



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

**Diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal  
como tratamiento secundario a un caudal menor al efluente de la  
PTAR “Los Tajos” para el reúso del agua tratada en riego  
paisajístico**

Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

**Hazel Alejandra Quirós Arroyo**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

2025

Práctica Dirigida de Graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Sustentante:



---

Hazel Quirós Arroyo

Aprobado por:



---

Ph.D. Alejandra Rojas González  
Presidenta del Tribunal  
Escuela de Ingeniería de Biosistemas



---

Ph.D. Ronald Aguilar Álvarez  
Director del Trabajo Final de Graduación



---

Lic. Wilfred Zúñiga Castro  
Asesor



---

M.Sc. Paola Vidal Rivera  
Asesora



---

Ph.D. Felipe Calleja Apéstegui  
Lector Invitado Tribunal

***Dedicatoria***

*En especial, a mi mamá Lilliam por su esfuerzo constante y apoyo incondicional; a mi hermano Nelson por enseñarme de todo lo que soy capaz. Por último, y no menos importante a mi mejor amiga María José, mi prima Rosaura y mi amiga Allison Pérez así como a mis colegas/amigos de carrera que fueron un lugar seguro en todos estos años.*

## ***Agradecimientos***

*Al profesor Ronald Aguilar por el conocimiento compartido, su guía constante y su apoyo durante la realización de este trabajo. De igual manera, extendo mi agradecimiento a los miembros de mi comité asesor, Paola Vidal y Wilfred Zúñiga, por el tiempo invertido en la revisión del trabajo y observaciones, las cuales fueron cruciales para el desarrollo del proyecto.*

*A la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos (PTAR Los Tajos) del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), y en especial al ingeniero Olman Jiménez, Director de la PTAR Los Tajos, así como nuevamente a Wilfred Zúñiga, Encargado del Área de Calidad y Gestión Ambiental de la misma planta, les agradezco por abrirme las puertas de la institución y brindarme la oportunidad de realizar este trabajo en sus instalaciones. Así como por el tiempo invertido en reuniones para revisión y discusión de resultados.*

*Por último, pero no menos importante agradecimiento profundo a mi mamá Lilliam Arroyo, este título es tan mío como de ella, porque no es un logro individual, sino el resultado de personas que se esforzaron para darme opciones. Una mamá que se dedicó a sacarnos adelante, a mis hermanos y a mí, con apoyo incondicional y muchas noches sin dormir. De mi hermano Nelson, que siempre se aseguró de brindarme la confianza que a mí muchas veces me faltaba, recordándome siempre que yo puedo cumplir todos esos sueños. De mi prima María Rosaura, por esas madrugadas compartidas entre trabajos y cafés, que eran un impulso para continuar. De ese grupo de amigos que conocí en primer año y compartimos muchas horas en la biblioteca o noches de esparcimiento. De mis amigas Allison Pérez y María Vidal, que fueron un lugar seguro donde desahogar frustraciones, compartir carcajadas y siempre celebrar pequeños logros.*

## RESUMEN

La planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos, ubicada en La Uruca, inició operaciones en 2015 como parte del Proyecto de Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana de San José, liderado por el AyA. En su primera etapa, brindó tratamiento a 36,000 conexiones de usuarios, reduciendo la carga de aguas residuales vertidas en ríos como el Torres y Rivera, con el objetivo de mitigar la contaminación del recurso hídrico. Actualmente, la planta opera en esta primera fase, ofreciendo tratamiento físico del agua, tratamiento del biogás, control de olores, y su efluente final se descarga en el río Torres (Presidencia de la República de Costa Rica, 2016).

Para fortalecer el ecosistema de la ribera del río Torres, en 2017 se creó el Corredor Biológico Interurbano, cuyo propósito es generar áreas verdes y boscosas a lo largo de la cuenca. Desde 2015, el AyA ha impulsado la reforestación en la vereda del río Torres; Sin embargo, en temporada seca, muchos de los árboles plantados enfrentan problemas por falta de agua. Ante esta necesidad, surge este proyecto de tesis, enfocado en el diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal como tratamiento secundario de un caudal menor del efluente de la PTAR Los Tajos, para su reúso en riego paisajístico. Este diseño se desarrolla en conformidad con el Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales y el DE-33601-S-MINAE: Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

El diseño del humedal artificial se fundamenta en la caracterización del agua, la topografía y el clima, mediante el análisis de datos registrados por la PTAR y el IMN en el período 2018-2023. Con esta base, se determinarán los parámetros de diseño del sistema de tratamiento secundario y su dimensionamiento adecuado. Para ello, se estimó el caudal necesario para abastecer la zona de reforestación, en función de esta demanda se calculó la cantidad de humedales artificiales requeridos.

El proyecto también definió el punto de redireccionamiento del caudal, su extracción y distribución mediante tuberías de PVC por gravedad. Se incluyó el diseño de un tanque de distribución, encargado de regular la entrega del caudal a los humedales, y la instalación de vertederos como estructuras, un tanque de almacenamiento al final del sistema de tratamiento para recolectar el agua tratada. Finalmente, se desarrolló un manual de operación y mantenimiento de los humedales artificiales y del sistema de reúso del agua tratada, dirigido al personal de la PTAR Los Tajos. Este manual cumple con los lineamientos del Artículo 29 del Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (N° 31545-S-MINAE), incluyendo información clave sobre la capacidad de diseño de cada estructura, la puesta en marcha del sistema, las tareas operativas, el equipo requerido y los procedimientos de mantenimiento.

## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificación.....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	3
1.3 Objetivos del proyecto .....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
2. 1 PTAR Los Tajos.....	4
2.2. Aguas residuales.....	4
2.3 Humedales artificiales .....	5
2.3.1 Tipos de Humedales artificiales .....	5
2.3.2 Funcionamiento de los Humedales artificiales.....	7
2.3.3 Componente de los Humedales artificiales .....	7
2.3.4 Diseño de los Humedales artificiales.....	10
2.3.5 Mantenimiento.....	14
2.4 Marco legal.....	15
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>17</b>
3.1 Descripción del sitio de estudio .....	17
3.1.1 Descripción climática del sitio .....	18
3.1.2 Descripción del agua residual de la PTAR Los Tajos .....	19
3.1.3 Descripción de la topografía de la PTAR Los Tajos .....	19
3.2 Dimensionamiento de estructuras hidráulicas y diseño de los humedales.....	19
3.2.1 Humedal artificial.....	20
3.2.2 Definición del total de caudales (Q) a redireccionar y la cantidad de humedales a implementar .....	22
3.2.3 Toma de agua.....	23
3.2.4 Tanques.....	23
3.2.5 Sistema de riego.....	24
3.3 Manual de operaciones y mantenimiento.....	24
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>25</b>
4.1 Descripción del sitio de estudio .....	25
4.1.1 Descripción climática del sitio .....	25
4.1.2 Descripción del agua residual de la PTAR Los Tajos .....	29

4.1.3 Descripción de la topografía de la PTAR Los Tajos .....	34
4.2. Diseño de tren de tratamiento y memoria de cálculo .....	36
4.2.1 Flujo hidráulico estructural.....	37
4.2.2 Humedal artificial .....	38
4.2.3 Caudal necesario para la zona de reforestación.....	44
4.2.4 Toma de agua.....	46
4.2.5 Tanques y vertederos .....	54
4.2.6 Tren de tratamiento.....	70
4.2.7 Sistema de riego.....	71
4.2.8 Principales costos del sistema de tratamiento.....	75
4.3 Manual de operaciones y mantenimiento del sistema de tratamiento propuesto .....	78
4.3.1 Generación de aguas residuales .....	79
4.3.2 Sistema de tratamiento propuesto .....	79
4.3.3 Ingeniería básica de diseño .....	81
4.3.4 Implementación del sistema y arranque. ....	81
4.3.5 Operación.....	82
4.3.6 Posibles problemas .....	83
4.3.7 Mantenimiento.....	84
4.3.8 Desechos .....	85
4.3.9 Reportes operacionales .....	85
4.3.10 Tabla resumen.....	89
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>92</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>98</b>
<i>Anexo 1: Carta de acuerdo entre Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos (PTAR Los Tajos) del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AYA) .....</i>	<i>98</i>
<i>Anexo 2: Marco teórico tablas de ventajas y desventajas de los tipos de HAFSS .....</i>	<i>100</i>
<i>Anexo 3: Manual de operación y mantenimiento.....</i>	<i>101</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de funcionamiento de humedal artificial de flujo subsuperficial.....	6
<b>Figura 2.</b> Esquema de funcionamiento de humedal artificial de flujo subsuperficial vertical. Modificado de Dotro et al (2017). .....	7
<b>Figura 3.</b> Macrófitas utilizadas para los humedales artificiales <i>Typha latifolia</i> (A) y <i>Phragmites australis</i> (B).....	8
<b>Figura 4.</b> Plantas tropicales recomendadas para implementar en humedales artificiales (Moncada, 2011).....	9
<b>Figura 5.</b> Distribución triangular de plantas. Creación propia en AuctoCAD, unidades en m. ....	9
<b>Figura 6.</b> Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos. Fuente: Google Earth.....	17
<b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo del proceso que posee la PTAR Los Tajos.....	18
<b>Figura 8.</b> Relación área y árboles a reforestar. Fuente: Comisión Nacional Forestal, (2010). ....	22
<b>Figura 9.</b> Precipitación acumulada mensual de enero-diciembre 1961-1990. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, (2008).....	26
<b>Figura 10.</b> Temperaturas promedio, mínima y máximas mensuales del Pacífico central de Costa Rica. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, (2008). ....	26
<b>Figura 11.</b> Datos de precipitación registrados durante el 2023 por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27. ....	27
<b>Figura 12.</b> Promedio de precipitaciones mensuales registradas del 2018 a 2023 por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27. ....	28
<b>Figura 13.</b> Datos de temperatura registrados del 2018 a 2023 por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27. ....	28
<b>Figura 14.</b> Promedio de temperaturas mensuales registrado del 2018 a 2023 por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27. ....	29
<b>Figura 15.</b> Caudales promedio de salida registrados en la PTAR Los Tajos en el 2023....	29
<b>Figura 16.</b> Valores de DBO y DQO registrados en la PTAR Los Tajos en el 2023.....	30
<b>Figura 17.</b> Histogramas de las concentraciones de DBO y DQO registrados en el efluente generado por la PTAR Los Tajos en el 2023. ....	31
<b>Figura 18.</b> Dispersión de las concentraciones de DBO y DQO registrados en la PTAR Los Tajos en el 2023. ....	32
<b>Figura 19.</b> Modelo de regresión lineal de DQO y caudal promedio.....	32
<b>Figura 20.</b> Modelo de regresión lineal de DBO y caudal promedio. ....	33
<b>Figura 21.</b> Gráficos box plot de concentraciones de DQO y DBO, unidades en mg/L. ....	34
<b>Figura 22.</b> Finca de la PTAR Los Tajos con huella constructiva actual y huella constructiva futura correspondiente a la segunda etapa del proyecto. Plano generado por PTAR Los Tajos del AyA.....	34
<b>Figura 23.</b> Representación topográfica con curvas de nivel de la zona disponible al oeste correspondiente a finca principal de la PTAR. Superficie creada en Autocad con archivo de curvas de nivel facilitado por el AyA. ....	36
<b>Figura 24.</b> Finca de la PTAR en 3D. Superficie 3D creada en Civil 3D con archivo de curvas de nivel facilitado por el AyA.....	36
<b>Figura 25.</b> Flujo del sistema propuesto para el sistema de tratamiento .....	37

<b>Figura 26.</b> Vista frontal del humedal artificial. Elaboración propia en Sketchup. ....	42
<b>Figura 27.</b> Planos de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal establecido como sistema de tratamiento del agua residual. Elaboración propia con AutoCAD.....	43
<b>Figura 28.</b> Área disponible para la implementación del sistema y zona de reforestación. .	44
<b>Figura 29.</b> Distribución en planta de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y las estructuras que forman parte del sistema de tratamiento secundario. ....	45
<b>Figura 30.</b> Localización del punto de captación en el pozo de desfogue de la PTAR Los Tajos, junto con su correspondiente vista en planta según el plano estructural. Fuente: Imagen satelital de Google Earth & Planos técnicos proporcionados por AyA.....	46
<b>Figura 31.</b> Vista superior y corte lateral del pozo de desfogue de la PTAR Los Tajos, con señalización de la cara superior y lateral al nivel de piso. Fuente: Planos técnicos proporcionados por AyA.....	47
<b>Figura 32.</b> Vista isométrica superior del tanque de desfogue de la PTAR Los Tajos con intervención para ingreso de la tubería para redireccionamiento de caudal al sistema de tratamiento propuesto. Elaboración propia en Sketchup. ....	47
<b>Figura 33.</b> Esquema de alturas de tanques y disposición de la bomba. ....	48
<b>Figura 34.</b> Simulación de sistema de tubería de envío de caudal con bomba centrifuga. ..	54
<b>Figura 35.</b> Vista lateral e isométrica del tanque de distribución. Elaboración propia con Sketchup.....	56
<b>Figura 36.</b> Borde libre del tanque. Elaboración propia con Sketchup .....	56
<b>Figura 37.</b> Isométrico de tubería de distribución de tanque a humedales, con accesorios y sus coeficientes de pérdidas. Elaboración propia con Sketchup.....	57
<b>Figura 38.</b> Modelo hidráulico obtenido en Epanet para la tubería de distribución de tanque a humedales.....	58
<b>Figura 39.</b> Planos de tanque de distribución. ....	59
<b>Figura 40.</b> Coeficiente de descarga en vertederos triangulares (Nengoue et al, 2015).....	60
<b>Figura 41.</b> Diseño de vertedero propuesto. Elaboración propia con Sketchup.....	62
<b>Figura 42.</b> Modelo hidráulico obtenido en Epanet para la tubería de distribución de vertedero a tanque de almacenamiento. ....	63
<b>Figura 43.</b> Modelo hidráulico obtenido en Epanet para la tubería de distribución de vertedero a tanque de almacenamiento, con variación de altura. ....	64
<b>Figura 44.</b> Vista frontal de la primera unidad de humedal artificial. Elaboración propia con Sketchup.....	64
<b>Figura 45.</b> Planos del vertedero. ....	65
<b>Figura 46.</b> Vista frontal del tanque de almacenamiento. Elaboración propia con Sketchup .....	66
<b>Figura 47.</b> Vista isométrica del tanque de almacenamiento propuesto. Elaboración propia con Sketchup.....	67
<b>Figura 48.</b> Vista lateral del tanque de almacenamiento, tubería de salida de agua hacia zona de riego. Elaboración propia con Sketchup. ....	67
<b>Figura 49.</b> Diseño de tanque de almacenamiento propuesto con tapa y punto de succión. Elaboración propia con Sketchup. ....	68
<b>Figura 50.</b> Planos del tanque de almacenamiento.....	69
<b>Figura 51.</b> Diseño 3D del tren de tratamiento propuesto. Elaboración propia con Sketchup. ....	70

<b>Figura 52.</b> Vista de perfil de diseño sugerido en 2D y 3D. Elaboración propia con Sketchup y AutoCAD. ....	70
<b>Figura 53.</b> Parámetro de diseño del canal provincial de riego de la zona en reforestación. Elaboración propia con software Hcanales. ....	71
<b>Figura 54.</b> Dimensiones del perfil del canal trapezoidal nuevo propuesto. Unidades en m. ....	72
<b>Figura 55.</b> Hoja de cálculo del nuevo tirante utilizando el software RStudio. ....	72
<b>Figura 56.</b> Corte del canal principal de riego. Elaboración propia con Sketchup. ....	73
<b>Figura 57.</b> Vista de canal principal con derivación y lámina para rebalse. Elaboración propia con Sketchup. ....	73
<b>Figura 58.</b> Canal derivado. Elaboración propia con Sketchup. ....	74
<b>Figura 59.</b> Drenajes de PTAR para zonas de inundación .....	74
<b>Figura 60.</b> Gráfico de pastel del total de costos por estructura. ....	78
<b>Figura 1.</b> Parte A carta de acuerdos establecidos por las partes interesadas .....	98
<b>Figura 2.</b> Parte B carta de acuerdos establecidos por las partes interesadas. ....	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Características del medio filtrante para humedales artificiales HAFSS (Cuervo et al, 2018).</i> .....	14
Tabla 2. <i>Límites máximos permitidos para reúso paisajístico de aguas residuales.</i> .....	16
Tabla 3. <i>Coefficiente de correlación de Pearson entre las concentraciones de DBO y DQO del efluente de la PTAR Los Tajos</i> .....	31
Tabla 4. <i>Resumen de parámetros establecidos para el diseño de una unidad de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.</i> .....	39
Tabla 5. <i>Resumen de temperaturas máximas y mínimas establecidas en la descripción climática de la zona de estudio.</i> .....	40
Tabla 6. <i>Resumen de valores establecidos para una unidad de humedal artificial de flujo subsuperficial de flujo horizontal.</i> .....	42
Tabla 7. <i>Resumen de relaciones y resultados obtenidos sobre el consumo hídrico del área de reforestación</i> .....	45
Tabla 8. <i>Cálculo de pérdidas por fricción en la tubería.</i> .....	49
Tabla 9. <i>Pérdidas por accesorios en tramo de tubería de tanque de desfogue a tanque de distribución.</i> .....	50
Tabla 10. <i>Pérdidas de tubería correspondiente al tramo de succión.</i> .....	51
Tabla 11. <i>Pérdidas por accesorios en tramo de tubería de succión.</i> .....	51
Tabla 12. <i>Dimensiones para tanque de distribución.</i> .....	55
Tabla 13. <i>Coefficientes de pérdidas menores por accesorios en tubería para distribución de agua en humedales artificiales (CFIA, 2017).</i> .....	57
Tabla 14. <i>Dimensiones del vertedor triangular de cresta delgada.</i> .....	62
Tabla 15. <i>Coefficientes de pérdidas menores por accesorios en tubería para recolección del agua a la salida de los humedales y su depósito en tanque de almacenamiento (CFIA, 2017).</i> .....	63
Tabla 16. <i>Dimensiones del tanque de almacenamiento de agua residual posterior al tratamiento.</i> .....	66
Tabla 17. <i>Costos relacionados con la instalación y construcción del diseño del sistema de tratamiento.</i> .....	75
Tabla 18. <i>Resumen de dimensiones de las estructuras.</i> .....	81
Tabla 19. <i>Periodos de muestreo para análisis de laboratorio.</i> .....	86
Tabla 20. <i>Resumen de tareas para mantenimiento.</i> .....	89
Tabla 1. ....	100
Tabla 2. ....	100

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

El presente proyecto se justifica ante la creciente preocupación global por la escasez y la calidad del agua, el agua cubre el 70% de la superficie terrestre, de este valor solo el 1% está disponible para consumo humano. Sumado a esto, en los últimos 20 años, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2020) en América Latina se han estimado reducciones de un 22% en la disponibilidad del recurso hídrico por persona.

Costa Rica no es la excepción, con el fin de aprovechar de manera responsable el recurso hídrico, el presente proyecto propone una revalorización del agua residual de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos (PTAR) para el riego de zonas en reforestación en la ribera del Río Torres, evitando así el uso de agua potable en esta actividad. Dado que la PTAR carece actualmente de un tratamiento secundario, se plantea la instalación de un sistema alternativo de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, como medida para garantizar la calidad del agua tratada y su seguridad en el riego. Este proyecto no solo busca beneficios ambientales, sino también educativos, al promover la conciencia sobre la gestión sostenible del agua y su reúso en la comunidad mediante un sistema que se integra de forma armoniosa con el entorno.

A nivel global, el problema del acceso al agua potable se agrava, debido a la escasez de tratamiento de las aguas residuales. En el 2019, en el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos, se menciona que cerca de 844 millones de personas carecen de agua potable y alrededor de 4.500 millones de personas no tienen acceso a sistemas de saneamiento (WWAP, 2019). Según el Banco Mundial (2020), cerca de un 80% de las aguas residuales no es tratada y se vierte a los cuerpos de agua. Además, en el 2020, la UNICEF indicó que alrededor de 1.000 niños mueren todos los días debido a enfermedades como diarrea por consumo de aguas contaminadas, producto de falta o nulo saneamiento (UNICEF, 2020).

Esta problemática se refleja claramente en la situación de Costa Rica, donde el 70% de la población utiliza tanques sépticos como tratamiento de aguas residuales ordinarias, sin presentar un correcto diseño y mantenimiento, lo cual puede provocar contaminación de mantos acuíferos (García, 2018). Por tal razón, en el 2015 entra en operación la PTAR Los Tajos, gracias al proyecto de Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana de San José elaborado por el AyA. El proyecto le permite a la población de la GAM conectarse a red sanitaria y no depender más de tanques sépticos en sus hogares. Además, busca reducir el vertido ilegal de las aguas grises al sistema pluvial o los ríos. Sin embargo, la planta en este momento se encuentra aún en su primera etapa, contando con tratamiento primario (tratamiento físico), sumado a esto poseen otras líneas de tratamiento como son el tratamiento de lodos, tratamiento de olores y de biogás, en este momento la planta posee como punto de desfogue el río Torres (Interempresas. 2022, marzo 22).

Un tratamiento primario de aguas residuales se basa en la remoción de sólidos suspendidos y sólidos sedimentados, por medio de métodos físicos o mecánicos (Rojas, 2002). El agua posterior al tratamiento primario pierde materia particulada, pero posee todavía una alta concentración de materia orgánica disuelta, presenta remoción de aproximadamente el 20 % de fósforo (P), 30% de demanda biológica de oxígeno (DBO) y 60% de sólidos totales (SST)

(Mihelcic et al, 2012), lo cual evidencia la necesidad de un tratamiento secundario.

En relación con la eficiencia de remoción de la PTAR Los Tajos, el estudio de Mora Aparicio (2022), encontró que la PTAR logra altos niveles de remoción para DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno) y SST (sólidos totales). Sin embargo, se registraron niveles elevados de coliformes fecales 4,417,551 NMP 100 mL<sup>-1</sup> aguas arriba y 18,354,482 NMP 100 mL<sup>-1</sup> aguas abajo del río Torres) después de la instalación de la planta. Además, se observaron bajos niveles de remoción para N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> y SAAM, debido a la falta de un tratamiento secundario en la PTAR.

En este contexto, es necesario considerar que el río Torres funciona como punto de conexión entre ecosistemas, ya que forma parte del Corredor Biológico Interurbano del Río Torres (CBIRT). Creado en el 2017, abarcando 18 distritos de diferentes cantones del país, con una longitud de 26 kilómetros (Biocorredores- s. f.) es por esta razón que de forma paralela desde el 2015 el AyA también inició con la reforestación de la vereda del río Torres, desde el Bajo Los Ledezmas hasta la PTAR, presentando complicaciones para una correcta reforestación en época seca (AyA, 2021).

Alvarado-García (2020) menciona que el ecosistema urbano del río Torres (ICEURT) posee zonas susceptibles a erosión o a la disponibilidad de recursos, por presencia de poca vegetación o vegetación que no es capaz de amortiguar el impacto de la lluvia sobre el terreno, generando terrenos con facilidad de arrastre. Navarro Ceciliano (2021) y Alvarado-García (2020) mencionan que es necesario aumentar esfuerzos en la recuperación de la vereda del río, para lograr obtener un buen mantenimiento de la funcionalidad y estructura del ecosistema acuático, esto mediante actividades de reforestación. La diversidad de flora permite mayor acceso a alimentos para la fauna residente, éxito reproductivo, la vegetación ribereña de la cuenca del río corresponde a un refugio ante radiación solar, anidación y depredadores, colaborando en la dispersión de semillas y en la polinización (Alvarado-García, 2020)

El sistema de humedales artificiales (HA) propuesto corresponde a sistemas ecológicos para el tratamiento de aguas contaminadas, los cuales, por medio de procesos de sedimentación, volatilización, adsorción de las plantas y degradación microbiana, realizan la remoción de contaminantes presentes en el agua, gracias a la interacción conjunta de vegetación, sustratos, microorganismos y suelo (Cai et al, 2020). Existen diferentes tipos de humedales artificiales, divididos de acuerdo a la dirección del flujo del agua, en este caso los de flujo subsuperficial horizontal (HAFSH) corresponden a sistemas que mejor adaptación presentan en el trópico y poseen mayor capacidad de tratamiento, ya que admiten una mayor cantidad de materia orgánica (García, 2008)

Con el establecimiento de los HAFSH se busca obtener un mejor tratamiento para sus nutrientes (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), así como mejorar la reducción de DQO y DBO, para un caudal menor al efluente de la PTAR. Pérez et al (2013) menciona que con estos sistemas se logran reducciones de 60% y 90%, obteniendo un efluente que cumple con el Reglamento de vertidos y reúso de aguas residuales. Estableciendo de esta forma un sistema de riego para las zonas en reforestación, durante la temporada seca, esto desde un enfoque de paisajismo ecosistémico y permitiendo ampliar el abanico de servicios ecosistémicos como la mitigación de las islas de calor y protección de la biodiversidad. Dando continuidad al proyecto iniciado desde el 2015 por parte del AyA, donde se pretende reforestar la ribera del río desde el Bajo los Ledezma hasta la PTAR (AyA, 2021).

## **1.2 Planteamiento del problema**

La PTAR Los Tajos posee un proyecto de reforestación en la ribera del Río Torres, el cual presenta problemas en la época seca. Evidenciando la necesidad de implementar un sistema de riego que ayude a abastecer la demanda del recurso hídrico de los árboles sembrados para su correcto crecimiento, la institución desea evitar el uso de agua potable en esta labor. La PTAR cuenta únicamente con un sistema de tratamiento primario, el cual no brinda el tratamiento correcto al efluente para que este pueda ser utilizado en riego.

Este proyecto pretende realizar el diseño de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal como tratamiento secundario a un caudal menor al efluente de la PTAR “Los Tajos” para realizar una revalorización del mismo en riego de las zonas en reforestación, evitando el uso de agua potable, garantizando su calidad y seguridad para implementarse en riego paisajístico.

## **1.3 Objetivos del proyecto**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal como Tratamiento Secundario a un caudal menor al efluente de la PTAR “Los Tajos” para el reúso del agua tratada en riego paisajístico.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1.3.2.1 Establecer los criterios espaciales y características del agua mediante el análisis de la información brindada por el AYA para el diseño del sistema de tratamiento y reúso del agua para riego.

1.3.2.2 Diseñar un sistema de tratamiento de las aguas efluentes de la PTAR basado en un humedal artificial y su reúso que cumpla con la normativa nacional para el riego de la zona de reforestación.

1.3.2.3 Generar un manual de operación y mantenimiento de los humedales artificiales y reúso de las aguas, basado en la normativa nacional, como herramienta técnica destinada para los funcionarios de la PTAR Los Tajos.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 PTAR Los Tajos

La planta de tratamiento Los Tajos, ubicada en la Uruca, dio inicio con sus labores en el 2015 con capacidad para brindar tratamiento a las aguas residuales de 1070 000 habitantes; sin embargo, en su primera etapa ofreció tratamiento a 36.000 conexiones de usuarios, aliviando la carga de aguas residuales que eran arrojadas a ríos como el Torres y Rivera (Presidencia de la República de Costa Rica, 2016). Esto gracias al proyecto de Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana de San José del AyA, el cual fue creado con el fin de implementar medidas de prevención sobre la contaminación del recurso hídrico (Interempresas. 2022, marzo 22).

En el proyecto se ven beneficiados los cantones de San José como Escazú, Desamparados, Alajuelita, Tibás, Montes de Oca, Moravia, Goicoechea, Vásquez de Coronado, la Unión y Curridabat. Sin embargo, la planta todavía se encuentra en su primera etapa de desarrollo, en la cual cuenta con tratamiento físico de las aguas, tratamiento del biogás, así como depuración de olores y siendo el punto final de desfogue el río Torres (Mora-Aparicio, 2022).

Con el fin de aportar al hábitat de la ribera del río Torres, en el 2017 se creó el corredor biológico interurbano, el cual posee como objetivo generar zonas verdes y boscosas a lo largo de la cuenca del río. Con el fin de establecer interconexión para aumentar la movilidad e intercambio genético de la flora y fauna local (Montero, B. 2020), el AyA desde el 2015 suma fuerzas en la reforestación de la vereda del río Torres.

### 2.2. Aguas residuales

Las aguas descartadas después de su uso y que han sido modificadas en su calidad son conocidas como aguas residuales. Usualmente, las aguas residuales llegan a cuerpos de agua y afectan su ecosistema acuático.

Para Costa Rica, las aguas residuales se pueden clasificar en dos categorías, aguas ordinarias y especiales. Las aguas ordinarias, que son aquellas procedentes de labores del hogar y que se subdividen en aguas negras (fecales) y grises (lavanderías, cocinas, baños); y aguas especiales, que son aquellas procedentes de labores industriales con residuos químicos en su composición (Mora et al, 2022).

Las aguas residuales especiales poseen presencia de microorganismos patógenos, lo que les otorga una capacidad infecciosa, toxicidad por contenido de productos químicos y poseen malos olores producto de la descomposición anaeróbica que experimenta la materia orgánica. Debido a estas características, las aguas residuales deben ser tratadas con antelación a su vertido final en cuerpos de agua, con el fin de reducir la toxicidad y niveles de contaminación, de esta forma se cumple con la legislación y disminuye la contaminación de fuentes de agua (Mora et al, 2022).

## **2.3 Humedales artificiales**

Los humedales artificiales (HA) corresponden a sistemas basados en la naturaleza para el tratamiento de aguas contaminadas. Dichos sistemas, por medio de procesos de sedimentación, volatilización, adsorción de las plantas y degradación microbiana, realizan la remoción de contaminantes presentes en el agua, gracias a la interacción conjunta de vegetación, sustratos, microorganismos y suelo (Cai et al, 2020).

La implementación de los humedales artificiales presenta ventajas económicas, sociales, estéticas y técnicas, en comparación con otros sistemas de tratamiento convencionales para aguas residuales. Los humedales artificiales permiten obtener aguas residuales de buena calidad, encontrándose dentro de los límites máximos permitidos de acuerdo a la normativa vigente y aprovechable para el reúso en riego agrícola. Estos sistemas presentan una vida útil en promedio de 25 años, con bajos costos de mantenimiento, operación, e implementación, así como bajos requerimientos energéticos (Arteaga-Cortez et al., 2019).

### **2.3.1 Tipos de Humedales artificiales**

Los humedales artificiales (HA) se clasifican en humedales de flujo superficial (HAFS) y humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS). Para el caso de estos últimos se dividen en humedales subsuperficiales horizontales (HAFSSH) y subsuperficial vertical (HAFSSV), esto de acuerdo con la dirección del flujo (Cuervo et al, 2018). En el apéndice 7.2 B, tablas 1 y 2 se resumen las ventajas y desventajas de aplicación de cada uno de los humedales de flujo subsuperficial.

#### **2.3.1.1 Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)**

Corresponden a los humedales artificiales que más asemeja el funcionamiento de los humedales naturales. Se basa en canales con poca profundidad, construidos sobre grava, arena o lecho, que propician el hábitat para las especies vegetales y además posee una superficie impermeable, con el fin de evitar la filtración del agua residual (Cuervo et al, 2018).

Estos poseen una menor eficiencia que los HAFSS, en cuanto a tratamiento de las aguas residuales, ya que soportan cargas orgánicas bajas. Sumado a esto, presenta poca viabilidad cuando se poseen espacios de instalación pequeños (Cuervo et al, 2018).

#### **2.3.1.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)**

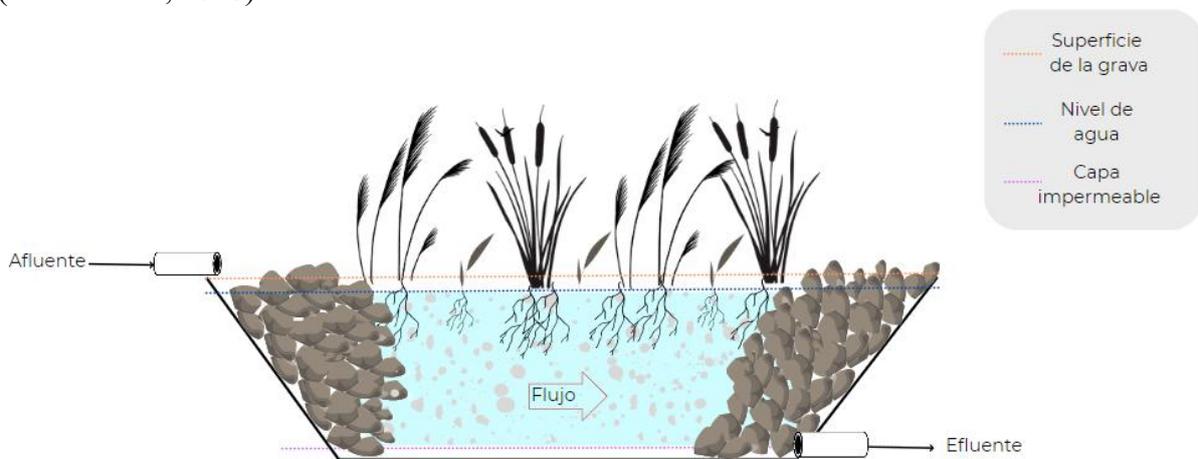
Su principal característica es que el agua fluye por medio de un medio granular o lecho, que cumple la función de filtro. Dicho medio granular aporta la estructura adecuada para el crecimiento de especies macrófitas o vegetales, y crecimiento de biopelículas microbianas.

Los HAFSS necesitan una menor área y menores tiempos de retención hidráulica (3 días), con velocidades de flujo similares a las de HAFS (Cuervo et al, 2018). Sumado a lo anterior, no se generan malos olores o bien vectores y presenta un correcto funcionamiento para valores altos de carga orgánica, estos se subdividen en dos tipos:

### 2.3.1.2.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal

En este tipo de humedales el agua ingresa por un extremo en la parte superior de la estructura y sale por el otro extremo inferior. Su funcionamiento se basa en el ingreso del agua residual a través de una tubería en el extremo superior, donde ingresa al lecho de grava que posee mayor tamaño, con el fin de retener aquellas partículas más grandes que pueden generar obstrucciones. Después, entra en el lecho de arena y/o antracita, en este caso el agua atraviesa el filtro horizontalmente, entrando en contacto con la rizosfera, donde se presentan los mayores contaminantes.

Por último, el agua se extrae del proceso por medio de una tubería en el extremo opuesto, en la parte inferior, en la figura 1 se muestra un diagrama de flujo y estructura correspondiente (Cuervo et al, 2018).

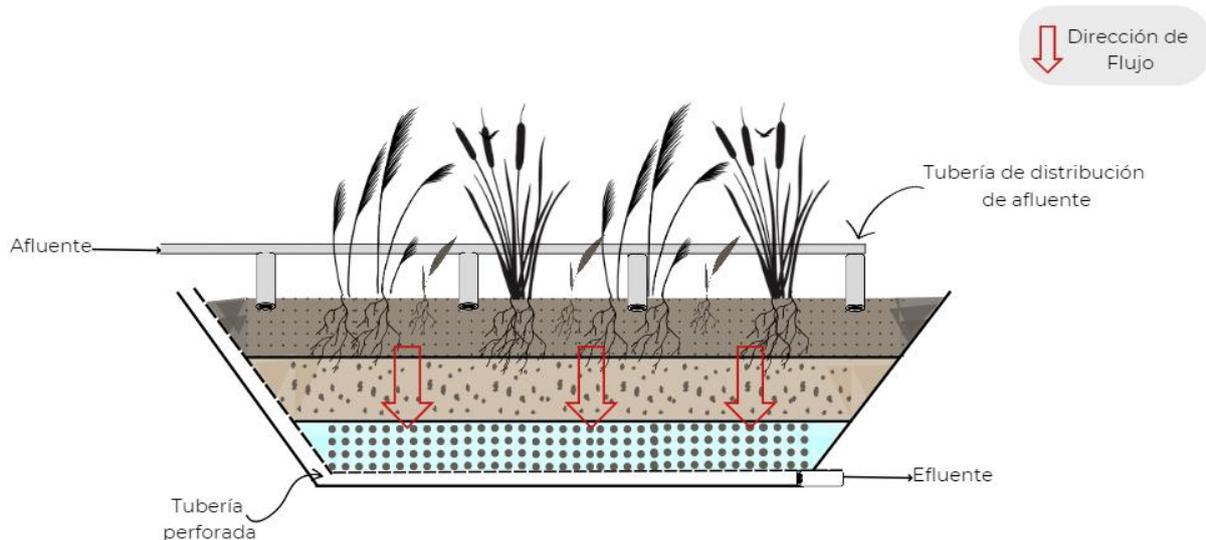


**Figura 1.** Esquema de funcionamiento de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. Modificado de Dotro et al (2017).

### 2.3.1.2.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV)

De la misma forma de los HASSSH, estos cuentan con un lecho filtrante. La diferencia es que para el caso de los HAFSSV se tienen varias capas de lechos filtrantes, que poseen diferentes tamaños de partículas, además de esto el flujo del agua en el sistema se da de forma vertical. El agua ingresa en la parte superior por medio de una tubería, donde inicia el proceso en un lecho filtrante de arena, posteriormente pasa al proceso de infiltración en un lecho inerte, llegando de esta forma a una tubería ubicada en la parte inferior de la estructura, la cual se encarga de extraer el agua tratada.

Un aspecto importante es que el flujo de agua en estos sistemas es intermitente, para evitar una saturación del sistema y la disminución del oxígeno dentro del humedal, en la figura 2 se muestra un diagrama de este tipo de sistemas (Cuervo et al, 2018):



**Figura 2.** Esquema de funcionamiento de humedal artificial de flujo subsuperficial vertical. Modificado de Dotro et al (2017).

### 2.3.2 Funcionamiento de los Humedales artificiales

Los humedales artificiales poseen diferentes niveles de tratamiento, divididos en tres: proceso de remoción físico, proceso de remoción biológica y el proceso de remoción química. Todo esto gracias a su capa de sustrato, vegetal y los microorganismos que habitan en él (Cuervo et al, 2018).

El proceso de remoción físico se da gracias a que el agua dentro del humedal se mueve en flujo laminar, debido a la poca pendiente que posee la estructura y a la presencia del sustrato y las especies vegetales, generando un efecto de resistencia al paso del agua residual a través del medio. Dando como resultado una filtración del agua a tratar, en donde se sedimentan la materia particulada y sólidos suspendidos, además de esto las raíces de la vegetación capturan los sólidos sedimentados, evitando que estos vuelvan a ser resuspendidos (Llagas et al, 2006).

Para el caso de los procesos de remoción biológica se experimenta debido a que el humedal experimenta subprocesos como respiración, fermentación, nitrificación, desnitrificación y remoción. Los cuales se presentan gracias a procesos que experimentan las plantas o bien los microorganismos que habitan en el humedal (Llagas et al, 2006). Por último, en los procesos de remoción química ocurre subprocesos como la absorción y adsorción, en los cuales ya sea por la asimilación como nutrientes o bien por la adherencia a las raíces, dan como resultado la retención de contaminantes (Cuervo et al, 2018).

### 2.3.3 Componente de los Humedales artificiales

Entre los principales componentes de un humedal artificial se resalta el sustrato y vegetación o macrófitas empleadas en el sistema. Además de esto, si el humedal se instala en una sección de terreno excavada, es necesaria la implementación de una membrana impermeable para evitar la contaminación del terreno y acuíferos.

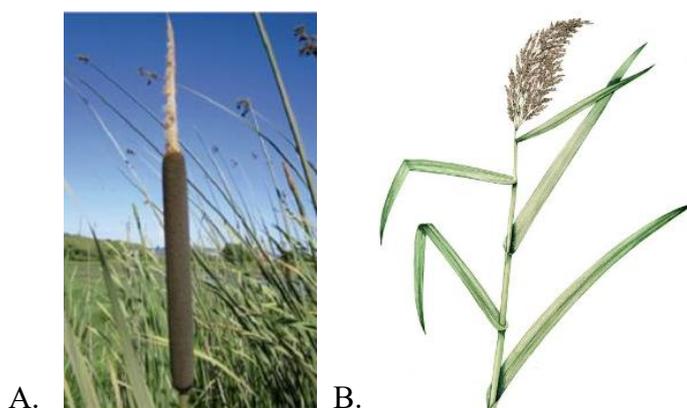
### 2.3.3.1 Vegetación

La vegetación implementada en el sistema favorece la oxigenación de la rizosfera, ayuda en la interacción bacteriana y la eliminación de nutrientes por extracción/absorción (Monrroy, 2022).

