

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN BIOSISTEMAS

**Diseño preliminar de un humedal artificial para tratar el efluente generado en el
proceso productivo de un ingenio azucarero localizado en Alajuela**

Trabajo Final de Graduación bajo modalidad de práctica dirigida, sometido ante la
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Como parte de los requisitos para optar por el título de grado de:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

Sofía Solís Núñez

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

2023

Trabajo Final de Graduación bajo modalidad de práctica dirigida, sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Ing. Sofía Solís Núñez

Candidata

Ing. Ronald Aguilar Álvarez, Ph.D.

Director, Comité Asesor

Econ Agr. Olga María Calvo Hernández, MBA

Ing. Natalia Montero Rambla, Lic

Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D.

Miembro, Tribunal Examinador

Ing. Juan Benavides Valverde, Lic

Miembro, Tribunal Examinador

Dedicatoria

A Dios por guiarme y acompañarme en toda mi vida universitaria, así como ser mi fuente de apoyo, tranquilidad y sabiduría.

A mi madre y abuela, Marianela y Gladys, por ser mis pilares y fuentes de motivación para seguir adelante.

A mi novio, Diego, por siempre creer en mí, apoyarme y motivarme en todos mis proyectos personales y universitarios.

A mi prima, Maria Paula, por todas las palabras de aliento y motivación, así como estar presente en todo momento.

A mi amigo, Edwin, por acompañarme en el proceso universitario y hacer de los momentos difíciles un recuerdo grato y divertido.

Agradecimiento

A mi familia por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y apoyarme en todos mis sueños y metas. Por todos los principios, valores, consejos y palabras de apoyo que me dieron a lo largo de todos estos años.

Al profesor Ronald Aguilar Álvarez, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo final de graduación, aconsejarme y guiarme en todo este proceso.

A la empresa por abrirme las puertas y desarrollar el trabajo en sus instalaciones, así por apoyarme en la realización de este y hacerme sentir a gusto.

A las profesoras Olga María Calvo Hernández y Natalia Montero Rambla por el tiempo invertido y las recomendaciones que aportaron durante el desarrollo del trabajo.

A Ensio Pérez por la colaboración en el transporte de materiales para el desarrollo del proyecto y estar atento mientras hacía uso del laboratorio.

A la Escuela de Ingeniería de Biosistemas por apoyarme en todos los requerimientos del trabajo final de graduación, así como por la formación académica.

A todas aquellas personas que formaron parte de mi vida universitaria y que dejaron un recuerdo memorable en mi vida.

A la Universidad de Costa Rica por todas las enseñanzas personales y profesionales.

Resumen

La industria azucarera se caracteriza por verter cantidades considerables de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica y contaminantes que los obliga a implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales, previo al vertido en los cuerpos de agua.

El presente estudio se realizó en un ingenio azucarero localizado en Alajuela, que se caracteriza por implementar diferentes acciones para reducir su impacto ambiental, como lo es una planta de tratamiento para sus vertidos. Si bien la empresa ya cuenta con un sistema de tratamiento, se tiene la oportunidad de mejorar el sistema. A partir de ello, el objetivo de este estudio consistió en realizar el diseño preliminar de un humedal artificial para reducir la concentración de los contaminantes en el efluente y propiciar un biosistema que atraiga fauna y armonía con el medio ambiente.

El primer objetivo específico consistió en la identificación de las etapas y componentes del sistema de tratamiento actual, la determinación del caudal que ingresa al sistema y la caracterización fisicoquímica del agua residual. Por lo que se tuvo como resultados, que el sistema de tratamiento de aguas residuales se encuentra conformado por un tratamiento preliminar, primario y secundario, así como una pila de lodos.

Además, se determinó que el caudal promedio en actividad productiva es de 0,26 L/s, lo que brinda tiempos de retención hidráulica de 5 horas para el decantador primario y de 13 horas para el secundario. En cuanto a la caracterización fisicoquímica del agua residual, se obtuvo que se cumple con la mayoría de los límites establecidos por el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (decreto N° 33601), exceptuando la materia orgánica y la concentración de pH.

El segundo objetivo específico tuvo como finalidad diseñar y construir modelos de los humedales artificiales a escala laboratorio. A partir de ello, se elaboraron seis humedales subsuperficiales de flujo vertical plantados con *Heliconia Psittacorum* (avecilla), donde tres modelos se alimentaron con el efluente del tratamiento primario y los restantes tres con el efluente del tratamiento secundario. Entre los resultados se obtuvo que los modelos primarios lograron remover un 86,7 % de DQO, 12,5 % de N_T y 62,5 % de PO_4^{3-} , mientras que los modelos secundarios alcanzaron remociones de 58,4 % de DQO, 25,2 % de N_T y 82,6 % de PO_4^{3-} .

El tercer objetivo específico consistió en el escalamiento del diseño preliminar del humedal. Para ello, con los datos generados con los modelos secundarios, se determinó la constante de velocidad de remoción de primer orden para las condiciones presentes a la zona y se tomó en cuenta la concentración de materia orgánica presente en el agua residual y el área disponible para realizar los humedales. Lo anterior dio como resultado que se debe implementar dos humedales subsuperficiales de flujo vertical en paralelo, cada uno de 38 m², de 1,5 m de altura y alimentados con un caudal de 0,9 m³/d.

Por último, el cuarto objetivo específico tuvo como finalidad estimar la inversión de la construcción de los humedales artificiales y las estructuras complementarias. Para ello, se determinó la cantidad de los elementos a requerir y se cotizaron en diferentes puntos de venta. Además, se incluyó la mano de obra requerida, los permisos municipales y servicios de agua y electricidad. En cuanto a los resultados, se obtuvo que el proyecto requiere una inversión de 15 128 615,09 CRC, lo que corresponde a 28 388,69 USD con un tipo de cambio de 532,91 CRC para el día 20 de mayo del 2023.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ABREVIATURAS	9
INDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE CUADROS	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Justificación	12
1.2 Delimitación del problema.....	14
1.3 Objetivos	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 Aguas residuales	15
2.2 Industria azucarera: Aguas residuales y plantas de tratamiento	16
2.3 Normativa Nacional	17
2.4 Tratamiento de aguas residuales	18
2.5 Humedales artificiales.....	19
2.5.1 Componentes que integran al sistema	19
2.5.2 Clasificación de los humedales artificiales	21
2.5.3 Ventajas y desventajas	23
2.5.4 Diseño.....	24
2.5.5 Investigaciones previas de humedales artificiales en industria azucarera.....	25
2.6 Caracterización de la empresa en estudio	27
3. METODOLOGÍA	28
3.1 Alcances y limitaciones	28
3.2 Caracterización de la zona de estudio.....	28
3.3 Caracterización y evaluación del sistema de tratamiento	28
3.4 Construcción y evaluación de los modelos de humedales artificiales	29
3.4.1 Diseño de los modelos de los humedales artificiales	29
3.4.2 Funcionamiento del sistema	33
3.4.3 Evaluación de los modelos de humedales artificiales	34
3.4.4 Análisis estadístico	35
3.5 Escalamiento del diseño preliminar del humedal artificial.....	35
3.6 Inversión asociada a la construcción del humedal artificial	35
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1 Caracterización y evaluación del sistema de tratamiento	37
4.2 Evaluación de los modelos de humedales artificiales en la remoción de contaminantes	43
4.3 Escalamiento del diseño preliminar del humedal artificial.....	48
4.4 Inversión asociada a la construcción del humedal artificial	62

5	CONCLUSIONES	66
6	RECOMENDACIONES	68
7	LIMITACIONES	69
8	REFERENCIAS	70
9	APÉNDICES	79

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

S.Susp Sólidos suspendidos

S.Sed Sólidos sedimentables

pH Potencial de hidrógeno

DQO Demanda química de oxígeno

DBO Demanda Bioquímica de Oxígeno

NO₃- Nitrato

NH₃- Nitrógeno amoniacal

N_T Nitrógeno total

PO₄³⁻ Fosfatos

HS Humedal superficial

HSS Humedal subsuperficial

HSSFH Humedales subsuperficial de flujo horizontal

HSSFV Humedales subsuperficial de flujo vertical

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Clasificación de los humedales artificiales [45].	21
Fig. 2. Humedal artificial superficial, elaboración propia.	22
Fig. 3. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal, elaboración propia.	22
Fig. 4. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical, elaboración propia.	23
Fig. 5. Diseño de sistema de drenaje de los modelos de humedales artificiales.....	30
Fig. 6. Diseño de sistema de riego de los modelos de humedales artificiales.	31
Fig. 7. Sustratos que se utilizaron en los modelos, piedra de río tipo canto rodado (izquierda), piedra cuarta de origen volcánico (centro) y granito de río (derecha).	32
Fig. 8. Diseño del sistema de plantación de los modelos de humedales artificiales.....	33
Fig. 9. Diagrama de flujo del sistema de sistema de tratamiento de aguas residuales, elaboración propia.	37
Fig. 10. Plano del sistema de tratamiento de aguas residuales, elaboración propia.	38
Fig. 11. Comportamiento del caudal para el escenario de producción, elaboración propia. ...	39
Fig. 12. Localización del sistema de modelos de humedales artificiales.....	43
Fig. 13. Distribución de la altura del humedal artificial, elaboración propia.	49
Fig. 14. Plano del sistema de alimentación y distribución de los humedales artificiales, elaboración propia.....	50
Fig. 15. Plano del sistema de drenaje de los humedales artificiales, elaboración propia.	52
Fig. 16. Distribución del sustrato en los humedales artificiales, elaboración propia.....	53
Fig. 17. Distribución de vegetación en los humedales artificiales, elaboración propia.....	53
Fig. 18. Plano de estructura de entrada de los humedales, elaboración propia.....	54
Fig. 19. Plano de estructura de salida de los humedales, elaboración propia.	56
Fig. 20. Plano de estructura de vertedero para aforo, elaboración propia.	58
Fig. 21. Plano del sistema de tratamiento de aguas residuales incluyendo humedales artificiales y estructuras complementarias, elaboración propia.	60
Fig. 22. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales incluyendo humedales artificiales y estructuras complementarias, elaboración propia.	61
Fig. 23. Distribución de la inversión del proyecto por sección, elaboración propia.....	65

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO I. Límites permisibles de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de la industria azucarera dispuestas en un cuerpo receptor [10].	18
CUADRO II. Principales características de los humedales superficial y subsuperficial [5]...23	
CUADRO III. Caracterización fisicoquímica del agua residual a lo largo de las etapas de tratamiento, Mediana \pm Desv.Est (Número de datos).....	41
CUADRO IV. Concentración de parámetros fisicoquímicos y eficiencias de remoción (% , valores entre paréntesis) de los modelos del tratamiento primario, (Promedio \pm Desv.Est), AR (n=10), Modelos (n=10).....	44
CUADRO V. Concentración de parámetros fisicoquímicos y eficiencias de remoción (% , valores entre paréntesis) de los modelos del tratamiento secundario, (Promedio \pm Desv.Est), AR (n=10), Modelos (n=10).	44
CUADRO VI. Inversión del proyecto para los escenarios propuestos (en colones).	64

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

La contaminación de los ríos se da por la incorporación de materiales de manera difusa o puntual en las aguas, ocasionando una alteración en la composición química y, por ende, en la calidad del agua [1]. A nivel mundial, se ha estimado que cada día llega un aproximado de dos millones de toneladas de residuos orgánicos y químicos a los ríos [2]. A nivel nacional el panorama es similar, según la Política Nacional de Saneamiento de Aguas Residuales el 54,7 %, de los efluentes industriales y el 84,0 % de los vertidos ordinarios se depositan en los ríos sin un tratamiento previo [3].

Los efectos negativos de las aguas residuales van a depender del sitio de donde provengan, ya sea de los núcleos de la población urbana, de procesos de producción industrial o de lluvias y/o lixiviados, mediante procesos de contaminación difusa [4]. Sin importar su procedencia, de forma general las aguas residuales presentan sólidos gruesos, sustancias oxidables (materia orgánica), grasas y aceites, patógenos, nutrientes (nitrógeno y fósforo), arenas y contaminantes emergentes [5] que pueden generar problemas en el ecosistema de un cuerpo de agua como el agotamiento del oxígeno disuelto, producción de sólidos suspendidos totales que son degradables a simple vista, proliferación de patógenos, problemas de eutrofización y toxicidad [6].

Es reconocido que el vertido de las aguas residuales directamente a un cuerpo de agua genera una problemática ambiental. Debido a los efectos negativos que las aguas residuales ocasionan en los ecosistemas acuáticos, la Asamblea General de las Naciones Unidas estableció como derechos humanos el acceso a saneamiento y el consumo de agua sin contaminantes [7]. Además, se contempló dentro del objetivo seis de la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), denominado “Agua limpia y saneamiento”. En este objetivo se busca implementar acciones para manejar el recurso hídrico de manera eficiente como es el caso de las tecnologías de tratamiento de vertidos [8]. Para alcanzar lo planteado en el ODS 6, es fundamental determinar las características del efluente con el fin de seleccionar la tecnología de tratamiento de aguas residuales más adecuada, previo al vertido de estas a un cuerpo de agua [9].

El principal objetivo de tecnologías de tratamientos de aguas residuales es reducir la concentración de los contaminantes presentes en el efluente, a través de procesos biológicos, físicos y químicos, hasta acatar los parámetros establecidos por la legislación [5]. Siendo el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (decreto N° 33601) el que establece los límites permisibles de los parámetros fisicoquímicos para Costa Rica [10]. En lo que respecta a la selección del tipo de tecnología se debe considerar el aspecto económico, social y técnico. De manera general se ha visualizado que los sistemas de tratamiento muy tecnificados son eficientes, pero requieren de constantes mantenimientos lo que los hace sistemas costosos [11].

Los humedales artificiales son una alternativa a los sistemas convencionales; estos consisten en la simulación de las características de los humedales naturales, donde la limpieza de las aguas contaminadas se realiza a través de procesos biológicos, físicos y químicos [12]. Para diseñar estos sistemas se utilizan modelos matemáticos de caja negra que permiten describir la eliminación de los contaminantes a partir de su concentración en el afluente, la constante de velocidad de remoción de primer orden basada en el área y la tasa de retención hidráulica [13]. Entre las principales ventajas que se le adjudica a esta tecnología es que son de bajo costo,

mantenimiento y operación accesible, y alta efectividad en la eliminación de contaminantes [14].

Este proyecto se enfoca en el tratamiento de aguas residuales producto del proceso industrial azucarero. A nivel mundial, esta industria se caracteriza por requerir cantidades considerables de agua para producir azúcar y productos derivados. Por ejemplo, se requieren alrededor de 500 kg de agua para producir 1 kg de azúcar [15]. A partir de esto, es común que viertan el mismo volumen de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica y contaminantes en los cuerpos de agua [15].

La industria azucarera costarricense se caracteriza por tener la participación de más de 8 000 productores de caña dependientes e independientes que integran la Federación de Cámaras de Productores y de 12 ingenios industrializadores que conforman La Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA) [16]. Existen seis áreas principales donde se produce la caña de azúcar, las cuales son: Turrialba, Valle Central, Zona Norte, Pacífico Central, Guanacaste y Zona Sur. Entre los cantones productores y entregadores de caña se pueden mencionar: Abangares, Atenas, Bagaces, Buenos Aires, Cañas, El Guarco, Esparza, Hojancha, Jiménez, Los Chiles, Pérez Zeledón, Puriscal, Turrialba, Tilarán, San Carlos, entre otros [17].

