & (MINAE), M. (2016). *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016-2045 1a ed.* San José: Obtenido de:
<https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Politica Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales marzo 2017.pdf> .
- (OEA), O. d. (1973). *Clasificación taxonómica de los suelos identificados*. Obtenido de
<https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea30s/ch026.htm#a.2.2%20suelos%20del%20orden%20inceptisol>
- (WEF), N. S. (2010). *Subsurface-flow Wetlands WEF Manual of Practice No. FD-16 (3era edición)*. Obtenido de <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010XHC2Q/natural-systems-wastewater/subsurface-flow-wetlands>
- ACEPESA, A. I. (2010). *Manual de construcción de biojardineras, humedales artificiales*.
- AcuaLogica. (18 de 04 de 2018). *Consumo de agua en Costa Rica por día*. Obtenido de
<https://acualogica.com/sabe-cuanta-agua-consume-cada-dia-2/>
- Affam, A., Ezechi, C., & Ezerie, H. (2020). *Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment - 27.7 Cronstructed Wetlands*. IG Global. Obtenido de:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012668RF/handbook-research-resource/constructed-wetlands>.
- Aguilar, R. (05 de Abril de 2022). *Funiconamiento de los Humedales Artificiales de fujo subsuperficial horizontal* . (R. Alvarado, Entrevistador)
- Alfaro, C., Pérez, R., Solano, M., & Mora, E. (Junio de 2013). *Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional*. Obtenido de
<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/7306/7554>

- Astorga, Y. (2018). *Informe de Gestión 2014-2018*. Obtenido de Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados : <https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Informe%20final%20de%20Gesti%C3%B3n%20AyA%202014%202018.pdf>
- Azcoitia, E. (18 de mayo de 2012). *Efecto de sobrecargas hidráulicas en el rendimiento de humedales construidos para la depuración de aguas*. Obtenido de <https://1library.co/article/nitr%C3%B3geno-efectos-humedales-calidad-agua.q5r38mrz>
- Bernal, D., & Cardona, D. (2003). *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas por Métodos Naturales: Una Metodología con Énfasis en Aspectos Tecnológicos*. Universidad del Valle.
- Braskerud, B. (2002). *Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution*. *Ecol Eng.* 351-370.
- Chang, R. (2013). *Química*. México: McGraw Hill.
- CONAGUA. (2015). *(Comisión Nacional de Aguas)*. Obtenido de Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas Rurales, Periurbanas y Desarrollos Ecológicos: Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS), libro 31: <http://aneas.com.mx/manual-de-agua-potable-alcantarillado-y-saneamiento-mapas-conagua-2015/>
- CONAGUA. (2015). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales artificiales. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)*.
- Conevey, M., Stites, D., Lowe, E., Battoe, L., & Conrow, R. (2002). *Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration*. *Ecol Eng.* 141-159.
- Cooper, P., Job, G., Green, M., & Shutes, R. (1993). *Reed Beds and Constructed Wetlands wastewater treatments for small users including individual residences*. Tennessee, United States: Tennessee Valley Authority Resource Group Water Management: Chattanooga.
- Cries, R. W., & Tchobanoglous, G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. New York: McGraw Hill.

- Crites, R. W. (1996). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Reuse*. Presentado en la Conferencia de la Fundación de Ingeniería, Ingeniería Ambiental en la Industria de Procesamiento de Alimentos, XXVI, Santa Fe, Nuevo México.
- Cubillo, M. F., & Gomez, W. (18 de abril de 2017). *Biojardineras como alternativas para el tratamiento de aguas residuales: experiencia en cinco biojardineras en las comunidades de Barra Honda y La Vigía de Nicoya, Guanacaste*. Obtenido de Revist Universidad en Diálogo: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/dialogo/article/view/9519/11287>
- Decreto Ejecutivo N°33601. (2006). *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. San José, Costa Rica.
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., & Stein, O. (2017). *Treatment Wetlands Vol. 16, Water Intelligence*. London : IWA Publishing. Obtenido de: <https://iwaponline.com/ebooks/book/330/> .
- Dunne, E., Coveney, M., Marzolf, E., Hoge, V., Conrow, R., & Naleway, R. (2012). *Efficacy of a large-scale constructed wetland to remove phosphorus and suspended solids from lake apopka*. Florida: Ecol. Eng. 90-100.
- EPA. (2000). *Folleto Informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial*. Obtenido de https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_023.pdf
- Galanakis, C. M., & Agrafioti, E. (2019). *Sustainable Water and Wastewater Processing - 2.4.5 Disinfection*. Obtenido de: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0122I59L/sustainable-water-wastewater/treatment--disinfection> .
- Garcia, J., Morator, J., Bayona, J., & Aguirre, P. (2004). *Performance of horizontal surface flow constructed wetlands with different depths-9th International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control*. Avignon, France.
- GoogleEarth. (Junio de 2022). Obtenido de <https://earth.google.com/web/search/pital+san+carlos/@10.4527524,-84.28124885,159.28189227a,387.68067195d,35y,49.80358321h,0t,0r/data=CigiJgokCb67PGO-b1BAEXdwHfsduj7AGcXnV1RKHT1Aiea-LzugN1TA>