Los procesos físicos corresponden al principal efecto que provocan las plantas en los humedales artificiales para aportar en la depuración del sistema, ejemplos de esto es que las especies macrófitas ejercen funciones de desbaste, reteniendo aquellos sólidos gruesos arrastrados por el agua residual. Otro de sus grandes aportes es que actúan como barrera física, permitiendo reducir la velocidad del influente, favoreciendo la sedimentación de las partículas en suspensión (González-Díaz et al, 2022).

Sumado a lo anterior, todas aquellas partes de las plantas que se encuentran en contacto con el influente, funcionan como soporte pasivo de los microorganismos, creando una mayor área superficial alrededor de toda el área transversal del humedal para el desarrollo de biopelículas, en donde se desarrollan bacterias, algas microscópicas y protozoos (González-Díaz et al, 2022).

Monrroy (2022) y Arteaga-Cortez (2019) menciona que en HAFSSH se utilizan plantas macrófitas acuáticas como el carrizo (*Phragmites australis*) y cola de gato (*Typha latifolia*), ya que corresponden a especies vegetales que presentan una buena adaptación en aguas residuales, esto con relación a su propagación y supervivencia.



**Figura 3.** Macrófitas utilizadas para los humedales artificiales *Typha latifolia* (A) y *Phragmites australis* (B).

Moncada (2011) menciona que plantas como platanillo (*Heliconia wagneriana*),avecilla (*Heliconia psittacorum*) y la caña agria (*Costus speciosus*), en la figura 4 se muestran dichas plantas:



**Figura 4.** Plantas tropicales recomendadas para implementar en humedales artificiales (Moncada, 2011)

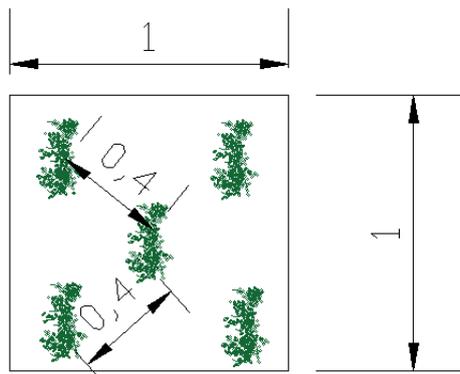
Estas plantas corresponden a una excelente opción a implementar en humedales artificiales, ya que estas son plantas tropicales que necesitan de mucha humedad, así como sol para poder así, además de esto soportan cierto grado de contaminación.

Cuervo et al (2018) menciona que aplicando la ecuación 1 se calcula la cantidad de plantas que se necesitan implementar en el sistema de acuerdo con la separación entre plantas que se desee aplicar. Según ACEPESA (2010) se recomienda mantener una separación de 40 cm entre plantas y una densidad de 8-9 plantas por  $m^2$ , además de esto, a la hora de sembrar las plantas se recomienda mantener un arreglo triangular, como se muestra en la siguiente figura 5:

$$Nv = \left( \frac{L}{dm - m} - 1 \right) * \left( \frac{W}{dm - m} - 1 \right) \quad [1]$$

Donde:

- dm-m: Distancia entre planta ( $m$ )
- L: Longitud total del humedal ( $m$ )
- W: Ancho del humedal ( $m$ )



**Figura 5.** Distribución triangular de plantas. Creación propia en AuctoCAD, unidades en m.

### 2.3.3.2 Sustrato:

Delgadillo et al (2010) menciona que el sustrato empleado en los sistemas de HAFSSH se basa en una cama de arena, grava y tierra, la cual funciona como sustento de la vegetación empleada. El medio debe permitir la permeabilidad del agua de acuerdo al flujo que se establece por el tipo de humedal, puede ser verticalmente u horizontal, para esto debe tener los diámetros adecuados para que no se generen obstrucciones en el flujo y que el tiempo de retención sea el adecuado.

El agua residual en la entrada y salida posee zonas de amortiguamiento, donde se emplean grava de mayor tamaño, con diámetros entre 50 mm a 100 mm, para el caso de la zona de plantación se conforma con grava más pequeña, con diámetros entre 3 mm y 32 mm. La profundidad del lecho se recomienda que se encuentre entre 0,45 m a 1 m, con una pendiente promedio entre 0,5 % al 1 % (Delgadillo et al, 2010).

### 2.3.3.3 Impermeabilización

Esta práctica busca evitar la contaminación de aguas subterráneas y es necesario efectuar en taludes en entrada y salida de los laterales y en el fondo de la celda. La impermeabilización se puede hacer mediante una buena compactación del terreno, aportaciones de arcilla, utilizando geomembranas, capas de bentonita, tratamientos químicos o bien asfalto. El tipo de impermeabilización a emplear varía según las condiciones de terreno, así como del diámetro del material granular (García et al. 2008).

### 2.3.4 Diseño de los Humedales artificiales

García et al (2008) y Cuervo et al (2018) detallan el procedimiento para establecer el dimensionamiento de los humedales artificiales. Este se realiza en dos etapas, dimensionamiento biológico y dimensionamiento hidráulico. Teniendo en cuenta el dimensionamiento biológico, se menciona que en los humedales AFSSH se pueden considerar con un comportamiento similar a un reactor de flujo ideal en pistón, en estos casos la degradación de los contaminantes se da siguiendo modelos cinéticos de primer orden.

Por último, en el dimensionamiento hidráulico se definen las dimensiones del sistema, como largo, ancho, para lo cual se debe tener en cuenta la relación largo:ancho 2:1, 3:1 y 4:1, establecida para asegurar un correcto funcionamiento del sistema (Delgadillo et al, 2010). Además, se utiliza la ley de Darcy, la cual describe el régimen del flujo en un medio poroso para confirmar que las dimensiones establecidas permiten que el humedal procese correctamente el caudal a tratar.

#### 2.3.4.1 Dimensionamiento biológico

Se debe realizar una corrección por la temperatura de la constante cinética de primer orden utilizando la ecuación de Arrhenius (García et al, 2008):

$$K_{v,t} = K_{v,20} * \theta^{T-20} \quad [2]$$

Donde:

$K_{v,20}$ : Constante de degradación 1,104 ( $d^{-1}$ ) (Cuervo et al, 2018)

T: Temperatura promedio del agua, ( $^{\circ}C$ )

$\theta$ : Coeficiente de Arrhenius 1.06, adimensional (Cuervo et al, 2018)

Tanto el parámetro  $P$ , como  $K_{v,20}$  son valores establecidos para el caso de humedales de flujo subsuperficial, para el DBO. El área superficial, a tratar de acuerdo al caudal y las concentraciones del agua residual, se obtiene por medio de (García et al, 2008):

$$As = \frac{Q(Ln Co - Ln Ce)}{KvtDm^n} \quad [3]$$

Donde:

As: Área superficial del humedal ( $m^2$ )

Q: Caudal ( $m^3/día$ )

$K_{vt}$ : Constante cinética de primer orden ( $d^{-1}$ )

Dm: Propuesta de profundidad de lecho (m)

n: Porosidad, adimensional

Para el caso de  $C_e$  se establece según el reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales y  $C_o$  corresponde a la concentración de contaminante que posee el agua residual, el cual se desea reducir a un valor menor a  $C_e$  para cumplir con los parámetros establecidos según el reglamento que rige al país (Cuervo et al, 2018). Para el caso de la profundidad media de un humedal de flujo subsuperficial horizontal se maneja en rangos de 0,45 - 1 m (Delgadillo et al., 2010).

Posteriormente, conociendo el caudal y volumen de acuerdo con el área calculada y profundidad establecida para el humedal, se define el tiempo de retención hidráulico (García et al, 2008):

$$TRH \text{ nominal} = \frac{n \cdot Dm}{\frac{Q}{As}} \quad [4]$$

Donde:

As: Área superficial del humedal, ( $m^2$ )

Q: Caudal, ( $m^3/día$ )

Dm: Propuesta de profundidad de lecho, (m)

n: Porosidad, adimensional

#### 2.3.4.2 Dimensionamiento hidráulico

Con el fin de evitar problemas de cortocircuitos y flujos preferenciales o bien la presencia de agua sobre el lecho de grava, se recomienda mantener una relación de largo:ancho de 2:1, 3:1 y 4:1, en caso de querer establecer una relación 2:1 (Delgadillo et al, 2010), se puede utilizar la

siguiente fórmula:

$$W = \sqrt{\frac{As}{2}} \quad [5]$$

Donde:

As: Área superficial del humedal, ( $m^2$ )

W: Ancho, ( $m$ )

Posteriormente por despeje se puede encontrar la longitud del humedal con el fin de mantener la relación largo: ancho deseado:

$$L = \frac{As}{W} \quad [6]$$

Con el fin de evitar desbordamientos del humedal se deja 0,2 m de resguardo en la profundidad de funcionamiento del humedal, por lo tanto, el volumen total del humedal se obtiene de la siguiente manera:

$$V_t = As * (Dm + 0,2) \quad [7]$$

Donde:

Vt: Volumen total del humedal ( $m^3$ )

As: Área superficial del humedal, ( $m^2$ )

Dm: Propuesta de profundidad de lecho, ( $m$ )

El volumen total útil del humedal, o bien el volumen total de agua, se puede calcular de la siguiente manera:

$$V = As * Dm * n \quad [8]$$

Donde:

As: Área superficial del humedal, ( $m^2$ )

V: Volumen de agua en humedal, ( $m^3$ )

Dm: Propuesta de profundidad de lecho, ( $m$ )

n: Porosidad, adimensional

Una vez obtenidas las dimensiones del humedal, se deben realizar una serie de comprobaciones, para asegurar el correcto funcionamiento de este. Una de estas corresponde a la carga orgánica superficial que puede procesar el humedal, ya que esta debe ser menor a  $6 \text{ g DBO}_5/m^2/d$  (García et al, 2008), para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$C \text{ org, s} = \frac{Q * Co}{As} \quad [9]$$

Donde:

$C_{org,s}$ : Carga orgánica superficial ( $g\ DBO_5/m^2/d$ )

$A_s$ : Área superficial del humedal ( $m^2$ )

$Q$ : Caudal ( $m^3/día$ )

$C_o$ : Concentración de contaminantes a la entrada ( $mg/L$ )

Como segundo punto se debe comprobar la carga hidráulica superficial, ya que se establece que esta debe encontrarse entre  $20-40\ L/m^2/d$ , para esto se puede emplear la siguiente fórmula:

$$Ch = \frac{Q}{A_s} \quad [10]$$

Donde:

$Ch$ : Carga hidráulica superficial ( $L/m^2/d$ )

$A_s$ : Área superficial del humedal ( $m^2$ )

$Q$ : Caudal ( $L/día$ )

Por último, se comprueba el área transversal del humedal, utilizando dos métodos, tomando el área transversal que de mayor como el área mínima que debe poseer la sección transversal del humedal para asegurar que el mismo puede absorber este caudal y la carga orgánica sin generar problemas como presencia de agua superficial:

Método 1: Carga orgánica máxima en la sección transversal  $250\ g\ DBO_5/m^2/d$

$$A_t = \frac{Q * C_o}{C_{org,s\ max}} \quad [11]$$

Donde:

$Q$ : Caudal ( $m^3/día$ )

$C_o$ : Concentración de contaminantes a la entrada ( $mg/L$ )

$C_{org,s\ max}$ :  $250\ g\ DBO_5/m^2/d$

Método 2: Ley de Darcy

$$Q = K_s * A_s * S \quad [12]$$

Donde:

$A_s$ : Área superficial del humedal ( $m^2$ )

$Q$ : Caudal ( $m^3/día$ )

$S$ : Pendiente ( $m/m$ )

$K_s$ : Conductividad hidráulica ( $M^3/m^2 * d$ )

Para el caso de la conductividad hidráulica y la porosidad, se establece de acuerdo con el tipo de medio filtrante que se implementa para el humedal. Delgadillo et al (2010) menciona que en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal se utiliza con frecuencia grava fina, con un diámetro de 16 mm:

**Tabla 1.**

*Características del medio filtrante para humedales artificiales HAFSS (Cuervo et al, 2018).*

Tipo de med filtrante	Tamaño efectivo	Porosidad	Conductividad hidráulica
	$\theta$ mm	%	( $M^3/m^2 * d$ )
Arena de cuarzo	2	32	1000
Arena graduada	8	35	5000
Grava fina	16	38	7500
Grava media	32	36-40	10000-100000
Roca de cuarzo	128	45	100000

### 2.3.5 Mantenimiento

Los humedales artificiales corresponden a tecnologías de tratamiento de aguas residuales sencillas en mantenimiento y operación, pero requiere de personal capacitado para asegurar su correcto funcionamiento (Tilley et al., 2014).

Uno de los puntos más importante es el mantenimiento que se realiza en cada uno de los tratamientos previos al ingreso al humedal, ya sean tanques sépticos o bien sistemas anaerobios, para evitar obstrucciones y garantizar el tratamiento esperado. Prestando especial atención a los sólidos sedimentables, ya que se debe evitar que estos ingresen al humedal, puesto que generan obstrucciones, reduciendo la capacidad de filtración del sistema, pudiendo provocar rebalses. Sumado a esto se debe evitar el crecimiento de árboles en el área del humedal, por el hecho de que las raíces de estos pueden llegar a romper la geomembrana que impermeabiliza la zona (Tilley et al., 2014).

Del sistema del humedal como tal se debe tener cuidado con las estructuras de entrada y salida, revisando si existe alguna obstrucción, así como el nivel de agua y el caudal del efluente. También es importante realizar muestreos frecuentes del afluente y efluente del humedal para revisar las concentraciones de contaminantes de esta y corroborar que se está realizando un buen tratamiento, por medio de análisis fisicoquímicos y microbiológicos (Hoffmann et al, 2011).

Sumado a lo anterior, es necesario realizar podas de las malas hierbas que crecen durante el arranque del humedal, en la primera temporada de crecimiento de las plantas, ya que estas malas hierbas pueden llegar a afectar su correcto crecimiento. Y cada 10 años se recomienda cambiar el material de filtro de la zona de entrada del humedal (Tilley et al., 2014). No realiza un mantenimiento adecuado del humedal, puede llegar a provocar problemas como una distribución irregular del flujo, un deterioro en la eficiencia de tratamiento de contaminantes, así como sobrecargas locales y mal olor (Hoffmann et al, 2011).

## 2.4 Marco legal

En Costa Rica existen dos reglamentos que se involucran directamente con la instauración de sistemas de tratamiento de aguas residuales, como lo son el DE-39887-s-MINAE “Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales” y DE33601-s-MINAE “Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales”.

En el DE-39887-s-MINAE “Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales” se especifican todos los lineamientos que se deben seguir para la construcción de los sistemas de tratamiento. Algunos de estos corresponden a las dimensiones de retiros y ubicación del sistema, así como los requisitos que se deben cumplir para obtener la aprobación del proyecto, formato y elementos que deben tener los planos constructivos, memoria de cálculo y el manual de operación y mantenimiento.

Por otro lado, en el DE33601-s-MINAE “Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales” se especifican los tipos de aguas residuales que hay y sus límites máximos permitidos, de acuerdo con el proceso que continúa posterior al tratamiento. En este se define agua residual como aquella agua utilizada que presenta modificaciones en su calidad producto de la incorporación de agentes contaminantes, se divide en aguas ordinarias y aguas especiales. Las aguas ordinarias se explican como aguas generadas por actividades domésticas y especiales, aquellas que no provienen solo de uso doméstico. Sumado a esto se define reúso como la acción de aprovechar aquellas aguas residuales de tipo ordinario o especial, para este caso se categorizan los tipos de reúso:

1. **Reuso urbano:** riego de zonas con acceso al público y labores como el lavado de automóviles.
2. **Reuso con acceso restringido:** silvicultura y cultivo de césped, entre otras
3. **Reúso agrícola en cultivo de alimentos que no se procesan previo a su venta:** riego por aspersión o goteo de alimentos que no se procesan o bien que se consumen crudos.
4. **Reuso agrícola en cultivo de alimentos que se procesan previo a su venta:** riego de cultivos que previo a su venta al consumidor reciben tratamiento físico y químico necesario
5. **Reuso agrícola en cultivos no alimenticios:** riego de pastos de piso, pastos, forrajes y cultivos de fibras.
6. **Reuso recreativo:** para uso de aguas artificiales donde se pueda presentar contacto de forma ocasional
7. **Reuso paisajístico:** se aprovecha de forma estética, donde el contacto con el público no es permitido y esta prohibición se informa claramente al público.
8. **Reuso en la construcción:** control de polvo, compactación de suelo y producción de concreto

Para el caso de reúso de tipo paisajístico de aguas residuales especiales se tiene un límite máximo permisible de coliformes fecales de 10.000 NMP/mL, con un factor multiplicador de 2, además de esto también se mencionan los siguientes límites máximos que se deben tener en cuenta:

**Tabla 2.**

*Límites máximos permitidos para reúso paisajístico de aguas residuales*

<b>Parámetro</b>	<b>Límite máximo (mg/L)</b>
DBO	50
DQO 5,20	150

En DE-39887-s-MINAE “Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales” se menciona que el retiro a los linderos de propiedad para el caso de lagunas anaerobias debe ser 20 metros y con caudales menores o iguales a  $5 \text{ m}^3$ , se aceptan retiros de 5 m.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

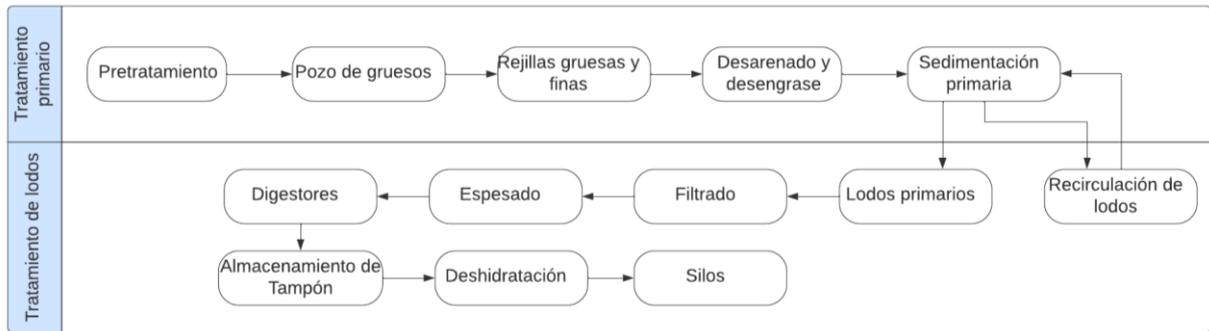
### 3.1 Descripción del sitio de estudio

El presente proyecto se lleva a cabo en La Planta de Tratamiento Los Tajos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), ubicada en La Uruca, San José, la cual posee las siguientes coordenadas  $9^{\circ}57'41''$  N  $84^{\circ}08'17''$  W, ver figura 6. La PTAR inició con el proyecto de Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana de San José, basándose en la instauración de redes de alcantarillado y colectores, con el objetivo de direccionar las aguas residuales generadas en el GAM a la PTAR Los Tajos para darles un correcto tratamiento, antes de ser vertidas en el río Torres (Mora-Aparicio et al, 2022).



**Figura 6.** Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos. Fuente: Google Earth

La PTAR Los Tajos cuenta con tratamiento primario (tratamiento físico), sumado a esto posee otras líneas de tratamiento para lodos y gases. En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo del proceso de tratamiento que presenta actualmente la institución para la línea de agua y lodos.



**Figura 7.** Diagrama de flujo del proceso que posee la PTAR Los Tajos.

El AyA desde el 2015 pone en marcha el proyecto de reforestación del margen derecho de la vereda del río Torres, empezando en el Bajo Los Ledezma y finalizando en la PTAR (AyA, 2021). El terreno de reforestación se encuentra alejado de la infraestructura gris presente, presentando escasa vegetación y una topografía en pendiente que se nivela gradualmente en su transición hacia el área de reforestación.

Para el diseño del sistema de humedales artificiales a implementar en la PTAR Los Tajos, es crucial comenzar con el análisis detallado de la información base. Este análisis se estructurará en tres etapas fundamentales: caracterización climática del sitio de estudio, caracterización del agua residual y descripción topográfica.

En primer lugar, se abordará la caracterización climática del sitio de estudio, incluyendo datos como la precipitación y la temperatura. Estos parámetros son esenciales para comprender las condiciones ambientales que influyen en el rendimiento del sistema de humedales. Posteriormente, se examinará la caracterización del agua residual, evaluando aspectos como el caudal y las concentraciones de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno). Estos datos son relevantes para diseñar un sistema que pueda abordar eficazmente las características específicas del efluente de la PTAR Los Tajos.

Finalmente, se realizará la descripción topográfica del área de estudio. Esta sección comprenderá detalles como la ubicación, los linderos, la pendiente, el área, el nivel freático y el tipo de suelo. Estos elementos son esenciales para optimizar la disposición y la configuración del sistema de humedales artificiales en el terreno disponible. Este enfoque secuencial garantizará una comprensión integral del entorno de trabajo y proporcionará la base necesaria para el diseño eficiente y efectivo del sistema de tratamiento en la PTAR Los Tajos.

### 3.1.1 Descripción climática del sitio

Para definir las condiciones climáticas que se presentan en la zona de estudio se solicitaron los datos de temperatura y precipitación diarias registradas por el Instituto Meteorológico Nacional de los últimos cinco años (2018-2023). Se utilizaron los datos de la estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27, debido a la cercanía de la estación con la PTAR Los Tajos. La estación presenta las siguientes coordenadas 84°08'22"O y 09°58'24" N, de longitud y latitud correspondientemente.

De la información proporcionada se extrajeron temperaturas máximas y mínimas mensuales, así como las precipitaciones acumuladas mensuales, con el objetivo de corroborar esta información y evitar eventos climáticos extremos que pueden afectar la red de datos del año 2023 usada para establecer condiciones climáticas de diseño, se contrastaron los datos con datos históricos de 1961 a 1990 del Instituto Meteorológico Nacional.

### 3.1.2 Descripción del agua residual de la PTAR Los Tajos

Para realizar una correcta descripción de la PTAR Los Tajos se analizaron los datos referentes a caudal y concentraciones de DBO y DQO del efluente, los cuales fueron proporcionados por parte del Área de Calidad y Gestión Ambiental de la PTAR Los Tajos, para un periodo de cinco años, abarcando del año 2018 al año 2023. Esto con el objetivo de establecer el caudal de diseño que trataría el humedal artificial. Para esto se aplicaron diferentes métodos estadísticos para describir el comportamiento del caudal, como coeficiente de correlación de Pearson, histogramas, modelos de regresión lineal y box plot, utilizando software como Excel e Infostat.

Para determinar las concentraciones de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno) en la entrada del sistema de humedales artificiales, se consideraron los valores promedio, máximo y cuartiles, priorizando definir valores que garanticen un tratamiento adecuado y se evite el sobredimensionamiento del sistema de estructuras de tratamiento.

### 3.1.3 Descripción de la topografía de la PTAR Los Tajos

Las capas del modelo digital del terreno suministradas por la PTAR se trabajaron implementando los Software Autocad Civil 3D 2020, Qgis versión 2.18.28 y AutoCAD 2020. Se extrajeron y organizaron los datos relacionados con el tipo de suelo y las curvas de nivel en esta área. Permitiendo de esta forma definir las elevaciones de la zona de trabajo y evaluar si es necesario realizar movimiento de tierra o relleno para asegurar profundidades necesarias para la construcción de la obra hidráulica.

Sumado a esto se obtuvo información referente al tipo de suelo a tener en cuenta para asegurar una correcta construcción del sistema de humedales artificiales y principalmente para el establecimiento de los canales de riego, a la hora de establecer parámetros importantes como rugosidad de la superficie. Todo esto extraído de las capas DWG y del informe de Estudio geotécnico y de mecánica de suelos proporcionados por la institución.

## **3.2 Dimensionamiento de estructuras hidráulicas y diseño de los humedales**

En el siguiente capítulo se explica en primera instancia el sistema de conducción de agua establecido y la importancia de cada una de las estructuras definidas. Seguidamente, se establece el área del terreno disponible para trabajar, analizando el modelo digital de la finca suministrado por la PTAR. Tomando en cuenta el reglamento DE-39887-s-MINAE “Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales”, para asegurar el cumplimiento de los retiros especificados por ley, en el establecimiento de obras hidráulicas para el tratamiento de aguas residuales.

Una vez definida el área de terreno disponible, así como el ancho y largo de una unidad de humedal artificial de acuerdo con retiros establecidos y cuidando no afectar zonas de

construcción futura, se determinará el caudal del efluente proveniente del tratamiento primario que puede ser tratada en una unidad de humedal artificial. Luego, se calcularán las dimensiones específicas de la obra hidráulica siguiendo la metodología propuesta por García et al. (2008). Los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) establecidos durante el primer objetivo se consideran como la concentración inicial de contaminantes (Co) que ingresan a los humedales.

Para el diseño de los humedales, es fundamental considerar diversos parámetros y factores, como la constante cinética de primer orden, la conductividad hidráulica y la profundidad de los humedales. Además, se debe garantizar que la concentración final de DBO (Ci) cumpla con los límites establecidos en el reglamento DE-33601-S-MINAE “Reglamento de Vertido.

Posteriormente, se analiza el agua necesaria para abastecer el riego de la zona de reforestación, de acuerdo con esto se establecen las unidades de humedales necesarias para suplir esta demanda, terminando con el dimensionamiento de cada una de las estructuras establecidas para el sistema y el punto de toma de agua de la zona de desfogue que posee la PTAR.

Además, el proyecto contempla el análisis y diseño del sistema de conducción de agua que conectará el punto de desfogue actual de la PTAR con los humedales, y posteriormente, dirigirá el efluente hacia su uso en el riego de la zona de reforestación. Este sistema debe ser cuidadosamente dimensionado para asegurar que las condiciones hidráulicas permitan un flujo eficiente y sin pérdidas significativas que comprometan el rendimiento del tratamiento y el suministro para el riego.

En el siguiente capítulo, se describe en primer lugar el sistema de conducción de agua establecido, destacando la función e importancia de cada una de las estructuras que lo conforman. Esto acompañado de un análisis detallado de la demanda hídrica requerida para el riego de la zona de reforestación, determinando con ello el número de unidades de humedales necesarios para satisfacer dicha demanda. Finalmente, se aborda el dimensionamiento completo de cada una de las estructuras hidráulicas, incluyendo las relacionadas con el sistema de conducción, las unidades de humedales y el punto de toma de agua ubicado en la zona de desfogue de la PTAR. Esto asegura que todo el sistema funcione de manera integrada y eficiente.

### 3.2.1 Humedal artificial

Para el diseño de los humedales artificiales se manejó en dos etapas, dimensionamiento biológico y dimensionamiento hidráulico. Para el dimensionamiento biológico, los humedales AFSSH se pueden considerar con un comportamiento similar a un reactor de flujo ideal en pistón, en estos casos la degradación de los contaminantes se da siguiendo modelos cinéticos de primer orden. En cada una de las etapas de diseño se siguió la metodología propuesta por García et al (2008) y Cuervo et al (2018), los cuales detallan el procedimiento para establecer el dimensionamiento de los humedales artificiales, las cuales se presentan en el apartado 2.3.4 del marco teórico.

Como se mencionó en el apartado 2.3.4. 1 para el dimensionamiento biológico se contemplan serie de ecuaciones que se presentan en dicho apartado, para las cuales se determinaron los siguientes puntos:

#### 3.2.4.1 Constante cinética de primer orden

Para corregir la constante cinética de primer orden según la temperatura, se utilizó la ecuación de Arrhenius [2], aproximando la temperatura del agua a la temperatura ambiental, tal como lo sugieren Kadlec & Wallace (2006). En este caso, se tomó como referencia los datos de temperatura proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional recopilados durante los últimos cinco años (2018-2023) en la estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27.

Según Cuervo et al. (2018), para diseñar sistemas de tratamiento, es necesario calcular el área superficial considerando tanto la temperatura mínima como la máxima, seleccionando aquella que requiera la mayor área superficial. Sin embargo, dado que el área ya estaba predefinida en este caso, la selección se realizó considerando el caudal más bajo a tratar.

Este enfoque permite garantizar que el diseño del sistema sea capaz de operar en condiciones críticas, es decir, aquellas en las que la capacidad de tratamiento puede verse limitada por temperaturas.

#### 3.2.4.2 Profundidad de lecho $D_m$ (m), porosidad y conductividad hidráulica

De acuerdo con lo establecido por Delgadillo et al (2010) la profundidad de los humedales de flujo subsuperficial horizontal se debe manejar entre 0,45-1 m, de acuerdo a esto se estableció una profundidad promedio de 0.55 m.

Para el caso de la porosidad y conductividad hidráulica, como se menciona en el apartado 2.3.4.2 dependen del tipo de medio filtrante, el cual se establece de grava fina de acuerdo a lo que menciona Delgadillo et al (2010), categorizado como uno de los medios filtrantes más utilizados en este tipo de humedales. Como se presenta en la tabla 1 en el apartado 2.3.4.2, para este caso el diámetro es de 16 mm, por lo cual se establece una porosidad de 38% y la conductividad hidráulica se encuentra entre  $7500 (M^3/m^2 * d)$ .

#### 3.2.4.3 Dimensiones del humedal

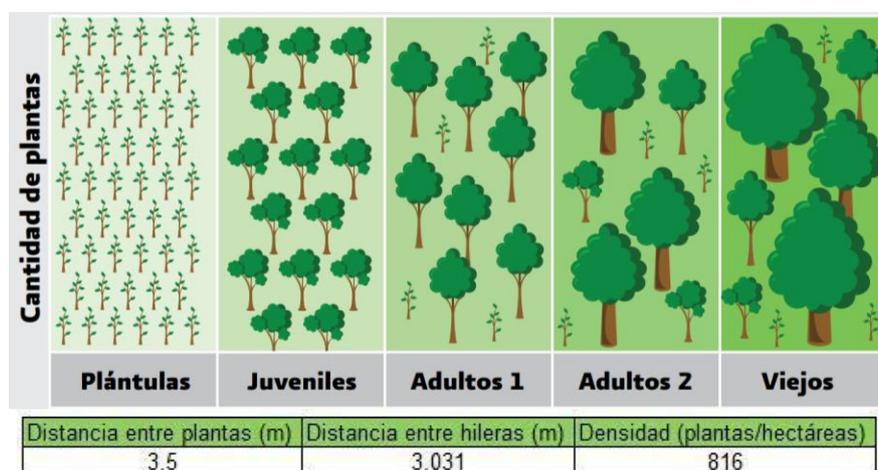
Como se mencionó anteriormente para establecer el diseño del humedal se tuvo en cuenta la distribución actual que posee la PTAR, la huella constructiva futura que el AyA compartió por medio de un archivo DWG y el decreto DE-39887-s-MINAE “Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales”, el cual establece un retiro de 20 m desde el lindero. Teniendo en cuenta esto se pasa a determinar un ancho para las celdas de los humedales artificiales y el largo de para cada celda, dando como resultado el área superficial de una unidad de humedal artificial. Esto procurando mantener una relación de 1:2, largo y ancho, correspondientemente, dicha relación es la más recomendada para asegurar un correcto funcionamiento de sistema (Delgadillo et al, 2010).

Una vez determinados cada uno de los parámetros anteriores, se utiliza la ecuación [3] para obtener el caudal que un humedal con dichas dimensiones puede procesar. Posterior a esto se pasa a calcular el resto de los parámetros como tiempo de retención usando la ecuación [4]. Sumado a esto, utilizando la ecuación de Darcy [12], se calculó el área transversal del humedal con el fin de asegurar que el agua a tratar puede fluir libremente por la sección, el cálculo se realizó considerando la conductividad hidráulica de la grava fina, que se presentan en la tabla 1.

### 3.2.2 Definición del total de caudales (Q) a redireccionar y la cantidad de humedales a implementar

Teniendo en cuenta las dimensiones previamente establecidas para una unidad de humedal y el caudal que esta puede procesar, fue necesario determinar cuántas unidades conformarán el sistema de tratamiento. Este análisis permitió definir el caudal total que sería redireccionado del flujo actual de la PTAR.

En primer lugar, se calculó la cantidad de agua requerida para regar la zona destinada a la reforestación. Para ello, se evaluaron distintas prácticas de reforestación con el fin de determinar la cantidad de árboles que deberían ser sembrados, siguiendo la relación establecida en la Figura 10:



**Figura 8.** Relación área y árboles a reforestar. Fuente: Comisión Nacional Forestal, (2010).

Se utilizó la relación correspondiente a bosque maduro, que especifica una densidad de 816 árboles por hectárea, bajo una distribución de tres bolillos. Esta configuración es altamente recomendada tanto para terrenos planos como para aquellos con pendiente. A partir de esta densidad, se calculó la demanda hídrica total utilizando la relación de 150 L/día por árbol (Brambila, M).

La cantidad de humedales a implementar se definió mediante un proceso iterativo. Este proceso consideró la división del área total disponible entre la zona destinada al tratamiento, a través del sistema de humedales, y el área destinada a reforestación. El objetivo fue garantizar que los humedales proporcionan el agua necesaria para satisfacer la demanda hídrica de la zona de reforestación, siguiendo las relaciones previamente mencionadas: densidad de plantas por hectárea y requerimiento hídrico diario por planta.

El objetivo principal de este análisis fue optimizar el uso del recurso hídrico, asegurando que la reducción de la zona de reforestación del corredor biológico, debido al espacio ocupado por el sistema de tratamiento, fuera mínima. Finalmente, este proceso iterativo permitió establecer la cantidad de caudal a tratar en el sistema.

### 3.2.3 Toma de agua

Para definir el punto de redireccionamiento del agua residual a tratar en el sistema propuesto, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

1. Punto donde el agua ha completado todo el proceso en el tren de tratamiento actual de la PTAR
2. Zona de fácil acceso
3. Zona cercana al sistema de tratamiento
4. Intervención no afecte el funcionamiento actual de la PTAR

El punto de mayor prioridad es asegurar que el agua a redireccionar ha completado todo el tren de tratamiento de la PTAR, para asegurar que presenta una reducción considerable en la remoción de sólidos suspendidos y sólidos sedimentados, debido al tratamiento primario con el que ya cuenta la institución. En segundo lugar, se debe tener en cuenta que sea una zona de fácil acceso para no realizar una intervención estructuralmente invasiva en la PTAR.

El tercer punto hace referencia a seleccionar una zona cercana al área disponible dedicada a la implementación del sistema de tratamiento propuesto, con el fin de reducir los costos de inversión en materiales de conducción como tubería y accesorios. Por último, el enfoque del cuarto punto va dirigido a tener en cuenta que el diseño sugerido se pueda implementar sin afectar el funcionamiento actual de la PTAR.

Para la selección del punto de redireccionamiento del caudal a tratar se realizaron giras a la institución para el levantamiento de posibles zonas de intervención y posteriormente estas fueron discutidas con el personal de la PTAR. Una vez definido el punto de redireccionamiento se debe analizar la mejor forma de realizar la intervención, analizando tanto la estructura como sus condiciones operativas. Este análisis permitió identificar la disponibilidad del agua, para definir cuál de estas opciones resulta la más funcional, teniendo en cuenta temas operativos de la PTAR

### 3.2.4 Tanques

Para el dimensionamiento del primer tanque que contiene el agua para distribuir en cada uno de los humedales se toma en cuenta el consumo diario de cada uno de los humedales y se establecen las dimensiones de este de acuerdo con esta demanda. Cabe destacar que también se tiene cuidado con la altura, ya que este sistema además de contener el agua de los humedales y asegurar su correcta alimentación para un tiempo determinado, debe cumplir la función de generar una columna de agua. Dicha columna de agua cumpliría la función de presurizar la tubería, permitiendo la correcta distribución en cada uno de los humedales, prestando atención a las velocidades y presiones obtenidas a lo largo de la tubería.

Por otro lado, para su diseño como tal se tomó en cuenta establecer tuberías de rebalse del tanque, las cuales van directamente al río torres. El diseño de este tanque de distribución ayuda a que el sistema de alimentación sea de forma constante, entendiendo que el flujo de ingreso y salida es el mismo.

Además del tanque de distribución, se plantea instalar un tanque de almacenamiento del agua tratada con el fin de generar un punto de recolección de agua en caso de requerir utilizarla en riego de otros puntos o bien como medida de contención ante incendios en zonas aledañas al

sistema de humedales. En cuanto al dimensionamiento de dicho tanque, se tiene en cuenta dimensiones que permitan acoplar el tanque con la tubería de alimentación, así como con el sistema de riego propuesto sin alterar el flujo.

Para el sistema de distribución de agua se utilizó el software Epanet, el cual permite tener en cuenta el diámetro de la tubería, caudales, pérdidas de los accesorios, pérdidas por fricción, así como las diferencias de alturas en cada punto según la topografía del terreno y alturas del nivel del agua. Este análisis se realiza seccionado según tramos de tubería necesarios para realizar las conexiones de las diferentes estructuras que conforman el tren de tratamiento definido.

El flujo a través de la tubería se definió de acuerdo con la demanda de los humedales, posteriormente de acuerdo con los planos constructivos se hizo un conteo de accesorios y tuberías, sumado a esto se alimentó el software con el diámetro de la tubería, rugosidad y la altura en los diferentes puntos. Cabe destacar que el programa permite decidir el método por el cual se quiere calcular las velocidades y presiones, en este caso se utilizó el método de Darcy-Weibach.

Una vez ingresados estos valores y definido el método de cálculo en el modelo hidráulico, se corrió el programa para evaluar si se cumple con las presiones en cada punto y evaluar las velocidades de cada tramo de tubería. En caso de no cumplir con alguno de estos valores se debe variar los valores de diámetros de tubería o bien la altura de cada punto.

### 3.2.5 Sistema de riego

Para el diseño de los canales de riego para la zona en reforestación, en primera instancia se planean canales de riego por gravedad, priorizando un diseño paisajístico, de forma que se asegure una integración armoniosa con el entorno natural. La capacidad de los canales de riego se define de acuerdo con el efluente obtenido del tratamiento de HAFSSH y el diseño de su sección transversal se realiza utilizando el programa Hcanales. El perfil obtenido por medio del software de Hcanales se modifica con el fin de obtener dimensiones viables para su construcción y obtener el cambio de altura necesario a la salida del tanque de almacenamiento de agua para el riego, así como obtener una altura donde el agua se encuentre más disponible para el sistema radicular.

## 3.3 Manual de operaciones y mantenimiento

Para el desarrollo de este apartado se siguió lo establecido en el artículo 29 del Reglamento de Aprobación y Operación de Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (N° 31545-S-MINAE), con el objetivo de elaborar el manual de operación y mantenimiento para el personal de la PTAR encargado de manejar el sistema de tratamiento. El reglamento especifica cada una de las aristas que se deben indicar en el manual con el fin de asegurar una correcta operación.

De acuerdo con lo que especifica el reglamento, se mencionan puntos claves como capacidad de diseño de cada una de las estructuras, la puesta en marcha del sistema de tratamiento, tareas necesarias para su operación, equipo necesario, así como el mantenimiento que se debe desarrollar en el sistema.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exhiben los resultados de las actividades correspondientes a los objetivos específicos del proyecto, presentándose en el orden establecido previamente. En la sección 4.1 se presentan los resultados correspondientes al primer objetivo específico, que aborda la caracterización del sitio de estudio. Se desarrolla la descripción climática, destacando las temperaturas y la precipitación acumulada registradas a lo largo del año 2023. Además, se caracteriza el agua residual de la PTAR, exponiendo datos sobre su caudal y concentración de DBO y DQO. Se incluyen también los resultados del análisis estadístico de estos valores, fundamentando la elección del valor de diseño. Por último, se analiza la topografía de la zona de estudio, considerando la pendiente, los linderos establecidos por ley, el tipo de suelo y el nivel freático.

En la sección 4.2, de acuerdo con lo establecido en el primer objetivo específico, se presenta el diseño del sistema de tratamiento propuesto como tratamiento secundario para la revalorización de agua residual en la zona de reforestación presente a lo largo de la ribera del río Torres. Se presenta la memoria de cálculo para el dimensionamiento de cada una de las estructuras establecidas y la propuesta respecto al sistema de riego a implementar en la zona del corredor biológico a reforestar.