En lo que respecta a los rendimientos de producción, en el 2021 se procesaron 425 178 toneladas de azúcar por cosecha [18]. En cuanto al aporte económico, se tuvo una participación del 2,3 % en el Producto Interno Bruto Agropecuario (PIBA) [18], mientras que para el 2022 se tuvo una participación del 0,7 % en el valor agregado y un 2,1 % del valor bruto de las actividades primarias del sector agropecuario [19]. Además, en la generación de trabajo la actividad cañera generó 20 000 empleos directos y 80 000 indirectos para el año 2021 [18].

Los indicadores anteriores evidencian la importancia del sector en la economía del país. Y como sector, se preocupa por el tratamiento de las aguas residuales que produce. En este proyecto, la empresa interesada en la mejora de su sistema de tratamiento se ubica en Alajuela y procesa la caña de azúcar para obtener varios productos que ponen a disposición comercial. Además, se caracteriza por buscar de manera constante que su proceso de producción sea más amigable con el ambiente. Por lo que ha implementado varias acciones para disminuir su impacto como un filtro a la salida de la caldera, la elaboración de abono orgánico a partir de los residuos y un sistema de tratamiento que trata los vertidos que, posteriormente, se descargan en el río [20].

Sin embargo, el sistema de tratamiento de los vertidos aún presenta oportunidades de mejora, ya que se podría reducir el contenido de la materia orgánica y algunos contaminantes específicos. A partir de lo mencionado, el proyecto se enfoca en el área de tratamiento de aguas residuales. Específicamente, en la elaboración del diseño preliminar de un humedal artificial para cumplir con lo solicitado por la empresa y mejorar el sistema de tratamiento actual al implementar un sistema accesible que permita reducir contaminantes, y propicie un biosistema que atraiga fauna y armonía con el medio ambiente. Además, no solo contribuirá en alcanzar el objetivo seis de la ODS, sino también en brindar un acercamiento de la Escuela de Ingeniería en Biosistemas en apoyar a la industria azucarera en el mejoramiento ambiental de las aguas residuales.

1.2 Delimitación del problema

La presente investigación se llevó a cabo en un ingenio azucarero y busca realizar el diseño preliminar de los humedales artificiales, como alternativa de mejora al sistema de tratamiento actual con el que cuenta la empresa. Para ello, se va a caracterizar el sistema de tratamiento actual, mediante el análisis del comportamiento del caudal y la caracterización fisicoquímica del agua residual. Además, se realizó el diseño y la construcción de los modelos de humedales artificiales a escala de laboratorio para evaluar el tratamiento que genera en dos distintas fases del sistema de tratamiento actual. Finalmente, se escaló los modelos de acuerdo con las condiciones de la empresa y se determinó la inversión de los materiales de construcción. A partir de lo anterior, la investigación tiene como alcances brindar los planos de diseño de los humedales artificiales y los costos de inversión de los materiales de construcción.

1.3 Objetivos

El proyecto tiene como objetivo general elaborar el diseño preliminar de un humedal artificial para tratar el efluente generado en el proceso productivo de un ingenio azucarero localizado en Alajuela.

Los objetivos específicos son:

- (1) Caracterizar el sistema de tratamiento actual de la empresa, mediante el caudal y la caracterización fisicoquímica del agua, para obtener los parámetros de entrada de los modelos de humedales artificiales.
- (2) Determinar la eficiencia del tratamiento de los efluentes primario y secundario, construyendo modelos de humedales artificiales, para obtener los parámetros de diseño del humedal artificial.
- (3) Escalar el diseño preliminar del humedal, mediante la utilización del modelo matemático de caja negra, para el tratamiento de las aguas residuales de la empresa.
- (4) Estimar la inversión de la construcción del humedal artificial.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación, se va a introducir los parámetros generales de las aguas residuales, la caracterización fisicoquímica de los vertidos de las industrias azucareras y las etapas de tratamiento que usualmente implementan estas industrias. Además, se menciona la normativa nacional vigente para el vertido de aguas residuales y los componentes de los sistemas de tratamientos de aguas residuales. A su vez, se introduce los componentes de los humedales artificiales, los tipos que existen, ventajas y desventajas, variables a considerar para el diseño, así como investigaciones realizadas con este tipo de tecnología en industrias azucareras. Finalmente, se realiza una descripción de la empresa donde se realizó el estudio.

2.1 Aguas residuales

Consisten en aquellas aguas cuya composición se modificó debido a la incorporación de agentes contaminantes [10]. Su clasificación se basa en la fuente de origen por lo que se dividen en dos grupos: ordinarias y especiales [4]. El primer grupo consiste en los vertidos que se originan en los asentamientos, en estas se pueden considerar las aguas negras, sistema de drenaje de calles, lavado doméstico, lluvia y lixiviados. Por otro lado, las aguas residuales especiales consisten en los vertidos que se generan en los procesos productivos de las empresas y se caracterizan por presentar composición variable [4].

En cuanto a la composición, las aguas residuales se encuentran clasificadas por características biológicas, físicas y químicas. Con base en estas características se establece la calidad del agua. Los parámetros que determinan las características físicas del agua residual son los sólidos suspendidos, sedimentables y totales, olor, pH, turbidez, temperatura y color. Por otra parte, las características químicas son de importancia porque influyen en la composición del agua; algunos parámetros son: demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, concentración de nitratos, fosfatos, nitritos, nitrógeno y amonio. Finalmente, las características biológicas consisten en los microorganismos presentes en el efluente, por lo que se consideran los coliformes totales y fecales [21].

En los análisis de calidad de las aguas residuales, es frecuente que se consideren como parámetros obligatorios los sólidos suspendidos, sedimentables, pH, temperatura, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total y fosfatos [10]. A partir de ello, se procederá a explicar estos parámetros.

Sólidos suspendidos (S.Susp): Consisten en partículas orgánicas e inorgánicas que están presentes de manera suspendida en el agua residual y que son susceptibles a sedimentar [21]. Para determinarlos, se debe pasar la muestra a través de un filtro con una porosidad de $0,45 \mu\text{m}$ y la cantidad de sólidos que quedan retenidos corresponderían a los sólidos suspendidos [22].

Sólidos sedimentables (S.Sed): Cuantifican el volumen de materia que se sedimenta en el fondo de los cuerpos de agua. La determinación se hace utilizando un cono Imhoff. Para ello, se deberá colocar un litro de muestra en el equipo y dejarla reposar por un periodo de 60 minutos, una vez concluido el tiempo se cuantifican los sólidos sedimentados en la parte inferior del cono [21].

Potencial hidrógeno (pH): Determina la concentración de ion hidrógeno en el agua residual y se caracteriza por ser fundamental a considerar debido a que aguas muy alcalinas o muy ácidas son un riesgo para los organismos acuáticos [23].

Temperatura en aguas residuales: Se caracteriza por ser mayor a lo reportado para el agua potable, debido a la incorporación de agua caliente de las actividades domésticas y productivas.

Además, es relevante a considerar debido a que puede contribuir a que se agote el oxígeno disuelto y se genere una modificación en la flora y fauna del agua receptora [21].

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Indica la cantidad de oxígeno que los microorganismos requieren para degradar la materia orgánica disponible en el agua. Para medir este parámetro, se aplica una prueba de incubación donde la muestra se siembra a lo largo de 5 días a 20 °C por medio del método Winkler o diversos métodos manométricos [24]. Es importante destacar, que en esta prueba se da una degradación del 65 % al 70 % de la materia orgánica [25].

Demanda química de oxígeno (DQO): Determina la cantidad de oxígeno que se necesita para degradar la materia orgánica en función de un oxidante químico. Para medirlo, se coloca un volumen de la muestra en un oxidante, siendo el dicromato de potasio el más utilizado para aguas residuales, y se espera que se lleve a cabo la reacción [24]. Es importante mencionar, que este parámetro siempre será más alto que la DBO porque además de cuantificar el oxígeno necesario para degradar la materia orgánica, también considera las sustancias oxidables por el método químico [21].

Además, existe una correlación entre la DBO y DQO que permite evaluar la efectividad de remoción de la materia orgánica del proceso. Por lo que se han establecido varios criterios de biodegradabilidad, siendo estos: muy biodegradable ($> 0,8$), biodegradable ($0,7$ a $0,8$), poco biodegradable ($0,3$ a $0,7$) y no biodegradable ($< 0,3$) [26].

Nitrógeno total (N_T): Consiste en la suma de todas las formas de nitrógeno que están presentes en el agua (nitrógeno total Kjeldahl, nitrito y nitrato). En lo que respecta a la importancia, se puede hacer énfasis en que la presencia de altas concentraciones de nitrógeno disminuye el oxígeno disuelto, lo que a su vez ocasiona una afectación en la vida acuática.

A partir de ello, las etapas de tratamiento de aguas residuales eliminan la concentración de compuestos nitrogenados a través de procesos de nitrificación y desnitrificación. En el primer proceso se da una oxidación biológica donde el Nitrógeno Amoniacal (NH_3) se convierte en Nitrito (NO_2^-) y luego en Nitrato (NO_3^-), mientras que en el segundo proceso se lleva a cabo un proceso microbiano anaerobio que reduce el nitrato para convertirlo en gas nitrógeno (N_2) [27].

Fosfatos (PO_4^{3-}): Puede presentarse en las aguas residuales en forma de fosfato orgánico, ortofosfato y polifosfato. Se ha observado que estos compuestos son nutrientes para las plantas, promoviendo el crecimiento de algas. Sin embargo, cuando este parámetro se encuentra en altas concentraciones ocasiona problemas de eutrofización y con ello efectos adversos en la masa de agua [21].

2.2 Industria azucarera: Aguas residuales y plantas de tratamiento

La industria azucarera se caracteriza por verter cantidades considerables de aguas residuales altamente contaminantes; cuyo origen provienen de las actividades de limpieza, lavado de equipos y del proceso productivo [28]. De manera específica, se ha visualizado que los principales contaminantes presentes en estas aguas son los sólidos de suspensión, pH y materia orgánica; siendo este último el factor más crítico debido a la influencia que tiene en el agotamiento del oxígeno disuelto [6], [15].

Se ha observado que el contenido de materia orgánica de estas aguas residuales proviene del bagacillo, aceites y grasas, cachaza y azúcares no recuperados del proceso productivo [29]. Además, el tipo de suelo, la variedad y las condiciones de cosecha de la caña de azúcar ocasiona

que la concentración de materia orgánica presente en el agua residual sea variable, presentándose valores entre 3 682 mg/L hasta 29 172 mg/L [29], [30].

A partir de la problemática que genera estas aguas residuales en los cuerpos receptores de agua es que resulta necesario depurarlas a través de plantas de tratamiento. A nivel mundial, se han implementado métodos físicos como adsorción, sedimentación, flotación y filtración; químicos como coagulación/floculación y electrocoagulación, y biológicos como lechos bacterianos o filtros biológicos, lagunas de oxidación y procesos de lodos activados [31]–[33].

En lo que respecta al diseño de las plantas de tratamiento que han implementado algunas industrias a nivel mundial, se puede hacer mención del Trapiche Lucerna S.A, Ingenio Central Castilla S.A e Ingenio Cabaña S.A, localizados en Colombia [34], [35]. La planta de tratamiento del Trapiche Lucerna S.A se encuentra conformada por un tratamiento preliminar y primario. De manera específica, el pretratamiento está compuesto por rejillas y una trampa de grasas, mientras que el tratamiento primario consiste en tres lagunas aerobias donde se da el proceso de sedimentación, aireación y estabilización, respectivamente [35].

Por otra parte, la planta de tratamiento del Ingenio Central Castilla S.A se encuentra conformado por una estación de bombeo, tres lagunas de sedimentación, una de oxidación y una de maduración [35]. Por último, la planta de tratamiento del Ingenio Cabaña S.A cuenta con un sistema anaerobio, específicamente una laguna, para el tratamiento de las aguas residuales que se generan el proceso de obtención de azúcar. Mientras que para las aguas residuales provenientes de los molinos se cuenta con una trampa de grasas y aceites, y una laguna anaerobia [34].

En Costa Rica el panorama es similar al expuesto anteriormente, donde las industrias azucareras implementan sistemas de tratamiento de aguas residuales para cumplir con los decretos N° 31545-S-MINAE y N° 33601-MINAE-S [10]. En cuanto al diseño de plantas de tratamiento a nivel nacional se puede hacer alusión al Ingenio Azucarero de CoopeVictoria R.L, en el que el sistema de tratamiento se encuentra conformado por un pretratamiento, tratamiento primario y secundario. Específicamente, el pretratamiento consiste en una aplicación de cal para reducir la acidez del agua residual y en un tamizador. Luego sigue el tratamiento primario que se encuentra conformado por un clarificador, sedimentador y una laguna de lodos. Por último, se haya una laguna anaerobia que funciona como tratamiento secundario [36].

2.3 Normativa Nacional

Para diseñar e implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales se debe considerar la reglamentación vigente de cada país. En el caso de Costa Rica, las directrices de diseño y funcionamiento de estos sistemas están establecidas en el decreto N° 31545-S-MINAE y N° 33601-MINAE-S.

El primer decreto establece las normativas de operación y aprobación de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales. Profundizando, menciona los permisos que se deben tramitar para construir y poner en funcionamiento el sistema de tratamiento como: permisos de ubicación y construcción, las directrices para aprobar proyectos de sistemas de tratamiento y las regulaciones para las industrias o entes que cuenten con estos sistemas [37].

Por otro lado, el decreto N° 33601-MINAE-S dicta los límites permisibles de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales para verterlas en alcantarillados sanitarios, cuerpos receptores o realizar un reúso del agua residual [10]. Para el caso de efluentes de industrias azucareras que se vierten en un cuerpo receptor, se deben considerar los límites mostrados en

el cuadro I. Mientras que para el límite de Nitrógeno Total y Fósforo se debe considerar un valor de 50 mg/L y 25 mg/L, respectivamente [10].

CUADRO I

Límites permisibles de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de la industria azucarera dispuestas en un cuerpo receptor [10].

Parámetro	Límite
DBO (mg/L)	150
DQO (mg/L)	300
Sólidos suspendidos (mg/L)	150
Grasas/aceites (mg/L)	30
Potencial de hidrógeno	5 a 9
Temperatura (°C)	$15 \leq T \leq 40$
Sólidos sedimentables (mL/L)	1
Sustancias activas al azul de metileno (mg/L)	5

2.4 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales tiene como finalidad disminuir los contaminantes hasta acatar con los límites establecidos por la legislación [5]. En cuanto a las etapas, esta se compone de cuatro: pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario [4].