- Gottschall, N., Boutin, C., Crolla, A., Kinsley, C., & Champagne, P. (2007). *The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural wastewater*. Ontario, Canada: Ecol. Eng. 154-163.
- Guerra, L. (2019). *Reacciones estequiométricas*. Obtenido de Universidad Autónoma del estado de Hidalgo: https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/b_sahagun/2019/lgm-quiminorganica.pdf
- H&M. (21 de 07 de 2022). *Catálogo de productos y servicios*. Obtenido de grupohym.com: <https://www.grupohym.com/wp-content/uploads/2018/10/Catalogo-Agregados-y-Concreto-HM.pdf>
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2021 y 2022). *Boletín Meteorológico* . Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>
- Kadlec, R. (1999). *The limits of phosphorus removal in wetlands*. Wetlands Ecology and Management. 165-175.
- Kadlec, R. (2005). *Phosphorus removal in emergent free surface wetlands*. J environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. 1293-1306.
- Kadlec, R., & Knight, R. (1996). *Treatment wetlands*. Boca Raton FL: CRC Lewis Publishers.
- Katukiza, A., Ronteltap, M., Niwagaba, C., Foppen, J., Kansiime, F., & Lens, P. (2012). *Sustainable sanitation technology options for urban slums*. *Biotechnology Advances*. pag 964-978: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.007>.
- Lehr, J., Keeley, J., & Lehr, J. (2005). *Water Encyclopedia, Volumen 1-5 - 1.4.64 Constructed Wetlands*. John Wiley & Sons. Obtenido de: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003ZE802/water-encyclopedia-volumes/constructed-wetlands> .
- Marin, M., Rudin, V., Villavicencio, X., Ulloa, P., Ulloa, M., Barrientos, F., . . . Rosales, E. (2010). *Manual para la construcción y mantenimiento de biojardineras*. Obtenido de ACEPESA II edición: <https://pdfslide.net/documents/manual-construccion-y-mantenimiento-de-biojardineras-acepesa.html>

- Martín, M., Gargallo, S., Hernández, C., & Oliver, N. (2013). *Phosphorus and nitrogen removal from tertiary treated urban wastewater by a vertical flow constructed wetland*. *Ecological Engineering*. 35-40.
- Mata, R., Vásquez, A., & Rosales, A. (s.f.). *El Mapa de Suelos de Costa Rica con la leyenda WRB*. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Gandería: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1630.pdf>
- Mendenhall, W., & Sincich, T. (1988). *Statistics for the Engineering and Computer Sciences*. San Francisco: Dellen Publishing Company.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas Residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*.
- Mihelcic, J., & Zimmerman, J. (2012). *Ingeniería Ambiental*. México: Alfaomega.
- Moncada, S. (2011). *Evaluación del diseño de una biojardinera de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises en Zapote, San José*. San José: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Morel, A., & Diener, S. (2006). *Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, review of different treatment systems for households or neighbourhoods*. Dübendorf, Switzerland.
- Mustafa, A., & Scholz, M. (2011). *Nutrient accumulation in Typha latifolia L. and sediment of a representative integrated constructed wetland*. *Water Air Soil Pollut.* 329–340.
- Nación, P. E. (01 de 03 de 2019). *COSTA RICA APROVECHA EFICAZMENTE EL RECURSO HÍDRICO, PERO NO LOGRA CONTROLAR LOS IMPACTOS NEGATIVOS DE SU USO INTENSIVO*. Obtenido de <https://estadonacion.or.cr/costa-rica-aprovecha-eficazmente-el-recurso-hidrico-pero-no-logra-controlar-los-impactos-negativos-de-su-uso-intensivo/>
- Narin, R., & Mitsch, W. (2000). *Phosphorus removal in created wetland ponds receiving river overflow*. *Ecol. Eng.* 107–126. .
- Proyecto ASTEC. (2004). *Aplicación de la tecnología de biofiltros como una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales domesticas en países de clima tropical*. AyA,

Costa Rica en unión con UNI-Nicaragua Cooperación austriaca SUCHER & Holzer. 29 p.

- Revista, C. A. (2013). *Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional*. Heredia: Universidad Nacional de Costa Rica.
- Robbins, D., & Ligon, G. (2014). *How to Design Wastewater Systems for Local Conditions in Developing Countries . 2.2.1 Blackwater and Greywater*. IWA Publishing. Obtenido de Knovel.com: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010X7VQ8/how-design-wastewater/blackwater-graywater>
- Rueda, G. (2017). *Selección de un sistema para el manejo de aguas residuales en el asentamiento informal Bajo Los Anonos*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Ruiz, F. (2012). *Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica*. San José: Instituto de Acueductos y Alcantarillados.
- Segura, I. (2017). *Cinética de decaimiento de coliformes fecales en un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias y Tecnología del Agua*. . México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Solano, J., & Villalobos, R. (2005). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional, Gestión de Desarrollo. Obtenido de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/ZonaNorte.pdf/c08ed9c6-3d27-4f76-a20a-7cac913fb6d8> .
- Soto, F., García, M., Bécares, E., & Luís, E. (1999). *Role of Scirpus lacustris in bacterial and nutrient removal from wastewater*. Wat. Sci. Tech, 242-245.
- Sperling, M. V. (2007). *Wastewater Characteristics*. Obtenido de Knovel.com: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UA3OZ1/wastewater-characteristics/main-characteristics>
- Sperling, V., Verbyla, M., & Oliveira, S. (2020). *Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data*. London: IWA Publishing.