En la sección 4.3, se presentan los resultados correspondientes al tercer objetivo específico, que corresponde a la elaboración de un manual de operación y mantenimiento. El manual se basa en lo establecido en el artículo 29 del Reglamento de Aprobación y Operación de Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (N° 31545-S-MINAE).

### 4.1 Descripción del sitio de estudio

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos para el objetivo específico 1, en el cual se realiza la caracterización climática, del agua residual de la PTAR y la descripción topográfica del terreno de la institución. Se presenta el análisis de los datos suministrados por la institución interesada y por el Instituto Meteorológico Nacional, se discute el comportamiento de estos datos, por medio de una comparación con datos históricos del IMN, logrando así definir aquellas temperaturas mensuales extremas y precipitaciones mensuales extremas. Por último, se establece el área de trabajo para la instalación del sistema de humedales artificiales, teniendo en cuenta la reglamentación nacional.

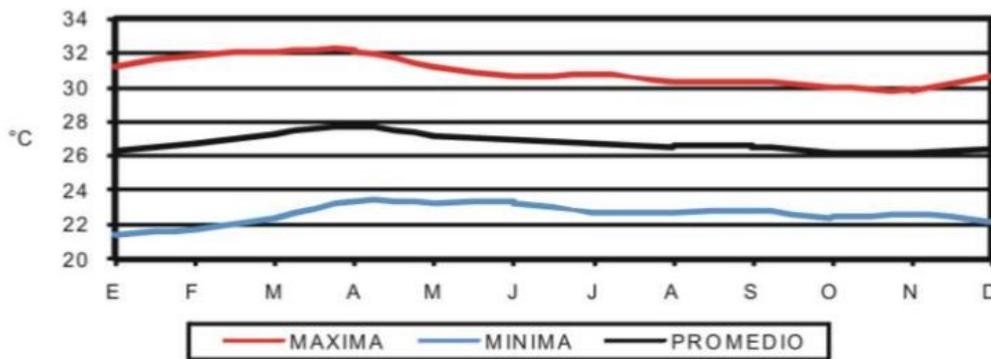
#### 4.1.1 Descripción climática del sitio

Los datos de precipitación históricos de 1961 a 1990 del Instituto Meteorológico Nacional (2008), del pacífico central, demuestran que se presenta un periodo seco de enero a marzo, abril y diciembre como meses de transición, y dos periodos de lluvias que van de mayo a noviembre, con picos en los meses de junio y octubre, ver figura 9.



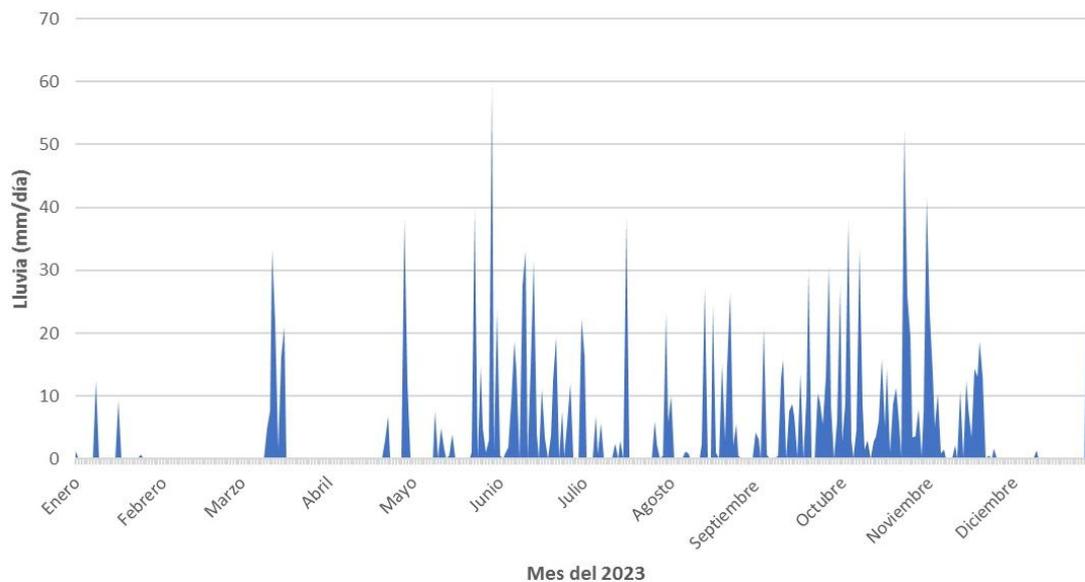
**Figura 9.** Precipitación acumulada mensual de enero-diciembre 1961-1990 en el pacífico central. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, (2008)

En la figura 10 se aprecia la temperatura registrada en el pacífico central de 1961 a 1990, la cual permite distinguir que en los periodos secos se presentan aumentos de temperatura y conforme se aumentan los dos periodos lluviosos en los meses de mayo a noviembre, se presentan disminuciones de temperatura. Y los meses de enero, febrero, marzo y abril corresponden a los meses con mayor variabilidad alrededor del año.



**Figura 10.** Temperaturas promedio, mínima y máximas mensuales del Pacífico central de Costa Rica. Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, (2008).

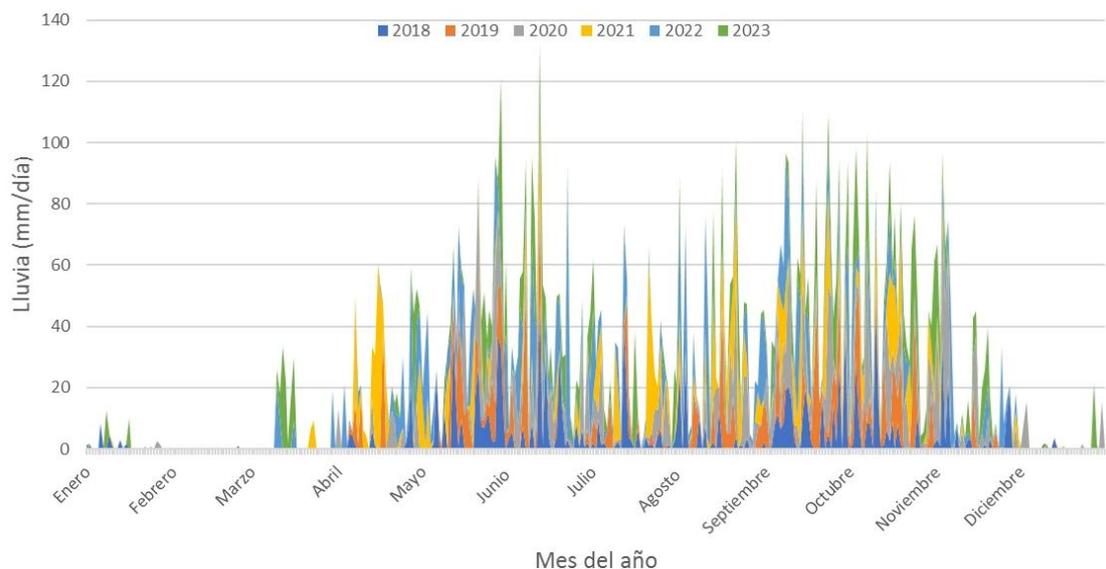
Se utilizan los datos proporcionados por IMN de la estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27. En el año 2023, en cuanto a promedios mensuales, el mes de octubre es el más lluvioso, registrándose 10,53 mm de agua. Por otro lado, enero, febrero y diciembre se colocan como los meses más secos, ver figura 11.



**Figura 11.** Datos de precipitación diaria registrada durante el 2023 por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27.

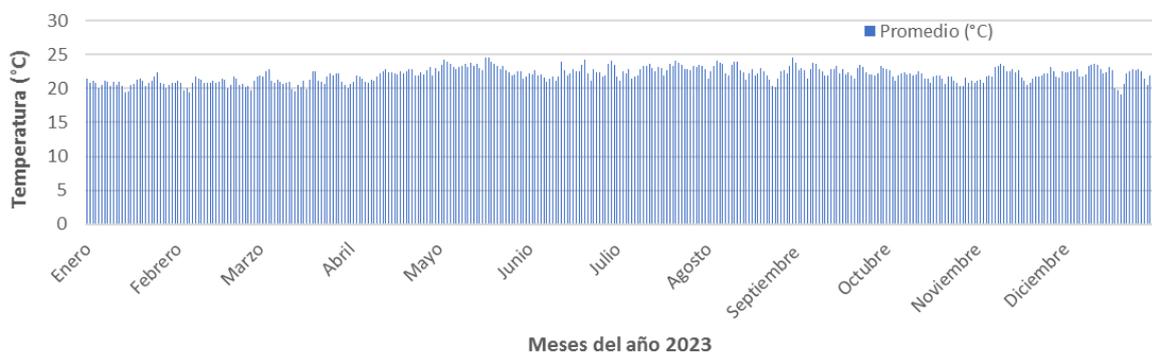
El comportamiento evidenciado durante el año 2023 es comparable a los datos históricos del IMN, mostrados en la figura 9, ya que los dos periodos de lluvia se concentran de mayo a noviembre. Abril y diciembre se comportan como meses de transición y la época seca se encuentra bien marcada en los meses de enero y febrero.

Según el IMN (2023), en el Valle Central durante el mes de marzo del 2023, el excedente de lluvia pasó el 300%. Ese comportamiento inusual en zonas que se encontraban en temporada seca está relacionado con factores atmosféricos como la cercanía de la zona de convergencia intertropical, ya que esta se encontraba más al norte de lo que correspondía para el mes de marzo. Esto generó un efecto de baja presión y vientos alisios debilitados, dando como resultado ese excedente de lluvia inusual. La estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27 registró una precipitación anual para el 2023 de 1621,4 mm de agua. Según los datos de precipitación registrados por la estación del 2018 al 2023, se sigue el comportamiento evidenciado en la figura 9, marcándose bien el periodo de sequía y los dos periodos de lluvia, ver figura 12.



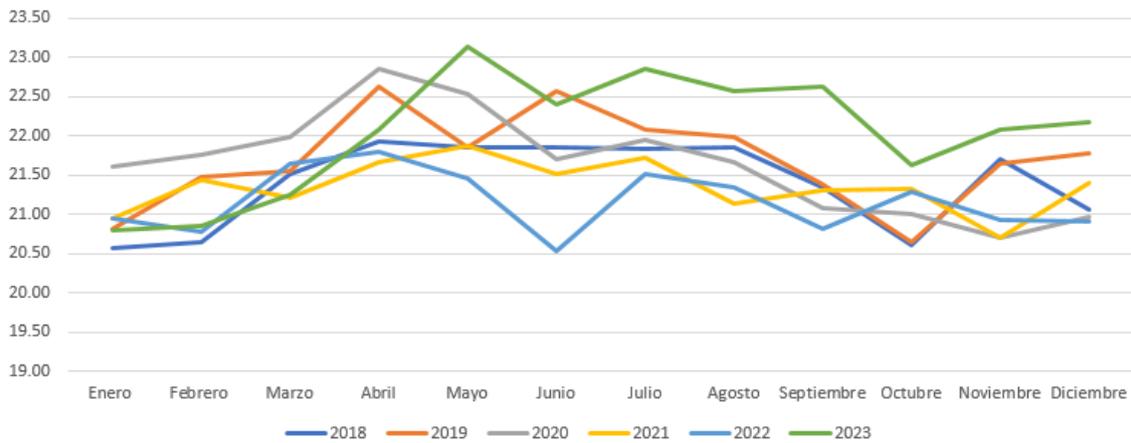
**Figura 12.** Promedio de precipitaciones mensuales registradas del 2018 a 2023 por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27.

También, del periodo del 2018 al 2023, predominan septiembre y octubre con los promedios máximos de precipitación y febrero como el mes con el menor promedio de precipitación registrado. Continuando con el análisis de las temperaturas registradas en el periodo estudiado, en la figura 13 se muestran las temperaturas registradas a lo largo del 2023:



**Figura 13.** Datos de temperatura registrados del 2018 a 2023 por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27.

De acuerdo con los datos suministrados por el IMN, durante el año de 2023, se registraron temperaturas de 24,6 °C durante el mes de mayo y 19,2 °C durante el mes de diciembre, como los días con temperaturas máximas y mínimas correspondientemente. Sin embargo, los meses con los promedios mínimos y máximos corresponden a enero con 20,8 °C y mayo con una temperatura promedio de 23,14 °C, ver figura 13. Según los datos recopilados durante los últimos seis años (2018-2023), se observa un incremento significativo en las temperaturas promedio anuales durante el año 2023, ver figura 14.

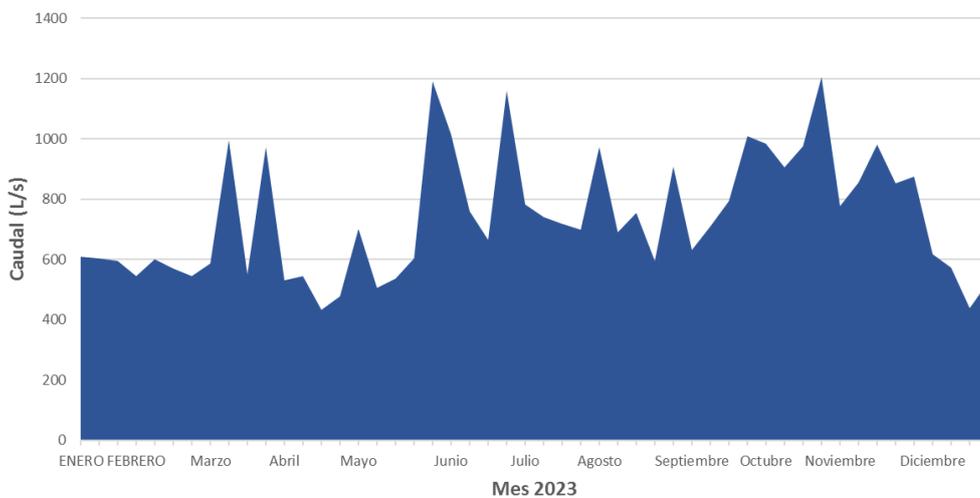


**Figura 14.** Promedio de temperaturas mensuales registrado del 2018 a 2023 por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27.

Además, se destaca que las temperaturas máximas registradas durante este periodo se alcanzaron principalmente en los meses de mayo y abril. Por otro lado, en cuanto a las temperaturas promedio mínimas, se evidencia que los meses de enero, octubre y junio presentaron los valores más bajos, siendo enero el mes con mayor recurrencia en este aspecto. Cabe destacar que para objetivos de proyecto se van a considerar ambas temperaturas promedio extremas mensuales de 20,8 °C y 23,14 °C, con el objetivo de asegurar el buen funcionamiento del sistema en ambas situaciones.

#### 4.1.2 Descripción del agua residual de la PTAR Los Tajos

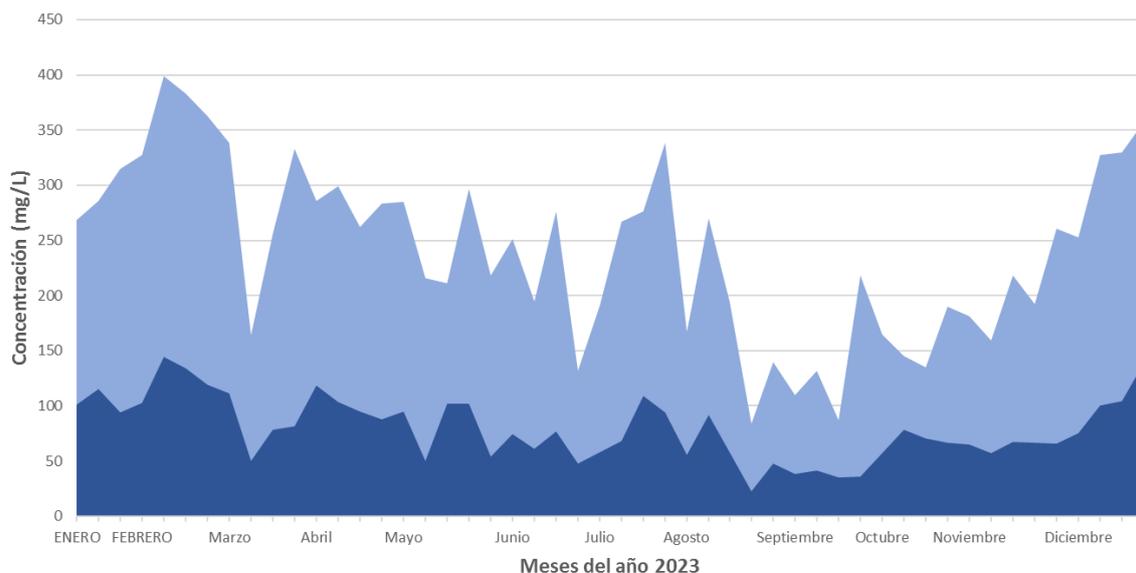
Para describir el efluente de La PTAR Los Tajos se tomó en cuenta la información del caudal y sus concentraciones de DBO y DQO que posee la institución. La información corresponde a la base de datos del año 2023. En la figura 15 se muestran los caudales promedios de salida registrados durante el 2023. Los picos, por lo general, corresponden a lluvia precipitada, que genera un aumento en el caudal registrado a la entrada de la PTAR.



**Figura 15.** Caudales promedio de salida registrados en la PTAR Los Tajos en el 2023.

Como se evidencia en la figura anterior, los picos de caudales se presentan en el mes de junio y noviembre. La tendencia que muestran los registros de caudales (Figura 15), responden en cierto modo al comportamiento histórico de precipitaciones que se muestra en la figura 9. Se destaca que, durante el mes de marzo 2023, hay dos picos de caudales registrados. Los picos pueden deberse a las lluvias presentadas durante ese mes. Esas lluvias fueron producto de la cercanía de la zona de convergencia intertropical, explicado anteriormente, ver figura 11. Los valores extremos de caudales registrados en La PTAR Los Tajos son 432,720 L/s y 1206,270 L/s en los meses de abril y octubre, respectivamente. El promedio es de 734,684 L/s y una desviación estándar de 203,316 (L/s), el valor elevado de la desviación estándar se explica por la naturaleza de los datos, ya que el caudal varía según estaciones del año, aumentando en temporada lluviosa y disminuyendo en verano.

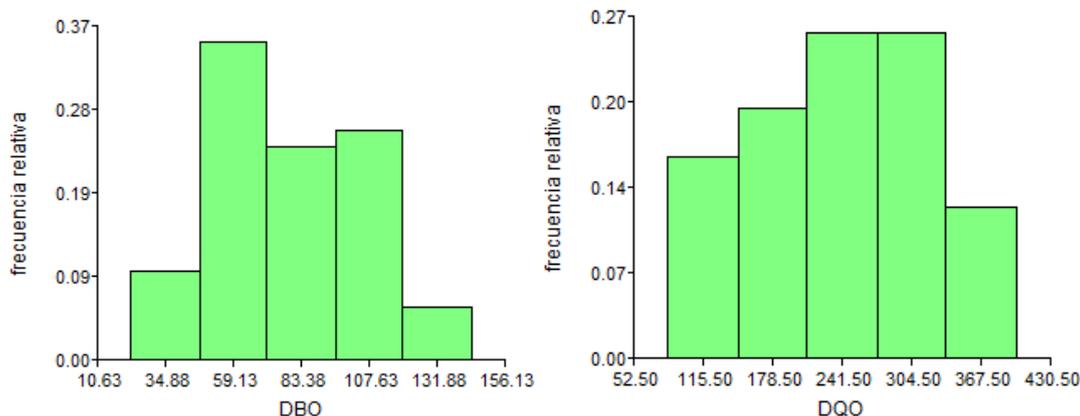
Este análisis de caudales permite obtener una visual de los volúmenes tratados en la PTAR a lo largo del año en las diferentes estaciones climáticas experimentadas, con el objetivo de establecer un valor de referencia, para posterior a definir el caudal que se puede tratar por medio del sistema de humedales validar que este no es mayor al caudal de salida que posee actualmente la PTAR. Las concentraciones de DBO y DQO registrados en el efluente a lo largo del año 2023 se muestran en la figura 16.



**Figura 16.** Valores de DBO y DQO registrados en la PTAR Los Tajos en el 2023.

Como muestra la gráfica de la figura 16, la concentración de DQO y DBO presentes en el efluente de la PTAR Los Tajos se encuentran estrechamente relacionados. Dicho comportamiento es el esperado de acuerdo con la teoría. La concentración de DBO posee valores inferiores que el DQO, debido a que este último presenta un mayor número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que por vía biológica (Guardia et, 2023).

Para realizar la selección de la concentración de diseño de DBO y DQO se realizó un análisis estadístico utilizando InfoStat 2020. En primera instancia se evaluó la distribución de los datos por medio de histogramas:



**Figura 17.** Histogramas de las concentraciones de DBO y DQO registrados en el efluente generado por la PTAR Los Tajos en el 2023.

Como se muestra en los histogramas, en ambos casos los valores de concentración presentan un comportamiento no normal. La concentración de DBO presenta una distribución bimodal a lo largo del tiempo. La concentración de DQO presenta una distribución sesgada a la izquierda. Para el caso de la concentración de DBO, una distribución bimodal hace referencia a que se presentan dos modas en los datos registrados, lo que puede hacer sugerencia a que se presentan condiciones ambientales que afectan las concentraciones de DBO. Para el caso de la concentración de DQO, el comportamiento sesgado evidencia una tendencia de los datos a un extremo inferior de la escala de concentraciones, pero existen algunos eventos que provocan concentraciones notablemente más altas en comparación con el promedio.

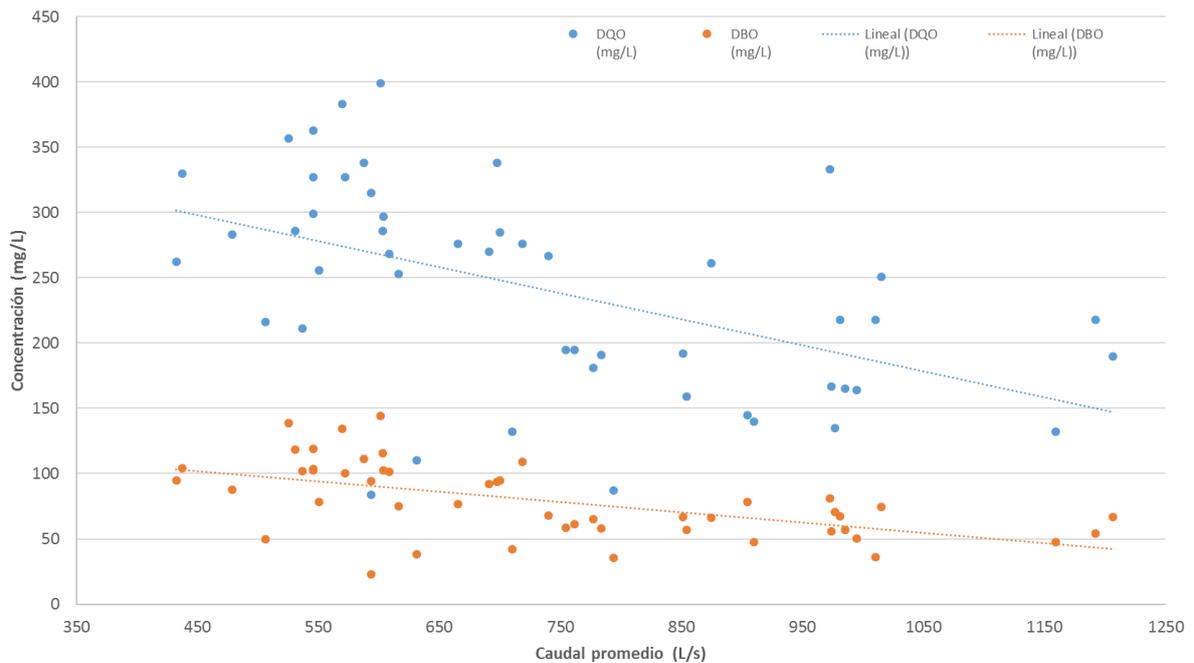
Para evidenciar la relación entre las concentraciones de DQO y DBO, se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson:

**Tabla 3.**

*Coeficiente de correlación de Pearson entre las concentraciones de DBO y DQO del efluente de la PTAR Los Tajos*

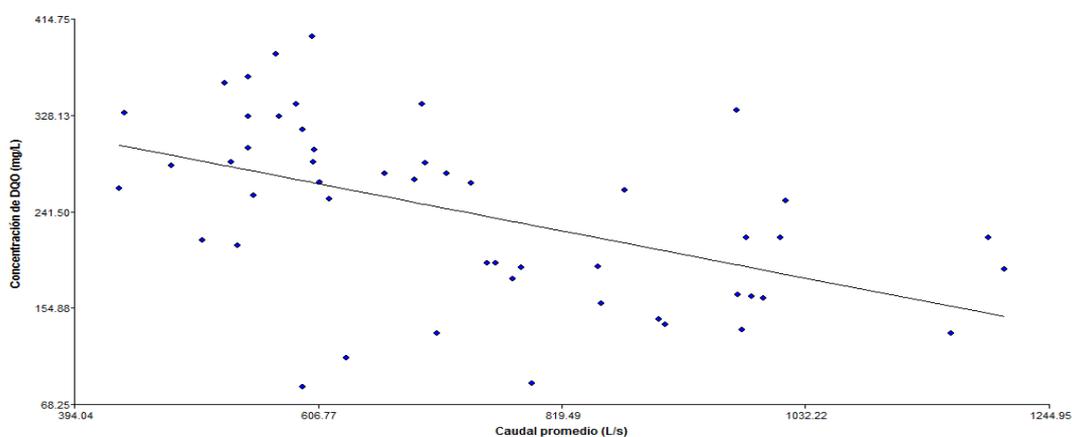
	<b>DQO</b>	<b>DBO</b>
<b>DQO</b>	1,00	0,00
<b>DBO</b>	0,87	1,00
<b>Caudal promedio</b>	-0,51	-0,56

De acuerdo con los resultados del coeficiente de correlación de Pearson, las concentraciones de DBO y DQO presentan un coeficiente de correlación positivo y cercano a 1. Esto significa que presentan una relación lineal, es decir, cuando aumenta o disminuye una, la otra también lo hace. Por otro lado, con el objetivo de estudiar la relación entre los datos de concentraciones y los caudales registrados, se realizó un gráfico de dispersión, con el caudal en el eje x y la concentración en el eje y (figura 19).



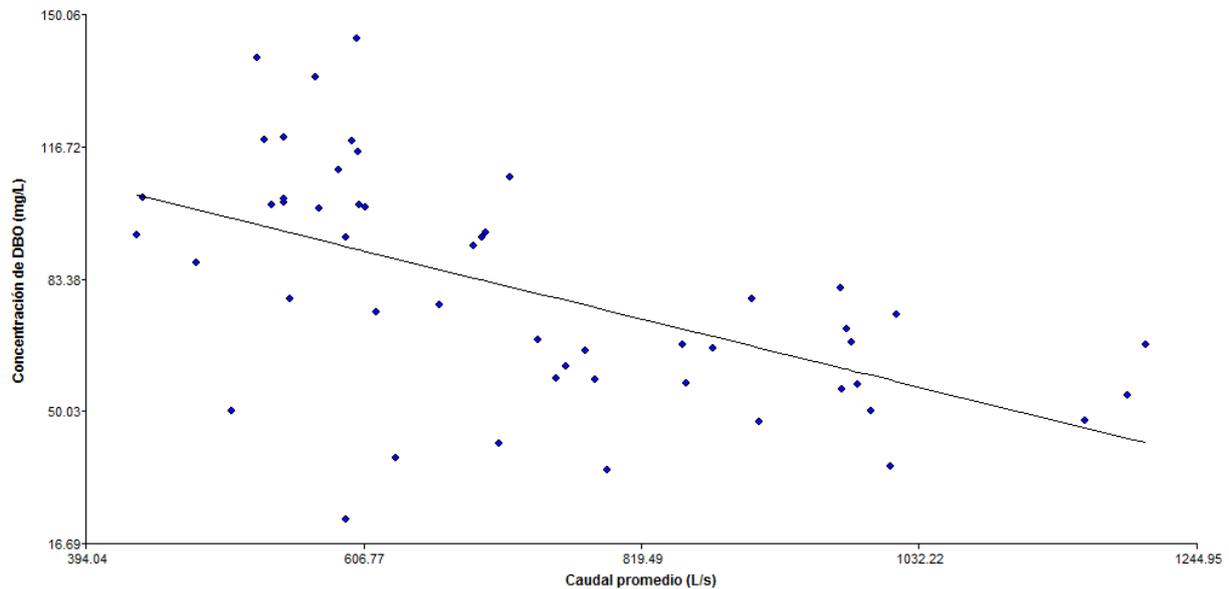
**Figura 18.** Dispersión de las concentraciones de DBO y DQO registrados en la PTAR Los Tajos en el 2023.

Como se puede apreciar en la figura 18, la nube de puntos en el extremo inferior derecho alcanza valores de concentración más bajos de DBO y DQO, identificados en color anaranjado y azul respectivamente, con valores de caudal más elevados. A diferencia del extremo izquierdo, donde la nube de puntos posee valores más altos de concentración de contaminantes (DBO en amarillo y DQO en azul), pero con caudales más elevados. Sin embargo, los datos no presentan un comportamiento decreciente, como se muestra en las figuras 19 y 20, el coeficiente de correlación de Pearson entre caudal y cada una de las concentraciones de DBO y DQO es negativo. Esta condición explica que existe una relación inversa entre estos parámetros, es decir, cuando uno de estos aumenta, el otro disminuye, lo que respalda el comportamiento presente en la gráfica de dispersión. Se presentan valores de coeficiente de dispersión de Pearson de -0,51 y -0,56 para DQO-caudal y DBO- caudal correspondientemente, los cuales son muy bajos, por lo que se decidió aplicar el modelo de regresión lineal:



**Figura 19.** Modelo de regresión lineal de DQO y caudal promedio.

Dicho modelo presenta un valor de  $R^2$  ajustado de 0,24 y un valor de p de 0,0002. El valor de p permite establecer una relación lineal decreciente entre el DQO y el caudal registrado (figura 19). Para el caso del DBO se obtuvieron los siguientes resultados (figura 20).

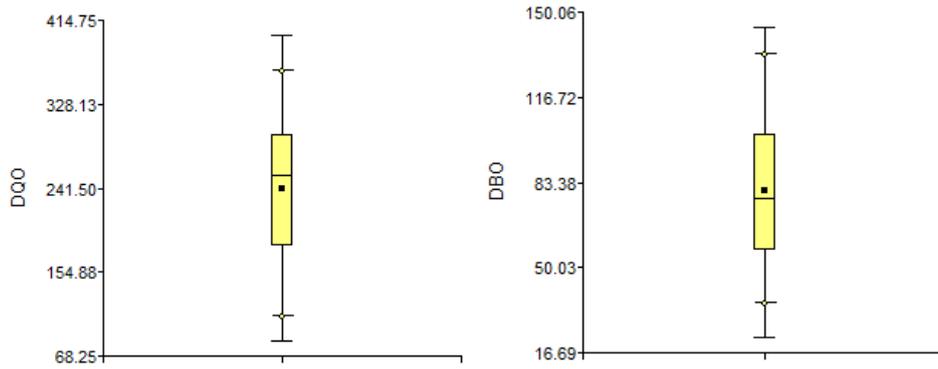


**Figura 20.** Modelo de regresión lineal de DBO y caudal promedio.

Para este caso se presentó un valor de  $R^2$  ajustado de 0,31 y un valor de p de 0,0001, evidenciando un comportamiento similar al del DQO. El p bajo hace referencia a una relación decreciente entre la concentración de DBO y el caudal promedio, es decir, su concentración disminuye conforme aumenta el caudal. Sin embargo, los valores de  $R^2$  ajustados son muy bajos, puesto que un valor aceptable es de 0,8, por lo tanto, no se puede asegurar una relación entre los datos de caudal y concentraciones de DQO y DBO, pero sí hay una tendencia a disminuir conforme aumenta el caudal.

Por la variabilidad de caudales y concentraciones explicada anteriormente, se opta por emplear los valores de DQO y DBO correspondientes al tercer cuartil, con el objetivo de seleccionar un valor que englobe el 75% de los datos. Esta elección considera la influencia de las variaciones estacionales y evita que datos extremos impactan significativamente en los resultados y de esta forma asegurar que el sistema brinda tratamiento adecuado al agua residual que ingresa al sistema. En la figura 21 se muestran los gráficos box plot obtenidos para las concentraciones de DBO y DQO.

Esta elección previene la posibilidad de sobredimensionar el sistema, garantizando así un tratamiento adecuado en la gama donde se concentra la mayoría de los datos registrados. Esto es especialmente relevante dado que las concentraciones varían significativamente según la época lluviosa o seca, presentando picos muy elevados y momentos en los que la concentración es tan baja que cumple con los reglamentos.

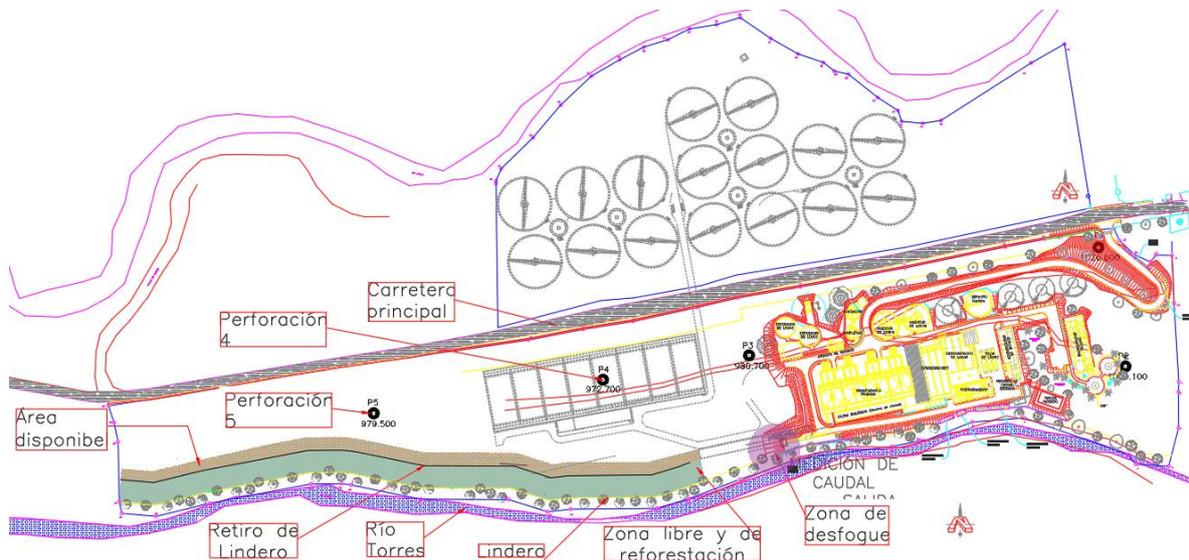


**Figura 21.** Gráficos box plot de concentraciones de DQO y DBO, unidades en mg/L.

Los valores de concentraciones referentes al tercer cuartil fueron de 294,250 mg DQO/L y 102,10 mg DBO/L. Se decide considerar estos valores para diseñar un sistema de humedales artificiales. Los humedales artificiales tienen como fin tratar las aguas efluentes del tratamiento primario que genera la PTAR Los Tajos. Una vez tratadas, se diseña un sistema de riego, para el reúso de estas.

#### 4.1.3 Descripción de la topografía de la PTAR Los Tajos

De acuerdo con la información de los archivos DWG, proporcionados por encargados de la PTAR, en el siguiente apartado se muestra la descripción topográfica del sitio. En la figura 22, se aprecia el terreno donde se ubica la PTAR, la cual se encuentra al margen derecho del Río Torres.



**Figura 22.** Finca de la PTAR Los Tajos con huella constructiva actual y huella constructiva futura correspondiente a la segunda etapa del proyecto. Plano generado por PTAR Los Tajos del AyA.

En la figura 22 se muestra la finca de las instalaciones de la PTAR. Con color azul se delimita todo el terreno que posee la institución, la estructura actual se encuentra centralizada en la finca entre la carretera principal representada con líneas grises y el Río Torres representado en color azul. La estructura actual de la PTAR se encuentra en la zona este de la finca, en color rojo se representan aceras, calles, rampas y taludes, por otro lado, con color amarillo se representan los edificios administrativos y estructuras del sistema de tratamiento primario. En la zona oeste se encuentra área libre, disponible para la construcción de la segunda fase del proyecto, representada en color gris, esta segunda etapa se divide en la finca principal y la finca secundaria, la cual se localiza en colindancia frontal con finca principal separada por la vía pública. El área de reforestación al margen del Río Torres se encuentra en la zona oeste de la finca provincial y se representa en color verde.

Según el estudio de geotécnico y de mecánica de suelos proporcionado por la institución, se especifica que la institución realizó cinco perforaciones a lo largo del terreno con un sistema de penetración estándar y de rotación con broca diamante, estos puntos se evidencian en la figura 22 en color negro. En la zona oeste se encuentran tres puntos de perforación (P3, P4 y P5). Como se etiqueta en la figura 22 el extremo sur de la PTAR que colinda con el Río Torres, se encuentra la zona de desfogue resaltado con un círculo morado en la figura 22.

Se implementará un sistema de humedales artificiales para el tratamiento del efluente generado. Se propone aprovechar el área libre ubicada en la zona oeste, de color verde, de manera que no se vean afectadas las estructuras existentes ni la huella futura destinada al tratamiento secundario. Además, esta ubicación se encuentra cerca de la zona de reforestación, que es el punto de aprovechamiento final del caudal tratado.

De acuerdo con esto, se plantea de interés la información del estudio geotécnico y de mecánica de suelos sobre las perforaciones que se encuentran en la zona oeste catalogada como área libre, específicamente los puntos P4 y P5. El estudio menciona que del punto P3 al P5 aparece el manto rocoso de ignimbritas Líticas en color gris, y en los puntos de perforación P4 y P5 se presentan los siguientes niveles freáticos de 2 m y 7,27 m respectivamente.

Sumado a esto, según el decreto DE-39887-s-MINAE “Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales” se deben mantener un retiro a los linderos de propiedad. Para el caso de humedales artificiales de flujo superficial o subsuperficial, el retiro debe ser 20 metros cuando el caudal a tratar es mayor a  $5 \frac{m^3}{día}$ . Con caudales menores o iguales a  $5 \frac{m^3}{día}$  se aceptan retiros de 1 metro.

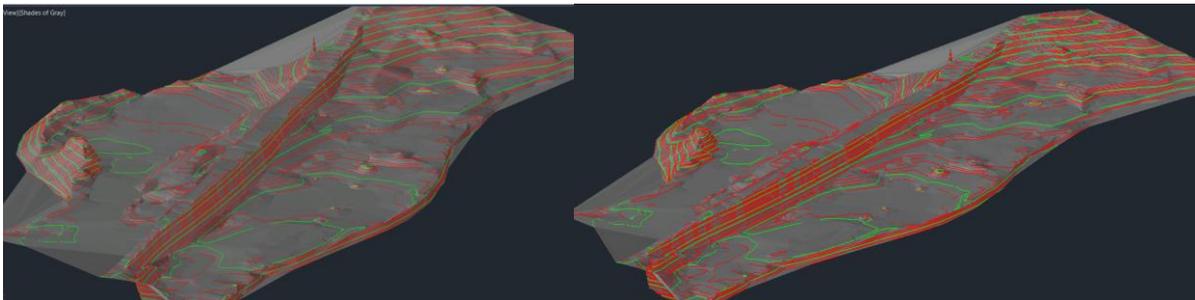
En la figura 22 también se especifica el lindero del terreno mediante una línea de color amarillo. Además de esto, se muestra el retiro del lindero (línea negra, dentro de zona color verde) de 20 m, dando como área disponible para la construcción del sistema de humedales en el área resaltada en color anaranjado.

El terreno en estudio posee una condición bastante plana, con cambios de elevación muy suaves, como se muestra en la siguiente imagen, donde las curvas de nivel de color rojo poseen elevaciones mayores y aquellas de color verde son más suaves, evidenciando hacia el oeste una zona relativamente plana:



**Figura 23.** Representación topográfica con curvas de nivel de la zona disponible al oeste correspondiente a finca principal de la PTAR. Superficie creada en Autocad con archivo de curvas de nivel facilitado por el AyA.