La etapa de pretratamiento tiene como objetivo remover sólidos de gran tamaño, arenas, grasas y aceites a través de medios mecánicos o físicos [4], [38]. Este proceso inicia la depuración del agua residual, removiendo material grueso que podría obstruir procesos y operaciones posteriores [4]. En cuanto a etapas características de este tratamiento se puede mencionar:

- **Desbaste:** Se utilizan rejas y rejillas para evitar que sólidos de gran tamaño; botellas de plástico, pedazos de madera y basura; entren al sistema de tratamiento posterior. En lo que respecta a su diseño, se debe considerar el tipo y cantidad de basura que ingresa a la planta de tratamiento, así como el caudal a tratar. Lo anterior permite definir la cantidad de barras, separación entre estas y el modo de funcionalidad: manual o automática [38].
- **Homogenización:** Esta operación tiene como objetivo mantener continua la concentración y el caudal del agua residual a ser tratada. Las unidades que normalmente se emplean consisten en tanques de grandes dimensiones, denominados tanques de homogenización o equalizadores. Es importante mencionar que se recomienda implementar esta operación cuando se tratan caudales y concentraciones inestables a lo largo del día [39].
- **Desarenado:** Tiene como finalidad separar la arena que pueden estar presentes en el agua residual para evitar que arrastre materias abrasivos. Existen diversos tipos como desarenadores de vórtice, aireados, longitudinales tipo Essen y tanques de detritus [38].
- **Desengrasado:** Se emplea para eliminar aceites, grasas y materiales con densidad menor al del agua [39]. Esta operación se puede llevar a cabo a través de trampas de grasas, sistemas de flotación por aire disuelto y sedimentadores primarios [38], [40].

El tratamiento primario consiste en eliminar partículas en suspensión que no se eliminaron en el pretratamiento a través de medios físicos y químicos como: decantación, flotación, neutralización y coagulación-flotación [4], [23]. Es importante mencionar, que en esta etapa se

logra reducir entre un 50 % y 85 % de los sólidos en suspensión y un 20 % de DBO [4]. A continuación, se profundiza en el método de decantación y los tanques sépticos:

- Decantación: Tiene como finalidad eliminar la mayor cantidad de sólidos en suspensión presentes en el agua residual, por medio de gravedad. Existen decantadores estáticos y dinámicos de tipo rectangular o circular, cuya diferenciación recae en que los estáticos no cuenta con partes mecánicas [4], [38].
- Tanques sépticos: Consiste es un tanque de sedimentación, donde el agua residual ingresa por la parte superior de la unidad y se da un tiempo de retención que ocasiona que las partículas livianas floten en la superficie y las más pesadas se sitúen en el fondo por el efecto de la gravedad. Posteriormente, el excedente líquido una vez tratado sale por el otro extremo de la unidad. Es importante destacar que se requiere que los flujos hidráulicos sean laminares, ya que la presencia de turbulencias puede afectar la flotación, sedimentación y el espesamiento [41].

En el tratamiento secundario se elimina la materia orgánica utilizando microorganismos aerobios o anaerobios. Los tratamientos que se encuentran dentro de esta etapa son: a) los de biomasa suspendida, donde la materia orgánica se encuentra en suspensión en el medio acuático (aireación prolongada y fangos activos) y b) los de biomasa fija donde la materia orgánica se encuentra sobre una estructura fija (biodiscos y lechos bacterianos). En lo que respecta a porcentajes de remoción se tiene que se logra un 90 % de los sólidos en suspensión y de un 70 % a 90 % para el DBO. Por lo que ya para esta etapa el efluente tiene una buena calidad fisicoquímica [4].

Por último, se encuentra el tratamiento terciario que busca remover contaminantes específicos (fosfatos, detergentes, y compuestos nitrogenados), y disminuir la carga orgánica si todavía se encuentra en altas concentraciones [23]. Entre los tratamientos que se utilizan en esta etapa se encuentra procesos fisicoquímicos (filtración, cloración o precipitación) o biológicos [4].

Es importante mencionar, que los lodos que surgen del tratamiento primario y secundario se consideran residuos especiales, debido a que presentan materia orgánica, partículas en suspensión, microorganismos, arenas y arcillas [42]. Por lo tanto, deben pasar por una línea de tratamiento antes de eliminarlos. Esta línea consiste en la reducción del volumen del lodo para agilizar la manipulación (espesamiento), estabilizarlo para impedir fermentaciones y el desarrollo de organismos patógenos (digestión) y finalmente deshidratarlos para facilitar el manejo y transporte hasta el uso o disposición final (deshidratación) [43].

2.5 Humedales artificiales

2.5.1 Componentes que integran al sistema

Los humedales artificiales son sistemas de purificación de las aguas residuales cuyo funcionamiento se basa en la actividad bioquímica de los microorganismos, la vegetación que aporta el oxígeno al medio y un sustrato que funciona como material filtrante y soporte para la vegetación [44].

Los microorganismos tienen como función degradar la materia orgánica y eliminar nutrientes presentes en el agua residual que pasa a través del humedal. De manera general, existen colonias anaerobias que se localizan en el sustrato, así como colonias aerobias que se encuentran en el área superior donde prevalece el oxígeno de la atmósfera y el que es liberado por las raíces de las plantas. En cuanto a los principales tipos de microorganismos que se

pueden encontrar se puede hacer mención de los hongos, levaduras, protozoarios y bacterias [45].

La vegetación tiene como función principal aportar oxígeno al sistema, sin embargo se pueden generar otras funciones como favorecer la filtración de nutrientes del agua residual y brindar superficie para que se formen películas bacterianas [5], [45]. En lo respecta a la selección de la vegetación se debe considerar que tengan abundantes rizomas y raíces, sean tolerantes a elevadas cargas orgánicas y presenten biomasa aérea alta para que los nutrientes se puedan asimilar [46]. Por otra parte, las especies vegetales más utilizadas en humedales artificiales se encuentran *Typha latifolia*, *Scirpus spp*, *Phragmites australis*, *Cyperus papyrus*, *Schoenoplectus*, *Juncus ssp*, *Carex*, *Iris graminea*, *Heliconia psittacorum*, *Canna indica*, entre otras [11], [45], [47].

Investigaciones recientes han evaluado que la utilización de especies ornamentales en humedales artificiales mejora la apariencia estética y genera beneficios económicos. De manera específica, se ha observado que la utilización de este tipo de vegetación favorece la producción de flores de corte que se pueden comercializar. Lo que permite recuperar parte de la inversión de la construcción del sistema y brindar recursos para el mantenimiento del humedal artificial [46].

A partir de ello, es que la utilización de sistemas de humedales artificiales con plantas ornamentales toma gran relevancia para los países tropicales, ya que se puede aprovechar los climas cálidos y la abundancia en biodiversidad [48]. En el caso de Costa Rica, una especie ornamental que se ha utilizado en el diseño de un humedal artificial es la *Heliconia psittacorum*, reconocida como avecilla [47].

La *Heliconia psittacorum* es una planta perenne, herbácea, monocotiledona y con crecimiento rizomatoso que produce vástagos o brotes. El rizoma se caracteriza por crecer horizontalmente debajo de la superficie del suelo y presentar raíces fibrosas, resistentes y largas. Esta planta cuenta con un pseudotallo glabro de tonalidad verde, con un diámetro de 2 cm a 2,6 cm y una altura de 0,5 cm a 1,5 m.

En cuanto a las hojas, estas se destacan por ser de un color verde brillante y estar conformadas por un nervio central de tonalidad verde-amarillo y varios nervios laterales finos. Además, se caracterizan por presentar un largo de 2 cm a 35 cm y ser dísticas, simples, basales y tener una textura herbácea. Finalmente, presentan una inflorescencia recta con un pedúnculo de 10 cm a 60 cm de longitud, raquis anaranjado de 10 cm a 15 cm de largo, (3 a 7) brácteas lanceoladas de color anaranjado-amarillo y de (5 a 10) flores por espata [49]–[51].

En lo que respecta a antecedentes de remoción de contaminantes en aguas residuales de países tropicales, se ha visualizado que la *Heliconia psittacorum* logra remociones de DQO del 64 % al 95 % para agua residual doméstica, 65 % a 75 % para lixiviados de vertederos, 93 % para agua residual del procesamiento de café [52] y 35,4 % a 38,4 % para aguas residuales de tipo ordinario [47].

Por otro lado, el sustrato consiste en un medio granular conformado por rocas naturales (grava, arenas), materiales artificiales (calcita, carbón activado) o subproductos industriales reutilizados (carbón vegetal, mineral de hierro) [45], [53]. Entre las funciones que se le adjudica, se puede hacer mención a que brinda soporte a la vegetación y microorganismos, así como sirve de material filtrante para las aguas residuales lo que permite la remoción de contaminantes [45].

Un aspecto por considerar en el diseño es el tamaño del sustrato, ya que este puede afectar el flujo hidráulico. Profundizando, se ha visualizado que materiales granulados compuestos por altas concentraciones de limo y arcilla permite tener una mejor filtración del agua, pero se requiere que las velocidades del caudal sean bajas y por ende limitando el flujo a tratar. En cambio, medios granulares conformados por arenas y gravas reducen la capacidad de filtración del medio, pero incrementan la conductividad hidráulica [45].

2.5.2 Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales se pueden clasificar con base al tipo de macrófitas que se utilicen como vegetación [45]. A continuación, se muestra un esquema con la clasificación de los humedales.

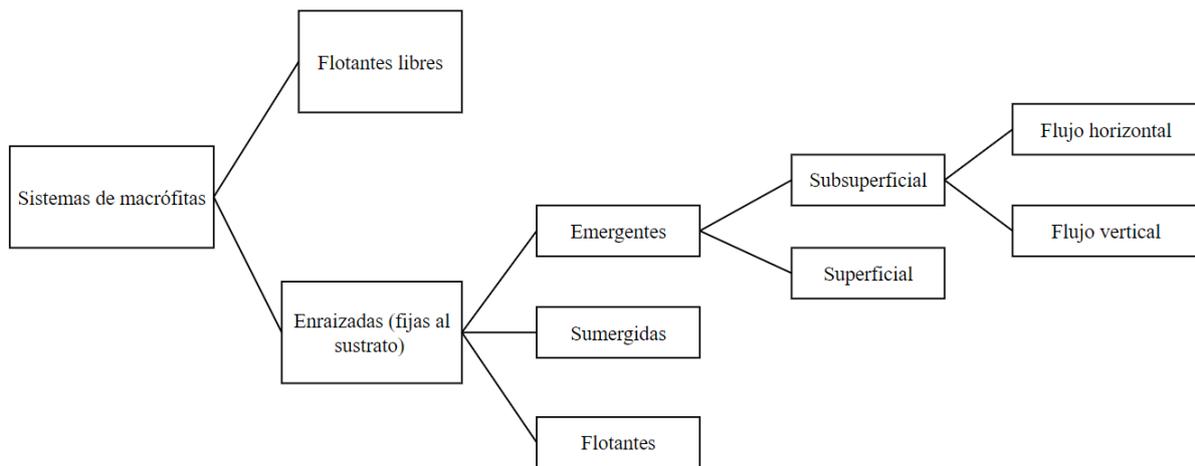


Fig. 1. Clasificación de los humedales artificiales [45].

Como se puede observar en la figura 1, los sistemas con macrófitas enraizadas se subdividen en tres tipos, los cuales son:

- Sistemas con macrófitas de hojas flotantes: Se caracterizan por presentar una alta capacidad de absorción de nutrientes [54]. Se utilizan angiospermas sobre suelos inundados como lenteja o jacinto de agua [45].
- Sistemas con macrófitas sumergidas: Son plantas donde su cuerpo no sale de la masa de agua [54]. En este sistema se encuentra helechos, musgos, angiospermas y carófitas [45].
- Sistemas con macrófitas emergentes: Son plantas que desarrollan su sistema radicular en terrenos inundados y cuyo tallo y hojas sobresalen de la masa de agua [54]. De esta vegetación surgen dos tipos de humedales que se diferencia por el régimen hídrico, estos son:
- Humedales superficiales (HFS): Son sistemas donde la superficie del agua se encuentra expuesta a la atmósfera y el agua se mueve de manera horizontal en medio de los tallos y hojas de las plantas [4], [55]. Usualmente se utiliza para tratamientos terciarios o la creación y recuperación de ecosistemas acuáticos [5]. La Fig. 2 muestra una representación de este tipo de sistema.

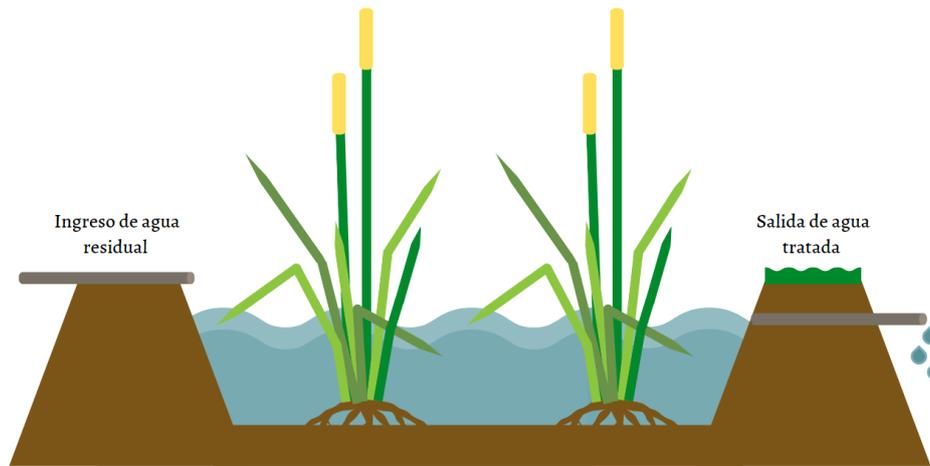


Fig. 2. Humedal artificial superficial, elaboración propia.

- **Humedales subsuperficiales (HFSS)**: Son sistemas donde el agua circula a través del sustrato, las raíces y los rizomas de las plantas [4]. Se utilizan para tratar aguas residuales con alta carga orgánica, por lo que comúnmente se encuentran como tratamiento secundario [5]. Este sistema se subdivide en:

- **Flujo horizontal (HFSSH)**: El agua residual fluye de manera lenta y horizontal a través del sustrato hasta llegar al final del humedal (ver figura 3) [55]. Se caracterizan por operar en condiciones anaerobias y presentar tiempos de retención hidráulica de días [4].

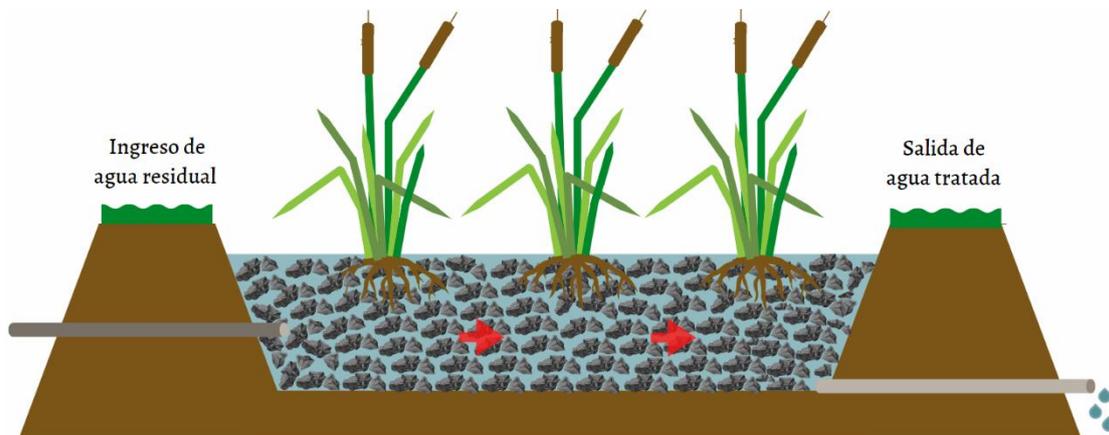


Fig. 3. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal, elaboración propia.