- SSWM, (. (2018). *Tecnologías de Saneamiento: Humedales artificiales de flujo superficial libre*. Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/humedal-artificial-de-flujo-superficial-libre>
- Tanner, C., Clayton , J., & Upsdell, M. (1995). *Plants for constructed wetland treatment systems-a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species*. *Ecol. Eng.* 59–88. .
- Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., & Zurbrugg, C. (2018). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. Dubendorf; Suiza. 2da Edición: Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (EAWAG). Obtenido de <https://www.eawag.ch/en/departament/sandec/publikationen/compendium>
- UN-HABITAT. (2008). *Constructed Wetland Manual*. Nepal, Kathamandu: Asian Cities Programme.
- Varjani, S. P., Ashok, T., & Huu Hao, C. (2020). *Knovel.com*. Obtenido de <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012LF3U3/current-developments/subsurface-constructed>
- Venegas, A. (2020). *Determinación de los parámetros de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para la optimización del diseño de modelos de caja negra bajo condiciones tropicales*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Vidal, P. (10 de 08 de 2022). Humedales artificiales como tratamiento para Aguas Residuales. (R. Alvarado, Entrevistador)
- Vymazal, J. (2007). *Removal of nutrients in various types of constructed wetlands*. *Total Environ.* 380, 48-65.
- Wu, H., Zhang, J., Li, C., & Zou, Y. (2013). *Mass balance study on phosphorus removal in constructes wetlands microcosms treating polluted river water*. *Clean-Soil Air Water*. 1-7.

8. Anexos

8.1. Proceso para la obtención de la cantidad de gramos de nitrógeno y fósforo presentes en los compuestos del nitrato, nitrito, amoniacal y fosfato.

Se define la masa molar del compuesto definiendo la masa atómica de cada elemento, obtenida de la tabla periódica:

Cuadro 25. Masa atómica de los compuestos estudiados

Elemento	Masa atómica (g/mol)
H	1
N	14
P	31
O	16

Cuadro 26. Masa molar de los compuestos estudiados

Compuesto	Fórmula	Masa molar (g/mol)
NO ₂	$1 \text{ mol N} * 14 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{N} + 2 \text{ mol O} * 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{O} = 46 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ de NO}_2$	46
NO ₃	$1 \text{ mol N} * 14 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{N} + 3 \text{ mol O} * 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{O} = 62 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ de NO}_3$	62
NH ₄	$1 \text{ mol N} * 14 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{N} + 4 \text{ mol H} * 1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{H} = 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ de NH}_4$	18
PO ₄	$1 \text{ mol P} * 31 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{P} + 4 \text{ mol O} * 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{O} = 95 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ de PO}_4$	95

Para la muestra de cálculo de obtención de la concentración tanto del NT como del PT se utilizan los valores obtenidos en el afluente y el efluente de la vivienda A en el mes de diciembre, los cuales se muestran a continuación

Cuadro 27. Valores efluente/afluente vivienda A para diciembre

Muestra Vivienda 1	Compuesto			
	NO2 (mg/L)	NO3 (mg/L)	NO4 (mg/L)	PO4 (mg/L)
Efluente	0,1	15	1,1	3,7
Afluente	0,07	4,0	0,3	1,0

Ejemplo obtención del NT para el afluente de la vivienda 1:

Se debe obtener la concentración de nitrógeno total presente en el nitrito, el nitrato y el nitrógeno amoniacal como se muestra a continuación. Se utilizan los valores presentados en los Cuadro 25 y Cuadro 26.

⇒ Obtención del N presente en forma de Nitrito:

$$[N \text{ en forma de } NO_2] = 0,1 \frac{mg}{L} NO_2 * \frac{1 \text{ mol } NO_2}{46 \text{ g } NO_2} * \frac{1 \text{ mol } N}{1 \text{ mol } NO_2} * \frac{14 \text{ g } N}{1 \text{ mol } N} = 0,035 \frac{mg}{L} N$$

⇒ Obtención del N presente en forma de Nitrato:

$$[N \text{ en forma de } NO_3] = 15 \frac{mg}{L} NO_3 * \frac{1 \text{ mol } NO_3}{62 \text{ g } NO_3} * \frac{1 \text{ mol } N}{1 \text{ mol } NO_3} * \frac{14 \text{ g } N}{1 \text{ mol } N} = 3,39 \frac{mg}{L} N$$

⇒ Obtención del N presente en forma de Nitrógeno Amoniacal:

$$[N \text{ en forma de } NH_4] = 1,1 \frac{mg}{L} NH_4 * \frac{1 \text{ mol } NH_4}{18 \text{ g } NH_4} * \frac{1 \text{ mol } N}{1 \text{ mol } NH_4} * \frac{14 \text{ g } N}{1 \text{ mol } N} = 0,86 \frac{mg}{L} N$$