En la figura 23 se aprecia la cota 960, 00 msnm resaltada en negrita representa la elevación a la que se encuentra el tanque de desfogue de la PTAR, marcado con un círculo azul. El área designada para la construcción de los humedales iniciaría a partir de la curva de nivel de 954,00 msnm, área resaltada en color verde, para aprovechar el cambio de altura que presenta el terreno en este punto y a partir de la curva de nivel 953,00 msnm se plantea como zona de instalación del sistema de humedales. En la siguiente figura 24 se muestra una imagen en 3D con el objetivo de mostrar la planicie que posee el terreno.



**Figura 24.** Finca de la PTAR en 3D. Superficie 3D creada en Civil 3D con archivo de curvas de nivel facilitado por el AyA.

#### 4.2. Diseño de tren de tratamiento y memoria de cálculo

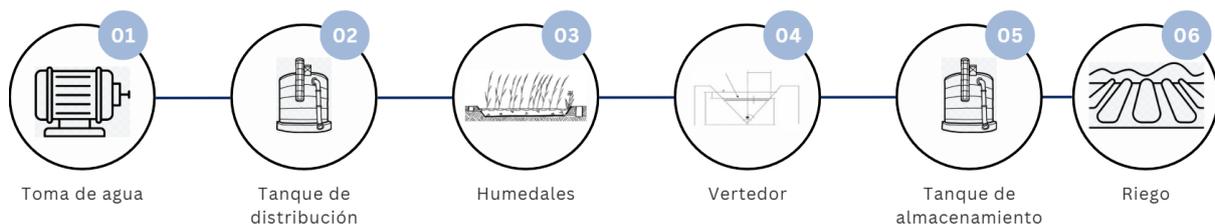
En este apartado se presentan los resultados obtenidos para el objetivo específico 2. En primer lugar, se establece el flujo hidráulico estructural necesario para redireccionar el efluente del tratamiento primario hacia los humedales artificiales. A continuación, se realiza el diseño de una unidad de humedal artificial, determinando sus dimensiones y el caudal que puede tratar, con base en los parámetros definidos previamente en el apartado 4.1, tales como la concentración de DBO, la temperatura del ambiente asignado al efluente y los retiros mínimos según la normativa vigente.

Posteriormente, se calcula el caudal requerido para el riego de la zona en reforestación, lo que permite determinar la cantidad de unidades de humedales artificiales necesarias para satisfacer dicha demanda hídrica en la zona de riego. Para este cálculo, se estimó el consumo hídrico en función del área a reforestar, ajustando su tamaño en relación con la cantidad de humedales en cada escenario. Este enfoque permite optimizar el sistema, evitando su sobredimensionamiento, por ejemplo, más humedales artificiales de lo necesario, y la generación de un excedente de caudal innecesario.

Por último, se llevó a cabo el dimensionamiento de las estructuras que conforman la conducción y distribución de agua. Finalmente, se presenta la propuesta del sistema de riego a implementar en la zona de reforestación, incluyendo las memorias de cálculo, los planos de las estructuras y sus vistas en 3D.

#### 4.2.1 Flujo hidráulico estructural

Para establecer las estructuras que conforman la conducción del efluente de tratamiento primario a la zona donde se ubicaran los humedales artificiales y la zona de riego, es importante tener en cuenta cada una de las necesidades de la PTAR. Como se muestra en la figura 23, el pozo de desfogue de la PTAR se encuentra a mayor altura (960 msnm). Esta altura se aprovecha para impulsar el efluente del tratamiento primario a la zona de tratamiento propuesto. La conducción se plantea utilizando tubería pvc. La figura 25 especifica las unidades a establecer para la conducción hacia el tratamiento con humedales artificiales y el reúso en riego.



**Figura 25.** Flujo del sistema propuesto para el sistema de tratamiento

En primera instancia, la toma de agua hace referencia al sistema necesario para extraer el efluente de tratamiento primario cuando pasa por el tanque de desfogue de la PTAR. Como segunda estructura, se plantea la instalación de un tanque de distribución. El propósito del tanque es garantizar un flujo constante que abastezca el sistema de humedales artificiales por un período mínimo de 24 horas. Además, este tanque funciona como un punto de muestreo del agua que ingresa a los humedales artificiales y la altura del agua en el tanque permite contar con una columna de agua fija y aprovecharla para presurizar la tubería de distribución del efluente en cada uno de los humedales.

La tercera estructura corresponde al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Este sistema se encarga de la remoción de contaminantes hasta alcanzar los parámetros adecuados para el reúso del efluente en riego. A la salida del sistema de humedales, se propone la instalación de vertederos como punto de control del rendimiento del sistema de tratamiento. Estos permitirán monitorear el caudal de salida y la eficiencia en la remoción de contaminantes, comparando los parámetros del agua antes y después del tratamiento.

Como se muestra en la figura 25, se contempla la instalación de un tanque de almacenamiento. Este tanque permitirá el aprovechamiento del efluente de los humedales artificiales, facilitando su recolección para la distribución en el sistema de riego de la zona en reforestación, priorizando implementar un sistema de riego por gravedad. El tanque también permite aprovechar el agua previamente tratada en futuros usos dentro de la PTAR e incluso como medida de contención ante incendios, un riesgo frecuente en las zonas alejadas.

Posterior al tanque de almacenamiento, se encuentra el sistema de riego sugerido para su aprovechamiento en la zona de reforestación a lo largo de la ribera del río Torres. La reutilización del efluente de la PTAR en riego de la zona en reforestación responde a un enfoque integral de sostenibilidad ambiental, así como optimización de recursos, ya que el agua también podría tener otras posibles aplicaciones internas dentro de la PTAR en tareas comunes como en la limpieza de las instalaciones. Sumado a esto el riego de las zonas en reforestación genera un mayor valor ambiental y social, al permitir aprovechar el recurso hídrico disponible para contribuir directamente en el proceso de reforestación del ecosistema circundante, donde se facilita la recuperación del paisaje ribereño, permitiendo ampliar el abanico de servicios ecosistémicos. De esta forma se transforma un subproducto del proceso de tratamiento de la PTAR en un insumo para la regeneración ambiental, donde se prioriza en un uso estratégico, que va más allá de la funcionalidad operativa y se orienta hacia la sostenibilidad a largo plazo.

#### 4.2.2 Humedal artificial

En el diseño del sistema de humedales artificiales para el tratamiento del efluente del tratamiento primario y su reúso, se procede con la memoria de cálculo de una unidad. Conocido el caudal que puede tratar una unidad de humedal artificial, se pasó a definir la demanda hídrica que se tendría en la zona en reforestación a lo largo de la Ribera del Río Torres. Conocida la demanda hídrica en la zona de reforestación, se establece la cantidad de unidades de humedales artificiales necesaria para abastecer el riego.

Para el caso de humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal, la profundidad del sustrato puede variar de 0,45 - 1 m y una pendiente promedio entre 0,5 % la 1 % (Delgadillo et al., 2010). Para el caso de la porosidad del sustrato, en la tabla 1 se mencionan los valores correspondientes de acuerdo con el medio filtrante. De acuerdo con Delgadillo et al (2010), el diámetro de la grava puede variar de 3-32 mm. Para el diseño se establece como medio filtrante la grava fina con un diámetro de 16 mm.

Para el diseño de un humedal artificial y la definición del caudal que este sistema puede procesar, se siguió el modelo de flujo de tapón. Como datos base se utilizan los datos obtenidos en el apartado de 4.1 Descripción del sitio. En la tabla 4 se presenta un resumen de dichos parámetros establecidos.

**Tabla 4.**

*Resumen de parámetros establecidos para el diseño de una unidad de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.*

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Fuente</b>
DBO PTAR (Co)	102,1	mg/L	Tercer cuartil de datos de PTAR Los Tajos
DQO PTAR /Ce)	294,25	mg/L	Tercer cuartil de datos de PTAR Los Tajos
DBO Marco Legal	30	mg/L	DE33601-s-MINAE "Reglamento de Vertido Reúso de Aguas Residuales"
DQO Marco Legal	150	mg/L	DE33601-s-MINAE "Reglamento de Vertido Reúso de Aguas Residuales"
Retiro de lindero	20	m	DE-39887-s-MINAE "Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales"
$Kv, 20^1$	1,104	$d^{-1}$	Cuervo et al, 2018
$\theta^2$	1,06	NA	Cuervo et al, 2018
Dm profundidad	0,55	m	Delgadillo et al., 2010
n grava <sup>4</sup>	0,38	NA	Cuervo et al, 2018

1: Constante de degradación

2: Coeficiente de Arrhenius

3: Propuesta de profundidad a partir de rango de 0,45 - 1 m

4: Porosidad de la grava fina

Según el decreto DE-39887-s-MINAE "Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales", un humedal artificial superficial o subsuperficial debe ubicarse a una distancia mínima de 20 m del lindero, tal como se indica en la figura 22. En función de esta restricción, se define un ancho óptimo de 12 metros para una unidad de humedal artificial. Considerando los 20 m de distancia con el lindero de la propiedad, este ancho permite mantener una separación adecuada con la huella gris proyectada donde se ubicará el tratamiento secundario en la PTAR Los Tajos (ver figura 22). Como consideración de diseño, se establece una relación de largo a ancho de 2:1 (Delgadillo et al., 2010). Por tanto, se establece un largo de 24 m para cada celda. Mantener esta proporción es fundamental para evitar la formación de flujos preferenciales o el desbordamiento del agua sobre la superficie de la grava (Delgadillo et al., 2010). Con estas dimensiones (12 m de ancho por 24 m de largo), una unidad de humedal artificial tiene un área superficial total de 288 m<sup>2</sup>.

De acuerdo con el largo, ancho y área superficial, se calcula el caudal que puede ser tratado por una unidad de humedal artificial, utilizando la ecuación 3. Como se muestra en la ecuación 3, se debe determinar el coeficiente de degradación de primer orden que está en función de la temperatura, para esto se utiliza la ecuación 2.

$$Kv, t = Kv, 20 * \theta^{T-20}$$

Para establecer la temperatura promedio del agua, Kadlee & Wallace (2006) menciona que es posible aproximar la temperatura del agua con la temperatura ambiental de la zona donde se implementa el sistema de humedales. De acuerdo con esto, se establece la temperatura

promedio ambiental máxima y mínima indicada en el apartado 4.1.1 Descripción climática del sitio, las cuales se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 5.**

*Resumen de temperaturas máximas y mínimas establecidas en la descripción climática de la zona de estudio.*

Temperatura máxima (°C)	23,14
Temperatura mínima (°C)	20,8

Sustituyendo, en la ecuación (ecuación 2) con las dos temperaturas extremas registradas tenemos.

Con T= 23,14 °C:

$$Kv,t = 1.104 * 1.06^{23,14-20}$$

$$Kv,t = 1,33 \text{ días}^{-1}$$

Con T= 20,8 °C

$$Kv,t = 1.104 * 1.06^{20,8-20}$$

$$Kv,t = 1,16 \text{ días}^{-1}$$

Seguidamente, se pasó a calcular el caudal que puede procesar el humedal artificial, utilizando la ecuación 3. Los parámetros necesarios para determinar el caudal se presentaron en la tabla 7. El área superficial del humedal artificial es de  $As = 288 \text{ m}^2$ . Se obtiene el caudal para los dos valores del coeficiente de degradación de primer orden obtenidos anteriormente ( $Kv, t$ ), con el fin de seleccionar el menor caudal que puede procesar el humedal artificial, logrando establecer el diseño del humedal bajo las condiciones más críticas.

$Kv,t = 1,33 \text{ días}^{-1}$

$$288 = \frac{Q(\text{Ln } 102,1 - \text{Ln } 30)}{1,33 * 0,55 * 0,38}$$

$$Q = 65,15 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$K_{v,t} = 1,16 \text{ días}^{-1}$$

$$288 = \frac{Q(\ln 102,1 - \ln 30)}{1,16 * 0,55 * 0,38}$$

$$Q = 56,85 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Como se muestra en los cálculos anteriores, el menor caudal de  $56,85 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$  que el sistema puede procesar, según el área superficial definida para el humedal, se obtiene utilizando la constante cinética de primer orden calculada con la temperatura ambiental más baja registrada en la zona de estudio de  $1,16 \text{ días}^{-1}$ . Esto concuerda con lo señalado por Mora-Orozco (2020), quien en su estudio establece un patrón claro de dependencia en la remoción de contaminantes respecto a las variaciones de temperatura a lo largo del año, presentando una mayor remoción en los días cálidos, ya que se aumenta el crecimiento de las plantas, lo que incrementa la actividad microbiana. De acuerdo con los cálculos se escoge el menor caudal de  $56,85 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$  con el objetivo de basar el diseño del sistema en las peores condiciones ambientales que se pueda enfrentar. Posterior al cálculo del menor caudal que el sistema puede procesar, se calcula el tiempo de retención hidráulica utilizando la ecuación [4].

$$TRH \text{ nominal} = \frac{n * Dm}{\frac{Q}{As}}$$

$$TRH \text{ nominal} = \frac{0,38 * 0,55}{\frac{56,85}{288}}$$

$$TRH \text{ nominal} = 1,06 \text{ días}$$

Cabe destacar que se plantea dejar 0,20 m de borde libre como factor de seguridad. De acuerdo con esto, la profundidad del sistema es de 0,75 m.

$$\text{Profundidad} = 0,55 \text{ m} + 0,2 \text{ m}$$

$$\text{Profundidad} = 0,75 \text{ m}$$

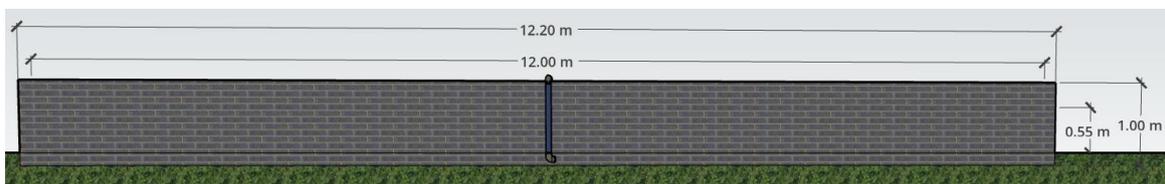
La tabla 6 resume los valores definidos sobre el diseño de una unidad de humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

**Tabla 6.**

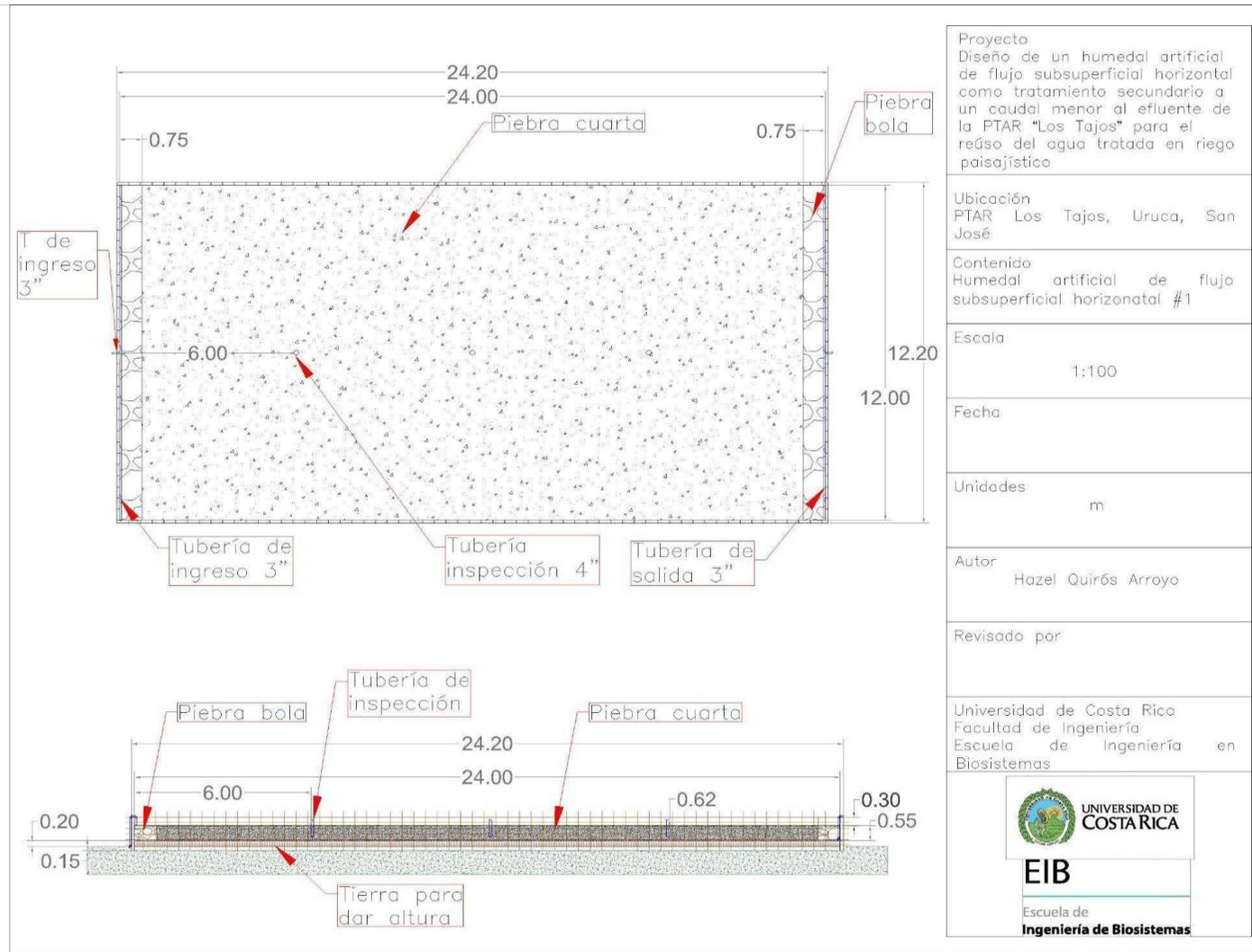
*Resumen de valores establecidos para una unidad de humedal artificial de flujo subsuperficial de flujo horizontal.*

Parámetros	Valor	Unidades
$Kv, t$	1,16	días <sup>-1</sup>
Caudal ( $Q$ )	56,85	$\frac{m^3}{día}$
Tiempo de retención hidráulica ( $TRH$ nominal)	1,06	días

Para la conducción y distribución del efluente del tratamiento primario hacia los humedales artificiales y el sistema de riego se han considerado las elevaciones para que sea por gravedad. De acuerdo con esta prioridad, el diseño del humedal no se establece de la forma convencional (inferior al nivel superficial del terreno), sino que se plantea dar una altura del nivel superficial del terreno, como se muestra en la figura 26. La altura del sustrato del humedal es de 0,55 m. Para contener el sustrato, se establece una estructura en concreto con una altura de 1 m, de los cuales posee 0,15 m anclados al terreno y 0,30 m como borde libre. En el fondo, para impermeabilizar y reducir costos de inversión, al nivel del terreno, se plantea colocar una geomembrana plástica. En la figura 27 se presenta un plano del humedal.



**Figura 26.** Vista frontal del humedal artificial. Elaboración propia en Sketchup.



**Figura 27.** Planos de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal establecido como sistema de tratamiento del agua residual. Elaboración propia con AutoCAD.

#### 4.2.3 Caudal necesario para la zona de reforestación

Conocer la demanda hídrica de la zona destinada a la reforestación es necesaria para establecer el caudal a tomar en el tanque de desfogue, la cantidad de humedales artificiales para el tratamiento de esas aguas y el dimensionamiento de las estructuras de manejo y conducción del agua. En la figura 28 se destaca la franja verde, la cual se estableció como la zona donde se pueden colocar unidades de humedales artificiales. Debajo de esa franja verde, se destaca, en color violeta y puntos oscuros, la zona de reforestación que se plantea regar con el reúso del agua tratada. La demanda hídrica corresponde a la cantidad de agua que requieren los árboles a establecer en la zona de reforestación.



**Figura 28.** Área disponible para la implementación del sistema y zona de reforestación.

Considerando un área de 11931,95 m<sup>2</sup> y con una densidad de plantación de 816 árboles por hectárea (Comisión Nacional Forestal, 2010), se tiene que en la zona de reforestación habría 974 árboles. La cantidad de agua que consume un árbol maduro se establece de 150 L/día por cada árbol (Brambila, M). Por tanto, teniendo en cuenta que se pueden plantar 974 árboles, el agua que se requiere en riego es de 146 m<sup>3</sup>/día (146 047,05 L/día). Debido a que una unidad de humedal artificial puede tratar 56,85 m<sup>3</sup>/día, se determina que se requieren tres unidades para suplir el riego en la zona de reforestación, obteniendo de esta forma un caudal total tratado de 170,5 m<sup>3</sup>/día. Con los tres humedales se obtiene un caudal necesario para regar la zona de reforestación y un caudal restante que puede ser utilizado para otras labores.

$$\text{Árboles a sembrar} = 1,19 \text{ ha} * 816 \frac{\text{árboles}}{\text{ha}} \quad [13]$$

$$\text{Árboles a sembrar} = 973,65 \text{ árboles}$$

$$\text{Agua necesaria} = 150 \frac{\text{L}}{\text{día} * \text{árbol}} * 973,65 \text{ árboles} \quad [14]$$

$$\text{Agua necesaria} = 146047,05 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

$$\text{Agua sobrante} = 170389,2903 \frac{L}{\text{día}} - 146047,05 \frac{L}{\text{día}} \quad [15]$$

$$\text{Agua sobrante} = 24492,24 \frac{L}{\text{día}}$$

El caudal tratado obtenido con las tres unidades de humedales artificiales de 1,97 L/s (170,5 m<sup>3</sup>/día), corresponde a un valor reducido respecto a los caudales que procesa la PTAR mostrados en la figura 15, representando valores entre de 0,002% a 0,005% en las diferentes estaciones climáticas.

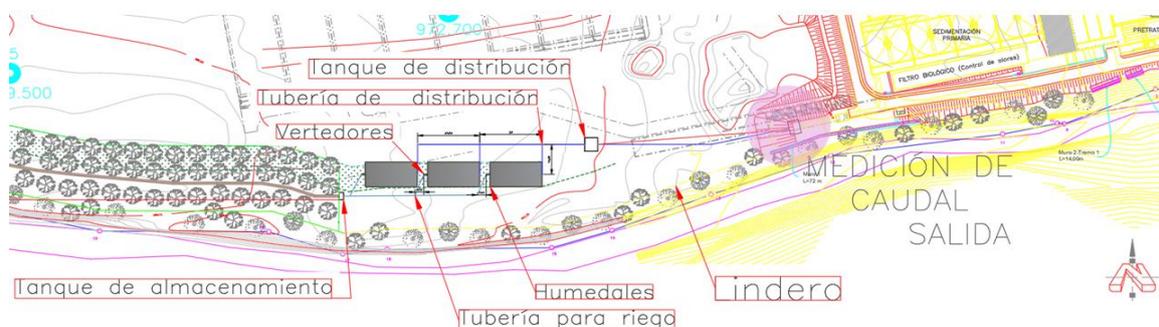
En la tabla 7 se resumen las relaciones utilizadas para estimar el consumo hídrico necesario para la zona en reforestación y los resultados obtenidos.

**Tabla 7.**

*Resumen de relaciones y resultados obtenidos sobre el consumo hídrico del área de reforestación*

Parámetros	Valor	Unidades
Área a regar	11931,95	m <sup>2</sup>
Área a regar	1,19	ha
Relación de árbol por hectárea	816	$\frac{\text{árboles}}{\text{ha}}$
Árboles a sembrar	973,65	árboles
Agua requerida por árbol por día	150	$\frac{L}{\text{día} * \text{árbol}}$
Agua necesaria	146047,05	$\frac{L}{\text{día}}$

De acuerdo con la secuencia establecida en la figura 25, después de cada unidad de humedal artificial se debe colocar un vertedero. Así es como en la figura 29, se muestran las tres unidades de humedales artificiales, cada una con su vertedero. Además, se muestra la zona de reforestación que posee la PTAR Los Tajos, con dicha distribución se respetan retiros establecidos por la normativa vigente y la huella de construcción futura.

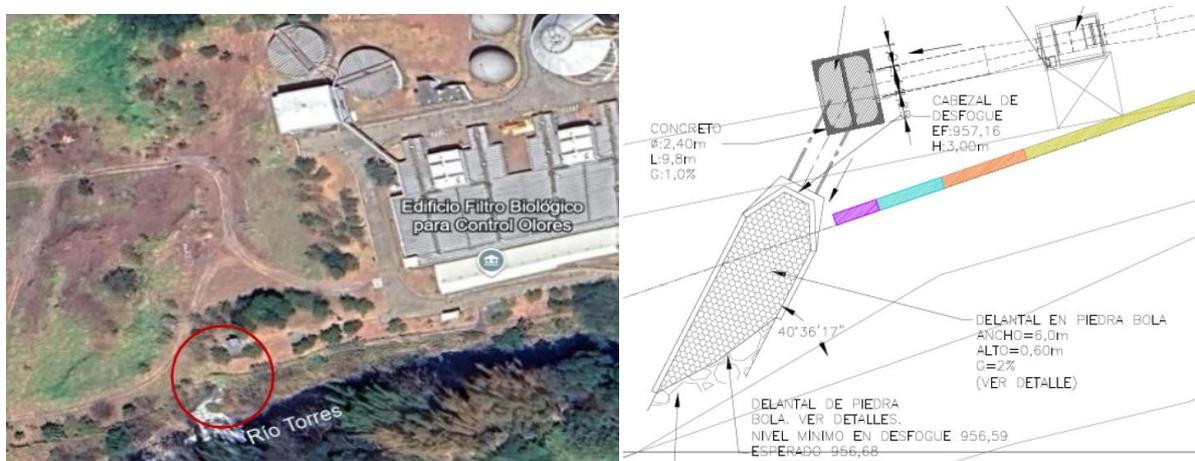


**Figura 29.** Distribución en planta de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y las estructuras que forman parte del sistema de tratamiento secundario.

Una vez establecido el caudal a tratar (56,85 m<sup>3</sup>/día) y las zonas donde se ubicarán los humedales artificiales, los vertederos y la zona de riego, se procede con el diseño de la conducción y estructuras para llevar el efluente del tratamiento primario, desde el tanque de desfogue hasta los humedales artificiales.

#### 4.2.4 Toma de agua

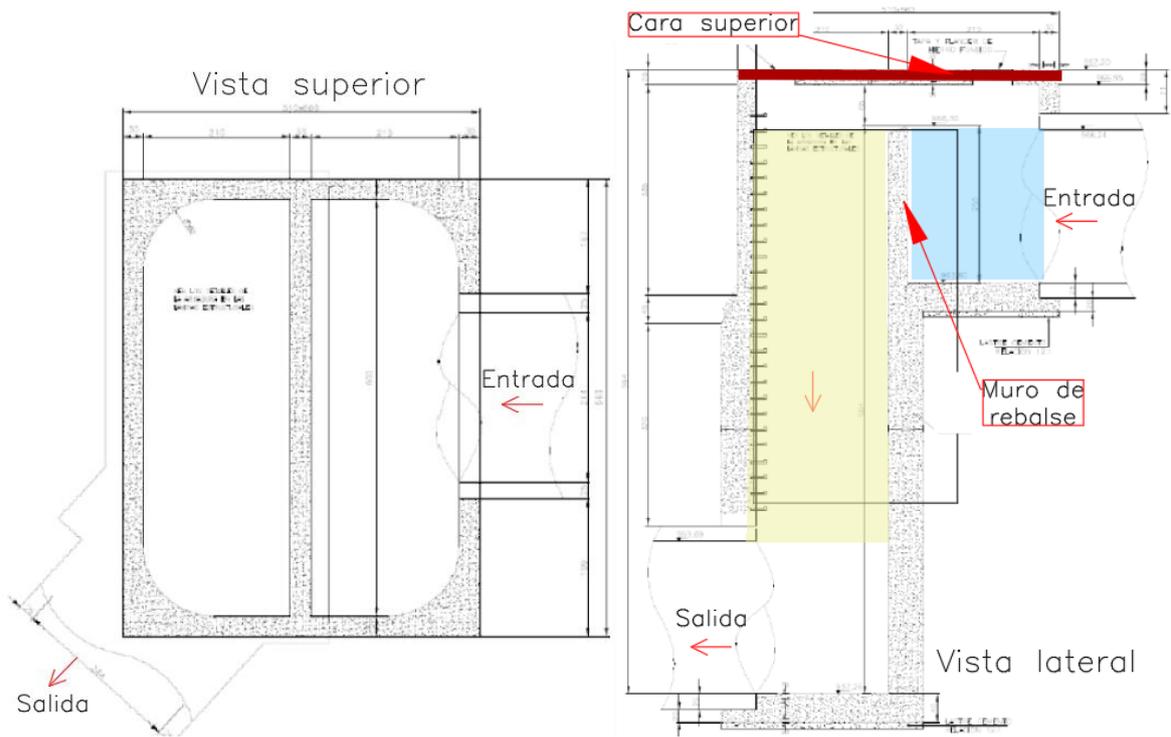
La toma de agua se estableció en el tanque de desfogue del efluente proveniente de tratamiento primario que posee la PTAR. La elección de este punto se debe a que es el más cercano identificado a la zona donde se colocarán los humedales artificiales y la zona de reforestación. En la figura 30 se aprecia, encerrado en un círculo rojo, la ubicación del pozo de desfogue y en la figura 31 se presenta el tanque de desfogue que posee la PTAR, al cual se le realizará la perforación destinada para la extracción del agua a tratar.



**Figura 30.** Localización del punto de captación en el pozo de desfogue de la PTAR Los Tajos, junto con su correspondiente vista en planta según el plano estructural. Fuente: Imagen satelital de Google Earth & Planos técnicos proporcionados por AyA.

Como se aprecia en la figura 31, el tanque de desfogue posee dos apartados resaltados en la imagen con color amarillo y celeste. Para el caso de la zona resaltada en color amarillo, corresponde a una zona de paso, en la cual el caudal va de salida en dirección al Río Torres. Para el caso de la zona resaltada en color celeste, ya que este cumple una función de vertedero en donde posee un muro que cumple la función de rebalsar el caudal, asegurando en este punto obtener un caudal permanente en esta zona.

Considerando la condición estructural y operativa del tanque de desfogue, se definió la ubicación del punto de extracción de caudal en la parte superior del mismo, específicamente en el área de rebose (marcada en color celeste). Esta configuración permite evitar intervenciones directas sobre las paredes laterales del tanque, las cuales están sometidas a mayores esfuerzos internos debido a la presión hidrostática, minimizando así el riesgo de comprometer la integridad estructural del sistema. En esta área, actualmente la PTAR posee una estructura techada y encerrada en malla, ya que por una tapa de registro realizan con una bomba un muestreo de efluente. Se plantea expandir la estructura techada para poder realizar una tapa registro e ingresar la tubería de succión en este punto, como se muestra en la figura 32.



**Figura 31.** Vista superior y corte lateral del pozo de desfogue de la PTAR Los Tajos, con señalización de la cara superior y lateral al nivel de piso. Fuente: Planos técnicos proporcionados por AyA.

La perforación debe estar en la cara superior, en un sector próximo a la pared. En ese sector, colocar una bomba axial, del cual baja hacia lo interno del pozo la tubería. Al estar cerca de la pared, la tubería se puede asegurar a la misma. La figura 32 muestra dónde quedaría la bomba centrífuga en la cara superior del pozo de desfogue.



**Figura 32.** Vista isométrica superior del tanque de desfogue de la PTAR Los Tajos con intervención para ingreso de la tubería para redireccionamiento de caudal al sistema de tratamiento propuesto. Elaboración propia en Sketchup.

Como se muestra en la figura 32, se plantea establecer una tapa registro en el tanque, para obtener una zona de ingreso al mismo y tener acceso a la tubería de succión de agua, en caso de ser necesaria una intervención o bien para dar mantenimiento. Se plantea mantener el equipo cercano a la cara lateral del tanque, con el fin de disminuir la cantidad de accesorios que pueden generar pérdidas importantes en el flujo.

Para la selección de la bomba que debe de succionar el efluente en el tanque de desfogue y enviar el agua al tanque de distribución, se plantea adquirir una bomba externa centrífuga. La elección de implementar una bomba externa en el sistema es debido a que el caudal de alimentación del tanque de desfogue genera demasiada turbulencia en el tanque, generando un ambiente inestable para la colocación de una bomba sumergible.

Para establecer la capacidad de la bomba se debe tener claro las alturas que debe vencer la bomba. En la figura 33 se presenta un esquema simple de las alturas que intervienen entre el tanque de desfogue y el tanque de distribución.

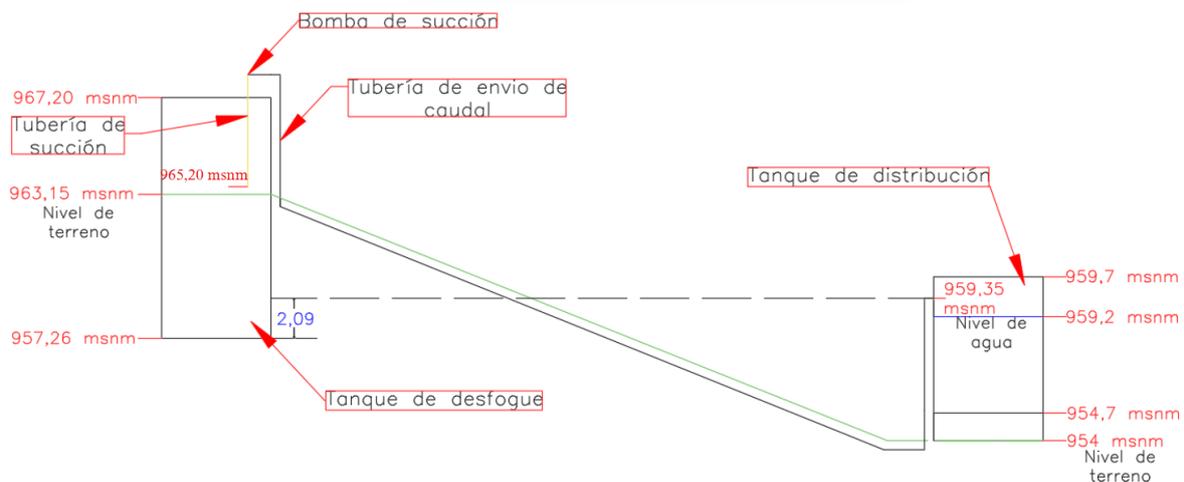


Figura 33. Esquema de alturas de tanques y disposición de la bomba.

Como se visualiza en el esquema de la figura 33, la bomba se coloca sobre el tanque de desfogue. La tubería de succión ingresa 2 m en el tanque. Para la selección de la bomba se utilizan las ecuaciones de Hazen-Williams. Sumado a esto, para el cálculo de la pérdida por accesorios en la línea de succión se tuvo en cuenta el coeficiente de pérdida unitaria, consultados del código de instalaciones hidráulicas y sanitarias en edificaciones del Código Federado de Ingenieros y Arquitectos.

En primera instancia se evaluó si la diferencia de altura entre el tanque de desfogue y el tanque de almacenamiento del sistema presenta un valor suficiente que permita obtener presiones positivas donde se asegure la entrega del caudal, para esto utilizamos las siguientes ecuaciones:

Área de un círculo:

$$A_{tubería} = \pi * r^2 \quad [16]$$

Donde:

r= radio de la tubería (m)

Seguidamente, se calcula la velocidad de flujo:

$$V_{flujo} = \frac{Q}{A_{tuberia}} \quad [17]$$

Donde:

Q= Caudal  $\frac{m^3}{s}$

A tubería= área de la tubería ( $m^2$ )

V flujo= velocidad del flujo dentro de la tubería ( $\frac{m}{s}$ )

La estimación de pérdidas por fricción se calculó con la siguiente ecuación:

$$H_f = \frac{10,67 * L * Q^{1,85}}{C^{1,85} * D^{1,85}} \quad [18]$$

Donde:

Hf= pérdida de carga (m)

C= Coeficiente de rugosidad

D= Diámetro interno de la tubería (m)

L= Longitud de la tubería (m)

Q= Caudal  $\frac{m^3}{s}$

Sumado a esto, se tiene en cuenta las pérdidas por fricción del tramo de la tubería para el traslado del caudal de  $7,11 m^3/h$  para la alimentación del sistema de tres humedales establecido (caudal de 56,85) del tanque de desfogue al tanque de distribución, la cual posee una longitud total de 101,66 m:

### Tabla 8.

*Cálculo de pérdidas por fricción en la tubería.*

C	Caudal ( $m^3/h$ )	Diámetro (mm)	Diámetro (m)	Caudal ( $m^3/s$ )	Área ( $m^2$ )	Velocida d (m/s)	Hf (m.c.a)	Hf acumulado (m.c.a)
150 <sup>1</sup>	7,11 <sup>2</sup>	53,21	0,05321	0,00197	0,0022 <sup>3</sup>	0,89 <sup>4</sup>	1,59 <sup>5</sup>	1,59

1: Coeficiente de rugosidad utilizado para pvc

2: Caudal de  $170,54 m^3/día$  sumas de caudales obtenidos del sistema de tres humedales ( $56,85 m^3/día$  por cada humedal)

- 3: Área obtenida con ecuación 16
- 4: Velocidad obtenida con ecuación 17
- 5: Pérdida de carga calculada con ecuación 18

Posteriormente, se realizó un conteo de los accesorios con el fin de estimar las pérdidas de carga generadas por estos. El coeficiente de pérdida total se calculó multiplicando la cantidad de cada tipo de accesorio por su correspondiente coeficiente de pérdida unitaria, según lo establecido en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos. Los detalles se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Pérdidas por accesorios en tramo de tubería de tanque de desfogue a tanque de distribución.*

Tramo	Accesorio	Cantidad	Coeficiente de pérdida unitaria	Coeficiente de pérdida total
Tanque de desfogue-tanque de distribución	Codos 90° 2"	5	0,66	3,3

Las pérdidas totales en este tramo de tubería corresponden a la suma de las pérdidas por fricción en la tubería y las pérdidas localizadas generadas por los accesorios. A continuación, se verifica si la diferencia de altura entre los tanques es suficiente para superar dichas pérdidas. Si el resultado es positivo, significa que la presión disponible es adecuada y el sistema funcionará correctamente, permitiendo que el caudal llegue al punto de entrega. En caso contrario, una diferencia negativa indicaría que la presión no es suficiente para garantizar el flujo requerido.

$$\text{Presión} = \text{Diferencia de altura} - H_f - \text{Coef pérdidas} \quad [19]$$

$$\text{Presión} = 7,85 \text{ m} - 3,3 \text{ m} - 1,59 \text{ m} = 2,96 \text{ m}$$

El resultado obtenido utilizando la ecuación 19 es positivo, por lo cual la diferencia de altura es suficiente para conducir el efluente desde el tanque de desfogue hasta el tanque de distribución. De acuerdo con esto, se plantea que la bomba succione el agua desde la parte superior del tanque de desfogue. Se utilizan las ecuaciones de Hazen-William para determinar las pérdidas totales a vencer (ecuación 18).

$$HTD = H_s + H_f + H_m \quad [20]$$

Donde:

- HTD= Altura dinámica total (*m*)
- Hs= Altura de succión (*m*)
- Hf= Pérdidas por fricción en la tubería (*m*)
- Hm= Pérdidas en accesorios (*m*)

La altura de succión es de 2 m, lo cual corresponde a la tubería que ingresa al tanque de desfogue desde la parte superior del tanque. En la tubería se plantea colocar una válvula check en la parte más baja de la tubería de succión de la bomba con el objetivo de permitir un único flujo del agua y de esta forma cebar la bomba y evitar que la bomba cavite. También, se recomienda considerar la instalación de una válvula de aire para que la bomba no sufra golpes de ariete y un manómetro para conocer la presión que se mantiene en la tubería. Para determinar las pérdidas se inicia con el cálculo de fricción del tramo de tubería de 2 m, utilizando la ecuación [15]. Los parámetros y resultados al ejecutar la ecuación 15 se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*Pérdidas de tubería correspondiente al tramo de succión.*

C	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Diámetro (mm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Hf (m.c.a)	Hf acumulado (m.c.a)
150 <sup>1</sup>	7,11 <sup>2</sup>	53,21	0,00197	0,002224 <sup>3</sup>	0,89 <sup>4</sup>	0,031 <sup>5</sup>	0,031 <sup>5</sup>

1: Coeficiente de rugosidad utilizado para pvc

2: Caudal de 170,54 m<sup>3</sup>/día sumas de caudales obtenidos del sistema de tres humedales (56,85 m<sup>3</sup>/día por cada humedal)

3: Área obtenida con ecuación 16

4: Velocidad obtenida con ecuación 17

5: Pérdida de carga calculada con ecuación 18

Posteriormente, se realiza el conteo de los accesorios y las pérdidas que se generan. En la tabla 11 se muestran los datos.