- **Flujo vertical (HFSSV)**: El agua residual ingresa de forma vertical e intermitente por medio de un sistema de tuberías, para evitar que el medio granular permanezca inundado [56]. Se distinguen por operar en condiciones aerobias y presentar tiempos de retención hidráulica de horas [4].

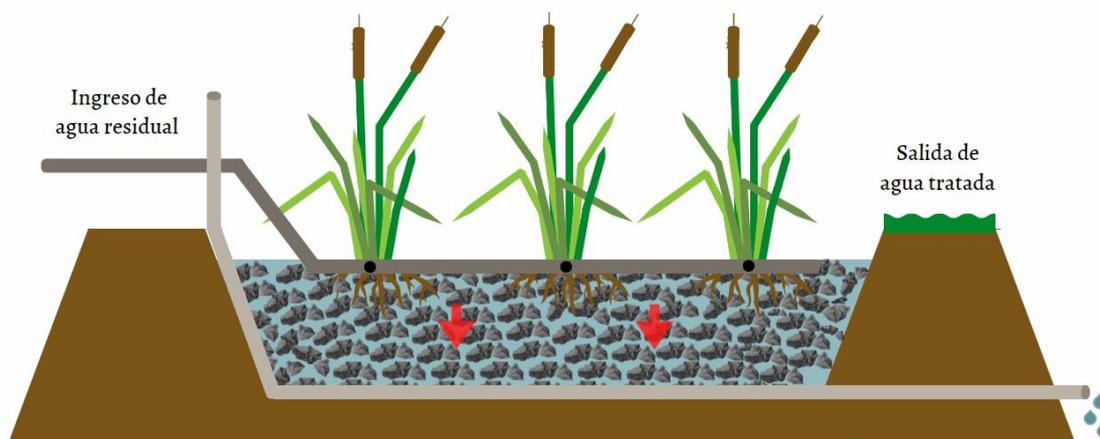


Fig. 4. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical, elaboración propia.

Seguidamente, en el cuadro II, se presenta un resumen de las principales características de los humedales de flujo superficial y subsuperficial. Como se puede observar, el humedal superficial es de menor costo debido a que no requiere un medio granular para su adecuado funcionamiento. Por otra parte, los humedales subsuperficiales presentan una mayor remoción de materia orgánica, ya que la porosidad del sustrato incrementa la superficie de contacto. Además, al circular subsuperficialmente el agua residual por el humedal se evita la aparición de olores e insectos [5].

CUADRO II

Principales características de los humedales superficial y subsuperficial [5].

Tratamiento	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
Carga orgánica	Baja	Alta
Olor	Puede darse	No hay
Insectos	Aparecen	No aparecen
Superficie	Mayor tamaño de superficie	Menor tamaño de superficie
Costo	Bajo	Alto

2.5.3 Ventajas y desventajas

Los humedales artificiales al tratar las aguas residuales fomentan biosistemas que atraen fauna y brindan armonía con el medio ambiente. Sin embargo, se debe considerar las ventajas y desventajas de implementar estos sistemas, las cuales son [4], [5]:

Ventajas:

- El consumo energético es muy bajo o nulo, ya que usualmente se trata de que estos sistemas trabajen por gravedad.
- La liberación de malos olores se reduce, debido a que en los humedales de flujo superficial los afluentes ya vienen tratados y en los de flujo subsuperficial el agua no está expuesta a la atmósfera.
- La ocurrencia de averías se disminuye ya que no se cuentan con equipos electromecánicos.
- La operación del sistema es sencilla, poco peligrosa y el mantenimiento es fácil de realizar y de bajo costo.
- Reduce el impacto ambiental, ya que se logra integrar con el medio ambiente.

- Se puede aprovechar la biomasa vegetal que se produce, ya que puede servir como alimento para animales (forrajes) o comercializarlo (especies ornamentales).

Desventajas:

- El funcionamiento óptimo dura más tiempo en alcanzarse, debido a que las plantas deben adquirir un grado de madurez. Sin embargo, ha habido casos en los que se ha presentado un buen funcionamiento desde el principio.
- Requieren grandes superficies de terreno para implementarlos, por lo que si no se cuenta con el espacio se pueden elevar los costos de construcción.
- Los humedales artificiales subsuperficiales pueden llegar a presentar problemas de colmatación en el sustrato, si las etapas previas al sistema no funcionan adecuadamente o si el medio granular no se eligió adecuadamente.
- Los humedales artificiales superficiales pueden fomentar la aparición de mosquitos y plagas que afecten la vegetación.
- Existen pocos parámetros de control que se pueden regular, por lo que los humedales se deben diseñar, dimensionar y construir adecuadamente.

2.5.4 Diseño

Generalmente, los humedales artificiales se diseñan con base a modelos de caja negra. Estos modelos permiten suponer la calidad del efluente del humedal artificial con base a las características del afluente, sin tomar en consideración los procesos internos dentro del humedal [57]. A nivel de literatura existen varios modelos, sin embargo, el de flujo de tapón es el que más se utiliza para diseñar estos sistemas debido a que es menos complejo [44].

El modelo de flujo tapón consiste en considerar los humedales artificiales como reactores biológicos donde suceden procesos de remoción homogéneos, completos e irreversibles; y donde el rendimiento se determina a través de una reacción de primer orden [13], [44]. Este modelo se caracteriza por depender de la temperatura, por lo que, si esta aumenta los procesos de biodegradación también lo hacen. Además, es idóneo para pronosticar la remoción de fósforo, procesos de nitrificación y desnitrificación y la reducción de materia orgánica. La representación de este modelo se realiza a través de la siguiente ecuación [47]:

$$\frac{c_e}{c_a} = e^{-k*t} \quad (1)$$

Donde c_e representa la concentración del efluente (mg/L), c_a la concentración del afluente (mg/L), k es la constante de velocidad de remoción de primer orden basada en la temperatura (m/d) y t es el tiempo de retención hidráulica (d) [13], [47].

Por otro lado, existe el modelo de flujo de tapón modificado $k-C^*$ que considera los contaminantes que se acumulan en el medio granular del humedal [47]. Este modelo se determina a través de la ecuación 2, donde es importante rescatar que se diferencia del modelo de flujo de tapón porque se le agrega la concentración base (C^*) (mg/L) [13].

$$\frac{c_e - C^*}{c_a - C^*} = e^{-k*t} \quad (2)$$

La concentración base se puede determinar por medio de la ecuación 3, donde m y n son las variables calibradas empíricamente para cada modelo [57]. Sin embargo, en investigaciones previas se han definido valores y ecuaciones para algunos parámetros de agua [47]. Para el caso del nitrógeno total se recomienda que la concentración base sea de 1,5 mg/L y para el

amoníaco y fosfato de 0 mg/L [58]. Por otro lado, la DBO y DQO se pueden determinar por medio de la ecuación 4 y los sólidos suspendidos totales con la ecuación 5 [48].

$$c_e = n + m * c_a \quad (3)$$

$$C^* = 3,5 + 0,053 * c_a \quad (4)$$

$$C^* = 7,8 + 0,063 * c_a \quad (5)$$

La constante de velocidad de remoción de primer orden es una variable fundamental que se considera en el modelo de flujo tapón y tapón modificado, y que se determina a través de las ecuaciones 6 y 7, las cuales surgen del despeje de las ecuaciones 1 y 2 [47]:

$$k = \frac{Q}{\varepsilon * A} \ln \left(\frac{c_a}{c_e} \right) \quad (6)$$

$$k = \frac{Q}{\varepsilon * A} \ln \left(\frac{c_a - C^*}{c_e - C^*} \right) \quad (7)$$

Donde k representa la constante de velocidad de remoción de primer orden con base al área (m/d), Q es el caudal diario (m³/d), ε es la porosidad del sustrato, A es el área superficial del humedal artificial (m²) y C* es la concentración base (mg/L).

Esta constante se ve influenciada por la temperatura, por lo a que la hora de diseñar los humedales artificiales se debe tomar en consideración las condiciones climáticas del sitio donde se van a implementar [47].

De manera general, se ha observado que el diseño de humedales artificiales en zonas templadas presenta el inconveniente de sobredimensionamientos, producto de las condiciones climáticas características de esta zona. Profundizando, durante el invierno el metabolismo de los microorganismos se reduce por las bajas temperaturas, ocasionando que se requiera mayor área para el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, este comportamiento no se presenta durante el verano, por lo que para esta época los sistemas se encuentran sobredimensionados.

Por otra parte, los países tropicales al presentar temperaturas constantes a lo largo del año mantienen estable el valor de k y por consiguiente el diseño de los humedales se ajusta más a la realidad del sistema de tratamiento [13]. A partir de lo mencionado, es que se recomienda utilizar sistemas pilotos de humedales artificiales para generar datos de la constante de remoción que se adecuen a las condiciones de estudio y así evitar sobredimensionamientos [47].

2.5.5 Investigaciones previas de humedales artificiales en industria azucarera

Se realizó una búsqueda bibliográfica para conocer las investigaciones realizadas en cuanto a la implementación de humedales artificiales para depurar las aguas residuales de industrias azucareras. La información disponible es limitada y específica para ciertas aguas industriales cuya composición fisicoquímica no es similar a las de la industria azucarera [59]–[63]. Se lograron encontrar tres investigaciones donde se implementan humedales artificiales para tratar los efluentes de las industrias azucareras, así como una investigación donde se evalúa la capacidad de depuración de varias especies vegetales que se adecuan a las condiciones climáticas del país. A continuación, se detallan estos estudios.

El estudio realizado por Zambonino [64] consistió en diseñar y analizar dos alternativas de sistemas de tratamientos para las aguas residuales del Ingenio Azucarero del Norte, localizado en Ecuador. La metodología consistió primeramente en establecer y diseñar las operaciones del

tratamiento primario, siendo estas el establecimiento de una trampa de grasas y aceites, así como un sedimentador.

Luego se prosiguió con la selección y diseño de los sistemas del tratamiento secundario, donde se establecieron dos sistemas para comparar cuál alternativa lograba una mayor reducción de los parámetros fisicoquímicos. Los sistemas que se escogieron fueron un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal por la facilidad de control de plagas y un sistema convencional de lodos activados con aireación prolongada. Por último, se realizó un análisis de costos para cada alternativa con el objetivo de establecer cuál era más viable. Entre los resultados obtenidos se puede mencionar que el humedal artificial obtuvo una mayor remoción del DBO, es de fácil operación y mantenimiento, y mostró ser técnica, económica y ambientalmente viable [64].

Por otro lado, Patel y Dharaiya [65] evaluaron la capacidad de depuración de dos humedales artificiales de flujo subsuperficial conformados por diferentes tipos de vegetación (*Typha angustifolia* y *Phragmites australis*). Para ello, se construyeron tres humedales con una altura de 73 cm, donde los primeros 3 cm se destinaron para cargar las aguas residuales y los 70 cm restantes para hacer el lecho del humedal. En lo respecta a la vegetación solo a dos modelos se les incorporó. Profundizando, en un modelo se utilizaron 25 plantas de *Typha angustifolia*, mientras que en el otro modelo se utilizaron 25 plantas de *Phragmites australis*. Es importante rescatar que ambas especies vegetativas se colocaron a una profundidad de 22 cm. Luego, se retuvieron las aguas residuales durante 7 días y se realizaron análisis diarios de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes.

Entre los resultados obtenidos se visualizó que los humedales artificiales tienen un alto rendimiento de remoción para casi todos los parámetros fisicoquímicos a un costo de construcción, operación y mantenimiento relativamente bajo, con respecto a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales. Además, se observó que *Phragmites australis* (carrizo) tuvo un mejor rendimiento en la absorción de contaminantes de las aguas residuales de la industria azucarera a comparación de *Typha angustifolia* [65].

Otro estudio en la misma temática fue el realizado por Cisneros et al [66], el cual diseñó, construyó y evaluó el desempeño de un humedal artificial subsuperficial de flujo vertical para evaluar el desempeño en el tratamiento del efluente del Ingenio Casasano, ubicado en México. Para llevarlo a cabo se construyó un humedal con un largo y ancho de 10 cm y con una profundidad de 1,2 m. Luego se colocó una geomembrana sobre la que se instalaron tuberías ranuradas a diferentes profundidades, para que el efluente ingresara de manera intermitente al humedal. Posteriormente, las tuberías se cubrieron con tierra y se sembró caña de azúcar como vegetación. Se visualizó que la utilización del humedal artificial removió los contaminantes presentes en el efluente y que conforme la profundidad incrementaba, la remoción de los contaminantes lo hacía de igual forma [66].

Por último, el estudio realizado por Venegas Castillo [47] consistió en establecer el diseño de un sistema de humedales artificiales de configuración vertical bajo tres tratamientos (lirio, heliconia y control) para la optimización en zonas tropicales, especialmente en Costa Rica. Para ello, se construyeron nueve modelos de flujo vertical, donde se colocaron tres capas de sustrato a cada tratamiento y cinco plantas para los dos tratamientos de vegetación. Como resultados, la planta Heliconia es más conveniente para ser utilizada en humedales artificiales debido a su depuración de las aguas residuales. Además, el autor menciona que los modelos de humedales artificiales permiten evaluar de manera experimental la eficiencia de remoción de contaminantes y se puede lograr determinar las constantes de velocidad de remoción de primer orden, de acuerdo a la zona donde se vaya a implementar los humedales a gran escala [47].

2.6 Caracterización de la empresa en estudio

La actividad azucarera en el país se caracteriza por ser una de las primeras actividades productivas. Al principio consistía en trapiches e ingenios pequeños y medianos que elaboraban azúcar y dulce para satisfacer la demanda interna. Sin embargo, conforme la demanda incrementó, se iniciaron los procesos de exportación y se presentó un mayor interés por la producción de alcohol anhidro y azúcar es que se da una industrialización del proceso, ocasionando la aparición de ingenios grandes y medianos, y reduciendo la cantidad de trapiches [67].

Actualmente, la industria azucarera costarricense se caracteriza por desarrollarse en seis áreas diferentes del país, siendo estas: Turrialba, Valle Central, Zona Norte, Pacífico Central, Guanacaste y Zona Sur. A partir de ello, se tiene una participación de más de 8 000 productores de caña dependientes e independientes que integran la Federación de Cámaras de Productores y de 12 ingenios industrializadores que conforman La Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA) [16].

La empresa del presente estudio se ubica en Alajuela y surge con el objetivo de procesar la caña de azúcar de una forma organizada y tomando en consideración el ambiente. En cuanto al funcionamiento, esta recibe la caña de azúcar de los productores de la zona para procesarla y así obtener los diferentes productos que ponen a disposición comercial [68].