Se procede a sumar todos los resultados obtenidos de nitrógeno para obtener el nitrógeno total:

$$NT = [N \text{ en forma de } NO_2] + [N \text{ en forma de } NO_3] + [N \text{ en forma de } NH_4]$$

$$NT = 0,035 \frac{mg}{L} + 3,39 \frac{mg}{L} + 0,86 \frac{mg}{L} = 4,285 \frac{mg}{L}$$

Ejemplo obtención del PT para el afluente de la vivienda 1:

$$[P \text{ en forma de } PO_4] = 3,7 \frac{mg}{L} PO_4 * \frac{1 \text{ mol } PO_4}{95 \text{ g } PO_4} * \frac{1 \text{ mol } P}{1 \text{ mol } PO_4} * \frac{31 \text{ g } P}{1 \text{ mol } P} = 1,21 \frac{mg}{L} P$$

Se repite el mismo procedimiento para todos los valores obtenidos en el laboratorio para las muestras analizadas. Estos valores de NT y PT se promedian y se presentan a continuación:

Cuadro 28. Nitrógeno total obtenido

Vivienda	Muestra	Nitrógeno total (mg/L)						
		Setiembre	Octubre	Diciembre	Enero	Marzo	Promedio	Desv. Est
A	1	5,93	53,70	5,89	21,60		21,78	22,53
	2	4,67	15,24	1,33	2,16		5,85	6,42
B	3	3,03	15,91	7,30	7,38	14,70	9,66	5,46
	4		9,22	1,60	3,98	6,19	5,25	3,24
C	5	4,00	48,29	9,09	16,21		19,40	19,90
	6		6,11	1,23	4,49		3,94	2,49

Cuadro 29. Fósforo total obtenido

Vivienda	Muestra	Fósforo total (mg/L)						
		Setiembre	Octubre	Diciembre	Enero	Marzo	Promedio	Desv. Est
A	1	5,81		1,21	2,22		3,08	2,42
	2	1,57		0,33	0,65		0,85	0,64
B	3	2,55		0,33	2,19	5,84	2,72	2,29
	4			0,82	0,62	1,66	1,03	0,56
C	5	1,04		1,17	1,66		1,29	0,33
	6			0,62	0,85		0,73	0,16

8.2. Parámetros generales de diseño

Según la Norma técnica para diseño y construcción de sistemas de abastecimiento de agua potable, de saneamiento y pluvial actualizada al 2021, se definen los parámetros de diseño como población y caudal de diseño como se muestra en los siguientes puntos:

8.2.1. Población de diseño

Ya que se diseñan sistemas individuales, la población de diseño se toma como la cantidad de habitantes por vivienda, esta información se muestra en el Cuadro 10 en la parte de resultados de este documento.

8.2.2. Caudal de diseño

En el cálculo de los aspectos generales de diseño para los HA, se toman los valores recomendados en el reglamento mencionado, los cuales se muestran a continuación.

Cuadro 30. Factores utilizados en el diseño

Factores	Valor
FR1	0,8
FR2	0,36
FMD	1,2
FMH	1,8

El FR2 incluye únicamente las aguas pertenecientes al lavavajillas, la pila y la lavadora, ya que estas son las aguas que son tratadas por los humedales en cuestión. En el caso del $Q_{\text{paro tratada}}$, se multiplica el valor de Q_{paro} por el FR2, con lo que se obtiene el caudal a tratar por los humedales.

Se trabaja en una zona rural por lo que se utiliza una dotación (DOT) de 170 l/p/d. Se utiliza la ecuación [4] para calcular el Caudal promedio:

$$\Rightarrow Q_{pap1} = \frac{170 \text{ l/p/d} * 6 \text{ p}}{86400} = 0,0118 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow Q_{pap2} = \frac{170 \text{ l/p/d} * 3 \text{ p}}{86400} = 0,0059 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow Q_{pap3} = \frac{170 \text{ l/p/d} * 2 \text{ p}}{86400} = 0,0039 \text{ l/s}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación [3] y utilizando un factor de retorno de 0,8 se tendría lo siguiente:

$$\Rightarrow Q_{par01} = 0,8 * 0,0118 \text{ l/s} = 0,00944 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow Q_{par02} = 0,8 * 0,0059 \text{ l/s} = 0,00471 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow Q_{par03} = 0,8 * 0,0039 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,00312 \text{ l/s}$$

Se calcula seguidamente el caudal máximo diario y máximo horario para aguas residuales, utilizando las ecuaciones [5] y [6] con lo que se tendrían los siguientes valores:

$$\Rightarrow QMD_1 = 0,00944 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 1,2 = 0,0113 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow QMD_2 = 0,00472 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 1,2 = 0,00566 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow QMD_3 = 0,00312 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 1,2 = 0,00374 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow QMH_1 = 0,00944 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 1,8 = 0,0170 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow QMH_2 = 0,00472 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 1,8 = 0,00850 \text{ l/s}$$

$$\Rightarrow QMH_3 = 0,00312 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 1,8 = 0,00562 \text{ l/s}$$