**Tabla 11.**

*Pérdidas por accesorios en tramo de tubería de succión.*

Tramo	Accesorio	Cantidad	Coeficiente pérdida unitaria	de Coeficiente de pérdida total
Succión de la bomba	Codo 90° 2"	1	0,66	2,05
	Válvula de pie	1	1,39	

De acuerdo con estas pérdidas se obtienen las pérdidas totales con la ecuación [20]:

$$HTD \text{ succión} = 2 \text{ m} + 0,031 \text{ m} + 2,05 \text{ m} = 4,081 \text{ m}$$

Posteriormente, se pasa a calcular la potencia que se requiere para la selección de la bomba:

$$Pb = \rho * g * Q * HTD \text{ succión} \quad [19]$$

Donde:

Pb= Potencia teórica de la bomba (W)

$\rho$  = Densidad del fluido ( $1000 \frac{Kg}{m^3}$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9,81 \frac{m}{s^2}$ )

Q= Caudal volumétrico total ( $\frac{m^3}{s}$ )

HTD= Altura total dinámica (m)

Sustituyendo tenemos:

$$Pb = 1000 \text{ Kg}/m^3 * 9,81 \text{ m}/s^2 * 0,00197 \text{ m}^3/s * 4,081 \text{ m} = 79,03 \text{ W}$$

Posterior a obtener la potencia de la bomba necesaria para vencer la resistencia total que presenta el sistema para mover el agua del tanque de desfogue de forma efectiva, se pasa a obtener la potencia real que debe poseer la bomba, teniendo en cuenta la eficiencia esperada del equipo, que en este caso la consideramos de 75%:

$$P_{real} = \frac{Pb}{\eta * 746} \quad [20]$$

Donde:

P<sub>real</sub>: Potencia real de la bomba (hp)

$\eta$ : Eficiencia de la bomba

Pb: Potencia teórica de la bomba (W)

Considerando 1Hp= 746 W

$$P_{real} = \frac{79,03 \text{ W}}{75\% * 746 \text{ W}/\text{Hp}} = 0,14 \text{ hp}$$

De acuerdo con esto, se establece colocar una bomba de 0,5 hp, ya que son las más pequeñas que se encuentran en el mercado. Seguidamente, se calcula el NPSH o bien la presión absoluta disponible en la succión de la bomba con el fin de evitar la cavitación del equipo. Para esto se tiene en cuenta la pérdida por fricción calculada anteriormente para la tubería de succión y la profundidad a la que se encuentra el agua de 2 m:

$$NPSHa = \frac{P_{atm}}{\gamma} - H_s - H_f - H_v \quad [21]$$

Donde:

Patm: Presión atmosférica

$\gamma$ : Peso específico del agua ( $9810 \frac{N}{m^3}$ )

Hs: Presión estática del fluido (m)

Hf: Pérdidas por fricción en la línea de succión (m)

Hvp: Presión de vapor del agua (m)

Ha: Altura de aspiración (m)

Para el caso de la presión atmosférica se utiliza el valor de 101325 Pa. En cuanto a la presión de vapor, Mattox (2010) menciona que a 20 °C el agua presenta una presión de 17,54 Torr. Considerando que 1 Torr= 13,322 Pa, se tiene que a 20 °C la presión de vapor es de 2,34 Pa. Dichas presiones se deben pasar de unidades de Pa a mca, para lo cual se sigue el siguiente procedimiento.

$$H_{vp} = \frac{Pa}{\rho * g} \quad [22]$$

Donde:

Hpv= Presión de vapor (m)

Pa= Presión de vapor (Pa)

$\rho$  = Densidad del fluido ( $1000 \frac{Kg}{m^3}$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9,81 \frac{m}{s^2}$ )

$$H_{vp} = \frac{2,34 Pa}{1000 Kg/m^3 * 9,81 m/s} = 0,238 mca$$

De acuerdo a esto, se calcula el NPSH requerido para la bomba:

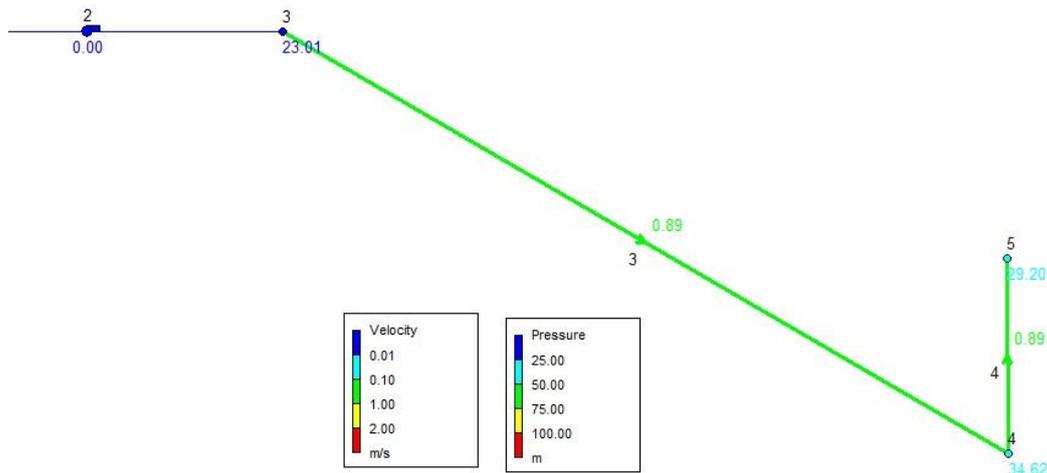
$$NPSHa = \frac{101325 Pa}{9810 N/m^3} - 2 m - 0,031 m - 0,238 m = 8,06 m$$

De acuerdo con esto, la bomba debe tener un NPSH requerido menor a 8,06 m para que esta funcione correctamente y evitar que cavite, sumado a esto debe ser de 0,5 hp.

Posteriormente, se procedió a analizar el impacto de la bomba sobre la tubería encargada de transportar el caudal hacia el tanque de distribución. Para ello, se ingresaron en el software EPANET los datos correspondientes a elevaciones, diámetros y caudal del sistema. Además, se incorporó la curva característica de una bomba centrífuga de 0,5 hp, obtenida a partir de fichas técnicas de proveedores del mercado nacional. Con esta información, se simuló las

condiciones del sistema, obteniendo los valores de presión y velocidad en distintos puntos de la tubería. Esto permitió evaluar el comportamiento hidráulico de la red y definir el tipo de tubería más adecuado, con el fin de evitar problemas como daños en accesorios o fugas por sobrepresión.

En la Figura 33 se presentan los resultados de la simulación en EPANET. En dicha figura se observa que, aguas abajo de la bomba, el sistema presenta velocidades del orden de 0,89 m/s y presiones de 34,62 m y 29,20 m en el punto de entrega, lo cual se indica con etiquetas sobre la tubería.



**Figura 34.** Simulación de sistema de tubería de envío de caudal con bomba centrífuga.

Estas presiones equivalen aproximadamente a 3,5 bar y 2,9 bar, valores comunes en redes de distribución de agua. No obstante, con el fin de evitar afectaciones en el punto de entrega en el tanque de distribución, se recomienda la instalación de una válvula reductora de presión previa al punto de salida. Asimismo, se debe garantizar que la tubería y los accesorios instalados en el sistema soporten al menos 35 m.c.a., siendo preferible un rango de 40 m.c.a. para asegurar un margen de seguridad adecuado. En este sentido, se recomienda el uso de tubería PVC clase PN 6 o PN 10.

#### 4.2.5 Tanques y vertederos

En el siguiente apartado, se presentan las memorias de cálculo de las estructuras establecidas en el apartado 4.2.1 en el cual se plantea la inclusión de dos tanques en el sistema. El primer tanque cumple la función de distribución del efluente del tratamiento primario en cada uno de los humedales artificiales. La columna de agua que se genera en el tanque de distribución genera una red de tubería de distribución presurizada, lo que asegura el movimiento del efluente hasta los humedales artificiales.

El segundo tanque corresponde al tanque de almacenamiento. El tanque de almacenamiento recibe y contiene el agua tratada de cada humedal para su reúso en riego de la franja de tierra del corredor biológico que se encuentra en reforestación. Teniendo en cuenta el flujo del sistema se pasa a definir las dimensiones de cada una de las estructuras establecidas.

Sumado a esto se establece la construcción de vertederos a la salida de cada uno de los humedales con el objetivo de obtener un punto de control del rendimiento del sistema de tratamiento y para medir el caudal.

#### 4.2.5.1 Tanque de distribución

El tanque de distribución debe almacenar un volumen de efluente del tratamiento primario para suplir, por 24 horas, la demanda del sistema de humedales establecido. Como se estimó con anterioridad, se requieren establecer tres humedales artificiales para suplir la demanda hídrica de la zona en reforestación. El caudal tratado que generan los tres humedales es de  $170,54 \text{ m}^3/\text{día}$ . De acuerdo con esto, se establecen las siguientes dimensiones del tanque.

**Tabla 12.**

*Dimensiones para tanque de distribución.*

Parámetros	Valor	Unidades
Altura (h)	5,0	m
Ancho (a)	6,5	m
Largo (l)	6,0	m
Volumen del tanque de distribución	195	$\text{m}^3$

Cabe destacar que la altura del agua en el tanque es de 4,5 m. Considerando esta altura, se obtiene un volumen de líquido de  $175,5 \text{ m}^3$

$$\text{Volumen de agua en tanque de distribución} = h (m) * a (m) * l (m) \quad [23]$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de agua en tanque de distribución (Vtanque)} &= 4,5 \text{ m} * 6,5 \text{ m} * 6 \\ &= 175,5 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que el consumo de los tres humedales es de  $0,00197 \text{ m}^3/\text{s}$  y se tiene en disposición un volumen de  $175,5 \text{ m}^3$ , el cual brindaría una alimentación de 25 h al sistema de humedales artificiales, como se evidencia con la ecuación 24.

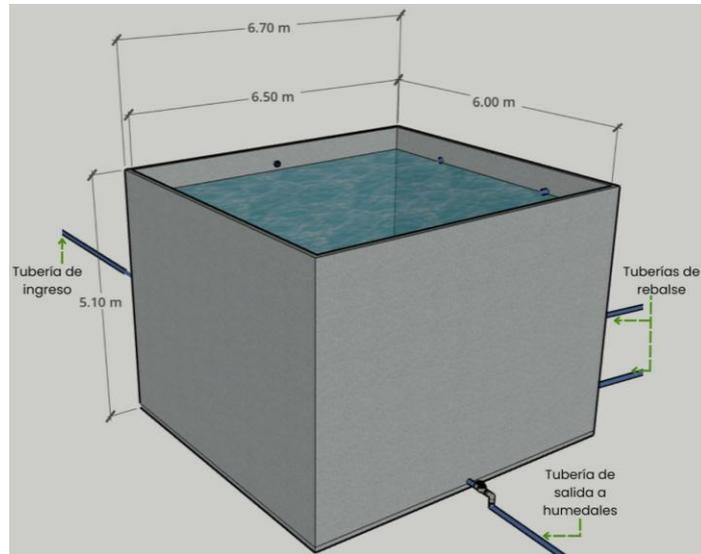
$$\text{Tiempo de alimentación} = \left( \frac{V_{\text{tanque}}}{V_{\text{t humedales}}} \right) / 3600^3 \quad [24]$$

- 1: Volumen total de tanque de distribución  $175,5 \text{ m}^3$
- 2: Caudal de consumo de los tres humedales ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- 3: Factor de conversión  $1\text{h} = 3600 \text{ s}$

$$\text{Tiempo de alimentación} = \left( \frac{175,5 \text{ m}^3}{0,00197 \text{ m}^3/\text{s}} \right) / 3600 \frac{\text{h}}{\text{s}}$$

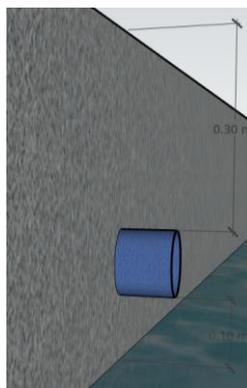
$$\text{Tiempo de alimentación} = 25 \text{ h}$$

Además, este volumen permite presurizar el agua en las tuberías de distribución. Ese detalle se explicará en la siguiente sección.



**Figura 35.** Vista lateral e isométrica del tanque de distribución. Elaboración propia con Sketchup

Es importante tener en cuenta que en la altura del tanque se contempla el diámetro de la tubería de ingreso del efluente desde el tanque de desfogue, un borde libre del tanque y un espacio libre entre la caída de la tubería y el nivel del agua para evitar desbordamientos, como se muestra a continuación.



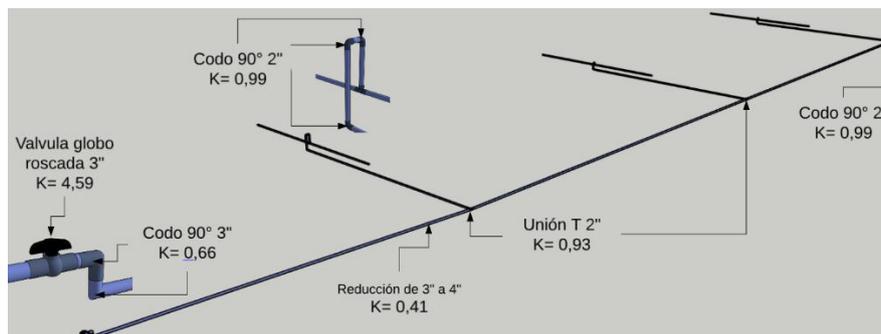
**Figura 36.** Borde libre del tanque. Elaboración propia con Sketchup

Como se muestra en la figura 34, el tanque cuenta con una tubería de alimentación y una tubería de salida para alimentación de los humedales. También cuenta con tuberías de rebalse justo en el límite de la altura deseada en el tanque de 4,5 m. Cabe destacar que cada una de las tuberías poseen el mismo diámetro de 4". Las tuberías de rebalse se colocan por seguridad, en caso de una sobrecarga del tanque de distribución, y el agua se desfoga en el río Torres.

Diseñado el tanque de distribución, se pasa al diseño de la tubería de distribución del efluente

primario. Esta tubería conecta el tanque de distribución con cada uno de los tres humedales. Para el diseño, se utilizó el software Epanet. En Epanet se ingresan los diámetros de la tubería y caudales, así como las pérdidas por accesorios en cada uno de los puntos, y por medio del método de Darcy-Weibach se evaluaron las presiones y velocidades obtenidas en el sistema. Cabe destacar que en este punto la altura de la columna de agua que posee el tanque de distribución juega un papel importante para presurizar la tubería y trasladar el agua del tanque a cada uno de los humedales.

Con el fin de obtener las pérdidas por accesorios se realizó un conteo de válvulas, reducciones, uniones T y codos, sobre el diseño de tubería planeado. En la figura 36 se presenta un dibujo 3D isométrico con los diferentes accesorios y diámetros que forman parte de la tubería de distribución.



**Figura 37.** Isométrico de tubería de distribución de tanque a humedales, con accesorios y sus coeficientes de pérdidas. Elaboración propia con Sketchup

Cada uno de los coeficientes de pérdidas se obtuvieron del Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. Los coeficientes de pérdidas del tanque de distribución a cada uno de los humedales se resumen en la tabla 13:

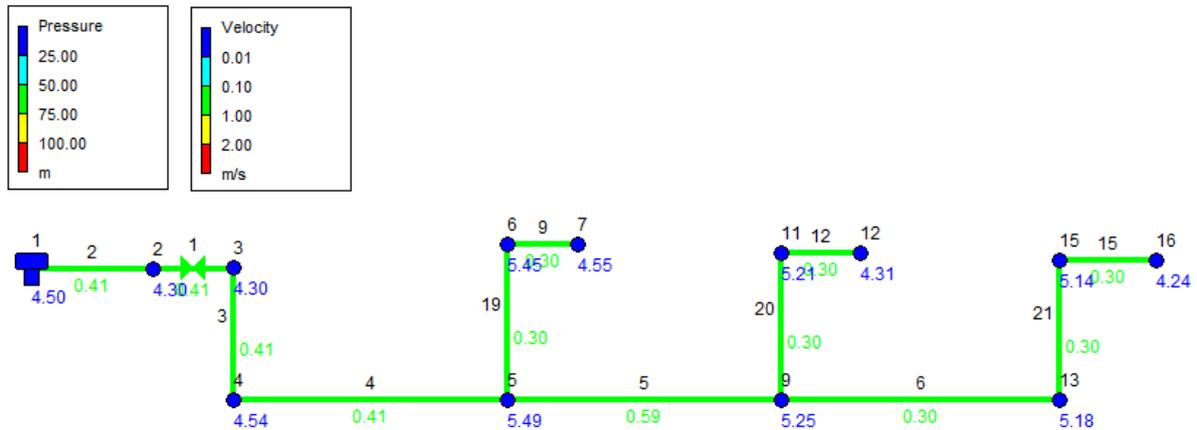
**Tabla 13.**

*Coefficientes de pérdidas menores por accesorios en tubería para distribución de agua en humedales artificiales (CFIA, 2017).*

Tramo	Accesorio	Cantidad	Coefficiente de pérdida unitario	Coefficiente de pérdida total	Coefficiente de pérdida total por tramo
Tanque de distribución-Humedales	Válvula globo roscada 4"	1	4,59	4,59	21,78
	Codo 90° 4"	2	0,66	1,32	
	Unión T 4"	2	0,93	1,86	
	Codo 90° 2"	13	0,99	12,87	
	Reducción de 4" a 2"	3	0,38	1,14	

Estos valores se ingresan en el software Epanet en conjunto con las longitudes de las tuberías,

utilizando un coeficiente de fricción para PVC de 0,0015. En la figura 38 se muestran los resultados de la simulación.



**Figura 38.** Modelo hidráulico obtenido en Epanet para la tubería de distribución de tanque a humedales.

En la figura 37 se muestra el modelo hidráulico obtenido en Epanet. Los valores en color azul corresponden a la presión (mca) en cada uno de los nodos de estudio. Los valores en color verde y amarillo, a lo largo de la tubería, hacen referencia a la velocidad (m/s) obtenida en dicho tramo. El modelo demuestra que la presión en cada uno de los puntos es positiva, evidenciando que la altura de la columna de agua en el tanque de distribución de 4,5 m es suficiente para trasladar el agua a cada uno de los tres humedales propuestos a implementar en el sistema de tratamiento, presentando velocidades de entre 0,30 m/s y 0,40 m/s. En la figura 38 se muestra el plano del tanque de distribución.

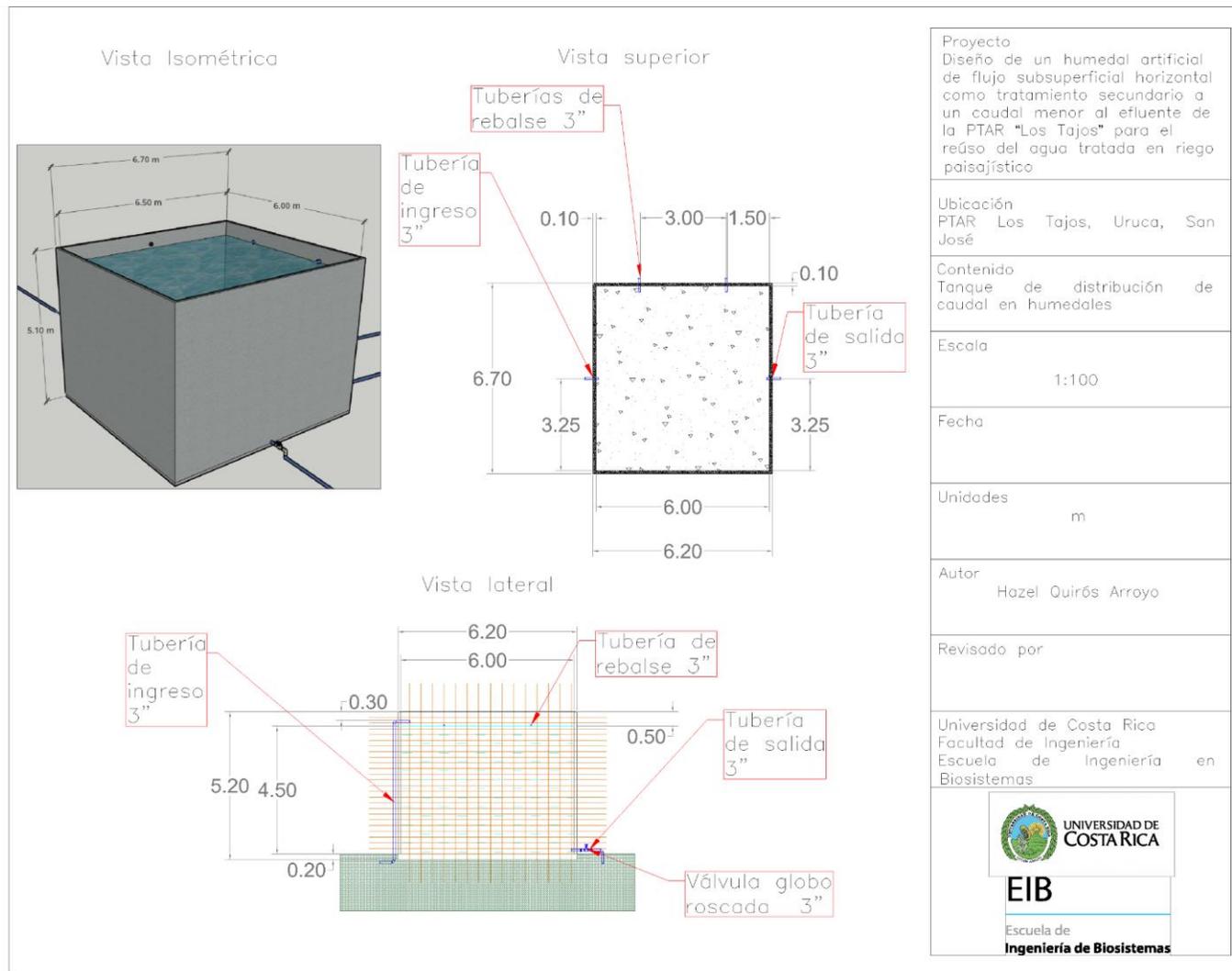


Figura 39. Planos de tanque de distribución.

#### 4.2.5.2 Vertederos

En el siguiente apartado se presenta el dimensionamiento de los vertederos mencionados en la sección 4.2.1, en donde se plantea la colocación de estas estructuras a la salida de cada humedal artificial. Como ya se mencionó anteriormente, el vertedor corresponde a una estructura para controlar el rendimiento, punto de muestreo y medidor de caudal de agua tratada. La estructura no corresponde a una unidad de reducción de contaminantes, pero juega un punto clave dentro del sistema.

Se plantea implementar un vertedor de cresta delgada con forma triangular. El vertedor es de cresta delgada debido a que es el tipo recomendado para caudales menores a 30 L/s. Además, la influencia de la altura del umbral y la velocidad del caudal es reducida. Para el dimensionamiento del vertedero se tiene los siguientes parámetros de entrada:

$$Q: 0,66 \frac{L}{s} = 0,000457 \frac{m^3}{s}$$

$$\theta: 15^\circ$$

$$\mu: 0,64$$

El caudal Q, corresponde al máximo que puede tratar cada humedal artificial. Theta ( $\theta: 15^\circ$ ) corresponde al ángulo de apertura seleccionado, ideal para caudales bajos de ingreso. El coeficiente de descarga  $\mu$  se establece de acuerdo con Nengoue et al, (2015), el cual menciona los valores de acuerdo al ángulo establecido, ver la figura 39.

ANGULO ( $2\alpha$ )	15°	30°	45°	60°	90°	120°
H>	0.25	0.205	0.185	0.17	0.14	0.12
<i>m</i>	0.343	0.33	0.325	0.32	0.313	0.322
$C_D$	0.643	0.619	0.609	0.6	0.587	0.604
<i>K</i>	0.2	0.392	0.596	0.818	1.386	2.471

**Figura 40.** Coeficiente de descarga en vertederos triangulares de acuerdo al ángulo de apertura (Nengoue et al, 2015).

Para el dimensionamiento del vertedero se siguió el procedimiento mencionado por Nengoue et al (2015). Con los parámetros de caudal, theta y mu, establecidos anteriormente, se pasó a obtener la carga hidráulica máxima del vertedor, utilizando la ecuación 23.

$$H = \left( \frac{Q}{\frac{8}{15} * \mu * \sqrt{2g} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right)^{\frac{2}{5}} \quad [23]$$

$$H = \left( \frac{0,000457}{\frac{8}{15} * 0,64 * \sqrt{2 * 9,81 * \tan\left(\frac{15}{2}\right)}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

$$H = 0,088 \text{ m} \approx 0,1 \text{ m}$$

La carga hidráulica máxima del vertedor es de 0,088 m, es decir, 8,8 cm, este valor se redondea a 0,1 m. Seguidamente, se pasa a definir cada una de las dimensiones del vertedor, para esto se siguen las recomendaciones de USBR (1978):

1. Para el caso del canal de aproximación antes del vertedor o bien de L aprox: se recomienda una distancia de 10 veces la carga hidráulica (10H).
2. Profundidad debajo de la cresta: esta profundidad se puede establecer como 2 veces la carga hidráulica (2H).
3. Nivel del agua para la medición del caudal: en este caso se recomienda una distancia de 4 veces la carga hidráulica antes del vertedor (4H).
4. La contracción de la pared del canal: se recomienda dos veces el valor de la carga hidráulica (2H).
5. El ancho mínimo del canal: se establece como 4H + ancho de abertura
6. Caída libre (F) desde la cresta del vertedor: debe ser de mínimo 15 cm
7. Longitud del canal después de la caída del vertedor (L): debe tener en consideración la caída libre y carga hidráulica (3H + 2F).
8. Altura de la cresta se establece de 0,45 m por facilidad de construcción

De acuerdo con las recomendaciones anteriores, se realiza algunos de los cálculos:

Canal de aproximación (L aprox):

$$L \text{ aprox} = 10 * H = 10 * 0,1 \text{ m} = 1 \text{ m} \quad [24]$$

Profundidad de la cresta:

$$Prof = 0,1 \text{ m} * 2 = 0,2 \text{ m} \quad [25]$$

Nivel del agua para la medición del canal

$$N = 4 * 0,1 \text{ m} = 0,4 \text{ m} \quad [26]$$

Longitud del canal después de la caída del vertedero (L):

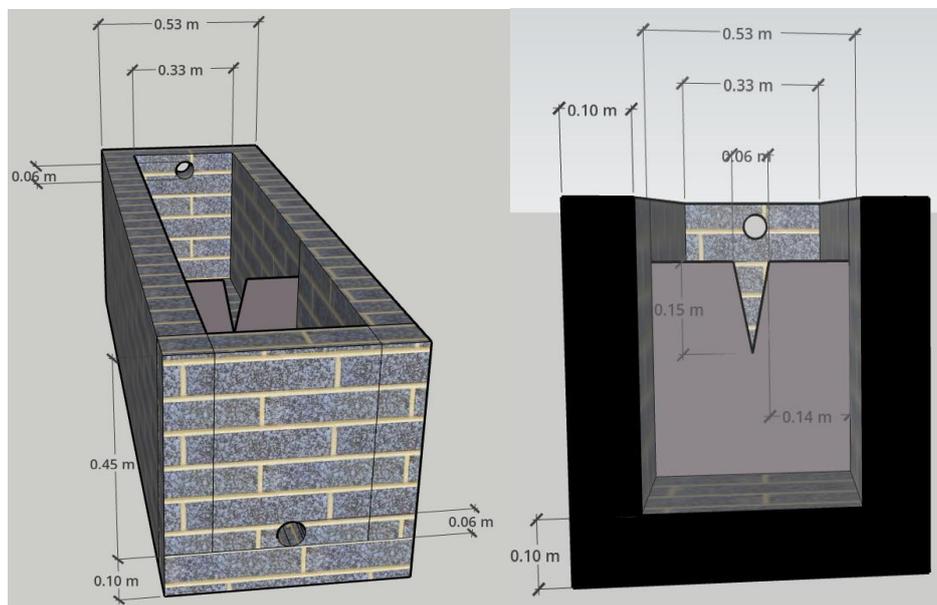
$$H = 3 * F + 2 * F = 3 * 0,1 + 2 * 0,15 = 0,6 \text{ m} \quad [27]$$

En la tabla 14 se muestran las dimensiones obtenidas para el diseño del vertedero. El diseño del vertedero se muestra en la figura 40.

**Tabla 14.**

*Dimensiones del vertedor triangular de cresta delgada.*

Parámetros	Valor (m)
Carga hidráulica del vertedor	0,1
Altura total del vertedor	0,15
Longitud del canal de aproximación $L_{aprox}$	1,0
Profundidad debajo de la cresta	0,2
Caída libre $F$	0,15
L canal después del vertedor $L$	0,6
Longitud del canal de aproximación $L_{aprox}$	1,0



**Figura 41.** Diseño de vertedero propuesto. Elaboración propia con Sketchup.

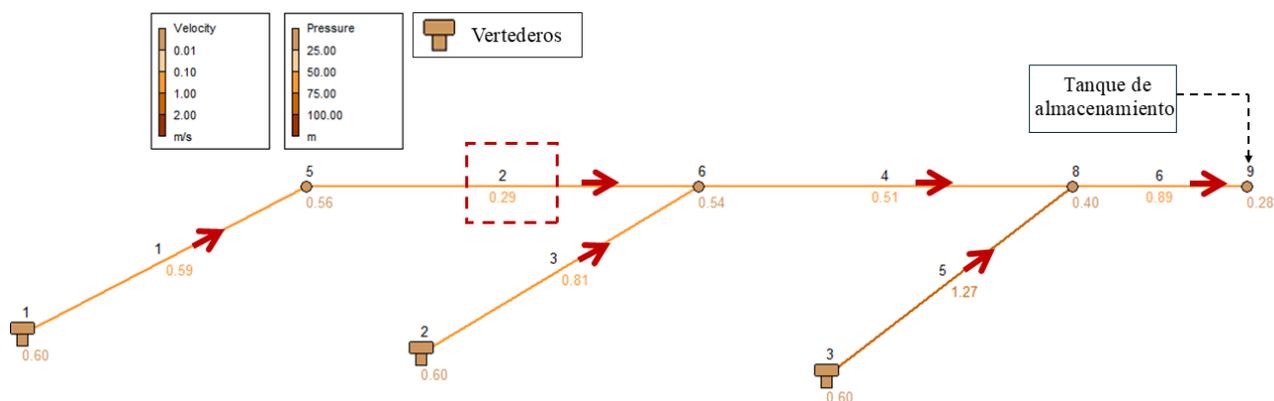
Ahora, se diseña el sistema de tubería para la recolección del agua a la salida de cada humedal artificial (desde el vertedero) hasta el tanque de almacenamiento. Nuevamente, con Epanet se diseña la conducción entre cada humedal artificial y el tanque de almacenamiento. En Epanet, se ingresan todas las alturas y diámetros de las tuberías de conducción de agua, las pérdidas producto de los accesorios. En la tabla 15 se muestra el conteo de accesorios y el coeficiente de pérdida correspondiente.

**Tabla 15.**

*Coefficientes de pérdidas menores por accesorios en tubería para recolección del agua a la salida de los humedales y su depósito en tanque de almacenamiento (CFIA, 2017).*

Tramo	Accesorio	Cantidad	Coefficiente de pérdida unitario	Coefficiente de pérdida total	Coefficiente de pérdida total por tramo
Humedal-Tanque de almacenamiento	Codo de 90" 2"	4	0,99	3,96	5,82
	Unión T 2"	2	0,93	1,86	

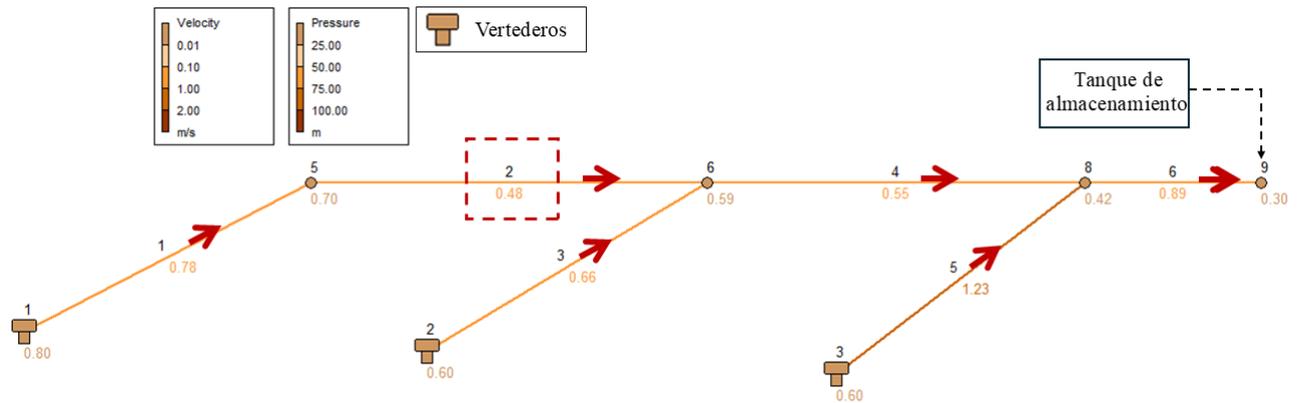
En el sistema se ingresa la altura de salida del vertedero y se plantea utilizar tubería pvc 2", dotando a la tubería de pendiente para movilizar el agua por gravedad, gracias a la diferencia de altura entre la salida de cada humedal artificial y el tanque de almacenamiento. En la figura 41 se presenta la simulación obtenida con el Software.



**Figura 42.** Modelo hidráulico obtenido en Epanet para la tubería de distribución de vertedero a tanque de almacenamiento.

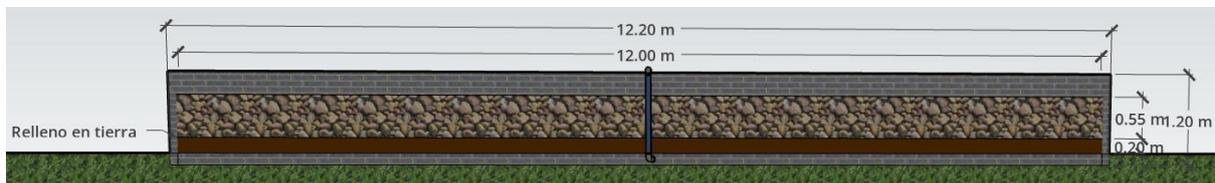
Como se muestra en la figura 41, los valores en los nodos corresponden a la presión (mca) en dicho punto y los valores a lo largo de las líneas (la tubería) corresponden a la velocidad (m/s) que posee el fluido en esa sección de tubería.

Como se muestra en la figura 41, al mantener iguales las elevaciones de cada uno de los vertederos se obtiene en la tubería número dos (señalada con el cuadro con línea discontinua rojo) una velocidad muy baja de 0,29 m/s, lo cual no es apto para el sistema. De acuerdo con esto, se toma la decisión de dar más altura al vertedero número uno. Se plantea aumentar la altura 70 cm para obtener en el sistema velocidades aceptables, así como presiones positivas, al elevar esta estructura se obtiene la siguiente simulación (figura 42).

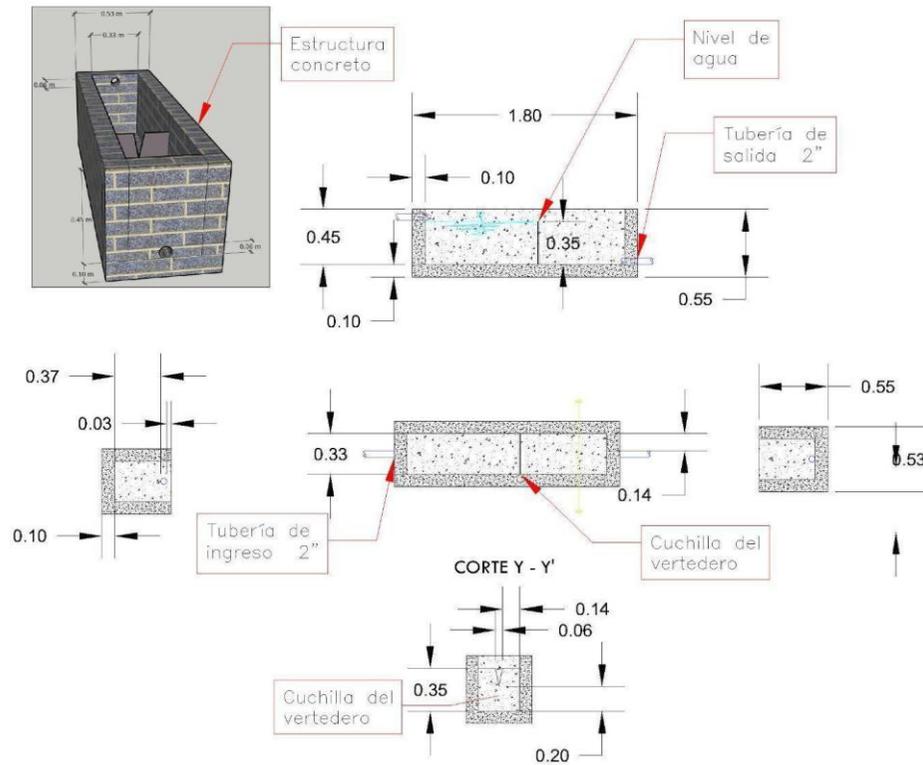


**Figura 43.** Modelo hidráulico obtenido en Epanet para la tubería de distribución de vertedero a tanque de almacenamiento, con variación de altura.

Como se evidencia en la figura 42, al aumentar la elevación de la estructura del vertedor del humedal artificial 1, se logró aumentar también la velocidad de la tubería número dos (encerrada en el cuadro rojo). De acuerdo con este cambio, se debe modificar la altura del primer humedal artificial y su vertedero correspondiente. Como se muestra en la figura 43 para el humedal artificial se plantea colocar una estructura de concreto de 1,20 m. De 1,20 m, de abajo para arriba, 0,15 m se comportan como anclaje al terreno. Para dar altura al humedal artificial, se plantea rellenar 0,20 m de este con tierra. En este punto, colocar la geomembrana para impermeabilizar el suelo. Sobre la geomembrana, se coloca el medio filtrante del humedal artificial, con una profundidad de 0,55 m. Finalmente, se adicionan 0,30 m de borde libre en caso de un mal funcionamiento en el cual se presenten rebalses en la lámina de agua del sistema, en la figura 44 se muestra el plano de la estructura.