Como previamente se mencionó, la empresa busca desarrollar sus productos de forma amigable con el ambiente. Por lo que llevaron a cabo una serie de acciones como: utilizar el bagazo como fuente de alimentación de la caldera en lugar de talar árboles, colocar un ciclón a la salida de la caldera para filtrar las impurezas que pueden surgir durante el proceso, elaborar abono a partir de los residuos e implementar un sistema de tratamiento para depurar los efluentes producidos [68].

3. METODOLOGÍA

3.1 Alcances y limitaciones

La presente investigación tuvo como alcance prediseñar un humedal artificial que se adecue a las condiciones de la empresa. Para ello, se evaluó el sistema de tratamiento por medio de la identificación de los componentes del sistema, el caudal de operación y la caracterización fisicoquímica del agua residual. Posteriormente, se analizó la configuración de humedal, vertical u horizontal, que mejor se adaptará a las condiciones del sistema de tratamiento y se evaluó su funcionamiento mediante modelos. Además, se brindó los planos de diseño de los humedales artificiales y los costos de inversión de los materiales de construcción.

En cuanto a limitaciones, por razones de confidencialidad no se va a hacer mención del nombre de la empresa y en algunos casos se presentará la información en porcentajes de remoción.

3.2 Caracterización de la zona de estudio

El estudio se realizó en una zona de Alajuela a una altitud superior a 952 msnm [69]. La zona se caracteriza por presentar diversidad de climas, con una temperatura promedio de 21 °C a 27 °C, humedad relativa promedio de 70 % a 80 % y una precipitación promedio anual de 2 600 mm. En cuanto a las actividades agrícolas y agropecuarias se puede mencionar la producción de hortalizas, café, plantas ornamentales, frutas y caña de azúcar [70].

3.3 Caracterización y evaluación del sistema de tratamiento

Para caracterizar el sistema de tratamiento, se identificaron las etapas con las que cuenta actualmente la empresa, los componentes y dimensiones de cada una de ellas, y los escenarios que tienen influencia en el sistema. Por otro lado, para evaluar el sistema de tratamiento se determinó el caudal que ingresa, los tiempos de retención y las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del agua residual a la entrada y salida de cada etapa de tratamiento.

El comportamiento del caudal se determinó por medio de dos aforos, donde se tomaron cinco mediciones cada hora durante el día de mayor producción de dos semanas utilizando el método volumétrico. Además, se realizó un análisis de los equipos a nivel productivo que podían representar un caudal representativo para la planta de tratamiento. Para ello, se consultó cuales equipos tenían mayor utilización y se determinó el caudal que estos aportaban por medio del método volumétrico.

Una vez identificadas las etapas de tratamiento, unidades y dimensiones de cada una, así como el caudal representativo que ingresa a la planta de tratamiento; se determinó el tiempo de retención hidráulica. Lo anterior se hizo con la finalidad de visualizar si el tiempo de permanencia en las unidades permite una adecuada extracción de los sólidos presentes en el agua residual. Para determinar el tiempo de retención hidráulica se utilizó la siguiente ecuación [38]:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (8)$$

Donde TRH representa el tiempo de retención hidráulica (h), V el volumen (m³) y Q el caudal (m³/h).

Para la caracterización fisicoquímica del agua residual, primero se analizaron las actividades de la empresa que generan aguas residuales (escenarios) y después se seleccionó el escenario más crítico para hacer la caracterización. Lo anterior se realizó con la finalidad de generar la

mayor cantidad de datos para la condición crítica y así diseñar los humedales con base a este, ya que se muestra ser útil para el peor escenario y en escenarios más favorables la remoción será mejor.

Una vez seleccionado el escenario, se realizaron tres mediciones de los parámetros fisicoquímicos y se utilizó el valor de la mediana como dato debido que no se contaba con los suficientes valores para cumplir la normalidad y no se ve afectado por valores extremos. En cuanto a los parámetros que se analizaron, se encuentra el pH, temperatura, sólidos sedimentables, conductividad eléctrica, DQO, DBO, Nitrato, Fosfato y Nitrógeno Amoniacal.

El análisis de los primeros cuatro parámetros se realizó en el sitio de estudio, donde para el pH y la temperatura se utilizó un Bluelab pH pen, para los sólidos sedimentables un cono Imhoff y para la conductividad eléctrica un medidor HI 98309 de la marca HANNA®. Mientras que los parámetros restantes, exceptuando el DBO, se analizaron en el Laboratorio de Investigaciones Varias y el Laboratorio de Aguas, Suelo y Ambiente de la escuela de Ingeniería de Biosistemas, utilizando un colorímetro Modelo DR900 de la marca HACH©.

En lo que respecta a la metodología de los parámetros analizados en el laboratorio, se siguió los procedimientos descritos por la empresa HACH© para el colorímetro Modelo DR900 [71]–[74]. Mientras que para determinar el DBO se utilizó una relación DBO/DQO de 0,49, la cual se determinó mediante el procedimiento establecido por HACH [75] y utilizando análisis previos realizados por un laboratorio certificado.

Es importante mencionar que se determinó el Nitrógeno total presente en las aguas residuales, para poderlo comparar con el límite máximo permisible establecido en la legislación. Para estimarlo, se realizó una relación entre los pesos moleculares del Nitrato, Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno total; y se tomó en consideración las concentraciones determinadas en el laboratorio de los dos primeros parámetros.

3.4 Construcción y evaluación de los modelos de humedales artificiales

3.4.1 Diseño de los modelos de los humedales artificiales

3.4.1.1 Diseño experimental

Para diseñar los modelos de los humedales artificiales, se tomó en consideración el caudal, la concentración de los parámetros fisicoquímicos del agua residual de cada etapa de tratamiento y el área disponible con la que cuenta la empresa para construir los humedales.

A partir de ello, se decidió realizar un diseño experimental de dos tratamientos con tres réplicas, donde cada tratamiento tuviera su propio control. Por ende, se construyeron seis modelos de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical con cajas plásticas de 74,5 cm de largo, 47 cm de ancho y 43,5 cm de profundidad, teniéndose un área por caja de 0,35 m². Es importante aclarar, que se seleccionó la configuración vertical debido a la alta eficiencia en remoción de contaminantes y el bajo requerimiento de área [12].

En lo que respecta a la diferenciación de los modelos, esta se realizó a través del agua residual a tratar. Por lo tanto, el primer tratamiento consistió en la depuración del agua residual primaria. Lo anterior, para visualizar la eficiencia de purificación de los humedales artificiales como sistemas de tratamiento secundario y si presentan una mejor remoción que el sistema secundario con el que cuenta la empresa. Por ende, se decidió que tres modelos trataran el agua residual de la salida del tratamiento primario y el tratamiento control fuera la caracterización fisicoquímica del efluente primario.

Por otro lado, el segundo tratamiento (tratamiento del agua residual secundaria) se realizó con el fin de observar la eficacia del tratamiento de las aguas residuales cuando los humedales funcionan como sistemas terciarios y si esta es mejor a comparación de cuando los humedales son sistemas secundarios. A partir de ello, se estableció que tres modelos trataran el agua residual del tratamiento secundario y el tratamiento control fuera la caracterización fisicoquímica del efluente secundario.

3.4.1.2 Tuberías de drenaje y riego

Para realizar el diseño del sistema de drenaje y riego se tomó como referencia la investigación llevada a cabo por Venegas Castillo [47] y las dimensiones de las cajas experimentales para construir los modelos.

Por lo tanto, el sistema de drenaje consistió en un sistema de tres ramificaciones de 57 cm de largo y un ancho de 32,5 cm. A cada ramificación se le realizó perforaciones de 3,18 mm (1/8 de pulgada) cada 3 cm, por lo que cada una cuenta con un total de 16 orificios. Además, se incorporó una válvula de bola para facilitar la extracción de las muestras y una tubería de aireación para brindar condiciones aeróbicas al sustrato y con ello mejorar el rendimiento de oxidación de la materia orgánica [53]. En lo que respecta a la construcción, se utilizó tubería de PVC con un diámetro de 12 mm (1/2 pulgada) y cada ramal se envolvió en un geotextil no tejido para impedir que los orificios fueran obstruidos.



Fig. 5. Diseño de sistema de drenaje de los modelos de humedales artificiales.

Por otro lado, el sistema de riego está conformado por un sistema de cuatro ramales de 81 cm de largo y 37 cm de ancho. Asimismo, cuenta con una estructura de alimentación constituida por una tubería vertical, un contenedor de almacenamiento en la parte superior de la tubería para que el agua residual ingrese al sistema por gravedad y una válvula de bola para controlar el ingreso del caudal. En cuanto a la construcción, también se utilizó tubería de PVC con un diámetro de 12 mm (1/2 pulgada) y se realizaron perforaciones de 3,18 mm (1/8 de pulgada) cada 3,5 cm, dando como resultado un total de 19 orificios por ramal.



Fig. 6. Diseño de sistema de riego de los modelos de humedales artificiales.

3.4.1.3 Sustrato

La composición del sustrato y el espesor de cada capa se determinó a través de una revisión de estudios que presentaban condiciones similares y se realizaron a escala de laboratorio. A partir de ello, se consideró el estudio realizado por Venegas Castillo [47] debido a que analizó el funcionamiento de los humedales en zonas tropicales. En esta investigación, el autor realizó nueve humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical de 35 cm de profundidad y un área de 0,32 m². En cuanto al sustrato, este se subdividió en una capa inferior de 7 cm de grosor de canto rodado (diámetro de 2,91 cm a 5,86 cm), una capa intermedia de 18 cm de piedra cuarta de origen volcánico (diámetro de 0,95 cm a 2,22 cm) y una capa superior de 10 cm de granito de río (diámetro de 0,12 cm a 0,24 cm).

En la presente investigación se utilizaron cajas con una profundidad de 43,5 cm para conseguir remociones equivalentes o mayores al 90 % de DBO [47]. Además, se tomó en consideración los sustratos utilizados en el estudio descrito anteriormente debido a que crean volumen de drenado, dan soporte a las raíces, filtran partículas grandes y proporcionan mayor superficie de contacto, lo que favorece el establecimiento de los microorganismos [47].

A partir de ello, los humedales artificiales quedaron estructurados por una capa inferior de 7 cm de grosor de canto rodado, una capa intermedia de 18 cm de grosor de piedra cuarta de origen volcánico y una capa superior de 18,5 cm de grosor de granito de río. Siendo el grosor de esta última capa diferente a lo empleado por Venegas Castillo [47] para incrementar la biopelícula y el espacio de filtrado, permitiendo que los microorganismos disminuyan en mayor grado la materia orgánica [76]. Es importante mencionar, que se colocó un sarán negro de 80 % de sombra entre la piedra cuarta volcánica y el granito de río para evitar la mezcla de los sustratos.



Fig. 7. Sustratos que se utilizaron en los modelos, piedra de río tipo canto rodado (izquierda), piedra cuarta de origen volcánico (centro) y granito de río (derecha).

En lo que respecta a la porosidad de los diferentes sustratos, se utilizó el valor determinado en la investigación de Venegas Castillo [47] para el caso de la piedra cuarta volcánica, siendo esta de $(14,98 \pm 0,37) \%$. Por otra parte, la porosidad del granito de río se determinó a través del método volumétrico y se obtuvo un valor de 25% , mientras que la porosidad de la capa de canto rodado no se consideró debido a que tiene como finalidad permitir el drenaje del agua residual. Una vez establecidas las porosidades de cada sustrato, se determinó la porosidad promedio ponderada, ya que es requerida en otros parámetros de diseño. Esta se determinó por medio de [77]:

$$\phi = \frac{\sum_1^n \phi_i * h_i}{\sum_1^n h_i} \quad (9)$$

Donde ϕ es la porosidad promedio ponderada (%), ϕ_i es la porosidad de cada sustrato (%) y h_i es el espesor de cada capa (cm). Por lo tanto, sustituyendo los valores en la ecuación, se obtiene que la porosidad promedio ponderada es de 20% .

3.4.1.4 Vegetación

La vegetación que se implementó en los modelos fue la *Heliconia psittacorum*, conocida comúnmente comoavecilla. Esta especie se seleccionó debido a que se encontraba en el sitio, presenta alta capacidad de depuración de materia orgánica y sólidos suspendidos, gran apariencia estética y se adapta a las condiciones climáticas del trópico [47].

En lo que respecta al diseño del sistema de plantación, se colocaron cuatro plantas en cada esquina y una en el centro. De manera específica, las plantas localizadas en los bordes se ubicaron a 12 cm en el eje X y a 16 cm del eje Y, esto considerando cada vértice de la caja como el punto de origen de un plano cartesiano (X, Y). Por lo tanto, cada modelo está conformado por cinco plantas y por tratamiento se tiene una densidad de 15 plantas/m^2 .



Fig. 8. Diseño del sistema de plantación de los modelos de humedales artificiales.

Para adaptar las plantas a los sistemas, se colocaron en los modelos un mes antes de que se realizaran las pruebas experimentales y se regaron con agua potable de lunes a viernes. Una vez finalizado el periodo de adaptación, se recortaron los tallos para que todas pudieran crecer de manera uniforme y se incorporó el agua residual a tratar para cada tratamiento.

3.4.2 Funcionamiento del sistema

El caudal de alimentación y la carga hidráulica requerida por cada modelo se determinó a partir de la carga orgánica, la concentración del contaminante y el área superficial, a través de las siguientes ecuaciones [78]:

$$Q = \frac{1000 \cdot A \cdot B_i}{C_i} \quad (10)$$

$$CH = \frac{1000 \cdot B_i}{C_i} \quad (11)$$

Donde Q es el caudal diario (L/d), CH es la carga hidráulica (cm/d), A es el área superficial del humedal (m²), B_i es la carga orgánica del contaminante i (g/m²/d) y C_i es la concentración del contaminante i (g/m³).

Para estimar la carga orgánica, se realizó una investigación bibliográfica con el fin de conocer los valores recomendados y se seleccionó el que mejor se adaptaba a cada tipo de tratamiento. Con base a la investigación, se visualizó que la carga orgánica es de 4,6 g DQO/m²/d a 14 g DQO/m²/d para humedales que funcionan como sistemas secundarios [78], mientras que para humedales que se utilizan como sistemas terciarios este valor es de 2 g DQO/m²/d a 13 g DQO/m²/d [79].

Además, se recomienda que la carga orgánica no sobrepase los 25 g DQO/m²/d debido a que se pueden generar problemas de obstrucción [80]. A partir de ello, se seleccionó una carga orgánica de 20 g DQO/m²/d para los tratamientos de agua residual primaria y secundaria para cumplir con los tiempos de retención hidráulica reportados en literatura.

En cuanto a la concentración del contaminante, se tomó en cuenta los valores determinados en la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales. Por lo tanto, considerando las ecuaciones 10 y 11, el área por cada humedal (0,35 m²), la carga orgánica y la concentración

de DQO de cada tratamiento. Se obtuvo como datos preliminares un caudal de 1,35 L/d y una carga hidráulica de 3,84 mm/d para el tratamiento de agua residual primaria y de 2,10 L/d y 6 mm/d para el secundario.