Los valores de caudales obtenidos se presentan de manera resumida en el Cuadro 31 mostrado a continuación:

Cuadro 31. Resumen resultados caudales utilizados en el diseño

Parámetro	Vivienda 1	Vivienda 2	Vivienda 3
Q_{pap} (l/s)	0,0118	0,00590	0,00394
Q_{par0} (l/s)	0,00944	0,00472	0,00315
Q_{par0} tratada (l/s)	0,0034	0,00170	0,00113
QMD (l/s)	0,00408	0,00204	0,00136
QMH (l/s)	0,00612	0,00306	0,00204

8.3. Aspectos generales de diseño para humedales artificiales

Realizando las conversiones necesarias, se cambian las unidades del $Q_{\text{paro tratada}}$ de l/s a m^3/d , los resultados obtenidos para cada vivienda se observan en el Cuadro 32:

Cuadro 32. Caudal de diseño en m^3/s

Caudal en m^3/d			
Parámetro	Vivienda 1	Vivienda 2	Vivienda 3
$Q_{\text{paro tratada}} (\text{m}^3/\text{d})$	0,2938	0,1469	0,0979

En cuanto a las concentraciones de entrada, se realizan cálculos estadísticos para analizar cual valor sería el mejor a utilizar. Se muestra en el Cuadro 33, la media, mediana, promedio y los valores extremos.

Cuadro 33. Concentraciones y sus valores estadísticos

Concentraciones entrada	DBO _{5,20} (mg/l)		
	CiA	CiB	CiC
Promedio	211,25	246,80	266,75
Desv. Est (S)	93,46	94,24	142,12
Mediana	233,00	260,00	255,50
Máximo	293,00	328,00	447,00
Mínimo	86,00	100,00	109,00

Se utilizan los valores máximos de concentraciones en el afluente para obtener el valor más crítico para el diseño. Para las concentraciones de salida, se utiliza el valor normado equivalente a 50 mg/l, el resumen de la información a utilizar para el diseño se muestra en el Cuadro 34.

Cuadro 34. Resumen parámetros utilizados en el diseño de los HFSSH

Parámetro	Vivienda A	Vivienda B	Vivienda C
$Q_{\text{paro}} (\text{m}^3/\text{d})$	0,29	0,15	0,10
$C_{\text{imax}} (\text{mg/l})$	293,00	328,00	447,00
$C_e (\text{mg/l})$	50,00		
KDBO	0,250		

Se proceden a calcular las dimensiones de los humedales como se explica en el marco teórico de este trabajo. Los valores obtenidos son los mostrados en el Cuadro 35, con los cuales se procede a realizar los diseños geométricos de los humedales artificiales.

Cuadro 35. Resumen de las dimensiones obtenidas para cada HFSSH

Parámetro	Vivienda A	Vivienda B	Vivienda C
Área crítica (m ²)	3,00	2,00	2,00
W (m)	0,5	0,5	0,5
Hi (m)	0,4	0,4	0,4
Hf (m)	0,45	0,45	0,45
L (m)	6,00	4,00	4,00
Pendiente de fondo (%)	0,83%	1,25%	1,25%

8.4. Resumen resultados HA

A continuación, se muestran los cuadros de resumen para los parámetros obtenidos del análisis en el laboratorio para cada uno de los meses de estudio y algunos resúmenes generales para las viviendas individuales.

Cuadro 36. Resumen general de los parámetros analizados para la vivienda A

Vivienda A										
Estadísticas	DBO		DQO		SST		Nt		Pt	
	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E
Número de datos, n	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,00
Promedio (mg/l)	211,25	74,50	308,56	106,71	332,50	40,00	21,78	5,85	3,08	0,85
Mediana (mg/l)	233,00	75,00	319,55	112,21	210,00	40,00	13,76	3,42	2,22	0,65
Desv. Est (mg/l)	93,46	46,49	188,90	73,40	294,55	25,82	22,53	6,42	2,42	0,64
Mínimo (mg/l)	293,00	123,00	517,30	170,80	770,00	70,00	53,70	15,24	5,81	1,57
Máximo (mg/l)	86,00	25,00	77,85	31,63	140,00	10,00	5,89	1,33	1,21	0,33
CV (%)	44,24	62,41	61,22	68,79	88,59	64,55	103,46	109,69	78,55	75,76
Eficiencia remoción promedio (%)	64,73		65,42		87,97		73,13		72,44	