**Figura 44.** Vista frontal de la primera unidad de humedal artificial. Elaboración propia con Sketchup



<p>Proyecto Diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal como tratamiento secundario a un caudal menor al efluente de la PTAR "Los Tajos" para el reúso del agua tratada en riego paisajístico</p>
<p>Ubicación PTAR Los Tajos, Uruca, San José</p>
<p>Contenido Vertedero para medición de caudal a la salida de cada humedal</p>
<p>Escala 1:25</p>
<p>Fecha</p>
<p>Unidades m</p>
<p>Autor Hazel Quirós Arroyo</p>
<p>Revisado por</p>
<p>Universidad de Costa Rica Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería en Biosistemas</p>
 <p>UNIVERSIDAD DE COSTA RICA</p> <p><b>EIB</b></p> <p>Escuela de Ingeniería de Biosistemas</p>

*Figura 45. Planos del vertedero.*

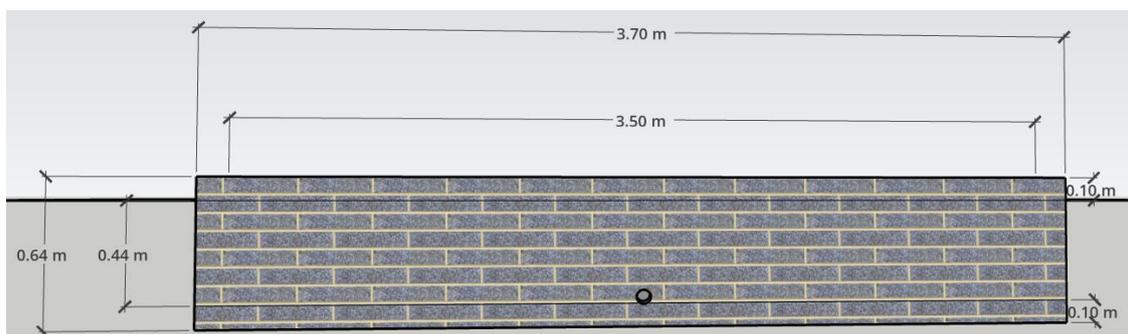
#### 4.2.5.3 Tanque de almacenamiento

En el siguiente apartado se presentan los cálculos correspondientes al dimensionamiento del tanque de almacenamiento de agua tratada. Las dimensiones del tanque se presentan en la tabla 15. La altura del nivel del agua hace referencia a la columna de agua que se puede acumular en el tanque. Como se menciona en la tabla 16 existe una altura de la estructura del tanque y una altura del nivel de agua, esto debido a la altura que posee la tubería de alimentación de agua en el tanque de almacenamiento, ya que esta posee una pendiente. Con la altura del nivel de agua y demás dimensiones se obtiene un volumen de agua de  $1,54 m^3$ , lo cual es  $1540 \frac{L}{día}$  disponible para su recolección y redistribución en caso de ser necesario. En la figura 45 se presenta una vista frontal del tanque de almacenamiento.

**Tabla 16.**

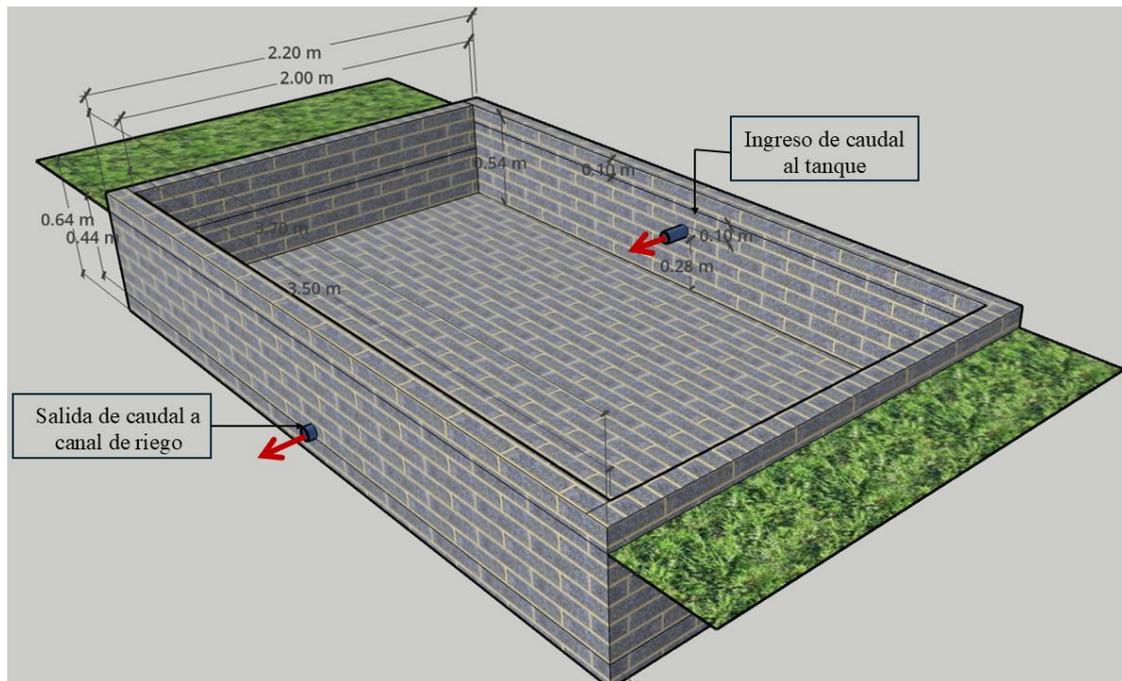
*Dimensiones del tanque de almacenamiento de agua residual posterior al tratamiento.*

Dimensión	Valor	Unidades
Altura del tanque	0,64	m
Altura del nivel de agua	0,22	m
Ancho	2	m
Largo	3,5	m



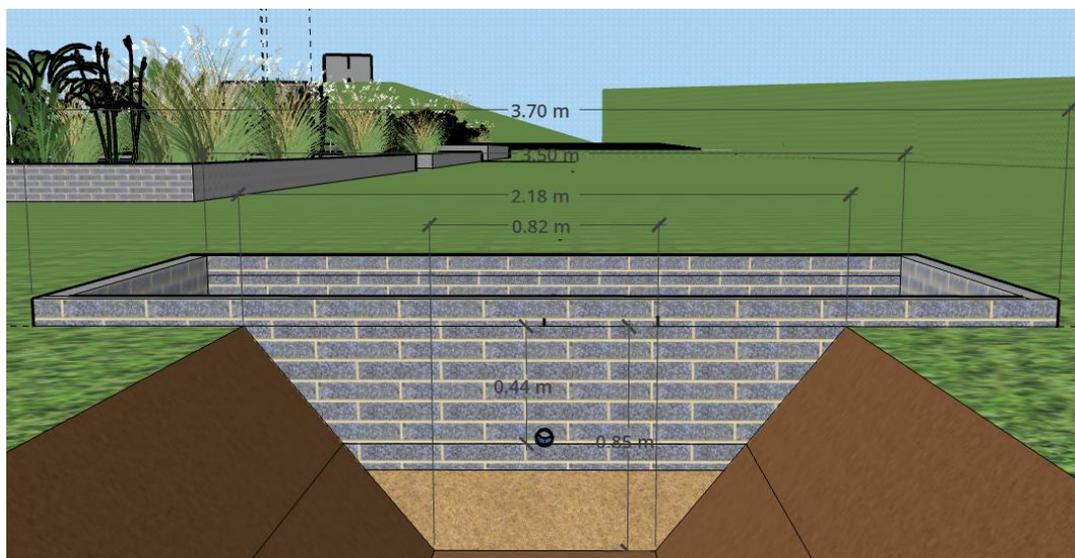
**Figura 46.** Vista frontal del tanque de almacenamiento. Elaboración propia con Sketchup

La tubería de alimentación, que conduce el agua tratada de los tres humedales hasta el tanque de almacenamiento, se encuentra a 0,10 m bajo el nivel superficial del terreno. Sumado a esto, se decide que el tanque posea un borde de 0,10 cm por encima del terreno, con el fin de evitar que ingrese agua producto de la escorrentía en temporada de invierno y evitar de esta forma un rebalse del tanque. En la figura 46 se presenta una vista isométrica de la estructura.



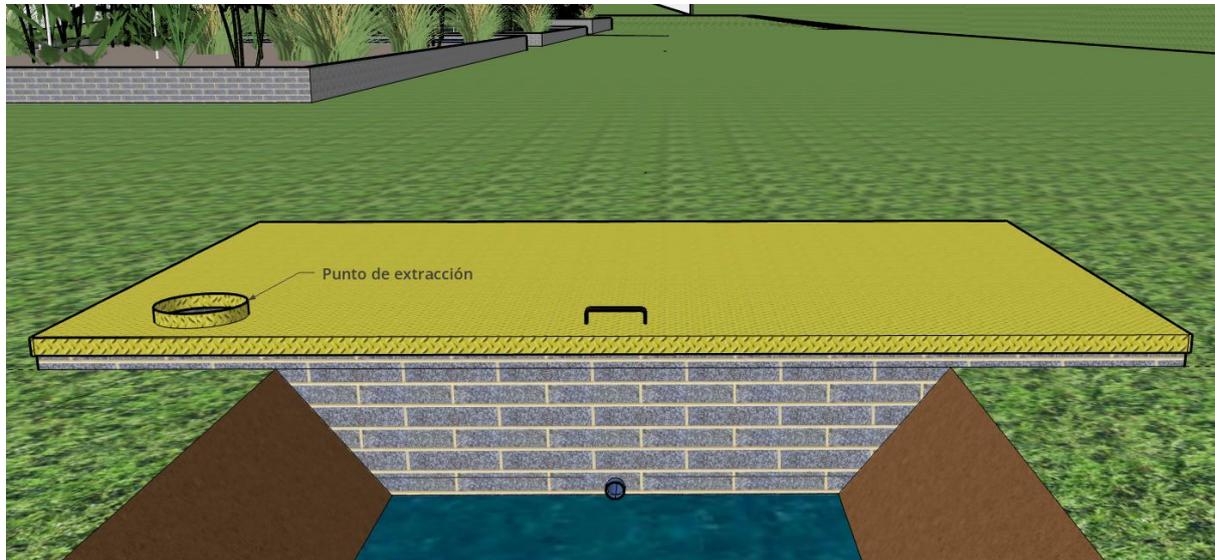
**Figura 47.** Vista isométrica del tanque de almacenamiento propuesto. Elaboración propia con Sketchup.

Como se muestra en la figura 46, por debajo de la tubería de alimentación del tanque al fondo de este, se presenta una altura de 0,28 m. Se plantea dejar una caída de 6 cm por debajo de la tubería de ingreso del caudal al tanque, de esta forma se establece que el nivel máximo de agua debe ser de 0,22 m. De acuerdo con esto, la tubería de salida del tanque se decide colocar en el fondo del mismo y de esa forma lograr acumular los 0,22 mca de columna de agua.



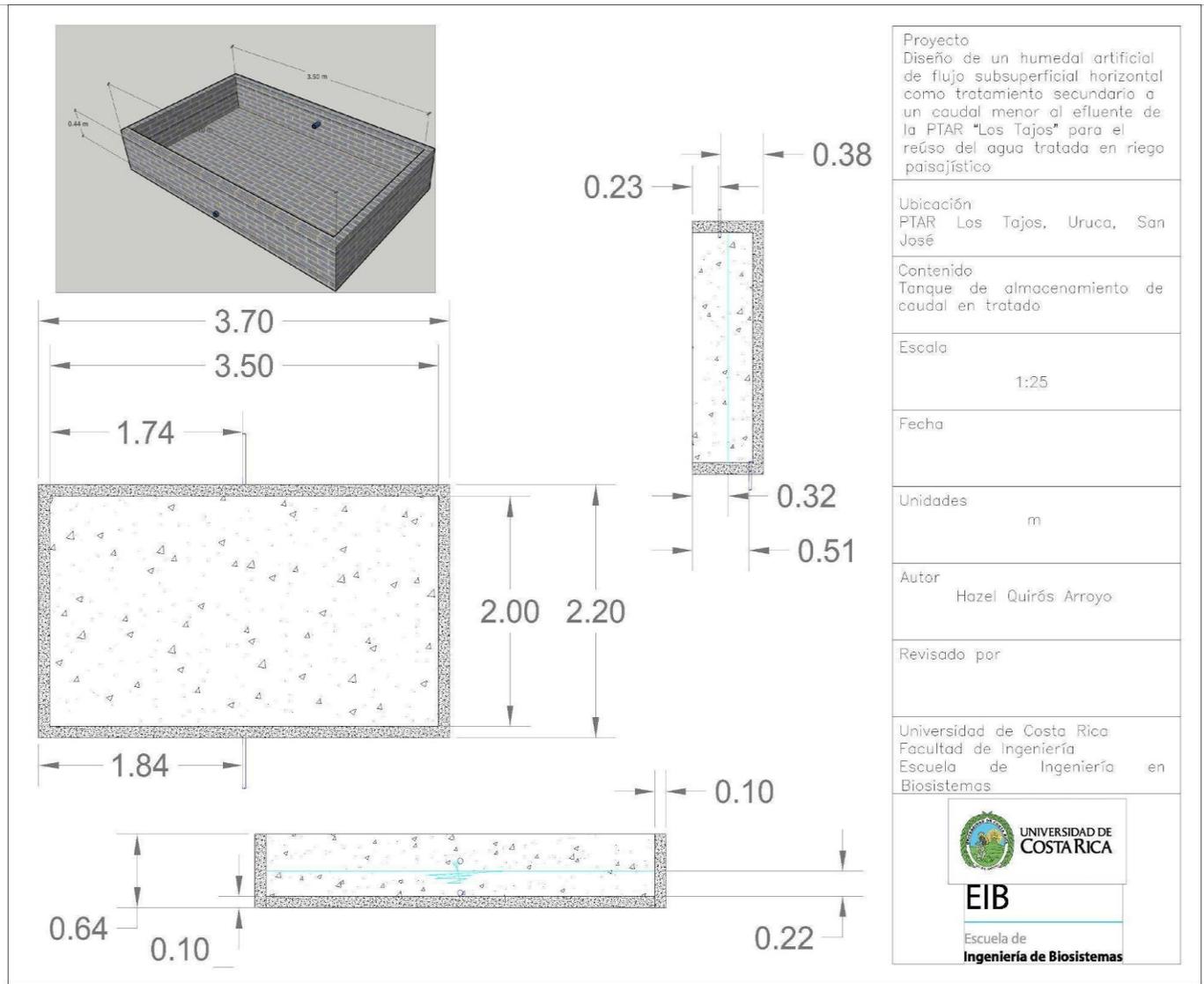
**Figura 48.** Vista lateral del tanque de almacenamiento, tubería de salida de agua hacia zona de riego. Elaboración propia con Sketchup.

Como se muestra en la figura 47, la tubería de salida del tanque de almacenamiento se encuentra 0,44 m por debajo del nivel superficial. Es importante mencionar que el tanque de almacenamiento debe poseer una tapa de metal. Esta tapa es importante por razones de seguridad ocupacional.



**Figura 49.** Diseño de tanque de almacenamiento propuesto con tapa y punto de succión.  
Elaboración propia con Sketchup.

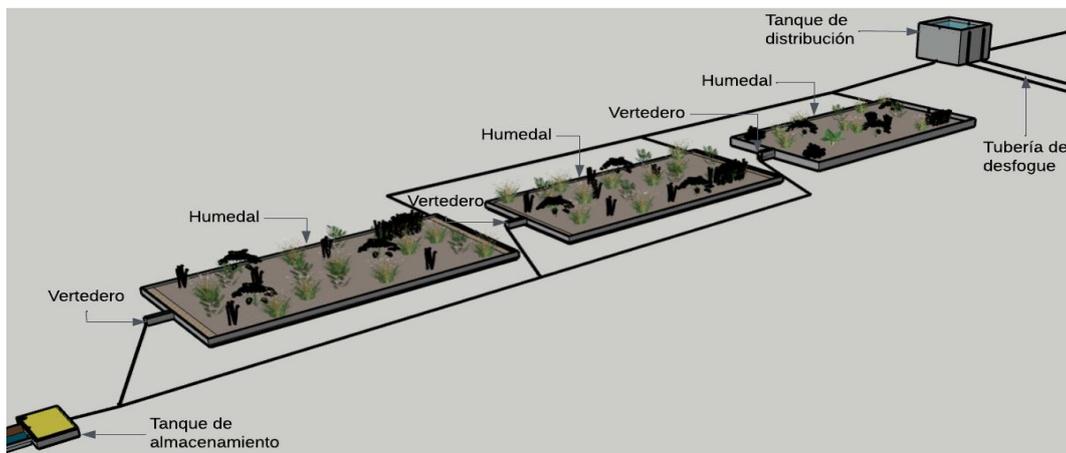
En la figura 48 se muestra la tapa a colocar sobre el tanque de almacenamiento. A petición de los funcionarios de la PTAR, a la tapa del tanque de almacenamiento se le deja un punto de toma de agua. Por el punto de toma puede ingresar una manguera al tanque y succionar con una bomba en caso de querer utilizar el agua como medida de contención contra los frecuentes incendios que experimenta la planta en sus alrededores. En la figura 49 se presenta el plano de la estructura del tanque de almacenamiento.



**Figura 50.** Planos del tanque de almacenamiento

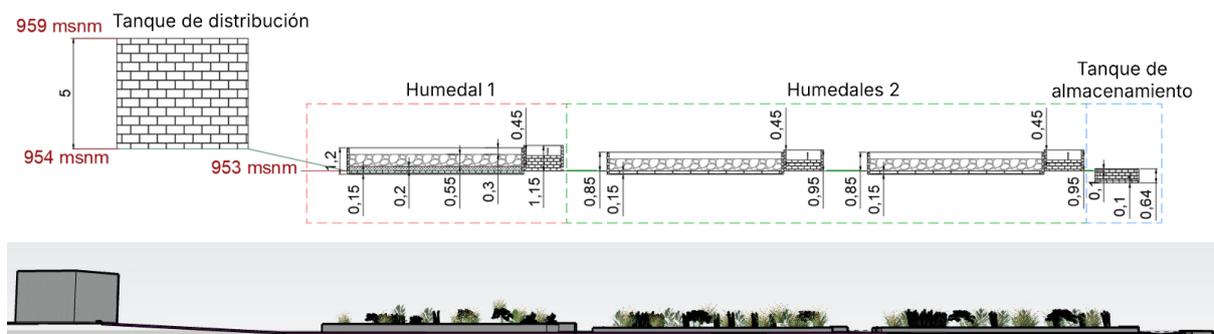
#### 4.2.6 Tren de tratamiento

En este apartado se muestra el diseño final, con las elevaciones correspondientes a cada punto. En la figura 50 se presenta una vista isométrica del diseño establecido. En la figura 51 se especifican las alturas de cada uno de los puntos, desde el tanque de distribución, pasando por los humedales artificiales, hasta el tanque de almacenamiento final. Como se evidencia, el tanque de distribución está a mayor altura, lo cual permite distribuir el agua hacia los humedales artificiales por gravedad. A la salida de cada vertedero, se dirige el agua al tanque de almacenamiento y se decide elevar más el vertedor uno, junto con el primer humedal, con el fin de presurizar la tubería y enviar por gravedad el caudal al punto de almacenamiento, obteniendo velocidades y presiones que aseguren su correcto funcionamiento.



**Figura 51.** Diseño 3D del tren de tratamiento propuesto. Elaboración propia con Sketchup.

Es importante mencionar que el diseño planteado posee como prioridad obtener un sistema de riego por gravedad, con el objetivo de que este se mezcle con en la zona de reforestación, permitiendo obtener una intervención más armoniosa con el entorno. Sumado a esto corresponde a un sistema de fácil implementación y progresiva, el cual se va adaptando al terreno y favorece un diseño paisajístico, que armoniza con el ecosistema, lo cual para la institución del AyA era de suma importancias. Asimismo, su simplicidad operativa evita la necesidad de contar con mantenimiento especializado.



**Figura 52.** Vista de perfil de diseño sugerido en 2D y 3D. Elaboración propia con Sketchup y AutoCAD.

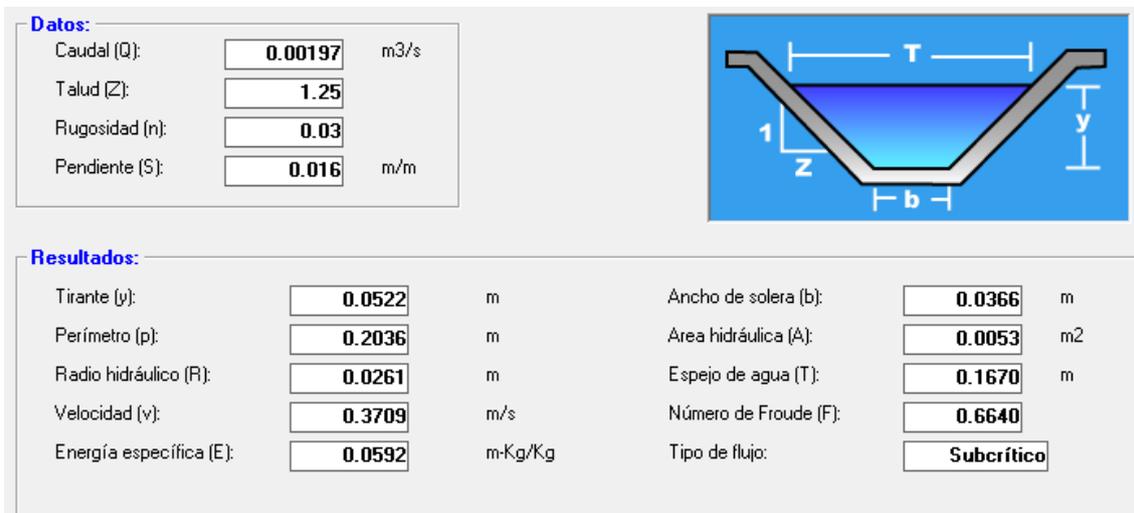
#### 4.2.7 Sistema de riego

Para el diseño del sistema de riego, se ha optado por distribuir, en la zona en reforestación, el agua tratada a través de canales de riego. En primera instancia se planean canales de riego por gravedad, priorizando un diseño paisajístico, de forma que se asegure una integración armoniosa con el entorno natural. La capacidad de los canales de riego se define de acuerdo al efluente obtenido del tratamiento de los humedales artificiales, el cual es captado en el tanque de almacenamiento. El diseño de la sección transversal de los canales se realiza utilizando el programa Hcanales.

En primera instancia se plantea la construcción de un canal de riego principal que atraviesa toda la zona de reforestación. En Hcanales se establecen las dimensiones del perfil del canal trapezoidal, ingresando los siguientes datos:

Q:  $0,00197 \frac{m^3}{s}$   
 Talud Z: 1,25  
 Rugosidad (n): 0,03  
 Pendiente (S):  $0,016 \frac{m}{m}$

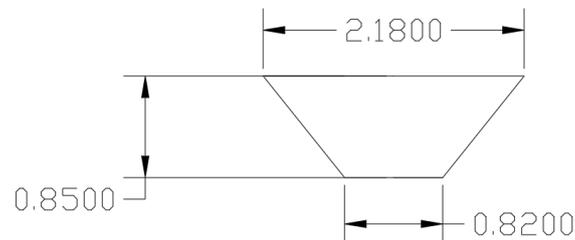
El caudal (Q) de ingreso del canal de riego corresponde generado por el sistema de los tres humedales establecidos (suma de caudales de los tres humedales de  $170,54 \text{ m}^3/\text{día}$ ). La rugosidad se establece teniendo en cuenta que el canal es sin ningún tipo de revestimiento. La pendiente del canal se definió a partir de aquella que permitiera obtener un flujo subcrítico, para así evitar la erosión del canal. Al ingresar estos valores en el software se obtiene un canal con un tirante de 0,0522 m, un espejo de agua de 0,167 m y un ancho de solera de 0,037 m, como se muestra en la figura 52.



**Figura 53.** Parámetro de diseño del canal provincial de riego de la zona en reforestación. Elaboración propia con software Hcanales.

Se ajustan las dimensiones del canal, ya que como se mencionó anteriormente, la tubería de salida del tanque de almacenamiento se encuentra 0,44 m por debajo del nivel superficial, por lo cual la profundidad de 0,052 m propuesta (tirante y) por el programa de Hcanales no es funcional. Para esto se modifica la profundidad del canal con el objetivo de obtener la

profundidad adecuada para el vertido del canal por parte del tanque de almacenamiento, esto manteniendo el talud establecido de 1,25 y la relación entre cada una de las dimensiones del trapezoidal, estableciendo una profundidad del canal de 0,85 m, obteniendo de esta forma una zona inundada con una profundidad 0,40 m. A partir de estas dimensiones se establece modificar el perfil del canal a las siguientes dimensiones del perfil trapezoidal, como se muestra en la figura 53.



**Figura 54.** Dimensiones del perfil del canal trapezoidal nuevo propuesto. Unidades en m.

Se recomienda rellenar el canal principal con piedras con el fin de que este no represente un riesgo para los funcionarios y evitar que el agua no se encuentre expuesta al ambiente. Se plantea utilizar piedra bola, de acuerdo con esto se pasa a calcular el nuevo tirante obtenido en el canal. Para el cálculo de este tirante se tiene en cuenta las dimensiones del nuevo perfil establecido y la porosidad de la piedra a colocar ( $\theta = 126 \text{ mm}$ ) mostrada en la tabla 1, para esto se utiliza la ecuación de Darcy. Para realizar el cálculo de manera más efectiva se utilizó el software RStudio, como se muestra en la figura 54:

```
# === PARTE 1: CÁLCULO DEL TIRANTE CON DARCY ===
# Parámetros del canal y flujo
Q <- 0.00197      # Caudal objetivo en m³/s
b <- 0.82         # Ancho del fondo del canal (m)
z <- 1.25        # Talud H:V
i <- 0.016       # Pendiente hidráulica (m/m)
K <- 1.157      # Conductividad hidráulica (m/s) para roca de cuarzo

# Función de Darcy (sin ajustar área por porosidad)
darcy_equation <- function(h) {
  A <- (b + z * h) * h
  Q_calc <- K * A * i
  return(Q_calc - Q)
}

# Verificamos signos en el intervalo
cat("f(0.001) =", darcy_equation(0.001), "\n")
cat("f(5)      =", darcy_equation(5), "\n")

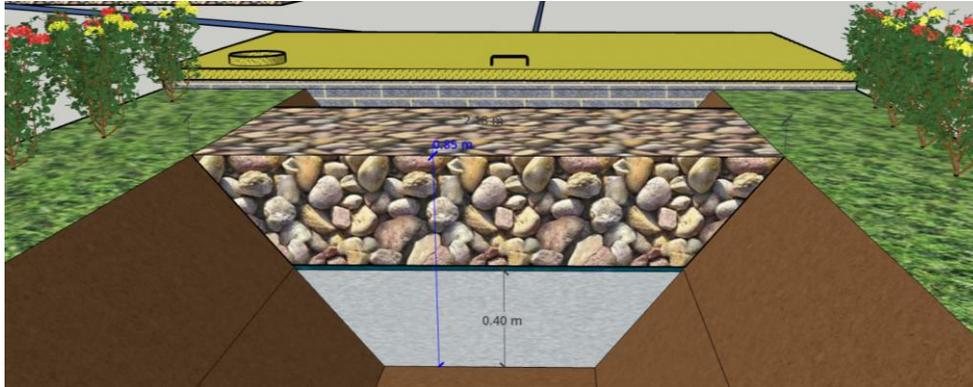
# Solución numérica del tirante
if (darcy_equation(0.001) * darcy_equation(5) < 0) {
  h_solution <- uniroot(darcy_equation, c(0.001, 5))$root
  cat("\n✅ Tirante estimado con Darcy:", round(h_solution, 4), "m\n")
} else {
  cat("\n⚠️ No se puede resolver: no hay cambio de signo en el intervalo.\n")
}

f(0.001) = -0.001954797
f(5)      = 0.6524292

✅ Tirante estimado con Darcy: 0.111 m
```

**Figura 55.** Hoja de cálculo del nuevo tirante utilizando el software RStudio.

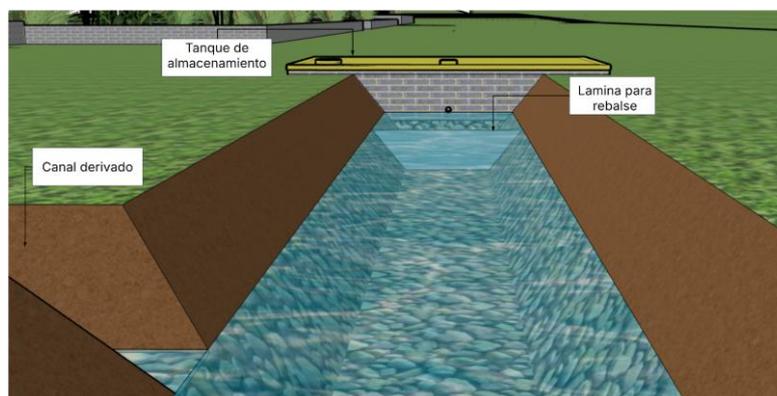
El valor del nuevo tirante obtenido con el nuevo perfil del canal trapezoidal es de 0,111 m, el cual es muy bajo. De acuerdo con esto, se propone colocar estructuras que aseguren una elevación del tirante de agua dentro del canal con el fin de que esta se encuentre accesible a las raíces de los árboles, como la que se muestra en la figura 55:



**Figura 56.** Corte del canal principal de riego. Elaboración propia con Sketchup.

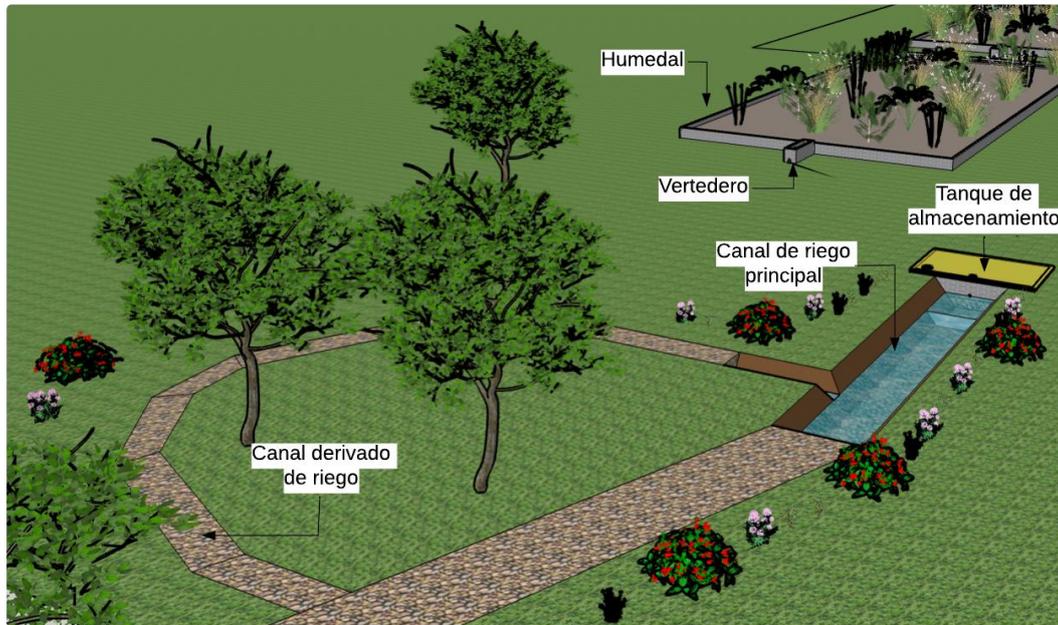
La estructura gris, con una altura de 0.40 m mostrada en la figura anterior, asegura que el agua de riego, al saturar la tierra, alcance dicho nivel. Esta se encuentra a 45 cm de profundidad respecto al nivel del terreno, lo que permite que, durante las primeras etapas de desarrollo de los árboles sembrados, el agua esté disponible a una profundidad más accesible para sus raíces. En el estudio de Brambila, M menciona que las raíces alcanzan profundidades de entre 20 cm y 60 cm, por otro lado, Callejas-Rodríguez et al (2012) menciona que generalmente en los primeros 20 cm de profundidad se presenta una alta densidad de raíces y que esto podría estar relacionado con que en este estrato se presente un mayor contenido de materia orgánica. Por otro lado, según Sillick et al (2013), en etapas más avanzadas las raíces de los árboles logran alcanzar una profundidad máxima de 60 cm.

La estructura para colocar para elevar la lámina de agua del canal debe ser un material que no se oxide, esta puede ser de policarbonato con un espesor considerable con el fin de obtener una estructura rígida. Sumado a esto, se recomienda crear canales pequeños derivados del canal principal con el fin de distribuir mejor el agua en la zona a regar, como se muestran en la figura 56.



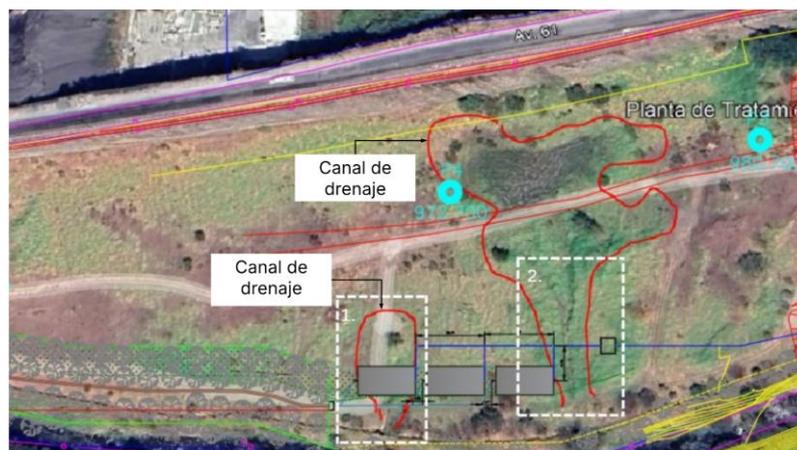
**Figura 57.** Vista de canal principal con derivación y lámina para rebalse. Elaboración propia con Sketchup.

Sumado a lo anterior se plantea colocar una cerca viva alrededor del canal, con el fin de limitar el paso personas y evitar que se camine sobre el mismo, se plantea que está cerca viva sea con plantas que atraen a polinizadores, permitiendo sumar al ambiente, creando puntos de polinización, como se representa en la figura 57:



**Figura 58.** Canal derivado. Elaboración propia con Sketchup.

Es importante mencionar que el presente corresponde a una recomendación sobre el diseño del sistema de riego, pero el mismo debe especificarse y ampliarse más. Por último, en cuanto a todo el diseño propuesto, es relevante tener en cuenta que en la PTAR cuentan con puntos más bajos, en donde se generan estancamientos de agua, y la institución cuenta con canales de drenaje para esas zonas hacia el Río Torres, los cuales se muestran en la figura 58.



**Figura 59.** Drenajes de PTAR para zonas de inundación

Como se muestra en la figura 58, las curvas rojas corresponden a los drenajes que posee la PTAR en el terreno. Como se evidencia, el drenaje número uno atraviesa el tercer humedal y el drenaje número dos, atraviesa la tubería de distribución. En cuanto al primer drenaje se recomienda un redireccionamiento de este y para el caso del segundo drenaje se pueden unificar

los dos canales y colocar una alcantarilla de paso. Para que la tubería de alimentación de los humedales pase en la parte superior y el drenaje de la zona, continúe por la alcantarilla.

#### 4.2.8 Principales costos del sistema de tratamiento

En el siguiente apartado se presenta un aproximado de los costos de construcción e implementación del diseño del sistema propuesto para un tratamiento secundario del agua residual con el objetivo de su reúso en riego de la zona en reforestación. Para estimar los costos del trabajo se realizó un conteo de los materiales y piedra, arena, concreto para las estructuras, tubería PVC accesorios y las plantas a colocar en el sistema de humedales artificiales.

Se consultaron centros de distribución presentes en el GAM con el objetivo de facilitar la logística de entrega y adquisición. Sumado a esto se consideraron servicios como la supervisión de la obra por parte de un ingeniero, cabe destacar que el presente resultado corresponde a precios consultados en las páginas web de diferentes empresas, por lo tanto, representa un aproximado del valor de proyecto.

De acuerdo con las plantas recomendadas para el sistema se plantea colocar de dos tipos avecilla (*Heliconia psittacorum*) y la caña agria (*Costus speciosus*), en una relación 1:1, para los precios de dichas plantas se consideraron casas comerciales como El Arca y Epa. En cuanto a las varillas de construcción en este caso se contemplaron varillas #4, que poseen diámetros de 12,7 mm, sin embargo, para la elección de las varillas de refuerzo es necesario una revisión estructural para asegurar su correcta selección. Para el caso de los tubos PVC se contempló tubería pvc SDR 26 (PN 6):

**Tabla 17.**

*Costos relacionados con la instalación y construcción del diseño del sistema de tratamiento.*

<b>Artículo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad necesaria</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total (C)</b>
<b><i>Tubería de distribución</i></b>				
Tubería pvc 3" (6m)	Unidad	36	¢19,950.00	¢714,875.00
Codo 90° 3"	Unidad	7	¢6,550.00	¢45,850.00
Codo 90° 2"	Unidad	17	¢1,385.00	¢23,545.00
Union T 3"	Unidad	2	¢15,950.00	¢31,900.00
Union T 2"	Unidad	2	¢3,495.00	¢6,990.00

Reducción 3" a 2"	Unidad	3	€6,595.00	€19,785.00
Valvula globo roscada 2"	Unidad	1	€16,570.00	€16,570.00
Valvula globo roscada 3"	Unidad	1	€25,590.00	€25,590.00
Tubería pvc 2" (3m)	Unidad	30	€8,395.00	€250,366.88
Total de tubería				€1,135,471.88

### ***Humedales artificiales***

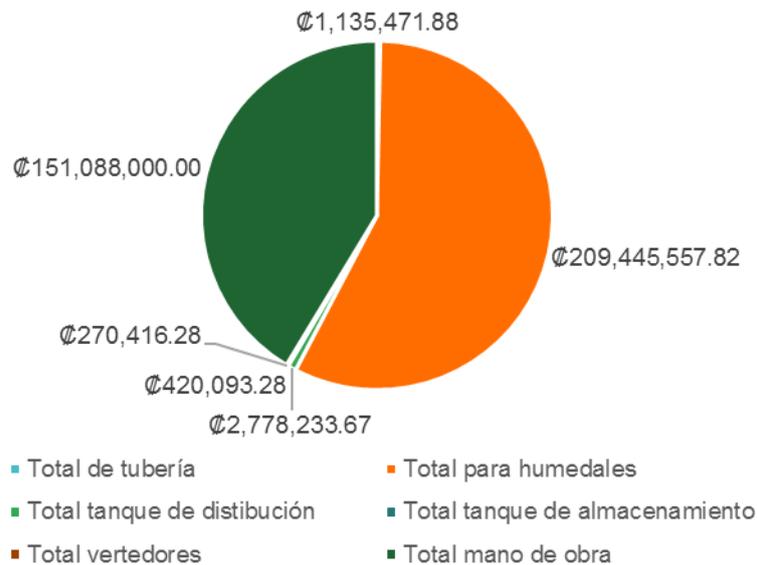
Varilla de construcción	Unidad	121	€6,795.00	€822,195.00
Blocks clase A 12x20x40	Unidad	305	€460.00	€140,300.00
Grava Fina (3mm-32mm)	m <sup>3</sup>	44550	€3,995.00	€177,977,250.00
Grava media (50mm-100mm)	m <sup>3</sup>	1485	€16,455.00	€24,435,675.00
Arena	kg	2096.64	€1,950.00	€4,088,448.00
Cemento (40 kg)	kg	757.12	€3,350.00	€63,408.80
Plantas: caña agría y avecilla	Cantidad	253	€1,990.00	€7,046.56
			€2,225.00	€7,878.69
Geomembrana 20 piesx100 pies 6mil	m <sup>2</sup>	7	€45,000.00	€318,688.52
Total para humedales				€207,860,890.57

### ***Tanque de distribución***

Varilla de construcción	Unidad	63.5	€6,795.00	€431,482.50
Blocks clase A 12x20x40	Unidad	82.75	€460.00	€38,065.00

Arena	kg	1165.86	€1,950.00	€2,273,427.00
Cemento (40 kg)	kg	421.005	€3,350.00	€35,259.17
Total tanque de distribución				€2,778,233.67
<b><i>Tanque de almacenamiento</i></b>				
Varilla de construcción	Unidad	36	€6,795.00	€244,620.00
Blocks clase A 12x20x40	Unidad	24.4	€460.00	€11,224.00
Arena	kg	82.944	€1,950.00	€161,740.80
Cemento (40 kg)	kg	29.952	€3,350.00	€2,508.48
Total tanque de almacenamiento				€420,093.28
<b><i>Vertedores</i></b>				
Varilla de construcción	Unidad	21.3	€6,795.00	€144,733.50
Blocks clase A 12x20x40	Unidad	25.65	€460.00	€11,799.00
Arena	kg	57.51	€1,950.00	€112,144.50
Cemento (40 kg)	kg	20.7675	€3,350.00	€1,739.28
Total vertedores				€270,416.28
<b><i>Mano de obra</i></b>				
Mano de obra	Operario	10	€15,108,800.00	€151,088,000.00
Total mano de obra				€151,088,000.00
<b>Total de proyecto</b>				<b>€363,553,105.68</b>

El costo del proyecto es elevado, ya que se consideran estructuras de concreto, sumado a esto se plantea implementar tres sistemas de humedales de 288 m<sup>2</sup>, estos representan la mayor parte del costo (ver figura 59). Los humedales requieren gran volumen de medio filtrante y de acuerdo al diseño planteado se cuenta con tipos de medio filtrante, uno con mayor diámetro en el punto de ingreso y salida de flujo y un medio filtrante de mejor diámetro en el punto donde se encuentran las plantas.