Otro parámetro a considerar es el tiempo de retención hidráulica del humedal, el cual consiste en el lapso en que tarda el agua atravesar el humedal artificial y que se determina a través de [79]:

$$\tau = \frac{A \cdot h \cdot \varepsilon}{Q} \quad (12)$$

Donde τ es el tiempo de retención hidráulica del humedal (d), A es el área del humedal (m^2), h es la altura del agua (m), ε es la porosidad (en decimal) y Q es el caudal diario (m^3/d).

Por lo que sustituyendo la ecuación con los valores determinados previamente se obtiene como dato preliminar un τ de 23 días para la depuración del agua residual primaria y de 15 días para el agua residual secundaria.

En lo que respecta a la alimentación de los modelos, esta consistió en retirar el agua residual de cada etapa de tratamiento y darle un periodo de adaptación. Luego, se incorporaba a los modelos respectivos y se retiraba de una vez para cumplir con el funcionamiento intermitente de los humedales subsuperficial de flujo vertical. Respecto a los días de alimentación, se realizó los lunes, miércoles y viernes.

3.4.3 Evaluación de los modelos de humedales artificiales

La evaluación de los modelos se realizó por 16 semanas y consistió en extraer una vez por semana un litro de muestra del efluente del tratamiento primario y secundario, tres litros para los modelos que depuraron el agua residual primaria y tres litros para los modelos que trataron el efluente secundario. En lo que respecta al análisis de los parámetros fisicoquímicos, tanto las aguas residuales de entrada como el efluente tratado por los modelos, se estudiaron una vez por semana cuando la empresa se encontraba en producción ($n=10$).

La medición de los parámetros fisicoquímicos se llevó a cabo en el sitio de estudio y el Laboratorio de Investigaciones Varias y el Laboratorio de Aguas, Suelo y Ambiente de la escuela de Ingeniería de Biosistemas. Profundizando, en el sitio de estudio se midió el pH y la temperatura con el equipo Bluelab pH pen, los sólidos sedimentables con un cono Imhoff, la conductividad eléctrica con un medidor HI 98309 de la marca HANNA® y la Demanda Química de Oxígeno utilizando un colorímetro Modelo DR900 de la marca HACH© y siguiendo los procedimientos descritos por la empresa [74].

Por otro lado, se determinó una vez por mes Nitratos, Fosfatos y Nitrógeno Amoniacal en el laboratorio, utilizando el colorímetro Modelo DR900 de la marca HACH© [71]–[73]. En el caso del Nitrógeno Total, se repitió el procedimiento mencionado anteriormente. Es decir, se realizó una relación entre los pesos moleculares del Nitrato, Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Total y se utilizó las concentraciones determinadas en el laboratorio de los dos primeros parámetros.

Además, se midió la Demanda Bioquímica de Oxígeno al principio, intermedio y final de la puesta en marcha de los modelos; mediante la prueba de 5 días a 20 °C utilizando el sensor BOD EVO de la marca VELP Scientifica®. Es importante rescatar, que para tener una idea del comportamiento de DBO durante las 10 semanas se utilizó una relación DBO/DQO de 0,49. Esta se determinó mediante el procedimiento establecido por HACH [75] y utilizando análisis previos realizados por un laboratorio certificado.

Una vez realizado los análisis fisicoquímicos, se determinó la disminución de la concentración de los contaminantes con los datos de entrada y salida de los humedales artificiales, así como el uso de la siguiente ecuación [47]:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \frac{(c_a - c_e)}{c_a} * 100 \quad (13)$$

Donde C_a es la concentración del agua residual de entrada (mg/L) y C_e es la concentración del agua residual de la salida (mg/L).

3.4.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó a través de un análisis de varianza, con un nivel de significancia (α) de 0,05. Este se realizó para cada parámetro fisicoquímico evaluado y se comparó la concentración del agua residual (afluentes) y los efluentes de los modelos con la finalidad de visualizar si había diferencias.

3.5 Escalamiento del diseño preliminar del humedal artificial

En primera instancia, se determinó la constante de velocidad de remoción de primer orden. Para ello, se tomó en consideración la etapa de tratamiento en la que se iban a colocar los humedales para así obtener la concentración de entrada y salida, el área y el caudal. Posteriormente, se aplicaron las ecuaciones 6 y 7 con el fin de visualizar cuál constante se adecuaba más a las condiciones del presente estudio.

Una vez obtenida la constante de remoción, se procedió a determinar el caudal de alimentación debido a que se tiene como limitante el área disponible para construir el humedal. Por lo tanto, el caudal de alimentación se determina a partir de [81]:

$$Q = \frac{A * k}{\ln(c_a) - \ln(c_e)} \quad (14)$$

Donde A es el área disponible para construir el humedal (m^2), k es la constante de velocidad de remoción de primer orden (m/d), c_a la concentración del afluente (mg/L) y c_e representa la concentración del efluente (mg/L). Es importante mencionar, que una vez obtenido el caudal de alimentación se determinó el tiempo de retención hidráulica del humedal con la ecuación 12, para visualizar si este se encontraba dentro de lo reportado por otros autores.

Posteriormente, se prosiguió a investigar en literatura el diseño de la estructura de entrada, componentes (bordo, tuberías, sustrato y vegetación) y estructura de salida de los humedales. Además, se diseñó un vertedero para aforos y se identificó y planteó elementos estructurales adicionales que son requeridos para el adecuado funcionamiento del humedal.

3.6 Inversión asociada a la construcción del humedal artificial

Para estimar la inversión asociada a la construcción del humedal artificial se realizó en primera instancia la lista de materiales requeridos, la cual se subdividió en tres secciones principales: sustrato, tuberías y obra gris. Profundizando, para la primera sección se consideró el volumen requerido de cada tipo de sustrato y la disponibilidad de estos materiales en lugares de venta cercanos.

Posteriormente, se identificó la cantidad y tipos de tuberías y accesorios a requerir en todas las estructuras propuestas para cotizarlas con ferreterías cercanas a la empresa. Por último, se consultó a un maestro de obras los materiales de obra gris y las cantidades requeridas para realizar las cotizaciones pertinentes.

Además, de las tres secciones mencionadas previamente se incluyó dentro de la inversión una opción de bomba y reservorio, los costos de mano de obra relacionados a la construcción de las diferentes estructuras, los permisos municipales requeridos y el costo asociado a los servicios de agua y electricidad.

Como parte del presente trabajo, se decidió realizar tres escenarios de inversión con diferentes puntos de venta comercial de los materiales de obra gris, esto debido a que de las tres secciones es el que mayor material requiere y por consiguiente siendo el escenario más crítico. Asimismo, es relevante mencionar que por temas de confidencialidad no se mencionará los puntos de venta.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización y evaluación del sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento de la empresa está conformado por tres etapas de tratamiento, las cuales son: pretratamiento, tratamiento primario y secundario, y una pila de lodos. El pretratamiento tiene como finalidad retirar el bagazo y otros sólidos no deseados, para ello se tienen tres rejillas. Las dos primeras rejillas cuentan con una ligera inclinación con respecto al suelo y la última se encuentra de forma vertical (apéndice 1). Posteriormente, se tiene un tamiz que permite afinar la extracción de partículas no deseadas (apéndice 2).

Se prosigue con el tratamiento primario, el cual consiste en un decantador circular de 5 m³, donde los lodos se van depositando en el fondo por medio de gravedad para su posterior extracción y el agua residual clarificada queda en la superficie (apéndice 3). Luego el agua depurada pasa al tratamiento secundario, el cual consiste en un decantador rectangular de 13 m³, conformado por dos unidades conectadas entre sí (apéndice 4). En este punto, el efluente se vierte al río. Finalmente, la pila de lodos tiene como objetivo recolectar los lodos generados en etapas anteriores y secarlos para darle un uso posterior (apéndice 5). A continuación, se muestra un diagrama y plano de distribución de la planta de tratamiento.

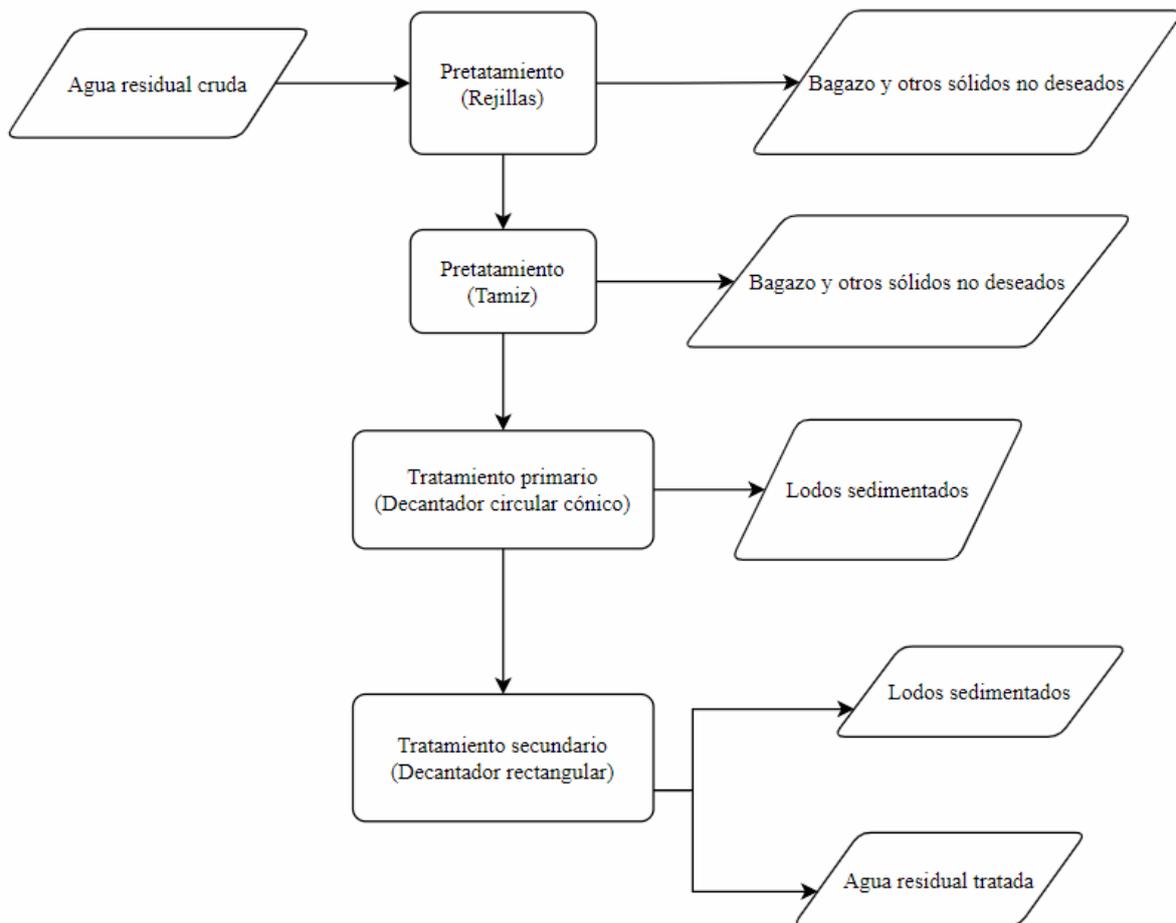


Fig. 9. Diagrama de flujo del sistema de sistema de tratamiento de aguas residuales, elaboración propia.

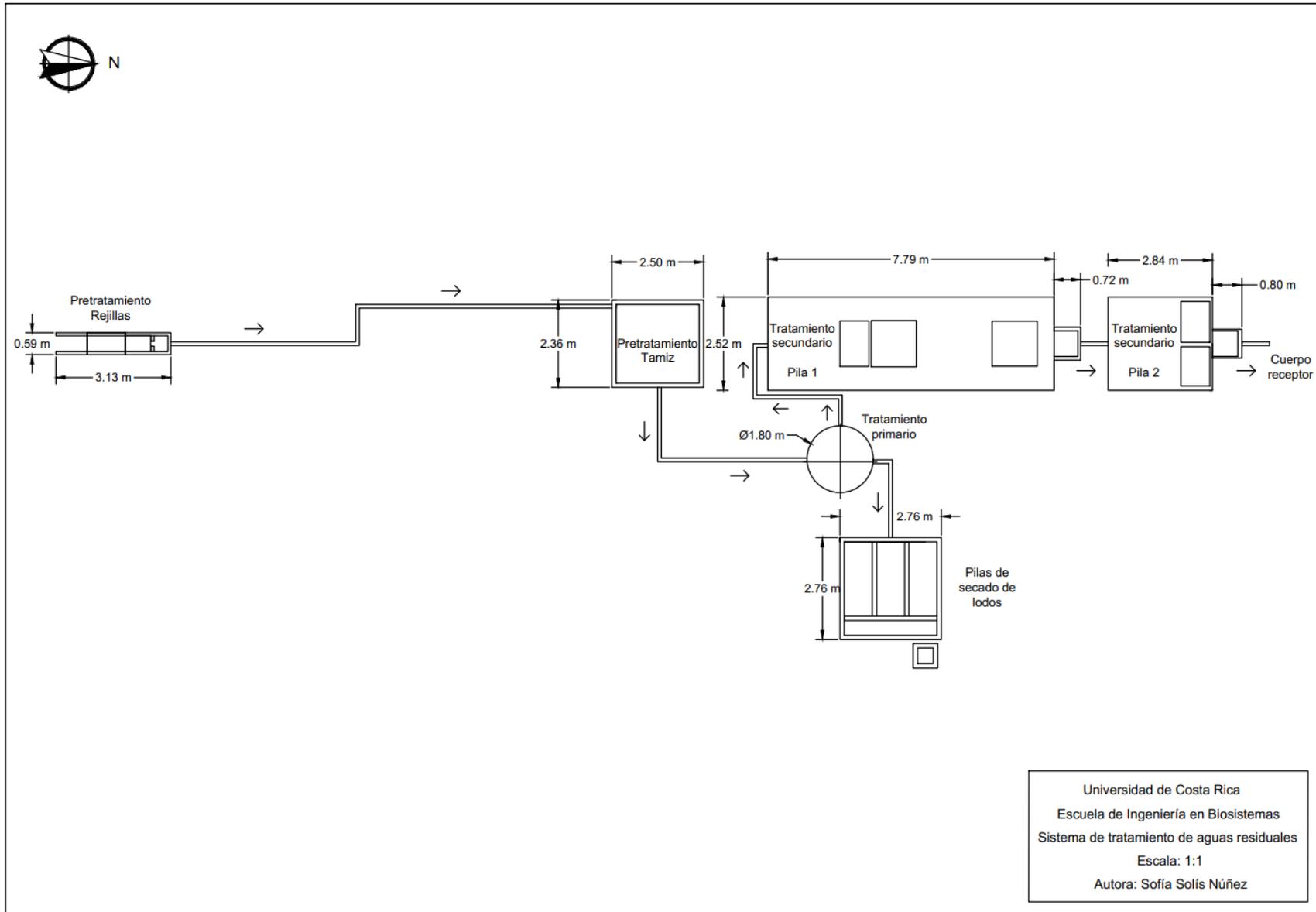


Fig. 10. Plano del sistema de tratamiento de aguas residuales, elaboración propia.