A: Afluente
E: Efluente

Cuadro 37. Resumen general de los parámetros analizados para la vivienda B

Vivienda B										
Estadísticas	DBO		DQO		SST		Nt		Pt	
	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E
Número de datos, n	5,00	4,00	5,00	4,00	6,00	5,00	5,00	4,00	4,00	3,00
Promedio (mg/l)	246,80	98,50	335,70	100,56	586,57	123,89	9,66	5,25	2,85	0,87
Mediana (mg/l)	260,00	84,00	351,90	107,65	504,72	60,00	7,38	5,09	2,37	0,62
Desv. Est (mg/l)	94,24	80,60	119,10	52,99	407,31	148,43	5,46	3,24	2,13	0,70
Mínimo (mg/l)	328,00	206,00	483,20	157,50	1110,00	380,00	15,91	9,22	5,84	1,66
Máximo (mg/l)	100,00	20,00	179,70	29,44	30,00	10,00	3,03	1,60	0,82	0,33
CV (%)	38,18	81,83	35,48	52,69	69,44	119,81	56,52	61,75	74,83	80,81
Eficiencia remoción promedio (%)	60,09		70,04		78,88		45,69		69,44	

A: Afluente

E: Efluente

Cuadro 38. Resumen general de los parámetros analizados para la vivienda C

Vivienda C										
Estadísticas	DBO		DQO		SST		Nt		Pt	
	A	E	A	E	A	E	A	E	A	E
Número de datos, n	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	3,00	2,00
Promedio (mg/l)	266,75	55,67	375,58	67,59	272,50	96,67	19,40	3,94	1,29	0,73
Mediana (mg/l)	255,50	35,00	358,85	82,26	210,00	60,00	12,65	4,49	1,17	0,73
Desv. Est (mg/l)	142,12	38,42	199,23	29,32	161,94	72,34	19,90	2,49	0,33	0,16
Mínimo (mg/l)	447,00	100,00	624,90	86,67	510,00	180,00	48,29	6,11	1,66	0,85
Máximo (mg/l)	109,00	32,00	159,70	33,83	160,00	50,00	4,00	1,23	1,04	0,62
CV (%)	53,28	69,02	53,05	43,38	59,43	74,84	102,61	63,12	25,25	22,00
Eficiencia remoción promedio (%)	79,13		82,00		64,53		79,67		43,28	

A: Afluente

E: Efluente

Cuadro 39. Resumen de los resultados DBO para el periodo de análisis

Vivienda	Proceso		DBO							\bar{x}	S	CV (%)
			Set	Oct	Dic	Ene	Mar					
Vivienda A	Tamaño de muestra		4									
	Afluente (entrada)	(mg/l)	293,0	271,0	86,0	195,0	-	211,3	93,46	44,24		
	Efluente (salida)	(mg/l)	104,0	123,0	46,0	25,0	-	74,50	46,49	62,41		
	Eficiencia de remoción	(%)	64,51	54,61	46,51	87,18	-	63,20	17,60	27,84		
Vivienda B	Tamaño de muestra		4,00									
	Afluente (entrada)	(mg/l)	100,0	327,0	219,0	328,0	260,0	246,8	94,24	38,18		
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	20,0	58,0	110,0	206,0	98,5	80,60	81,83		
	Eficiencia de remoción	(%)	-	93,88	73,52	66,46	20,77	63,66	30,87	48,49		
Vivienda C	Tamaño de muestra		3,00									
	Afluente (entrada)	(mg/l)	294,0 0	217,0 0	109,0	447,0	-	266,7 5	142,12	53,28		
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	32,00	100,0	35,00	-	55,67	38,42	69,02		
	Eficiencia de remoción	(%)	-	85,25	8,26	92,17	-	61,89	46,58	75,26		

Cuadro 40. Resumen de los resultados DQO para el periodo de análisis

Vivienda	Proceso		DQO							\bar{x}	S	CV (%)
			Set	Oct	Dic	Ene	Mar					
Vivienda A	Tamaño de muestra		4									
	Afluente (entrada)	(mg/l)	517,3	248,8	77,85	390,3	-	308,56	188,90	61,22		
	Efluente (salida)	(mg/l)	168,6	170,8	55,82	31,63	-	106,71	73,40	68,79		
	Eficiencia de remoción	(%)	67,41	31,35	28,30	91,90	-	54,74	30,48	55,69		
Vivienda B	Tamaño de muestra		4									
	Afluente (entrada)	(mg/l)	179,7	351,9	259,9	483,2	403,8	335,70	119,10	35,48		
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	29,44	157,5	104,3	111	100,56	52,99	52,69		
	Eficiencia de remoción	(%)	-	91,63	39,40	78,41	72,51	70,49	22,22	31,52		

Vivienda	Proceso		DQO							
			Set	Oct	Dic	Ene	Mar	\bar{x}	S	CV (%)
Vivienda C	Tamaño de muestra		3							
	Afluente (entrada)	(mg/l)	289	159,7	428,7	624,9	-	375,58	199,23	53,05
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	86,67	82,26	33,83	-	67,59	29,32	43,38
	Eficiencia de remoción	(%)	-	45,73	80,81	94,59	-	73,71	25,19	34,18