**Figura 60.** Gráfico de pastel del total de costos por estructura.

Otro de los rubros que eleva el costo del proyecto es la mano de obra, para esto se está considerando diez operarios, esto ya que los trabajos pueden suponer de mayor riesgo, puesto que involucra utilizar herramientas de corte, realizar trabajos en altura en caso de los tanques, lo que implica que muchos de estos operarios van a estar realizando tareas de monitoreo y soporte en trabajos críticos. Sumado a esto se consideran cinco meses de trabajo en planta por la complejidad de las labores.

### 4.3 Manual de operaciones y mantenimiento del sistema de tratamiento propuesto

En el siguiente apartado se presenta una descripción del proceso de instalación y puesta en marcha del sistema de tratamiento propuesto, así como su mantenimiento. Cabe destacar que para el desarrollo del presente apartado se sigue el artículo 29 del Reglamento de Aprobación y Operación de Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (N° 31545-S-MINAE), el cual establece el formato y contenido que se debe presentar en un manual de operación y mantenimiento.

De acuerdo con el reglamento, se plantea desarrollar en primera instancia la ingeniería a detalle con una descripción de su proceso de tratamiento, así como la información básica de diseño. Sumado a esto se plantea la necesidad de especificar el proceso de puesta en marcha y la distribución de personal necesaria, finalizando con un apartado sobre la operación y mantenimiento del sistema para su correcto funcionamiento. A continuación, se desarrolla cada uno de los apartados:

#### 4.3.1 Generación de aguas residuales

En Costa Rica a nivel nacional el 70% de la población posee en sus hogares tanques sépticos como sistema de tratamiento de aguas residuales ordinarias, pero debido a no presentar un correcto diseño y un buen plan de mantenimiento, estos sistemas terminan provocando contaminación de mantos acuíferos (García, 2018). Las aguas residuales especiales corresponden a aquellas aguas que poseen presencia de microorganismos patógenos, lo que les otorga una capacidad infecciosa, toxicidad por contenido de productos químicos. Por este motivo, las aguas residuales deben ser tratadas con antelación a su vertido final en cuerpos de agua, con el fin de reducir los niveles de contaminación y encontrarse dentro de los parámetros que especifica la legislación.

Por tal razón, en el 2015 entra en operación la PTAR Los Tajos, gracias al proyecto de Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana de San José elaborado por el AyA. La planta se encuentra en la Uruca, dio inicio con sus labores en el 2015 con capacidad para brindar tratamiento a las aguas residuales de 1070 000 habitantes; sin embargo, en su primera etapa ofreció tratamiento a 36.000 conexiones de usuarios, aliviando la carga de aguas residuales que eran arrojadas a ríos como el Torres y Rivera (Presidencia de la República de Costa Rica, 2016). La PTAR recibe agua de diferentes cantones de San José como Escazú, Desamparados, Alajuelita, Tibás, Montes de Oca, Moravia, Goicoechea, Vásquez de Coronado, la Unión y Curridabat.

#### 4.3.2 Sistema de tratamiento propuesto

Como se mencionó anteriormente, la PTAR en estos momentos se encuentra en su primera etapa de desarrollo, la cual se basa en un tratamiento primario (físico), acompañado de tratamiento del biogás, así como depuración de olores y siendo el punto final de desfogue en río Torres. Y de acuerdo con la necesidad de la PTAR de regar una zona de reforestación en la ribera del río Torres, se plantea un sistema de tratamiento secundario por medio de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.

Para la implementación de los humedales como método de tratamiento secundario de las aguas residuales se plantea la inclusión de diferentes estructuras hidráulicas para la distribución del caudal. De acuerdo con esto, en primera instancia se establece un tanque de distribución el cual alimenta en cada uno de los humedales. Posterior a cada uno de los sistemas de tratamiento, se plantea colocar un vertedero, para finalmente enviar el agua tratada a un tanque de almacenamiento para ser utilizada en riego de la zona en reforestación que posee la PTAR a lo largo de la ribera del Río Torres. A continuación, se especifica cada uno de los procesos que se involucran en el diseño hidráulico:

##### 4.3.2.1 Tanque de distribución

El tanque de distribución se coloca en un punto de forma estratégica con el fin de aprovechar la altura del terreno y establecer el sistema con un sistema de distribución por gravedad, colocando posterior al tanque de desfogue que posee la PTAR hacia el río Torres. Se decide dar una elevación adecuada al tanque para poder generar una columna de agua adecuada para presurizar el sistema y movilizar el agua en los diferentes humedales establecidos.

#### 4.3.2.2 Humedales

Este punto corresponde a la sección del sistema donde se realiza el tratamiento secundario establecido con el fin de realizar la remoción de la materia orgánica. Gracias a que la PTAR posee una primera etapa correspondiente a un sistema de tratamiento primario en donde se realiza una remoción de sólidos de gran tamaño y sólidos suspendidos, por lo que el agua que ingresa en los humedales posee materia orgánica disuelta que no fue posible eliminar por medio de procesos físicos.

Los humedales artificiales poseen diferentes niveles de tratamiento como remoción física, remoción biológica y remoción química. El proceso de remoción físico se da por filtración gracias a la presencia del sustrato y las especies vegetales, generando un efecto de resistencia al paso del agua residual a través del medio, además de esto las raíces de la vegetación capturan los sólidos sedimentados, evitando que estos vuelvan a ser resuspendidos (Llagas et al, 2006).

Los procesos de remoción biológica se experimentan debido a las plantas y los microorganismos que habitan en el humedal donde se presentan subprocesos como respiración, fermentación, nitrificación, desnitrificación y remoción. Por último, en la remoción química ocurren subprocesos como la absorción y adsorción, en los cuales ya sea por la asimilación como nutrientes o bien por la adherencia a las raíces, dan como resultado la retención de contaminantes (Cuervo et al, 2018).

#### 4.3.2.3 Vertedor

Los vertederos deben colocarse a la salida de cada una de las unidades de humedales necesarias. Dicha estructura controla el rendimiento, punto de muestreo y medidor de caudal a la salida, juega un punto clave dentro del sistema.

Se plantea implementar un vertedor de cresta delgada con forma triangular, su funcionamiento consiste en que el caudal pasa a través de una hoja de metal la cual posee en la parte superior un hueco en forma triangular. Esta hoja ayuda a nivelar la altura del agua en el estanque, con el fin de poder medir la altura con una regla, asociando esta altura a un caudal.

#### 4.3.2.4 Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento debe colocarse posterior a los vertederos, con el fin de recolectar toda el agua a la salida de los diferentes puntos de tratamiento, con el fin de generar un punto de recolección del agua tratada y lista para ser reutilizada. El tanque posee un punto de ingreso del caudal tratado y un punto de salida del agua limpia para pasar a regar la zona de reforestación a lo largo de la ribera del río torres.

#### 4.3.2.5 Riego

Posterior al tanque de almacenamiento se debe colocar el sistema de riego de la zona en reforestación que posee la PTAR. El sistema propuesto corresponde a canales de riego por gravedad, el cual contempla un canal de riego principal del cual se generan derivaciones de canales más pequeños, con el fin de lograr una buena distribución del caudal a lo largo de la zona de reforestación.

### 4.3.3 Ingeniería básica de diseño

En el siguiente apartado se presenta un resumen de las dimensiones y capacidad de las estructuras establecidas, cabe destacar que se está considerando blocks de concreto con dimensiones de 10x20x40, ancho, alto y largo respectivamente.

Todo el diseño del sistema está basado en obtener la cantidad de caudal necesaria para abastecer la zona de reforestación, de acuerdo a esto se establecieron la cantidad de humedales necesarios y el dimensionamiento de las demás estructuras. Cada una de las estructuras son rectangulares y se transporta el caudal de un punto al otro mediante tubería pvc, en el siguiente recuadro se presenta un resumen de las dimensiones de cada una de estas:

**Tabla 18.**

*Resumen de dimensiones de las estructuras.*

<b>Estructura</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Largo (m)</b>	<b>Ancho (m)</b>	<b>Capacidad (<math>m^3</math>)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
<b>Tanque de distribución</b>	5	6,70	6,20	175,5	0,10
<b>Humedal 1 y Humedales 2, 3</b>	1,2 1	24,20	12,20	158,4	0,15
<b>Vertedor 1 y vertedor 2, 3</b>	1,15 0,95	1,8	0,53	NA	0,15
<b>Tanque de almacenamiento</b>	0,64	3,70	2,20	1,54	0,54

Cada una de las dimensiones especificadas anteriormente corresponden a las medidas establecidas de acuerdo con el diseño estructural de cada obra civil. Por otro lado, el sistema posee una capacidad de procesamiento de caudal máximo diario de 170, 54  $m^3/día$  y horaria de 7,11  $m^3/h$ .

### 4.3.4 Implementación del sistema y arranque.

Para la construcción del sistema se recomienda tener en cuenta el dimensionamiento establecido para cada una de las estructuras y los diámetros correctos de una de las tuberías para que de esta forma el sistema funcione de la forma esperada evitando rebalses o bien cavitación o golpes de ariete en la tubería.

Una vez finalizada la construcción de cada una de las estructuras es importante recordar que para arrancar la bomba centrífuga de succión colocada sobre el tanque de desfogue se debe cebar de forma correcta, para que esta no arranque sin fluido en su sistema, logrando evitar así reducir la vida útil de la misma.

Se debe tener en cuenta que el tanque de distribución debe primero alcanzar su límite máximo de altura de 4,5 m, una vez obtenida esta altura se puede abrir la válvula globo roscada en su totalidad para que de esta forma arranque el funcionamiento de todo el sistema de tratamiento. Es importante que el tanque de distribución alcance esta altura para poder obtener la columna de agua necesaria para presurizar la tubería de distribución, obteniendo presiones y velocidades adecuadas.

#### 4.3.5 Operación

En el siguiente apartado se presentan todas las aristas necesarias para asegurar una correcta operación del sistema, desde el personal, equipo necesario, así como aquellas tareas que se deben realizar para asegurar su correcto funcionamiento.

##### 4.3.5.1 Control operacional

El sistema de tratamiento propuesto no conlleva muchas tareas a realizar de forma frecuente, gracias a esto no es un sistema que impacte a la planta en cuanto a su funcionamiento y organización operacional actual.

La principal tarea que se resalta es la de control operacional con el fin de medir el rendimiento del sistema y asegurar los parámetros necesarios para su aprovechamiento en riego. Para esto se recomienda realizar análisis fisicoquímicos mensuales, con el fin de poder detectar a tiempo un mal tratamiento y planificar las medidas correctivas correspondientes sin llegar a impactar al medio ambiente. Evaluando parámetros como pH, DBO, DQO, sólidos totales, sólidos sedimentables, esto de acuerdo con lo que indica el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (Decreto N°33601 MINAE).

Con respecto a los humedales se deben realizar inspecciones diarias en el humedal para asegurar que este no presenta rebalses sobre el nivel superficial de la grava, ya que esto estaría relacionado con algún tipo de obstrucción en las tuberías de salida o bien en el medio filtrante. Sumado a esto es necesario revisar que la capacidad de tratamiento en cuanto al caudal es el esperado, para esto se deben realizar lecturas en el vertedor triangular de cresta delgada.

Para realizar la medición de caudal en el vertedor se establece una relación entre el nivel del agua en el canal y el caudal que presenta el sistema en ese momento. Para esto se debe medir la sección del canal que se encuentra antes de la hoja de metal, el procedimiento es muy sencillo, solo se debe ingresar una regla de forma vertical con el valor cero en el extremo inferior de la regla que ingresa al canal.

##### 4.3.5.2 Equipo

Para realizar las inspecciones necesarias en el sistema y asegurar su correcto funcionamiento es necesario que el personal de la PTAR cuente con el equipo necesario, el cual le asegure condiciones seguras.

Dentro del equipo de trabajo se encuentra el equipo de protección del personal para poder realizar labores de inspección. Es de suma importancia brindar este equipo al personal, así como

generar una cultura de seguridad donde los operarios comprendan la importancia del mismo y eviten poner su salud en riesgo por proactividad o aumentar la velocidad de las labores, ya que se manipulan aguas con agentes biológicos que pueden llegar a ser perjudiciales para la salud. A continuación, se menciona el equipo necesario, así como su importancia:

- Botas de hule: para evitar el ingreso de agua residual en contacto con la piel del operario y que sean de fácil lavado.
- Pantalones y camisa manga larga: como mínimo, con el fin de aislar a la persona del contacto directo de las aguas residuales, a la vez que se protege de agentes ambientales como el sol, ligado a esto se alienta asegurar que el personal utilice sombrero de ala ancha y bloqueador solar.
- Lentes de seguridad o medicados y mascarilla: evitar que partículas de agua entren en contacto directo con los ojos o en la boca del funcionario.
- Guantes de látex: importantes en caso de necesitar tomar muestras.

Además del equipo de protección, es necesario que los operarios cuenten en equipo de jardinería para poder manipular las plantas que se encuentran sembradas en el medio filtrante del humedal, a continuación, se presentan estas herramientas básicas:

- Rastrillos
- Una pala
- Carretillo
- Tijeras para podar
- Hidrolavadora

Como se menciona anteriormente es necesario contar con rastrillo, carretilla, una pala para remover restos de vegetación o bien el caso de tener que sembrar nuevos árboles en la zona de reforestación. Sumado a esto se menciona una hidrolavadora, que no corresponde a una herramienta de jardinería, pero en este caso que las plantas están sembradas en un sustrato de piedra, la hidrolavadora juega un papel importante en caso de obstrucciones.

#### 4.3.5.3 Personal

Como se mencionó en el apartado anterior, las tareas de operación no impactan significativamente la saturación del personal de la PTAR, por lo que se asume que estas labores pueden ser asumidas por el personal que posee actualmente la institución. Acompañados previamente de una explicación del funcionamiento del sistema para evitar confusiones, eliminar ideas falsas y generar un sentimiento de pertenencia sobre el proyecto de revalorización del agua residual en riego.

#### 4.3.6 Posibles problemas

A continuación, se mencionan algunos de los principales problemas que se pueden presentar una vez el sistema se encuentra en funcionamiento, que pueden llegar a impactar de forma considerable su rendimiento.

Uno de los principales problemas que se pueden presentar es desbordamiento de los humedales artificiales por acumulación de materia orgánica entre los espacios disponibles de la grava

utilizada como medio filtrante, es recomendable extraer la zona afectada y realizar un lavado de las rocas utilizando la hidrolavadora y posteriormente regresar el material a su lugar original, para este trabajo es necesario realizar sobre una superficie que logre recoger el agua generada durante el lavado y que posteriormente pueda ser integrada en el flujo de tratamiento, evitando de esta forma la contaminación de las aguas subterráneas. Por otro lado, en caso de presentar problemas con las plantas debido a factores climáticos extremos o bien experimentar algún tipo de plagas, se recomienda sustituir la planta.

#### 4.3.7 Mantenimiento

En el siguiente apartado se presenta el mantenimiento que le debe aplicar a cada una de las estructuras que forman parte del sistema de tratamiento, con el fin de procurar tener un sistema trabajando en óptimas condiciones, logrando, asegurando su correcto funcionamiento y alargando su vida útil:

##### 4.3.7.1 Tanque de distribución, vertedero y tanque de almacenamiento

Dichas estructuras corresponden a estructuras de paso o bien se encarga de almacenar el agua residual que se redirecciona a lo largo del sistema de tratamiento secundario propuesto. El flujo se moviliza por el método por gravedad, por lo que las tareas de mantenimiento son reducidas, sin embargo, se recomienda una vez al año realizar inspecciones infraestructurales para asegurar que no se tengan fugas o acumulación de sedimentos que me generen obstrucciones.

##### 4.3.7.2 Humedales artificiales

Los humedales artificiales corresponden a sistemas encargados de reducir la carga microbiológica del agua residual, las tareas de mantenimiento se basan en realizar inspecciones rutinarias.

En cuanto a la tubería se debe revisar que no haya fugas en la tubería de distribución, así como que no existan obstrucciones en la tubería de ingreso y salida del caudal, sumado a esto se debe verificar que no existan rutas de distribución preferenciales dentro del humedal, con el fin de asegurar que se distribuya uniformemente. En cuanto al sustrato del humedal, se debe verificar que no exista encharcamiento de manera superficial, ya que indicaría que existen obstrucciones en el sustrato, para lo cual se debe extraer el sustrato y limpiarlo y volver a colocarlo en su lugar.

Por último, se recomienda de forma semanal eliminar restos de materia orgánica sobre el sustrato del humedal, para evitar que esto pueda generar obstrucciones de forma futura. Se deben realizar podas de las plantas sembradas en el humedal durante el primer año, durante el periodo de adaptación de la vegetación utilizada, posterior a que dichas plantas ya se encuentran bien arraigadas (Delgadillo et al, 2010).

#### 4.3.7.3 Canales de riego

Para el caso de los canales de riego que se encargan de distribuir el caudal a lo largo del terreno de reforestación, se debe evitar acumulaciones que me generen obstrucciones y limiten el movimiento del flujo. Los canales son sin revestimiento, por lo que puede llegar a ocurrir el crecimiento de vegetación a lo largo de su perfil, de acuerdo con esto se recomienda la poda de este para que esta no genere interrupciones importantes en el avance de este.

#### 4.3.8 Desechos

Dado que lo que implementamos es un sistema de tratamiento secundario, no se poseen muchos desechos. El principal caso es en el caso de los humedales artificiales, los cuales pueden generar residuos orgánicos, producto de la materia vegetal que forma parte del sistema, como por ejemplo hojas o bien plantas marchitas y un caso muy poco común la acumulación de raíces que pueden llegar a obstruir el flujo del agua en el medio filtrante.

En el caso de estos residuos no corresponden a volúmenes grandes, por lo que para realizar una correcta disposición se recomienda acumular en un sector, en una especie de cama viva y dejar que se degraden o bien ingresar a un sistema de compostaje para su aprovechamiento en la cadena de valor.

#### 4.3.9 Reportes operacionales

El artículo 5 del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (N°33601-MINAE), establece que aquellos entes generadores en los cuales el efluente es vertido a un cuerpo receptor o alcantarillado sanitario, infiltrado o reusado, deben presentar un reporte operacional periódicamente al Ministerio de Salud.

El reglamento establece que el reporte operacional debe ser elaborado y firmado por el representante legal del ente generador y por el Responsable Técnico. En la sección de anexos se puede encontrar un machote del reporte de operaciones, basado en el que se presenta en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales. Reglamento menciona que como mínimo el reporte debe desarrollar los puntos que se desarrollan a continuación:

##### 4.3.9.1 Datos Generales

A continuación, se presenta la información general que debe presentar el reporte de operaciones:

- Ente generador
- Código CIU: Código Internacional Industrial Unificado.
- Provincia, Cantón y Distrito
- Dirección.
- Página en Internet: página del ente generador
- Permiso Sanitario de Funcionamiento
- Patente Municipal

- Número de reporte
- Fecha de reporte
- Período reportado
- Frecuencia de presentación del reporte
- Información del propietario o representante legal del ente generador
- Información del responsable Técnico del Reporte Operacional

#### 4.3.9.2 Disposición de las aguas residuales

En este apartado se debe indicar el destino final del efluente, ya que el agua es revalorizada en riego de una zona de reforestación, se debe detallar el tipo de reuso.

#### 4.3.9.3 Medición de caudales

Se solicita especificar el método de medición utilizado, de acuerdo con el diseño establecido corresponde mencionar que como medidor de caudal se implementó un vertedero.

#### 4.3.9.4 Resultados de las mediciones de parámetros por parte del ente generador

Menciona la necesidad de contar con una bitácora en la cual se lleva un registro detallado de las actividades de operación, control de los sistemas de tratamiento, mantenimiento, incluyendo la medición de caudales y los resultados de la medición de los parámetros, así como la evaluación del sistema de tratamiento, los registros de producción y el plan de acciones correctivas

Establece la frecuencia mínima de muestreo ya análisis de acuerdo al caudal, en este caso como es menor a  $100 \text{ m}^3/\text{día}$ , se deben realizar muestreos de forma mensual y trimestral de los siguientes parámetros:

**Tabla 19.**

*Periodos de muestreo para análisis de laboratorio.*

<b>Parámetro</b>	<b>Mensual</b>	<b>Trimestral</b>
Caudal	x	x
pH	x	x
Sólidos Sedimentables	x	x
Temperatura	x	x
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO 5,20)		x
Demanda Química de Oxígeno (DQO)		x

Grasas y Aceites (GyA)	x
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	x
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	x
Coliformes fecales (CF)	x

---

Por otro lado, también se solicita un método específico para el cálculo del caudal promedio diario del periodo a reportar, en el cual solicita obtener las horas diarias de acuerdo con el periodo total de producción y la jornada de trabajo. Para la medición mensual el número de horas diarias me va a indicar la cantidad de muestras que se deben tomar cada hora en un día representativo. Con la calidad de muestras de caudal obtenidas, equivalente a la cantidad de horas diarias, se extrae el promedio diario de descarga de aguas residuales, multiplicando el promedio horario en  $m^3/h$  por las horas diarias de funcionamiento en  $h/día$ , obteniendo de esta forma el caudal diario de descarga en  $m^3/día$ , esto de acuerdo con una muestra representativa de datos.

#### 4.3.9.5 Resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos

De acuerdo con el tipo de reúso el reglamento (N°33601-MINAE) establece los parámetros y la frecuencia mínima a evaluar, la cual en este caso con un reúso del tipo 7 corresponde una frecuencia trimestral y el listado de los parámetros a evaluar son los siguientes:

- Caudal
- pH
- Sólidos Sedimentables
- Temperatura
- Caudal
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO 5,20)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Grasas y aceites
- Sólidos suspendidos Totales
- Coliformes fecales
- Nemátodos intestinales

Sumado a lo anterior, el reglamento solicita que el reporte del laboratorio cuente con número de Permiso de Funcionamiento del Laboratorio, con la fecha de rige y vencimiento, así como la siguiente información:

- Nombre del Laboratorio, en conjunto con el número de permiso sanitario de funcionamiento (período en que rige)
- Nombre del ente generador
- Actividad del ente generador
- Localización del ente generador: provincia, cantón y distrito
- Número de Informe
- Fecha del Informe
- Fecha de Muestreo

- Nombre del responsable de la toma de las muestras: funcionario del laboratorio
- Tipo de Muestreo: se solicita que sea compuesto
- Horario de Muestreo: hora de inicio y hora de finalización
- Volumen de las submuestras
- Lugar del muestreo: debe ser tomada en la última unidad de tratamiento
- Sitio de la disposición final del efluente: reuso en riego
- Caudal: el valor del caudal promedio debe coincidir con el caudal promedio reportado por el ente generador. En caso contrario, debe adjuntarse una explicación técnica que sustente la incongruencia
- Incertidumbre para cada parámetro analizado
- Nombre y firma del responsable de la elaboración del análisis químico o microbiológico
- El número del método y el nombre de cada análisis que se reporta
- Refrendo del Colegio de Químicos cuando proceda

El muestreo compuesto solicitado debe realizarse dentro de la jornada diaria con el fin de lograr la representatividad de los parámetros de calidad.

#### 4.3.9.6 Evaluación de las unidades de tratamiento.

Se debe destinar un responsable técnico de la elaboración del reporte operacional, este debe evaluar los resultados del análisis del laboratorio sobre los diferentes parámetros, la bitácora, para de esta forma realizar conclusiones y recomendaciones sobre el funcionamiento del sistema de tratamiento. Es importante tener en cuenta que se debe informar al Ministerio de Salud si se realiza un cambio en el proceso de tratamiento.

#### 4.3.9.7 Plan de acciones correctivas

En caso de sobrepasar el límite máximo de alguno de los parámetros, se debe adjuntar un plan de acciones correctivas, con su respectivo cronograma de actividades, donde se comprometan plazos reales para las acciones inmediatas, corto plazo y mediano plazo. Para esto se debe tener en cuenta lo establecido en la publicación “Instructivo para presentación de cronograma de acciones correctivas en sistemas de tratamiento de aguas residuales” de La Gaceta 146 del 31 de julio de 2002. Una vez el Ministerio de Salud aprueba el cronograma, se tomará como punto de referencia para un correcto control y seguimiento de acciones, así como para la evaluación sobre la renovación del permiso sanitario de funcionamiento correspondiente.

#### 4.3.9.8 Registro de producción

En este apartado se debe incluir indicadores globales de producción por parte del ente generador con base a su promedio diario durante el período de reporte correspondiente. Cabe destacar que el Ministerio de Salud posee la potestad de realizar consultas sobre las unidades reportadas en caso de ser necesario.

#### 4.3.9.9 Nombre y Firma del responsable Técnico del Reporte y Propietario o Representante Legal.

El documento del reporte operacional debe ir firmado por el propietario o representante legal del ente generador y por el responsable técnico, esto con el fin de evidenciar conocimiento sobre la situación operacional de la PTAR, planes de acciones correctivas y su cronograma de acciones correspondiente.

#### 4.3.10 Tabla resumen

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las actividades de mantenimiento necesarias para el funcionamiento de cada una de las estructuras establecidas:

**Tabla 20.**

*Resumen de tareas para mantenimiento*

<b>Estructura</b>	<b>Actividad</b>	<b>Frecuencia</b>
Tanque de distribución	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Revisión estructural</li><li>2. Limpieza de sedimentos</li></ol>	1 vez al año
Humedal	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Limpieza de materia vegetal</li><li>2. Limpieza de tubería de ingreso y salida de caudal</li><li>3. Inspección de encharcamiento</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Diario</li><li>2. Mensual</li><li>3. Diario</li></ol>
Vertedor	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Revisión estructural</li><li>2. Limpieza de sedimentos</li></ol>	1 vez al año
Tanque de almacenamiento	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Revisión estructural</li><li>2. Limpieza de sedimentos</li></ol>	1 vez al año
Canal de riego	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Poda de vegetación</li></ol>	1 vez al año

## CONCLUSIONES

El análisis de las condiciones de la PTAR del 2018-2023, permitieron determinar la base de diseño, de acuerdo con los datos brindados por la PTAR y por el Instituto Meteorológico Nacional, estación meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños 27. Obteniendo de esta forma las condiciones climáticas extremas a las que tiene que operar la planta, registrando 20,8 °C y 23,14 °C como temperaturas mínimas y máximas respectivamente. Se utiliza la temperatura mínima como temperatura de diseño debido a la relación creciente registrada entre la temperatura y la remoción de contaminantes, de esta forma se diseña el sistema para las peores condiciones ambientales que puede enfrentar.

En el caso de las precipitaciones se evidencian valores máximos en el mes de octubre con 10,53 mm y mínimas de 0 mm de agua en época seca, coincidiendo de esta forma con datos históricos donde el periodo de lluvia se ubica de mayo a noviembre, una época seca de enero a marzo y abril y diciembre colocándose como meses de transición. Cabe destacar que se registra un comportamiento inusual de lluvias en el mes de marzo, debido a un fenómeno registrado IMN.

En cuanto al caudal registrado, la planta registró valores de 1206,270 l/s y 432,720 l/s como valores máximos y mínimos respectivamente. Para definir las concentraciones de DBO y DQO se realizó un análisis de cuartiles y se selecciona el referente al tercer cuartil de 294,250 mg/L y 102,10 mg/L, para DQO y DBO correspondientemente, de esta forma se engloba al 75% de los datos, permitiendo de esta forma establecer un sistema no sobredimensionado, pero capaz de funcionar correctamente en casos más extremos.

En cuanto al estudio topográfico de la zona y el análisis de disponibilidad de espacio registrada en la zona, se establece el área de implementación del sistema de tratamiento. Y según el estudio de geotécnico y de mecánica de suelos proporcionado por la institución, en esta zona se tiene un nivel freático de 2 y 7 m, lo cual no afecta en las excavaciones a realizar. Teniendo en cuenta el decreto DE-39887-s-MINAE “Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales” se consideró un retiro de 20 m y con el fin de no intervenir la huella futura de la PTAR se establece un ancho de las celdas de los humedales de 12 m, obtenido de esta forma un largo de 24 m para mantener la relación 1:1, dando como resultado un área superficial del humedal de 288 m<sup>2</sup>.

De acuerdo con el área de una unidad de humedal artificial, este puede tratar un flujo de  $56846 \frac{L}{día}$  y la demanda hídrica de la zona se estima de 146047,05 l/día, por lo tanto, se contempla colocar tres unidades de humedales artificiales y de esta forma suplir el requerimiento hídrico de la zona en reforestación. Obteniendo un excedente de  $24492,24 \frac{L}{día}$ , los cuales pueden ser aprovechados en otras labores diarias. El flujo se conforma por seis estructuras, un tanque de distribución, las tres unidades de humedales artificiales, vertederos a la salida de cada humedal y un tanque de recolección del caudal tratado.

El tanque de distribución debe tener 4,5 m de columna de agua para de esta forma lograr presurizar el sistema y asegurar que el caudal llegue a cada punto de entrega. Además de esto, las unidades de humedales artificiales se colocaron sobre el nivel superficial con el objetivo de obtener un método de riego por gravedad, con un volumen de 158,4 m<sup>3</sup>, logrando de esta forma reducir la carga orgánica anteriormente mencionada y que cumpla para su reuso paisajístico. El caudal se moviliza de un punto a otro utilizando tubería pvc de 4”, 3” y 2”, para lograr obtener velocidades y presiones requeridas en todo el sistema.

En caso de darse la implementación del proyecto en la PTAR Los Tajos, colocaría a la

institución en una planta modelo e innovadora en sistemas de tratamientos, al plantear la revalorización del efluente en prácticas como riego de una zona en reforestación, la cual poseen con el objetivo de impactar positivamente el Corredor Biológico Interurbano del Río Torres (CBIRT), considerar que el río Torres funciona como punto de conexión entre ecosistemas. Permitiendo a su vez obtener un punto de referencia para la educación en cuanto a sistemas de tratamiento de aguas residuales, revalorización del efluente, así como servicios ecosistémicos como la mitigación de las islas de calor y protección de la biodiversidad. Además, del cumplimiento de algunos alcances en los ODS, así como los ejes centrales de la política Nacional de Saneamiento.

El sistema de tratamiento secundario propuesto, basado en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, permite desarrollar estructuras que se integran de manera natural, armónica y funcional al paisaje. Además, contribuye a la restauración ambiental de los ecosistemas circundantes a la PTAR, generando un valor ecológico añadido al entorno.

Por último, desde la perspectiva de la Ingeniería en Biosistemas, el presente trabajo posee una contribución significativa al campo del saneamiento ambiental y al reúso de aguas residuales, implementando soluciones basadas en procesos biológicos y sostenibles. La implementación del sistema propuesto no solo impulsa el tratamiento eficiente, sino que también representa una visión global e innovadora, que permite alinear a la Institución con los principios de una economía circular. Logrando de esta forma una revalorización del efluente de la PTAR, a la vez que se favorece la restauración ecológica del entorno. Permitiendo reafirmar el aporte de la Ingeniería en Biosistemas orientada al desarrollo de tecnologías resilientes y limpias, mediante propuestas integrales, sustentables y eficientes, los cuales son capaces de responder a los desafíos ambientales actuales.

## RECOMENDACIONES

- En la construcción del sistema se debe tener sumo cuidado con las alturas de cada una de las estructuras, así como de la tubería, ya que de esta forma es que se obtiene un correcto flujo en el sistema.
- El diseño del sistema de tratamiento se basa en un caudal específico y en concentraciones de contaminantes representativas al 75% de los datos analizados. En este contexto, es fundamental garantizar que el caudal de ingreso al sistema no experimente incrementos significativos. Asimismo, se requiere la realización de muestreos periódicos para monitorear las concentraciones de contaminantes. En caso de detectarse un aumento inusual de estas concentraciones, se debe reducir el caudal de entrada con el fin de incrementar el tiempo de retención hidráulica dentro del sistema. Esta estrategia permite asegurar que las concentraciones a la salida cumplan con los parámetros establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.
- En la puesta en marcha es fundamental que el agua en el tanque de distribución alcance la altura de 4,5 m, ya que esta columna de agua asegura su correcta distribución en las tuberías.
- Ingresar en los cronogramas rutinarios de análisis de laboratorio, para llevar de forma correcta el control del funcionamiento del sistema de tratamiento.
- En caso de desear reutilizar el caudal en tareas diferentes al riego de la zona en reforestación, es necesario contemplar la cloración de esta para reducir riesgo de salud.
- Realizar una correcta señalización de las diferentes estructuras por temas de seguridad ocupacional y educación ambiental. Así como del recordatorio de los cuidados y equipos necesarios en caso de realizar una intervención, para eliminar riesgos de salud.
- Realizar una correcta distribución de cargas, así como actualizar las labores del personal de la PTAR, para llevar un correcto control y mantenimiento del sistema.
- Colocar un buen sistema de drenaje centralizado de la zona de inundación que posee la PTAR, para que este no afecte el sistema de tratamiento. Y a manera futura evaluar el impacto en el biosistema y tipo de ecosistema que se crea alrededor de esta zona de inundación, evaluando opciones de incluir este al paisaje de forma correcta.
- La estructura del humedal es únicamente de contención del medio filtrante, por lo cual al momento de su construcción es de gran importancia la colocación de la geomembrana, para impermeabilizar el suelo, sumado a esto se puede colocar sacos sobre la geomembrana para evitar que esta se vea afectada al colocar las piedras y eliminar riesgos de generar una fuga.
- Realizar una correcta capacitación del personal encargado del sistema de tratamiento, de tal modo que se sienta cómodo y familiarizado con las tareas asociadas al funcionamiento del sistema.
- Recordar que en todo momento que el tanque de almacenamiento del agua tratada se debe encontrar debidamente tapado, con el fin de evitar el ingreso de agua de lluvia o bien algún animal.
- En momentos de operación o mantenimiento del sistema de tratamiento, el personal debe contar con el equipo de protección completo. Contemplando pantalón largo, botas, lentes, guantes de látex, cubrebocas y delantal, así como protección solar como bloqueador, sombrero de ala ancha, mangas y una correcta hidratación. Para el caso de la PTAR Los Tajos, que cuenta con un Área de Seguridad Ocupacional, se puede crear un protocolo o instructivo que dé la seguridad ocupacional adecuada en el tren de tratamiento del biosistema.
- A través del área de Calidad y Gestión Ambiental, gestionar estudios de los tipos de

árboles a sembrar en el área de reforestación, para no afectar negativamente el ecosistema local, como se ha realizado a la fecha.

- El área de Calidad y Gestión Ambiental de Los Tajos puede utilizar sistema de tratamiento en pro de la educación ambiental, con la generación de visitas de campo y charlas, incentivando sistemas de tratamiento que se mezclen con el ambiente, logrando a su vez impactar diferentes aristas de la problemática ambiental, como se planteó con este TFG.
- Es fundamental realizar un adecuado planteamiento estratégico para el direccionamiento de la PTAR Los Tajos, que permita la incorporación de propuestas de desarrollo alternativas e innovadoras. Esto implica la asignación de fondos de inversión hacia proyectos con enfoques integrales, que no solo optimicen el funcionamiento de la planta, sino que también contribuyan a posicionar a la institución como referente en el diseño y operación de infraestructuras de saneamiento avanzadas y sostenibles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arteaga-Cortez, Viviana M., Quevedo-Nolasco, Abel, Valle-Paniagua, David H. del, Castro-Popoca, Martiniano, Bravo-Vinaja, Ángel, & Ramírez-Zierold, Jorge A. (2019). State of art: A current review of the mechanisms that make the artificial wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 319-343. Epub 15 de febrero de 2020. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Alvarado-García, Virginia, Pérez-Gómez, Gabriela, & Gastezzi-Arias, Paola. (2020). Calidad del ecosistema urbano del río Torres, San José, Costa Rica: factores bióticos y abióticos. *Cuadernos de Investigación UNED*, 12 (2), 527-542. <https://dx.doi.org/10.22458/urj.v12i2.3016>
- AyA. (2021). Planta de Aguas Residuales. Empresa de Agua Potable y Alcantarillado de Sucre. <http://www.elapas.com.bo/area-operativa/planta-de-aguas-residuales/>
- APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20a ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, editores. Washington, D.C.; 1999.
- Banco Mundial. (2020). El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medio ambiente y las economías, según el Banco Mundial. Washington. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resorce-thatcan-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>
- Baque Solis, J., Cuadrado Torres, L., & Palacios Paredes, B. (2022). Análisis comparativo topográfico sobre levantamientos altimétricos con RTK GNSS, Estación Total y Drone en Manta. *Polo del Conocimiento*, 7(12), 586-602. [doi:http://dx.doi.org/10.23857/pc.v7i12.5015](http://dx.doi.org/10.23857/pc.v7i12.5015)
- Biocorredores. (s. f.). Corredor Biológico Interurbano Río Torres, Reserva de la Biosfera. Biocorredores. <https://biocorredores.org/biodiversitysanjose/corredoresbiologicos/corredor-biologico-interurbano-rio-torres-reserva-de-la-biosfera>
- Brambila, M. Lámina de riego y monitoreo de humedad en suelo para frutillas y aguacate. Recuperado de <https://www.netafim.com.mx/blog/LAMINA-DE-RIEGO-Y-MONITOREO-DE-HUMEDAD-EN-SUELO-PARA-FRUTILLAS-Y-AGUACATE/>
- Cai, H., Sun, H., Liang, Z., & Li, X. (2020). Effects of Environmental Factors and Human Activities on the Water Quality of a River in a Typical Agricultural Catchment. *Water*, 12(5), 1373. <https://doi.org/10.3390/w12051373>
- Calheiros, C. S. C., Rangel, A. O. S. S., & Castro, P. M. L. (2007). Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research*, 41(8), 1790–1798. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2007.01.01>
- Callejas-Rodríguez, Rodrigo, Rojo-Torres, Eduardo, Benavidez-Zabala, Carlos, & Kania-Kuhl,

- Erika. (2012). Crecimiento y distribución de raíces y su relación con el potencial productivo de parrales de Vides de Mesa. *Agrociencia*, 46(1), 23-35. Recuperado en 01 de abril de 2025, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952012000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000100003&lng=es&tlng=es).
- Cuervo, A & Hernández, E. (2018). *Diseño y Modelación de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Vereda Mancilla del Municipio de Facatativá, Cundinamarca* [Trabajo de Grado, Universidad de Cundinamarca]. Repositorio ucundinamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.12558/1422>
- Costa Rica tiene un Gran Reto Para Mejorar El Saneamiento de Aguas Residuales. Delfinocr. Retrieved September 26,2022, recuperado de <https://delfino.cr/2021/07/costa-rica-tiene-un-gran-reto-para-mejorar-el-saneamiento-de-aguas-residuales>
- Comisión Nacional Forestal. (2010). Prácticas de reforestación. Recuperado de [https://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/MANUAL\\_PRACTICAS\\_DE\\_REFORESTACION.PDF](https://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/MANUAL_PRACTICAS_DE_REFORESTACION.PDF)
- CFIA. (2017). Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=83561&nValor3=107558&strTipM=TC#down](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=83561&nValor3=107558&strTipM=TC#down)
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). *Treatment Wetlands*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780408774>
- García, V. (2018, 26 marzo). 70 % del agua residual generada por costarricenses carece de tratamiento. Universidad de Costa Rica. Recuperado 26 de septiembre de 2022, <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/3/26/70-del-agua-residual-generada-por-costarricenses-carece-de-tratamiento.html>
- García, J., y Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Libro. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>
- Guardia, C y Ccente, I. (2023). Evaluación de la eficiencia de remoción de la DBO, DQO y SST del tanque IMHOFF, de la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Acoria, provincia de Huancavelica, departamento de Huancavelica [Tesis de graduación, Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/64eb2678-86cd-4c00-b185-d108f53f12df/content>
- Interempresas. (2022, marzo 22). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos, Costa Rica. Interempresas. <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/457045-Planta-de->

Tratamiento-de-Aguas-Residuales-Los-Tajos-Costa-Rica.html

Kadlec, R & Wallace, S. (2006). Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems: Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements. Water Environment Research Foundation

Ley N° 33601. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. (19 de marzo del 2007). [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=59524&nValor3=83250&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=59524&nValor3=83250&strTipM=TC)

Mattox, D. M. (2010). The “Good” Vacuum (Low Pressure) Processing Environment. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, 73–145. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2037-5.00003-4>

Monrroy Miranda, H. A. (2022). *Implementación de un humedal artificial como alternativa de tratamiento de aguas residuales grises, en el distrito de Juan Viñas, cantón de Jiménez, provincia de Cartago, Costa Rica, 2020-2021* [Trabajo final de graduación, Universidad Nacional de Costa Rica]. Repositorio una. <http://hdl.handle.net/11056/25391>

Mora-Aparicio, C., Alfaro-Chinchilla, C., Pérez-Molina, J., & Vega-Guzmán, I. (2022). Environmental contribution of Los Tajos wastewater treatment plant in the removal of physicochemical and microbiological pollutants. *Uniciencia*, 36(1), 1-17. <https://doi.org/10.15359/ru.36-1.33>

Montero, B. (2020). *TEC se Suma a la Creación del Corredor Biológico Interurbano Río Torres*. Hoy en el TEC. <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2020/08/06/tec-se-suma-creacion-corredor-biologico-interurbano-rio-torres#:~:text=3DEl%20r%C3%ADo%20nace%20en%20Rancho%2Cen%20Pavas%20de%20San%20Jos%C3%A9>

Mora-Orozco, Celia De La, Saucedo-Terán, Rubén Alfonso, González-Acuña, Irma Julieta, Gómez-Rosales, Sergio, & Flores-López, Hugo Ernesto. (2020). Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11(Supl. 2), 1-17. Epub 30 de junio de 2020. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681>

Mihelcic, J., & Zimmerman, J. (2012). *Ingeniería ambiental. Fundamentos, sustentabilidad y diseño*. Alfaomega, México DF, México.