Comparando el sistema de tratamiento de aguas residuales con los sistemas de otras industrias azucareras, se puede visualizar que el este tiene similitud en las etapas y componentes que se utilizan. Tal es el caso del Trapiche Lucerna S.A, localizado en Colombia, donde la depuración de aguas residuales se hace a través de un tratamiento preliminar con rejillas y tratamiento primario por medio de una laguna que realiza el proceso de sedimentación [35]. Por otra parte, el Ingenio Azucarero de CoopeVictoria R.L, ubicado en Costa Rica, cuenta con un tratamiento preliminar, primario y secundario, donde se utiliza un tamizador para extraer los sólidos de gran tamaño y un clarificador y sedimentador para reducir contaminantes específicos, respectivamente [36].

En cuanto al funcionamiento de la planta de tratamiento, se observó que existen tres escenarios que influyen en el caudal y la calidad del agua residual. Los tres escenarios que se dan en la empresa son: mantenimiento, operación y sin operación. De manera específica, el primer escenario consiste en aguas provenientes de la limpieza de los equipos de producción y las instalaciones. Por otra parte, el escenario de operación hace alusión a las aguas residuales que la empresa genera cuando realiza las diferentes actividades productivas. Por último, en el escenario sin operación las aguas residuales provienen de aguas de servicio, es decir, del comedor y servicios sanitarios.

A partir de ello, se puede visualizar que los dos primeros escenarios influyen de manera significativa en la caracterización y cantidad de agua residual, a comparación del último escenario. Esto concuerda con lo reportado por la literatura, donde se hace alusión que las principales aguas residuales que generan este tipo de industria provienen de las actividades de limpieza y del lavado de los equipos, así como del agua utilizada en el proceso productivo [15].

Al analizar el caudal del agua residual que le ingresa a la planta de tratamiento, se identificó que es muy variable dependiendo del escenario y la hora (figura 11). Este comportamiento es común en las industrias azucareras, donde dependiendo del escenario y la actividad a realizar se requieren cantidades variables de agua potable y por consiguiente produciéndose caudales cambiantes de aguas residuales que ingresan a la planta de tratamiento. Por ejemplo, en la producción, la etapa de condensado requiere 50 kg de agua por kg de azúcar para enfriar el condensador [15]. En el caso de este proyecto, se identificó que el caudal promedio que ingresa a la planta de tratamiento en actividad productiva es de 0,26 L/s, y que se presentan diversos valles y picos a lo largo del día, rondando estos entre 0,1 L/s y 1,09 L/s.

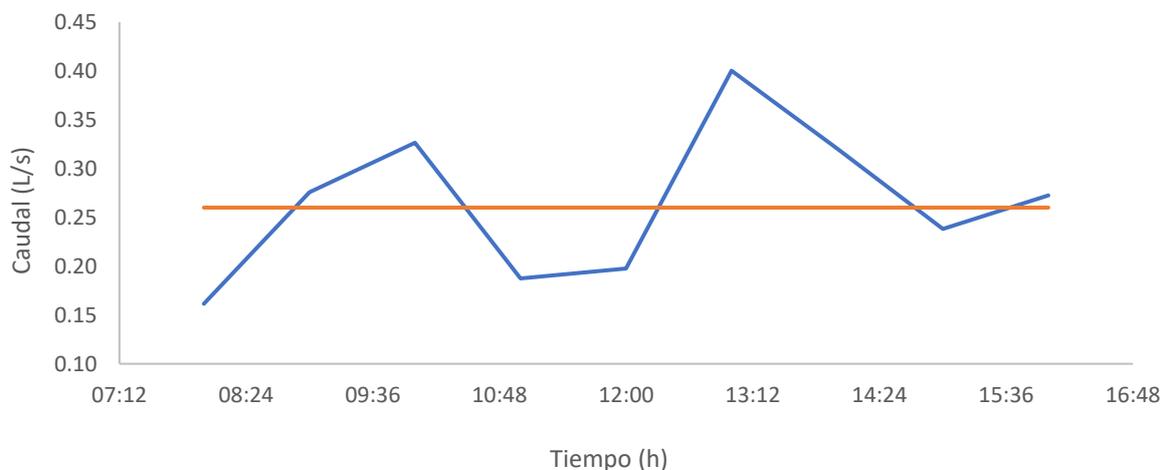


Fig. 11. Comportamiento del caudal para el escenario de producción, elaboración propia.

Comparando el comportamiento del caudal con el funcionamiento de la planta de tratamiento, se observó que para el decantador primario y secundario se tienen tiempos de retención óptimos. Profundizando, el caudal de 0,26 L/s brinda tiempos de retención hidráulica de 5 h para el decantador primario y 18 h para el decantador secundario. Al comparar los tiempos de retención hidráulica obtenidos con la literatura se puede visualizar que son adecuados, ya que se recomienda que sea mínimo de 1 a 3 horas para decantadores primarios [38] y de 6 h a 72 h para decantadores secundarios [82].

Asimismo, se determinó si los picos de caudal afectan el funcionamiento del pretratamiento y los tiempos de retención hidráulica en los decantadores. De manera general, se visualizó que si no hay una extracción continua de los sólidos recolectados en las unidades del tratamiento preliminar estas fallan cuando se presentan caudales pico, esto debido a que los sólidos no permiten el paso del agua residual a las unidades posteriores.

Por otra parte, el ingreso de caudales mayores a 1 L/s ocasiona que los tiempos de retención sean bajos para ambas etapas de tratamiento, siendo de 1 h para el decantador primario y de 5 h para el decantador secundario, y afecta el proceso de tratamiento. Lo anterior concuerda con la teoría, donde se hace alusión que un incremento en el caudal genera una disminución en el tiempo de retención, y por consiguiente repercutiendo en la extracción de los sólidos. Asimismo, cuando se presentan tiempos de retención altos se promueve la generación de condiciones sépticas, problemas de malos olores y flotación de lodos [38]. Esta última condición se puede presentar en la planta, durante los periodos sin operación.

Las actividades que generan caudales pico, y que por tanto disminuyen los tiempos de retención hidráulica, son durante el escenario de operación. En particular, se identificaron dos equipos, los cuales son la puntera y tres evaporadores. Profundizando, se visualizó que la puntera se descarga completamente tres veces durante la producción, lo que ocasiona un caudal de 9 L/s. Por otra parte, los evaporadores brindan un caudal de 23 L/s cada uno, sin embargo, estos solo se llenan y descargan por completo para realizar un lavado en estos antes de iniciar la producción.

A partir de lo mencionado, se puede observar que el aporte de caudal de la puntera y los evaporadores disminuyen los tiempos de retención en los decantadores de la planta de tratamiento, a tal punto que no tiene el suficiente tiempo para poder sedimentar los sólidos presentes en el agua residual. Por lo tanto, se recomienda incorporar un tanque de homogenización, después del pretratamiento y antes del tratamiento primario, para que reciba los caudales pico y los distribuya de manera continua a la planta de tratamiento.

En lo que respecta a la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales que ingresan y salen de la planta de tratamiento, se determinó que el escenario más crítico correspondía al de operación. A continuación, se muestra la caracterización físico química obtenida, donde es relevante mencionar que los datos corresponden a muestras de diferentes días y escenarios de producción:

CUADRO III

Caracterización fisicoquímica del agua residual a lo largo de las etapas de tratamiento,
Mediana \pm Desv.Est (Número de datos).

Parámetro	Pretratamiento	Tratamiento Primario	Tratamiento secundario	Límite permisible
DQO (mg/L)	5 130 \pm 6 098 (5)	5 205 \pm 2 600 (5)	3 336 \pm 3 154 (5)	300
DBO (mg/L)	2 514 \pm 6 098 (5)	2 550 \pm 2 600 (5)	1 635 \pm 3 154 (5)	150
NO ₃ ⁻ (mg/L)	4 \pm 2 (5)	6 \pm 2 (5)	5 \pm 3 (5)	
NH ₃ ⁻ (mg/L)	0,1 \pm 1 (5)	1 \pm 0 (5)	1,2 \pm 3 (5)	
N _T (mg/L)	3 \pm 2 (5)	4 \pm 2 (5)	5 \pm 4 (5)	50
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	18 \pm 21 (4)	22 \pm 9 (4)	24 \pm 36 (4)	25
Sólidos sedimentables (mL/L)	0,2 \pm 1 (3)	3 \pm 16 (3)	0 \pm 0 (3)	1
pH	6,9 \pm 0 (3)	5,3 \pm 1 (3)	4,2 \pm 0 (3)	5 a 9
Temperatura (°C)	24 \pm 3 (3)	30 \pm 2 (3)	23 \pm 1 (3)	15 a 40
Conductividad eléctrica (μ S/cm)	0,22 \pm 0 (3)	0,27 \pm 0 (3)	0,25 \pm 0 (3)	

En el Cuadro III se puede visualizar que el contenido de materia orgánica, en el cuadro indicados como DQO y DBO, y pH no cumplen con los límites permisibles establecidos en el reglamento, mientras que los restantes si lo hacen. Además, se observa que la concentración de todos los parámetros, exceptuando el pH, incrementan al pasar del pretratamiento al tratamiento primario. A continuación, se analiza de manera detallada los resultados obtenidos.

Analizando los resultados de DQO se puede visualizar que, si bien hay una disminución en la concentración, esta sigue sin cumplir con el límite establecido por ley. Al comparar los resultados obtenidos en el presente proyecto con otros estudios, se puede observar que la concentración de DQO puede rondar entre los 3 600 mg/L hasta los 29 000 mg/L [29], [30] y que incluso teniendo una política idónea de uso y reúso del agua se pueden llegar a presentar valores promedios de 2 000 mg/L a 5 000 mg/L [29].

Concentraciones altas de DQO se debe a la presencia de materia orgánica como bagacillo, azúcares no recuperados, grasas, aceites y cachaza que dificultan la reducción de este parámetro [83]. Por lo que se recomienda implementar tratamientos secundarios e incluso terciarios para lograr disminuir aún más la carga orgánica, así como brindarles el mantenimiento respectivo [15], [83].

En cuanto al nitrato (NO₃⁻) y nitrógeno amoniacal (NH₃⁻) se puede visualizar que ambos parámetros incrementan entre el pretratamiento y el tratamiento primario. Lo anterior se puede deber a las concentraciones de pH y contenido de materia orgánica, que tienen influencia en la eficiencia del proceso de nitrificación y por consiguiente en el de desnitrificación.

Profundizando, el proceso de nitrificación se caracteriza por consumir alcalinidad para poder llevar a cabo las reacciones, por lo que requiere que los valores de pH superen la neutralidad [84]. Sin embargo, las condiciones presentes en el decantador son ácidas, por lo que se puede estar afectando la eficiencia del proceso. Además, la presencia de altos contenidos de carga orgánica en el decantador ocasiona un incremento en la concentración de oxígeno disuelto. Lo

anterior posibilita el crecimiento de bacterias heterótrofas que llegan a competir con las nitrificantes y por consiguiente afectan la eficiencia de remoción [84].

Analizando el fosfato, se puede visualizar que hay presencia de este componente en el agua residual, el cual puede provenir de los agentes de limpieza que se utilizan en el mantenimiento de equipos e instalaciones [85]. Asimismo, se observa que este incrementa conforme el agua residual pasa en las diferentes etapas de tratamiento. Lo anterior se puede deber al nivel de sólidos sedimentables, concentración de nitratos, tipo de materia orgánica y la presencia de sólidos suspendidos totales en el agua residual.

De manera general, los sólidos sedimentables genera zonas anaerobias que pueden incentivar estrés bacteriano y con ello la liberación de fósforo [86]. Además, la presencia de altas concentraciones de nitratos complica la reducción de parámetro, ya que las bacterias encargadas del proceso de desnitrificación consumen parte del sustrato y por ende limitan la presencia de este para los microorganismos que eliminan fósforo [87].

Por otra parte, la materia orgánica poco biodegradable en el agua residual afecta la remoción de fósforo. Lo anterior se debe a que la conversión a acetato es más lenta y por consiguiente la concentración disponible se encuentre limitada, lo que ocasiona que haya una afectación en el crecimiento de las bacterias acumuladoras de fósforo. Por último, la presencia de altas concentraciones de sólidos suspendidos incrementan la presencia de fósforo en el efluente, por lo que resulta de vital importancia minimizar estos sólidos [85].

Por otra parte, el aumento en la concentración de los sólidos sedimentables entre el tratamiento preliminar y primario se puede adjudicar al punto de toma de la muestra, las variaciones del flujo, el tiempo de extracción de los lodos y las condiciones ácidas presentes en el decantador. De manera específica, cuando el caudal que ingresa a los decantadores no es constante, se propicia que los lodos sedimentados sean levantados del fondo y entren en estado de suspensión [38]. Esta situación afecta la sedimentación y posibilita que los sólidos suspendidos sean arrastrados hacia el tratamiento secundario.

Además, la presencia de largos tiempos de extracción de los lodos genera condiciones sépticas que disminuyen la velocidad de sedimentación y por consiguiente la eficiencia del decantador. Lo anterior debido a que se generan gases que empujan los sólidos hacia la superficie e impiden que sedimenten en el fondo, lo que permite el paso de sólidos indeseados a etapas posteriores [38]. Finalmente, las condiciones ácidas del decantador contribuyen a que los sólidos permanezcan en suspensión o no se puedan eliminar por completo, por lo que el proceso de sedimentación se ve afectado y por consiguiente su eficiencia [38].

Analizando el pH, se puede visualizar que hay una reducción en la concentración entre el tratamiento primario y secundario y que este está por debajo del límite máximo permisible para verter aguas tratadas en un cuerpo receptor. La fluctuación se puede deber a la variabilidad de los volúmenes y el alto contenido de carga orgánica que contiene el agua residual [88], ya que este favorece la liberación de ácidos grasos volátiles que acidifican el agua residual [83].

En lo que respecta a la temperatura, se puede visualizar que el tratamiento primario presenta el valor más alto. Esto se puede adjudicar al punto de toma de la muestra, el cual se caracteriza por tener una mayor exposición solar a comparación de los otros tratamientos. Por otro lado, se puede visualizar que la conductividad eléctrica incrementa entre el tratamiento preliminar y el primario. Lo anterior se puede deber a la presencia de sólidos disueltos totales [89], la temperatura [90] y las condiciones ácidas, las cuales facilitan la dilución de los metales pesados presentes en el agua residual [91].

4.2 Evaluación de los modelos de humedales artificiales en la remoción de contaminantes

La remoción de contaminantes por parte de los modelos de humedales artificiales se analizó comparando los afluentes con respecto a los efluentes, a través de eficiencias de remoción (ecuación 13). De manera general, las eficiencias se pueden ver influenciadas por el diseño de los modelos, la composición fisicoquímica del afluente y factores ambientales como temperatura, humedad y precipitación. Para propósitos del objetivo 2, se visualizó que el sitio donde se ubicaron los modelos permitía una correcta exposición solar y una mínima exposición a la precipitación, permitiendo el adecuado funcionamiento del sistema de humedales y lográndose controlar las condiciones de estudio.