Cuadro 41. Resumen de los resultados SST para el periodo de análisis

Vivienda	Proceso		SST							
			Set	Oct	Dic	Ene	Mar	\bar{x}	S	CV (%)
Vivienda A	Tamaño de muestra		4							
	Afluente (entrada)	(mg/l)	770	140	240	180	-	332,50	294,55	88,59
	Efluente (salida)	(mg/l)	50	70	30	10	-	40,00	25,82	64,55
	Eficiencia de remoción	(%)	93,51	50,00	87,50	94,44	-	81,36	21,13	25,97
Vivienda B	Tamaño de muestra		4							
	Afluente (entrada)	(mg/l)	30	1110	1000	370	504,72	602,94	449,15	74,49
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	380	50	60	64,72	138,68	161,00	116,09
	Eficiencia de remoción	(%)	-	65,77	95,00	83,78	87,18	82,93	12,37	14,92
Vivienda C	Tamaño de muestra		3							
	Afluente (entrada)	(mg/l)	160	510	240	180	-	272,50	161,94	59,43
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	60	50	180	-	96,67	72,34	74,84
	Eficiencia de remoción	(%)	-	88,24	79,17	0,00	-	55,80	48,54	86,98

Cuadro 42. Resumen de los resultados nitrógeno total para el periodo de análisis

Vivienda	Proceso		Nt					\bar{x}	S	CV (%)
			Set	Oct	Dic	Ene	Mar			
Vivienda A	Tamaño de muestra		4							
	Afluente (entrada)	(mg/l)	5,93	53,70	5,89	21,60	-	21,78	22,53	103,46
	Efluente (salida)	(mg/l)	4,675	15,239	1,330	2,161	-	5,85	6,42	109,69
	Eficiencia de remoción	(%)	21,13	71,62	77,40	90,00	-	65,04	30,26	46,52
Vivienda B	Tamaño de muestra		4							
	Afluente (entrada)	(mg/l)	3,026	15,911	7,296	7,379	14,702	9,66	5,46	56,52
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	9,22	1,60	3,98	6,19	5,25	3,24	61,75
	Eficiencia de remoción	(%)	-	42,08	78,00	46,04	57,90	56,00	16,13	28,81
Vivienda C	Tamaño de muestra		3							
	Afluente (entrada)	(mg/l)	4,00	48,29	9,09	16,21	-	19,40	19,90	102,61
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	6,11	1,23	4,49	-	3,94	2,49	63,12
	Eficiencia de remoción	(%)	-	87,34	86,50	72,31	-	82,05	8,45	10,30

Cuadro 43. Resumen de los resultados fósforo total para el periodo de análisis

Vivienda	Proceso		Pt							\bar{x}	S	CV (%)
			Set	Oct	Dic	Ene	Mar					
Vivienda A	Tamaño de muestra		3									
	Afluente (entrada)	(mg/l)	5,81	-	1,21	2,22	-	3,08	2,42	78,55		
	Efluente (salida)	(mg/l)	1,57	-	0,33	0,65	-	0,85	0,64	75,76		
	Eficiencia de remoción	(%)	73,03	-	72,97	70,59	-	72,20	1,39	1,93		
Vivienda B	Tamaño de muestra		3									
	Afluente (entrada)	(mg/l)	2,55	-	0,33	2,19	5,84	2,72	2,29	84,19		
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	-	0,82	0,62	1,66	1,03	0,56	53,72		
	Eficiencia de remoción	(%)	-	-	-150,00	71,64	71,51	71,58	127,93	178,73		
Vivienda C	Tamaño de muestra		2									
	Afluente (entrada)	(mg/l)	1,04	-	1,17	1,66	-	1,29	0,33	25,25		
	Efluente (salida)	(mg/l)	-	-	0,62	0,85	-	0,73	0,16	22,00		
	Eficiencia de remoción	(%)	-	-	47,22	49,02	-	48,12	1,27	2,64		

Cuadro 44. Resultados obtenidos con el medidor de multiparámetros

Valores promedio para cada punto de control					
Muestra	Ph	%DO	ppm DO	ppm Tds	T °C
1	6,62	49,45	3,92	395,00	26,20
2	7,01	43,85	3,45	447,00	26,54
3	6,75	42,50	3,39	350,38	26,03
4	6,98	39,28	3,11	442,42	26,32
5	7,00	41,55	3,29	393,00	26,46
6	7,00	40,45	3,22	332,25	26,01

8.5. Desglose de costos

En los cuadros mostrados a continuación, se desglosan los costos incurridos en el desarrollo de humedales artificiales según las recomendaciones brindadas en el *Manual para la construcción y mantenimiento de biojardineras*. Estos costos se obtienen para el año 2022, en el periodo de diciembre, por lo que estos varían a lo largo del tiempo y se debe tomar en cuenta para su uso futuro.