Navarro-Ceciliano, Osvaldo. (2021). Estudio de capacidad de acogida del suelo en el Corredor Biológico Interurbano Río Torres, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, (67), 144-169. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.67-2.6>

NENGOUE, U., & Aurèle, U. (2015). Caracterización de vertederos hidráulicos mediante técnicas cfd. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/275615021.pdf>

Sillick, J.M & Jacobi, W.R. (2013). Raíces Sanas y árboles sanos. Recuperado de <https://extension.colostate.edu/docs/pubs/spanish/02926.pdf>

- ONU. (2020). El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático. (2020, diciembre 1). Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732>
- Pérez Salazar, R., Alfaro Chinchilla, C., Sasa Marín, J., & Agüero Pérez, J. (2013). Evaluación del Funcionamiento de un Sistema Alternativo de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Uniciencia*, 27(1), 332-340.
- Presidencia de la República de Costa Rica. (2016, marzo 17). Planta de tratamiento Los Tajos genera beneficios adicionales al saneamiento. Presidencia de la República de Costa Rica. <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2016/03/planta-de-tratamiento-los-tajos-genera-beneficios-adicionales-al-saneamiento/#:~:text=Esta%20planta%20cuenta%20con%20la,seg%C3%BAn%20los%20planes%20reguladores%20vigentes.>
- Reutelshöfer, T., y Guzmán Bejarano, L. F. (s.f.). Guía para la toma de muestras de agua residual. SENASBA. Depósito Legal: 4-1-149-15 P.O. ISBN: 978-99974-47-91-3. Recuperado de [https://www.bivica.org/files/5376\\_aguas-residuales-muestra.pdf](https://www.bivica.org/files/5376_aguas-residuales-muestra.pdf)
- Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*, 1(1), 8-15.
- UNICEF. (2020). Día Mundial del Agua: 1.000 niños mueren cada día por falta de agua potable. Recuperado de <https://www.unicef.es/noticia/dia-mundial-del-agua-1000-ninos-mueren-cada-dia-por-falta-de-agua-potable>
- Venegas, C. (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 [Tesis, Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2020/12/TFG-JohelVenegasCastillo.pdf>
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. París, UNESCO.

## ANEXOS

### *Anexo 1: Carta de acuerdo entre Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos (PTAR Los Tajos) del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AYA)*

#### **Carta de Acuerdos para la realización Práctica profesional de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos (PTAR Los Tajos), del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AYA).**

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos (PTAR Los Tajos), como parte de su programa de Investigación y Desarrollo establece relaciones con la Escuela de Ingeniería de Biosistemas, de la Universidad de Costa Rica, para el desarrollo de la Práctica profesional en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas por la estudiante Hazel Quirós Arroyo, cédula 6 0453 0276. Esta práctica se efectuará de agosto del 2023 a junio del 2024.

#### **Alcance de la cooperación**

Sujeto a mutuo acuerdo y a razón de la ejecución de este proyecto, la cooperación se ha de llevar a cabo mediante el cumplimiento de las siguientes actividades, para cada una de las partes involucradas.

#### **La PTAR Los Tajos:**

- Permitir el acceso a los sitios establecidos dentro de las instalaciones de la PTAR Los Tajos de forma bimodal (presencial y no presencial). En caso de virtualidad se apoyará con acceso a imágenes, documentación autorizada, videos y video llamadas, visitas, recorridos para realizar la observación de procesos a la PTAR Los Tajos con previa coordinación con los encargados de la planta.
- Las áreas de Mantenimiento y Calidad y Gestión Ambiental en apoyo de otras áreas de la PTAR Los Tajos darán apoyo a los practicantes con los recursos disponibles por la Institución para que en conjunto se realice el cumplimiento de los objetivos planteados.
- Permitir acceso a documentos históricos de uno u dos años sobre análisis químicos y biológicos del efluente, principalmente datos de DQO y DBO, así como su caudal.
- Para el sitio de estudio, permitir acceso de pruebas de tipo de suelo.
- Para el sitio de estudio, permitir acceso de planos del terreno con linderos y proyecciones de huella constructiva del tratamiento secundario.

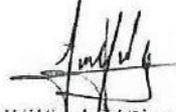
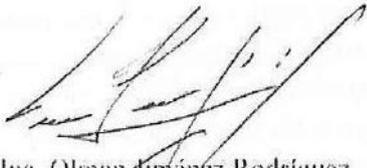
#### **El estudiante que desarrolla la práctica profesional:**

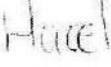
- Respetar los lineamientos de Salud y Seguridad Ocupacional que establezca el AYA en sus instalaciones.
- Realizar análisis de los datos de contaminantes presentes en el efluente de la PTAR Los Tajos, otorgados por la institución.
- Elaborar un diseño de humedales artificiales como tratamiento secundario complementario para un caudal menor del efluente de la PTAR Los Tajos.

**Figura 61.** Parte A carta de acuerdos establecidos por las partes interesadas

Para este documento de entendimiento las partes involucradas designa a los siguientes representantes para desarrollar las actividades específicas de la práctica profesional:

Firmado en la ciudad de San José, el día 17 julio del 2023.

<p>Por la Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas</p>	<p>Por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos</p>
 <p>Dr. Ronald Esteban Aguilar Álvarez Docente supervisora la Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas Tel. 8522 9553 correo: ronalddesteban.aguilar@ucr.ac.cr</p>	 <p>Lic. Wilfred Zúñiga Castro Encargado del Área de Calidad y Gestión Ambiental PTAR Los Tajos Tel. 2543-6612. correo: wzuniga@aya.go.cr</p>  <p>Ing. Olman Jiménez Rodríguez Director, PTAR Los Tajos Dpto. OMST, Dir. RyT GAM</p>

<p>Estudiante Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas</p>
 <p>Hazel Quiros Arroyo Estudiante Práctica en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas</p>

**Figura 62.** Parte B carta de acuerdos establecidos por las partes interesadas

**Anexo 2: Marco teórico tablas de ventajas y desventajas de los tipos de HAFSS**

**Tabla 1.**

*Ventajas de los tipos de HAFSS*

<b>Flujo subsuperficial horizontal</b>	<b>Flujo subsuperficial vertical</b>
1. Alta remoción de DBO, DQO y sólidos suspendidos totales (Arteaga-Cortez et al., 2019)	1. Acelera la difusión de oxígeno y aumenta la depuración de DQO y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , debido a que presenta una mejor mezcla en el lecho del humedal (Arteaga-Cortez et al., 2019)
2. Presenta remoción adicional de fósforo y amonio, cuando se emplea suelo (Arteaga-Cortez et al., 2019)	2. Permite la restauración aeróbica, favoreciendo la nitrificación (Arteaga-Cortez et al., 2019)
3. Soportan fluctuaciones de flujo o intermitencias (Calheiros, 2007)	3. Favorece la restauración de condiciones aeróbicas y el amonio es adsorbido (Arteaga-Cortez et al., 2019)
4. Favorece la desnitrificación, ya que proporciona condiciones anoxias (Arteaga-Cortez et al., 2019)	
5. Flujo continuo	

**Tabla 2.**

*Desventajas de los tipos de HAFSS (Arteaga-Cortez et al., 2019)*

<b>Flujo subsuperficial horizontal</b>	<b>Flujo subsuperficial vertical</b>
1. Menor eliminación de nutrientes	1. Susceptible a la obstrucción, por lo tanto, requiere una alimentación limitada a 25 g DQO/ m <sup>2</sup> al día
2. Requieren mayor espacio para la construcción	2. Se recomienda usar sistema de forma rotatoria
3. Mantenimiento con personal capacitado	3. Mantenimiento con personal capacitado
	4. Eficiencia depende de la aireación, el sustrato



SISTEMA DE TRATAMIENTO  
SECUNDARIO CON  
**HUMEDALES  
ARTIFICIALES**

Operación y Mantenimiento

**2025**



Elaborado por  
Hazel Quirós Arroyo



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

**EIB**

Escuela de  
**Ingeniería de Biosistemas**



INSTITUTO COSTARRICENSE DE  
ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

# ÍNDICE

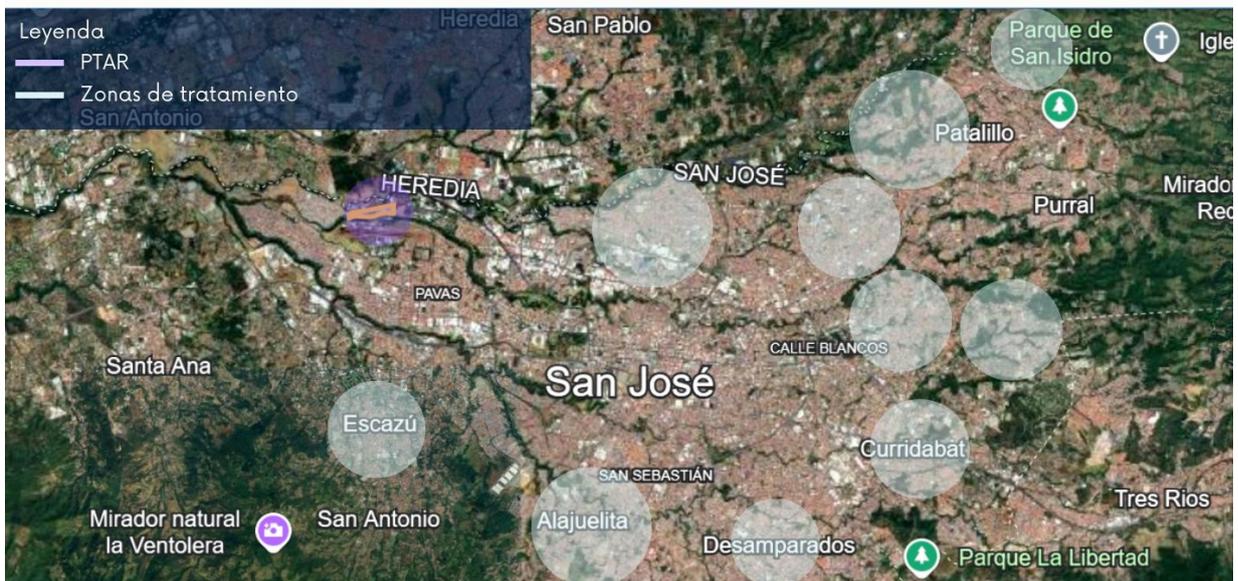


- 01. Generación de aguas residuales**
- 02. Sistema de tratamiento propuesto**
  - 02.1 Tanque de distribución
  - 02.2 Humedales
  - 02.3 Vertedor
  - 02.4 Tanque de almacenamiento
  - 02.5 Riego
- 03. Ingeniería básica de diseño**
- 04. Implementación del sistema y arranque.**
- 05. Operación**
  - 05.1 Control operacional
  - 05.2 Equipo
  - 05.3 Personal
- 06. Posibles problemas**
- 07. Mantenimiento**
  - 07.1 Tanque de distribución, vertedero y tanque de almacenamiento
  - 07.2 Humedales artificiales
  - 07.3 Canales de riego
- 08. Desechos**
- 09. Reportes operacionales**
  - 08.1 Datos Generales
  - 08.2 Disposición de las aguas residuales
  - 08.3 Medición de caudales
  - 08.4 Resultados de las mediciones de parámetros por parte del ente generador
  - 08.5 Resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos
  - 08.6 Evaluación de las unidades de tratamiento
  - 08.7 Plan de acciones correctivas
  - 08.8 Registro de producción
  - 08.9 Nombre y Firma del Responsable Técnico del Reporte y Propietario o Representante Legal

## 01. Generación de aguas residuales

La planta de tratamiento Los Tajos, ubicada en la Uruca, dio inicio con sus labores en el 2015 con capacidad para brindar tratamiento a las aguas residuales de 1070 000 habitantes; sin embargo, en su primera etapa ofreció tratamiento a 36.000 conexiones de usuarios.

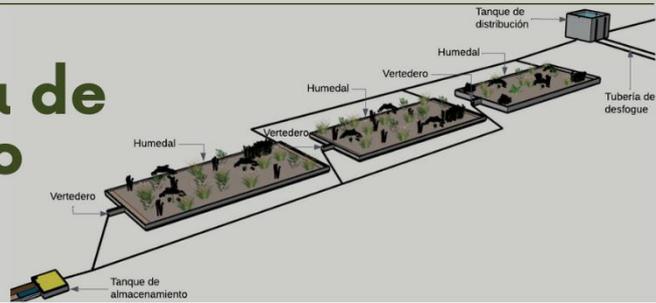
En el proyecto se ven beneficiados los cantones de San José como Escazú, Desamparados, Alajuelita, Tibás, Montes de Oca, Moravia, Goicoechea, Vásquez de Coronado, la Unión y Curridabat



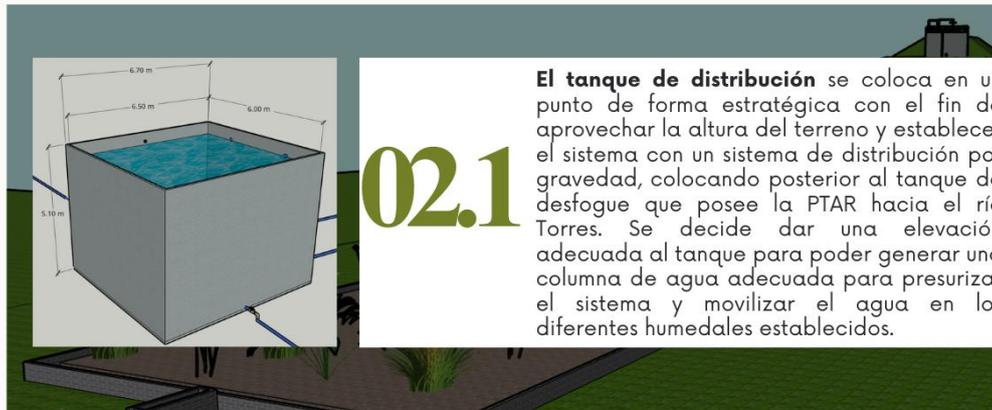
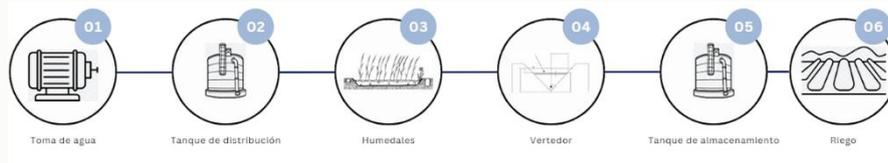
Dentro de las aguas que recibe la planta, trata aguas ordinarias o domésticas y se clasifican de acuerdo con la actividad que las genera en aguas negras (materia fecal) y aguas grises (baños, cocinas, lavanderías, entre otros). Sumado a esto trata las aguas especiales que corresponden a líquidos generados en los procesos industriales o comerciales.

### TIPOS DE AGUAS TRATADAS

## 02. Sistema de tratamiento propuesto

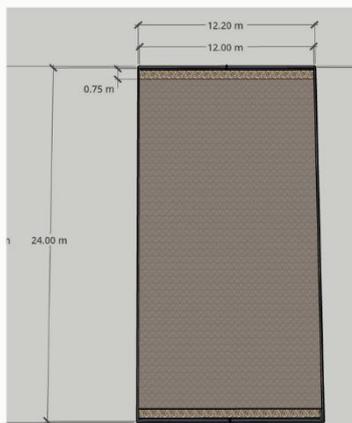


De acuerdo a la necesidad de la PTAR de regar una zona de reforestación en la ribera del río Torres, se plantea un sistema de tratamiento secundario por medio de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Para esto, en primera instancia se establece un tanque de distribución, posterior a cada uno de los sistemas de tratamiento, se plantea colocar un vertedero, un tanque de almacenamiento, para finalmente utilizar el agua tratada en riego de la zona en reforestación:



### 02.1

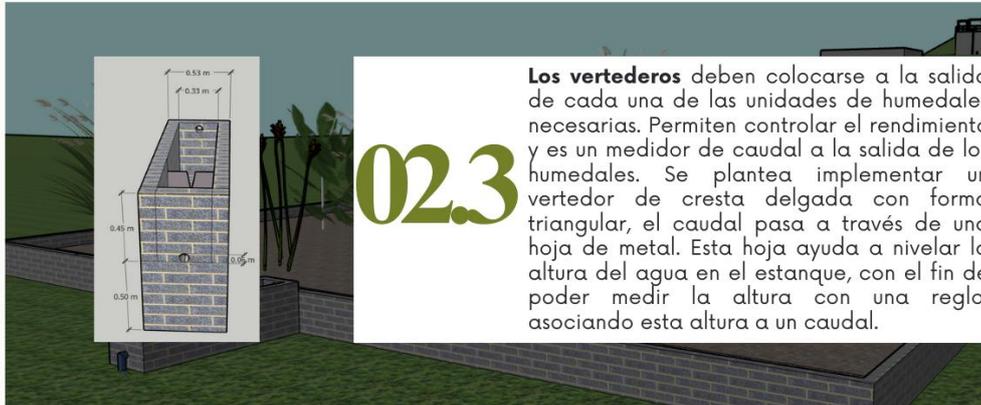
**El tanque de distribución** se coloca en un punto de forma estratégica con el fin de aprovechar la altura del terreno y establecer el sistema con un sistema de distribución por gravedad, colocando posterior al tanque de desfogue que posee la PTAR hacia el río Torres. Se decide dar una elevación adecuada al tanque para poder generar una columna de agua adecuada para presurizar el sistema y movilizar el agua en los diferentes humedales establecidos.



### 02.2

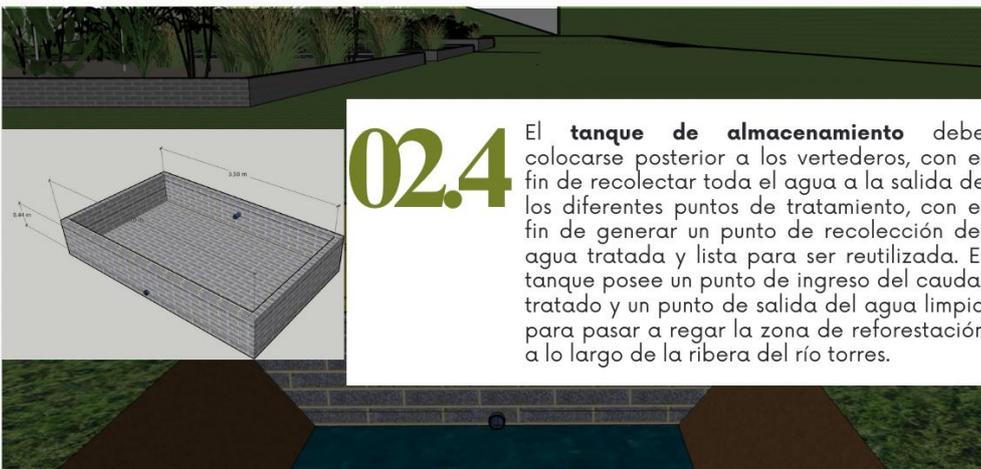
**Los humedales artificiales** corresponden a la sección del sistema donde se realiza el tratamiento secundario establecido con el fin de realizar la remoción de la materia orgánica. Gracias a que la PTAR posee una primera etapa correspondiente a un sistema de tratamiento primario en donde se realiza una remoción de sólidos de gran tamaño y sólidos suspendidos, por lo que el agua que ingresa en los humedales posee materia orgánica disuelta que no fue posible eliminar por medio de procesos físicos.

Los humedales artificiales poseen diferentes niveles de tratamiento como remoción física, remoción biológica y remoción química.



## 02.3

Los **vertederos** deben colocarse a la salida de cada una de las unidades de humedales necesarias. Permiten controlar el rendimiento y es un medidor de caudal a la salida de los humedales. Se plantea implementar un vertedor de cresta delgada con forma triangular, el caudal pasa a través de una hoja de metal. Esta hoja ayuda a nivelar la altura del agua en el estanque, con el fin de poder medir la altura con una regla, asociando esta altura a un caudal.



## 02.4

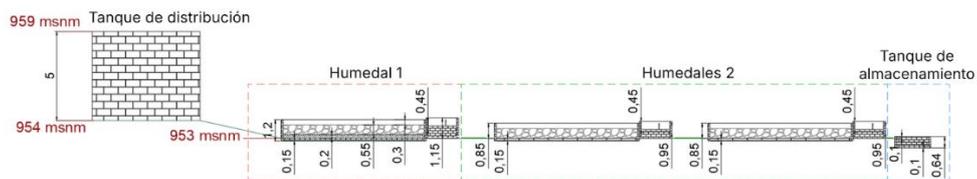
El **tanque de almacenamiento** debe colocarse posterior a los vertederos, con el fin de recolectar toda el agua a la salida de los diferentes puntos de tratamiento, con el fin de generar un punto de recolección del agua tratada y lista para ser reutilizada. El tanque posee un punto de ingreso del caudal tratado y un punto de salida del agua limpia para pasar a regar la zona de reforestación a lo largo de la ribera del río Torres.



## 02.5

Posterior al tanque de almacenamiento se debe colocar el **sistema de riego** de la zona en reforestación que posee la PTAR. El sistema propuesto corresponde a canales de riego por gravedad, el cual contempla un canal de riego principal del cual se generan derivaciones de canales más pequeños, con el fin de lograr una buena distribución del caudal a lo largo de la zona de reforestación.

## 03. Ingeniería básica de diseño



Todo el diseño del sistema está basado en obtener la cantidad de caudal necesaria para abastecer la zona de reforestación, de acuerdo a esto se establece la cantidad de humedales necesarios y el dimensionamiento de las demás estructuras. Cada una de las estructuras son rectangulares y se transporta el caudal de un punto al otro mediante tubería pvc.

### Dimensiones de estructuras

En el siguiente recuadro se presenta un resumen de las dimensiones de cada una de las estructuras. Cada una de las dimensiones especificadas corresponden a las medidas establecidas de acuerdo al diseño estructural de cada obra civil, es importante respetar cada una de las alturas y profundidades establecidas ya que esto permite que el sistema funcione de forma correcta:

Estructura	Altura (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Profundidad (m)
Tanque de distribución	5	6,70	6,20	175,5	0,10
Humedal 1 y Humedales 2, 3	1,21	24,20	12,20	158,4	0,15
Vertedor 1 y vertedor 2, 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,15</li> <li>• 0,95</li> </ul>	1,8	0,53	NA	0,15
Tanque de almacenamiento	0,64	3,70	2,20	1,54	0,54

Por otro lado, el sistema posee una capacidad de procesamiento de caudal máximo diario de 170, 54 m<sup>3</sup>/día y horaria de 7,11 m<sup>3</sup>/h.



## 04. Implementación del sistema y arranque.

En la construcción de cada una de las estructuras se deben respetar todas dimensiones y alturas. Para la construcción de los humedales se debe tener especial cuidado en algunos aspectos como impermeabilización, plantas y sección de filtración.

Para la impermeabilización del terreno se recomienda una buena compactación del terreno y utilizar una geomembrana sobre el terreno. Esta práctica busca evitar la contaminación de aguas subterráneas y es necesario efectuar en taludes en entrada y salida de los laterales y en el fondo de la celda. En este caso solo se debe colocar en el fondo del área, ya que se diseñó sobre el nivel de terreno.



En el proceso de su colocación se debe tener especial cuidado evitando que queden arrugas, zonas sin recubrimiento o bien generar huecos al tensar en exceso el material. Se recomienda además de colocar la geomembrana, colocar sobre esta un geotextil.

Posterior a la impermeabilización se pasa a agregar el medio filtrante. Se basa en una cama de arena y grava, la cual funciona como sustento de la vegetación empleada.

El medio filtrante debe tener los diámetros adecuados para que no se generen obstrucciones en el flujo y que el tiempo de retención sea el adecuado.

Para el caso de la zona de plantación se conforma con grava más pequeña, con diámetros entre 3 mm y 32 mm.



sobre todo en el ancho y profundidad del lecho. Esta debe tener diámetros entre 50 mm a 100 mm.

Se recomienda construir un pequeño dique al inicio y salida del lecho, para garantizar que las aguas residuales se distribuyan de manera uniforme

La vegetación implementada en el sistema favorece la oxigenación de la rizosfera, ayuda en la interacción bacteriana y la eliminación de nutrientes por extracción/absorción. Sus raíces ayudan en la



conductividad hidráulica del sustrato y el crecimiento de las colonias de bacterias que forman un biofilm adherido a la superficie de las raíces

La plantación corresponde a la última etapa en la construcción de los humedales. La plantación debe realizarse cuando el medio filtrante

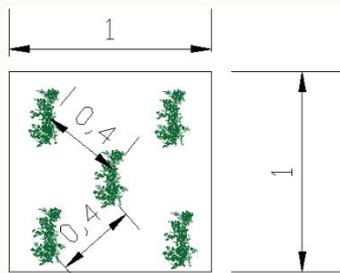


ha sido colocado y nivelado, todo el sistema de conducción debe encontrarse conectado y se han realizado pruebas de su funcionamiento hidráulico.

Se cultivan plantas como platanillo (*Heliconia wagneriana*), avecilla (*Heliconia psittacorum*) y la caña agria (*Costus speciosus*), corresponden a una excelente opción a implementar en humedales artificiales, ya que estas son plantas tropicales.



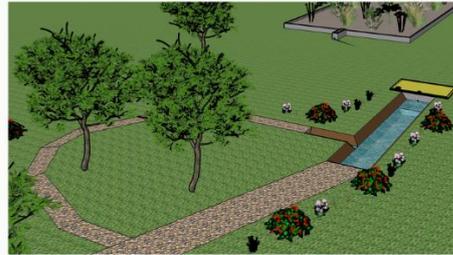
Se recomienda mantener una separación de 40 cm entre plantas y una densidad de 8-9 plantas por m<sup>2</sup>, además de esto, a la hora de sembrar las plantas se recomienda mantener un arreglo triangular



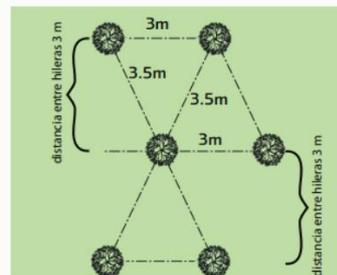
Una vez finalizada la construcción de cada una de las estructuras es importante recordar que para arrancar la bomba centrífuga de succión colocada sobre el tanque de desfogue se debe cebar de forma correcta, para que esta no arranque sin fluido en su sistema, logrando evitar así reducir la vida útil de la misma.

Se debe tener en cuenta que el tanque de distribución debe primero alcanzar su límite máximo de altura de 4,5 m, una vez obtenida esta altura se puede abrir la válvula globo roscada en su totalidad para que de esta forma arranque el funcionamiento de todo el sistema de tratamiento. Es importante que el tanque de distribución alcancé esta altura para poder obtener la columna de agua necesaria para presurizar la tubería de distribución, obteniendo presiones y velocidades adecuadas.

Se plantea colocar una cerca viva alrededor del canal, con el fin de limitar el paso personas y evitar que se camine sobre el mismo, se plantea que esta cerca viva sea con plantas que atraen a polinizadores, permitiendo sumar al ambiente.

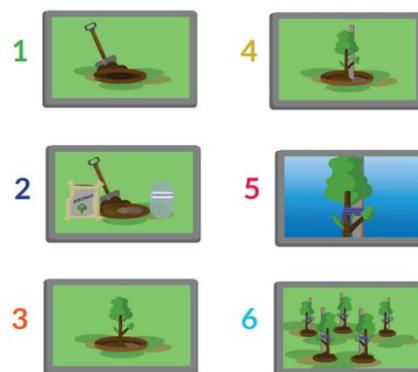


En la zona de reforestación a la hora de sembrar los árboles se recomienda una distribución de tres bolillos. Esta configuración es altamente recomendada tanto para terrenos planos como para aquellos con pendiente.



La selección de árboles es de vital importancia y se recomienda realizar un estudio del tipo de árboles a sembrar en

el área de reforestación, para no afectar negativamente el ecosistema local. Para la reforestación se recomienda seguir el siguiente procedimiento:



## 05. Operación

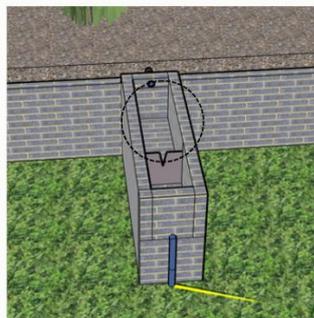
En el siguiente apartado se presentan todas las aristas necesarias para asegurar una correcta operación del sistema, desde el personal, equipo necesario, así como aquellas tareas que se deben realizar para asegurar su correcto funcionamiento.

### 05.1 Control operacional

En los humedales se deben realizar inspecciones diarias en el humedal para asegurar que este no presenta rebalses sobre el nivel superficial de la grava, ya que esto estaría relacionado con algún tipo de obstrucción en las tuberías de salida o bien en el medio filtrante. Sumado a esto es necesario revisar que la capacidad de tratamiento en cuanto al caudal es el esperado, para esto se deben realizar lecturas en el vertedor triangular de cresta delgada.



Tanto la tubería de ingreso y salida de caudal de salida se encuentran en la sección de 0,75 m de ancho que posee piedra bola.



Para realizar la medición de caudal en el vertedor se establece una relación entre el nivel del agua en el canal y el caudal que presenta el sistema en ese momento. Para esto se debe medir la sección del canal que se encuentra antes de la hoja de metal, el procedimiento es muy sencillo, solo se debe ingresar una regla de forma vertical con el valor cero en el extremo inferior de la regla que ingresa al canal.



Tanto la tubería de ingreso y salida de caudal de salida se encuentran en la sección de 0,75 m de ancho que posee piedra bola.

### 05.2 Equipo

Dentro del equipo de trabajo se encuentra el equipo de protección del personal para poder realizar labores de inspección. Es de suma importancia brindar este equipo al personal, así como generar una cultura de seguridad donde los operarios comprendan la importancia del mismo y eviten poner su salud en riesgo por proactividad o aumentar la velocidad de las labores, ya que se manipulan aguas con agentes biológicos que pueden llegar a ser perjudiciales para la salud. A continuación se menciona el equipo necesario, así como su importancia:



Botas de hule



Pantalones y camisa manga larga



Lentes de seguridad



Mascarilla



Guantes de nitrilo

Sumado a esto el personal debe contar con buena hidratación y protección al sol, utilizando sombreros de ala ancha y bloqueador solar. Es importante que en la planta de cuenta con una ducha para que posterior a cada jornada el funcionario pueda darse una ducha y evitar el transporte de microorganismos.



Además del equipo de protección es necesario que los operarios cuenten en equipo de jardinería para poder manipular las plantas que se encuentran sembradas en el medio filtrante del humedal, a continuación se presentan estas herramientas básicas:



Rastrillo, carretilla, una pala para remover restos de vegetación o bien el caso de tener que sembrar nuevos árboles en la zona de reforestación. Sumado a esto se menciona una hidrolavadora, que no corresponde a una herramienta de jardinería, pero en este caso que las plantas están sembradas en un sustrato de piedra, la hidrolavadora juega un papel importante en caso de obstrucciones.

### 05.3 Personal

Como se mencionó en el apartado anterior, las tareas de operación no impactan significativamente la saturación del personal de la PTAR, por lo que se asume que estas labores pueden ser asumidas por el personal que posee actualmente la institución. Acompañados previamente de una explicación del funcionamiento del sistema para evitar confusiones, eliminar ideas falsas y generar un sentimiento de pertenencia sobre el proyecto de revalorización del agua residual en riego.

## 06. Posibles problemas

Se recomienda llevar un registro de las diferentes incidencias en los diferentes puntos que se presente, así como las medidas correctivas implementadas. Esto con el fin de generar una base de datos de buenas prácticas, puntos críticos tanto del sistema secundario propuesto, así como identificar posibles problemas aguas arriba en el tren de tratamiento.

Uno de los principales problemas que se pueden presentar es desbordamiento de los humedales artificiales por acumulación de materia orgánica entre los espacios disponibles de la grava utilizada como medio filtrante es recomendable extraer la zona afectada y realizar un lavado de las rocas utilizando la hidrolavadora y posteriormente regresar el material a su lugar original. Por otro lado, en caso de presentar problemas con las plantas debido a factores climáticos extremos o bien experimentar algún tipo de plagas, se recomienda sustituir la planta.

Un posible problema es la obstrucción de las tuberías, debido a sólidos suspendidos. Es importante tener en cuenta que no se deben usar desatoradores, puesto que puede afectar a la vegetación de los humedales, la recomendación es cambiar accesorios.



En caso de presentar desbordamientos por colmatación, por acumulación de partículas suspendidas, es necesario atacar el problema extrayendo el sustrato y lavándolo con hidrolavadora, posterior se recoloca el medio filtrante en el sistema.

Además de esto se debe investigar y plantear una solución para disminuir la cantidad de sólidos suspendidos en el agua.



Se pueden tener problemas con la vegetación por condiciones ambientales extremas, plagas o bien animales que ingresan al sistema.



Se recomienda remover la planta y sustituir por otra para evitar afectaciones en el proceso de reducción de contaminantes del sistema, puesto que es importante contar con una buena distribución de raíces en el lecho de filtración.

Para reducir problemas con la vegetación se recomienda que las plantas a colocar se encuentren adaptadas al clima de la zona.



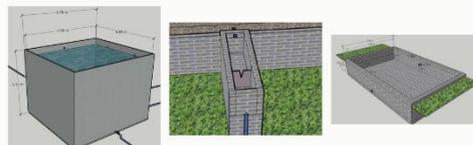
Una vez arrancado el sistema para evitar afectaciones en la vegetación. No debe permitirse que la raíces de las plantas se queden sin alimentación de agua. Un buen parámetro y comportamiento es que el nivel del agua se encuentre 5 cm por debajo de la superficie del medio filtrante.

## 07. Mantenimiento

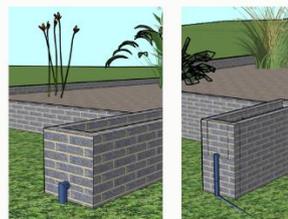
En el siguiente apartado se presenta el mantenimiento que le debe aplicar a cada una de las estructuras que forman parte del sistema de tratamiento, con el fin de procurar tener un sistema trabajando en óptimas condiciones, logrando asegurando su correcto funcionamiento y alargando su vida útil:

### 07.1 Tanque de distribución, vertedero y tanque de almacenamiento

Dichas estructuras corresponden a estructuras de paso o bien se encarga de almacenar el agua residual que se redirecciona a lo largo del sistema de tratamiento secundario propuesto. El flujo se moviliza por el método por gravedad, por lo que las tareas de mantenimiento son reducidas, sin embargo, se recomienda una vez al año realizar inspecciones infraestructurales para asegurar que no se tengan fugas o acumulación de sedimentos que me generen obstrucciones.



Cada una de las tuberías de salida de agua de los tanques se encuentran en la parte más baja de la estructura ayudando a no obtener un espacio de acumulación de sedimentos en el fondo del mismo. Pero a la hora de mantenimiento es bueno revisar y desacoplar la tubería de salida para extraer sedimentos en caso de que exista una pequeña acumulación.



### 07.2 Humedales artificiales

Las tareas de mantenimiento en los humedales se basan en realizar inspecciones rutinarias. Se debe revisar que no haya fugas en la tubería de distribución:



En estos casos se recomienda cerrar la válvula más cercana para poder realizar mantenimiento en el tramo de tubería correspondiente. Es importante que independientemente del tramo de tubería (antes o después de los humedales) donde se trabaje se debe utilizar todo el equipo de protección correspondiente. Evaluar el daño, cambiar los accesorios en caso de ser necesario y revisar el motivo de la posible fuga si es por aumento de presión o golpes.



Se debe monitorear el sustrato del humedal, verificar que no existan rutas de distribución preferenciales, con el fin de asegurar que se distribuya uniformemente y revisar si se presenta encharcamiento de manera superficial.

El encharcamiento se debe a la colmatación del lecho filtrante (ver siguiente figura), debido a la saturación del mismo por partículas en suspensión del agua residual. Este problema

evidencia un mal tratamiento aguas arriba, para habilitar el funcionamiento del humedal se debe extraer el sustrato y limpiarlo con ayuda de una hidro lavadora y volver a colocarlo en su lugar.



Un lecho filtrante en buenas condiciones debe apreciarse sin encharcamientos y sin rutas preferenciales, como se muestra en la siguiente figura:



### 07.3 Canales de riego

Se debe evitar acumulaciones que me generen obstrucciones y limiten el movimiento del flujo. Los canales son sin revestimiento, por lo que puede llegar a ocurrir el crecimiento de vegetación a lo largo de su perfil:



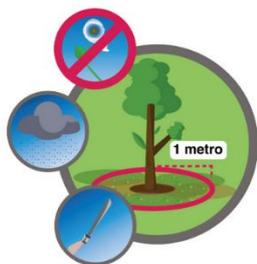
Sumado al crecimiento de vegetación se pueden presentar problemas de obstrucciones por erosión de los taludes o bien por arrastre de sedimentos. Para esto se debe realizar un control de maleza por medio de podas y

retiro de sedimentos, para alargar la vida útil de los mismo y no disminuir su capacidad hidráulica.

Como parte del mantenimiento de la zona de reforestación se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

### 07.3.1 Rodaje

Mínimo 1 m de radio, en primeras etapas realizar con herramientas manuales, una vez el árbol se ha establecido se puede emplear



deshierbador ecológico. Se recomienda realizar al menos de tres a cuatro veces por año, prestando especial atención en época lluviosa.

### 07.3.2 Podas sanitarias y de mantenimiento

Realizarse con el acompañamiento de un ingeniero forestal. Programar como mínimo una vez al año, o de acuerdo a las



características de cada especie y con el uso de herramientas manuales como podadoras de mano o extensibles. Posterior a la poda se debe aplicar la pasta desinfectante selladora, con el objetivo de evitar el ingreso de agentes patógenos, bióticos o abióticos, al árbol.



## 09. Reportes operacionales

El artículo 5 del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (N°33601-MINAE), establece que aquellos entes generadores en los cuales el efluente es vertido a un cuerpo receptor o alcantarillado sanitario, infiltrado o reusado, deben presentar un reporte operacional periódicamente al Ministerio de Salud.

El reglamento establece que el reporte operacional debe ser elaborado y firmado por el representante legal del ente generador y por el Responsable Técnico. En la sección de anexos se puede encontrar un machote del reporte de operaciones, basado en el que se presenta en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

## 08. Desechos

El principal desecho que se generan corresponden al deshierbe. En humedales de flujo superficial la cosecha o corte se realiza para evitar la incorporación de materia orgánica adicional al agua y el reciclado de nutrientes absorbidos por las plantas, se recomienda hacer el deshierbe durante el primer año.