Cuadro 45. Desglose de costos según manual ACEPESA para un consumo de 200 l/p/d

Material requerido	4 personas 200 l/p/d	7 personas 200 l/p/d	10 personas 200 l/p/d
Tratamiento primario	₡123 290,00	₡143 290,00	₡143 290,00
Recipientes plásticos con tapa	₡76 000,00	₡96 000,00	₡96 000,00
T's PVC, sanitarias de 38 mm (1,5 ")	₡11 200,00	₡11 200,00	₡11 200,00
Tubería PVC, sanitaria de 38 mm (1,5 ")	₡5 950,00	₡5 950,00	₡5 950,00
Uniones PVC de 38 mm (1,5 ")	₡760,00	₡760,00	₡760,00
Tubería PVC de 25 mm (1 ") ventilación	₡21 000,00	₡21 000,00	₡21 000,00
Unión PVC de 25 mm (1 ")	₡660,00	₡660,00	₡660,00
Codos sanitarios de 25 mm (1 ")	₡720,00	₡720,00	₡720,00
Pegamento PVC	₡7 000,00	₡7 000,00	₡7 000,00
Biojardineria	₡249 749,48	₡364 653,21	₡486 192,91
Piedra tipo bola	₡34 800,00	₡62 400,00	₡90 000,00
Piedra cuarta entre 3/4 y 1 "	₡90 000,00	₡149 760,00	₡216 180,00
Plástico no menor a 0,7 mm espesor, 3 m ancho	₡11 129,48	₡16 853,21	₡23 212,91
Tubería PVC sanitaria 38 mm (1,5 ")	₡55 930,00	₡55 930,00	₡55 930,00
Tapones PVC sanitaria de 38 mm (1,5 ")	₡4 860,00	₡4 860,00	₡4 860,00
T's PVC, sanitarias de 38 mm (1,5 ")	₡13 300,00	₡13 300,00	₡13 300,00
Tuvo pegamento para PVC	₡7 000,00	₡7 000,00	₡7 000,00
Cemento o pegamix	₡20 850,00	₡34 750,00	₡48 650,00
Sacos para cubrir el plástico	₡11 880,00	₡19 800,00	₡27 060,00
Unidad de salida del agua	₡28 950,00	₡33 950,00	₡33 950,00
Recipiente plástico con tapa	₡19 000,00	₡24 000,00	₡24 000,00
Válvulas o llave de paso PVC de 38 mm (1,5 ")	₡4 000,00	₡4 000,00	₡4 000,00
Tubería PVC sanitaria 38 mm (1,5 ")	₡5 950,00	₡5 950,00	₡5 950,00
Mano de obra	₡121 310,65	₡194 097,04	₡242 621,30
Operario (1)	₡61 447,95	₡98 316,72	₡122 895,90
Ayudantes (2)	₡59 862,70	₡95 780,32	₡119 725,40
Costo total por HA	₡523 300,13	₡735 990,25	₡906 054,21

Cuadro 46. Desglose de costos según manual ACEPESA para un consumo de 120 l/p/d

Material requerido	4 personas 120 l/p/d	7 personas 120 l/p/d	10 personas 120 l/p/d
Tratamiento primario	¢123 290,00	¢131 290,00	¢151 290,00
Recipientes plásticos con tapa	¢76 000,00	¢84 000,00	¢104 000,00
T's PVC, sanitarias de 38 mm (1,5 ")	¢11 200,00	¢11 200,00	¢11 200,00
Tubería PVC, sanitaria de 38 mm (1,5 ")	¢5 950,00	¢5 950,00	¢5 950,00
Uniones PVC de 38 mm (1,5 ")	¢760,00	¢760,00	¢760,00
Tubería PVC de 25 mm (1 ") ventilación	¢21 000,00	¢21 000,00	¢21 000,00
Unión PVC de 25 mm (1 ")	¢660,00	¢660,00	¢660,00
Codos sanitarios de 25 mm (1 ")	¢720,00	¢720,00	¢720,00
Pegamento PVC	¢7 000,00	¢7 000,00	¢7 000,00
Biojardinera	¢205 793,58	¢267 763,43	¢330 249,25
Piedra tipo bola	¢27 600,00	¢41 700,00	¢55 500,00
Piedra cuarta entre 3/4 y 1 "	¢66 600,00	¢99 720,00	¢133 020,00
Plástico no menor a 0,7 mm espesor, 3 m ancho	¢8 903,58	¢12 083,43	¢15 899,25
Tubería PVC sanitaria 38 mm (1,5 ")	¢55 930,00	¢55 930,00	¢55 930,00
Tapones PVC sanitaria de 38 mm (1,5 ")	¢4 860,00	¢4 860,00	¢4 860,00
T's PVC, sanitarias de 38 mm (1,5 ")	¢13 300,00	¢13 300,00	¢13 300,00
Tuvo pegamento para PVC	¢7 000,00	¢7 000,00	¢7 000,00
Cemento o pegamix	¢13 900,00	¢20 850,00	¢27 800,00
Sacos para cubrir el plástico	¢7 700,00	¢12 320,00	¢16 940,00
Unidad de salida del agua	¢28 950,00	¢30 950,00	¢35 950,00
Recipiente plástico con tapa	¢19 000,00	¢21 000,00	¢26 000,00
Válvulas o llave de paso PVC de 38 mm (1,5 ")	¢4 000,00	¢4 000,00	¢4 000,00
Tubería PVC sanitaria 38 mm (1,5 ")	¢5 950,00	¢5 950,00	¢5 950,00
Mano de obra	¢72 786,39	¢121 310,65	¢169 834,91
Operario (1)	¢36 868,77	¢61 447,95	¢86 027,13
Ayudantes (2)	¢35 917,62	¢59 862,70	¢83 807,78
Costo total por HA	¢430 819,97	¢551 314,08	¢687 324,16