Fig. 12. Localización del sistema de modelos de humedales artificiales.

Los resultados de los parámetros analizados del afluente y el efluente que sale de los modelos de humedales artificiales se presentan en el Cuadro IV. La información muestra los promedios generales de los parámetros de calidad de agua obtenidos para cada tratamiento en las diez semanas de ensayo y los valores máximos permisibles por ley para comparar los promedios obtenidos. Es importante rescatar que los datos presentados en el Cuadro IV corresponden a muestras de diferentes días y escenarios de producción. En cuanto al análisis estadístico, se llevó a cabo un análisis de varianza para los diferentes parámetros fisicoquímicos en el agua residual de entrada y los efluentes de los modelos primarios y secundarios.

CUADRO IV

Concentración de parámetros fisicoquímicos y eficiencias de remoción (% , valores entre paréntesis) de los modelos del tratamiento primario, (Promedio ± Desv.Est), AR (n=10), Modelos (n=10).

Parámetro	Agua residual primaria	Modelos del tratamiento primario	Valor máximo permisible de descarga en cuerpo receptor
DQO (mg/L)*	11 663 ± 8 369,3	1525 ± 1 067,3 (86,7 ± 7,5)	300
DBO (mg/L)	2 017 ± 1 486,4	517 ± 285,9 (67,1 ± 15,0)	150
N _T (mg/L)**	6,6 ± 6,5	4,3 ± 3,9 (12,5 ± 101,0)	50
PO ₄ ³⁻ (mg/L)*	6,6 ± 4,0	2,0 ± 1,1 (62,5 ± 32,7)	25
pH*	5,5 ± 1,0	6,9 ± 0,6	5 a 9
Temperatura (°C)*	24,2 ± 1,6	22,3 ± 1,8	15 a 40
Sólidos sedimentables (mL/L)	2,2 ± 3,6	NA	1
Conductividad eléctrica (µS/cm)*	0,3 ± 0,2	0,6 ± 0,3	

*Existen diferencias significativas (p<0,05) entre el agua residual (afluente) y los efluentes de los modelos.

** NT: Se determinó por medio de la sumatoria de las concentraciones de Nitrógeno Amoniacal y Nitrato.

DBO: AR (n=3), Modelos (n=3). NT y PO₄³⁻: AR (n=5) , Modelos (n=5).

CUADRO V

Concentración de parámetros fisicoquímicos y eficiencias de remoción (% , valores entre paréntesis) de los modelos del tratamiento secundario, (Promedio ± Desv.Est), AR (n=10), Modelos (n=10).

Parámetro	Agua residual secundaria	Modelos del tratamiento secundario	Valor máximo permisible de descarga en cuerpo receptor
DQO (mg/L)	4 329 ± 4 638,2	1 324 ± 1 306,4 (58,4 ± 26,6)	300
DBO (mg/L)	507 ± 340,8	255 ± 51,7 (31,1 ± 45,2)	150
N _T (mg/L)**	2,1 ± 2,8	0,7 ± 0,2 (25,2 ± 44,8)	50
PO ₄ ³⁻ (mg/L)*	9,5 ± 5,3	1,4 ± 0,9 (82,6 ± 10,0)	25
pH*	3,8 ± 0,4	6,2 ± 1,1	5 a 9
Temperatura (°C)	22,9 ± 1,2	22,3 ± 1,9	15 a 40
Sólidos sedimentables (mL/L)	2,9 ± 8,5	NA	1
Conductividad eléctrica (µS/cm)*	0,3 ± 0,1	0,5 ± 0,2	

*Existen diferencias significativas (p<0,05) entre el agua residual (afluente) y los efluentes de los modelos.

** NT: Se determinó por medio de la sumatoria de las concentraciones de Nitrógeno Amoniacal y Nitrato.

DBO: AR (n=3), Modelos (n=3). NT y PO₄³⁻: AR (n=5) , Modelos (n=5).

Los resultados obtenidos permiten analizar si la concentración de los efluentes, con y sin tratamiento por parte de los humedales, cumple con la normativa costarricense para el vertido de las aguas residuales en cuerpos receptores, según el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (N° 33601-MINAE-S).

De manera general, se puede visualizar que para ambos modelos la concentración de NT, PO_4^{3-} y Temperatura cumplen para ser vertidos en un cuerpo receptor, mientras que la concentración de DQO, DBO no cumplen con el límite. Además, el agua residual primaria y los modelos primarios y secundarios cumplen con la concentración de pH para ser vertidos en cuerpos receptores; caso contrario al agua residual secundaria. Seguidamente, se profundizará en los resultados obtenidos para los siguientes parámetros fisicoquímicos: DQO, DBO, NT, PO_4^{3-} y pH.

Analizando los resultados obtenidos para la concentración de DQO se puede visualizar que existe diferencia significativa entre el agua residual primaria y los modelos primarios ($p=0,0024$) (ver Cuadro IV) pero no en el segundo tratamiento ($p=0,0797$) (ver Cuadro V). Además, se observa que el agua residual secundaria y los modelos respectivos presentan desviaciones cercanas o superiores al valor reportado, lo cual se puede adjudicar a la variabilidad en la producción de la empresa. En cuanto a los porcentajes de remoción, los modelos del tratamiento primario obtuvieron porcentajes del 86,7 % mientras que los del tratamiento secundario obtuvieron porcentajes del 58,4 %.

La remoción obtenida se puede adjudicar al efecto físico de tratamiento que ofrece el sustrato del humedal artificial y su configuración, en este caso granito de río y la configuración de flujo vertical. De manera específica, el reducido tamaño de partícula del granito río permite disminuir los espacios intersticiales por donde pasa el agua residual y por ende incrementando el tiempo de retención. Lo anterior ocasiona que la materia orgánica sea retenida por filtración cerca de las raíces de las plantas. Además, la configuración vertical promueve áreas insaturadas que le brinda a los microorganismos descomponedores oxígeno disponible para degradar la materia orgánica retenida [92].

Para el parámetro de DQO, los porcentajes de remoción obtenidos en los modelos primarios y secundarios son comparables con lo que se indica en la teoría. Por ejemplo, se menciona que los humedales subsuperficiales logran remociones entre 75 % a 85 % [93], y los de flujo vertical del 80 % al 90 % [94]. Comparando con los porcentajes de remoción obtenidos en los modelos de este proyecto, se puede observar que solo los modelos primarios se encuentran dentro de los porcentajes de remoción teóricos. Lo anterior se puede adjudicar a la composición del agua residual y el caudal de alimentación de cada modelo. Profundizando, el volumen de alimentación de los modelos secundarios fue mayor al de los primarios, lo que pudo ocasionar que el contacto entre el agua residual y la biomasa presente en el sistema fuera breve y por consiguiente reduciendo la eliminación de los contaminantes [95].

Analizando los porcentajes obtenidos en este trabajo con la literatura, se puede visualizar que los resultados concuerdan con lo reportado por dos estudios realizados en diferentes localidades de México. De manera específica, ambos estudios realizaron un humedal subsuperficial de flujo vertical a escala de laboratorio para visualizar el nivel de tratamiento que este tipo de sistemas podían hacer en aguas residuales de industria azucarera. Como resultados, el primer estudio obtuvo porcentajes de remoción de la concentración de DQO del 40 % al 78 % [96], mientras que la segunda investigación obtuvo remociones del 42 % al 95 % [97].

Otro estudio de esta índole fue el realizado en India, en donde un humedal subsuperficial de flujo vertical a escala de laboratorio trató aguas residuales de la industria azucarera y logró obtener porcentajes de remoción de DQO de hasta 98,8 %. Por lo que comparando con los

resultados obtenidos se puede visualizar que la remoción fue mayor a la obtenida en el presente estudio, lo que se pudo deber a las condiciones climáticas y sustrato utilizado [65].

En cuanto a la remoción de DBO, se puede visualizar que estadísticamente no hubo diferencias significativas entre el agua residual (afluente) y los efluentes de los modelos, y que ambos sistemas de humedales lograron reducir la concentración de este parámetro en el agua residual. Profundizando, los modelos del tratamiento primario obtuvieron remociones del 67,1 % mientras que los modelos del tratamiento secundario alcanzaron remociones del 31,1 %.

La teoría menciona que los humedales artificiales subsuperficiales logran porcentajes de remoción del 80 % al 90 % [93] y los de flujo vertical entre 48 % a 98 % [98]. Al analizar los porcentajes obtenidos se puede observar que solo los modelos del tratamiento primario se encuentran dentro de lo reportado. Lo anterior se puede relacionar nuevamente al caudal de alimentación, ya que al ser menor que el de los modelos del tratamiento secundario se pudo promover un mayor contacto entre el agua residual y la biomasa, y por consiguiente favoreciendo la reducción de DBO [92].

La relación de DBO/DQO de los datos experimentales mostró un valor de 0,23 para el efluente de los sistemas primarios y de 0,61 para los sistemas secundarios. Al analizar la biodegradabilidad, se puede visualizar que el agua residual primaria se caracteriza por ser no biodegradable, mientras que la secundaria es poco biodegradable [26]. De ahí la importancia de mantener en el tren de tratamiento de la empresa, el tratamiento secundario. De esta manera, se reduce la carga de materia orgánica que ingresaría a los humedales artificiales subsuperficiales. Comparando con otros estudios, se puede observar que las relaciones obtenidas están dentro de los valores reportados para la industria azucarera, siendo estos de 0,26 a 0,68 [30], [88].

Por otro lado, al analizar la concentración de Nitrógeno Total se puede visualizar que el agua residual primaria y secundaria cumplen con el límite máximo permitido para ser vertidos en un cuerpo receptor (ver Cuadro IV y Cuadro V). Al pasar el agua residual primaria por los humedales artificiales, se redujo aún más la concentración, teniéndose porcentajes de remoción de 12,5 % para los modelos primarios y de 25,2 % para los secundarios. En lo que respecta al análisis estadístico, este obtuvo como resultado que los afluentes no presentaron diferencias significativas con respecto a los efluentes de los modelos primarios y secundarios.

La literatura menciona que los humedales subsuperficiales logran remociones del 20 % al 40 % [93] y los de flujo vertical un 30 % [99]. Al comparar con los resultados obtenidos, se puede observar que los sistemas de humedales están por debajo de las remociones reportadas. Lo anterior se pudo deber a que el proceso de nitrificación-desnitrificación no se llevara cabo en su totalidad por la influencia de factores como la fuente orgánica e inorgánica de carbono, pH, población microbiana, oxígeno disuelto y temperatura [100].

Un estudio realizado en Colombia reportó resultados similares a los del presente proyecto. Profundizando, el autor evaluó la remoción de Nitrógeno Total utilizando un sistema de prototipos de humedales subsuperficiales de flujo vertical con y sin vegetación (*Heliconia psittacorum*). Entre los resultados obtenidos, se hace énfasis en que ambos sistemas obtuvieron bajas remociones de la concentración de N_T (18 % al 25 %), debido a que el proceso de desnitrificación no se llevó de manera adecuada [92].

Otro parámetro fisicoquímico que cumple con el límite permisible para ser vertido en un cuerpo receptor es el fosfato (PO_4^{3-}). De manera general, se puede observar que la concentración tanto el afluente a los modelos primarios como secundarios se encuentran por debajo del límite (ver Cuadro IV y Cuadro V) y que, al pasar por los humedales artificiales, se depuran aún más. Específicamente, los modelos primarios lograron disminuir un 62,5 % de la concentración de fosfato, mientras que los secundarios un 82,6 %. Por lo que estadísticamente existe diferencias significativas tanto para el tratamiento primario ($p=0,0371$) como para el secundario ($p=0,0095$) al aplicar el análisis de varianza.

Según estudios realizados en humedales subsuperficiales de flujo vertical, la remoción de fosfatos por parte de estos sistemas ronda entre 62 % a 99,5 % [101], [102]. Por otro parte, dos estudios realizados en Honduras e Indonesia, evaluaron la eficiencia de depuración de un humedal subsuperficial de flujo horizontal con *Heliconia* como vegetación y reportaron porcentajes de remoción de 40 % y 89,9 % [103], [104]. Por último, una investigación llevada a cabo en Indonesia utilizó un humedal subsuperficial vertical con *Heliconia* para evaluar la remoción de fosfato, entre los resultados obtenidos se hace énfasis en que se logró una eficiencia del 50,9 % [105].

Las concentraciones de fosfato obtenidos en el presente proyecto, demuestra que el efluente de los modelos primarios y secundarios se encuentran dentro de los valores reportados por la literatura. La remoción de este parámetro fisicoquímico se puede adjudicar a las plantas y el sustrato establecidos en los humedales artificiales. Profundizando, las raíces de las plantas aportan oxígeno disuelto en la zona de la rizosfera lo que permite que los microorganismos aerobios que están en esta zona tengan buena oxigenación y por consiguiente propiciando una buena remoción de fósforo [106].

Por otro parte, la depuración de fosfato en el sustrato se puede dar por intercambio iónico y adsorción [102]. Donde en este último, los microorganismos que están presentes en la biopelícula asimilan el fosfato para lograr los procesos metabólicos que permiten su desarrollo y reproducción. Es importante mencionar, que la depuración de fosfato por este medio es más eficaz, debido a la tasa rápida de crecimiento de los microorganismos [106].

Si bien se puede visualizar, que la remoción de este parámetro por el sustrato es más eficiente, es necesario brindar también condiciones adecuadas de biomasa y desarrollo vegetal. Lo anterior se debe a que conforme el tiempo pase el sustrato va a llegar a saturarse, ocasionando que la asimilación se dé principalmente por parte de la biomasa y las plantas [101].

En lo que respecta al pH, se puede visualizar que el agua residual primaria se encuentra dentro de los límites permisibles más no el agua residual secundaria. Lo anterior se puede adjudicar a la presencia de largos tiempos de extracción de los lodos que genera condiciones sépticas [38] y por consiguiente la liberación de ácido sulfhídrico que baja el pH [107].

Además, se puede observar que los modelos de ambos tratamientos alcalinizaron el agua residual, siendo óptimos para ser vertidos en un cuerpo receptor. Profundizando, el agua residual primaria paso de 5,5 a 6,9 y la secundaria de 3,8 a 6,9 al pasar por los humedales residuales. Por lo que estadísticamente, tanto los modelos del tratamiento primario ($p=0,0007$) como los secundarios ($p=0,00001$) presentaron diferencias significativas al aplicar el análisis de varianza.

Varios estudios realizados en humedales subsuperficiales de flujo horizontal y vertical con diferentes especies vegetativas obtuvieron un comportamiento similar, es decir, donde el efluente de los humedales presentaban pH más altos que los del afluente [100], [108]–[110]. De la misma forma sucedió en dos investigaciones llevadas a cabo en Colombia, donde utilizaron *Heliconia psittacorum* como vegetación y lograron un incremento de 2,62 y 1,17 unidades de pH [111], [112]. El aumento de este parámetro a la salida de los humedales artificiales es muy común, ya que estos sistemas se caracterizan por tener capacidad amortiguadora [108] producto de la actividad fotosintética de la vegetación y la desnitrificación que sucede en el sustrato [113].

A partir del monitoreo realizado por diez semanas, se decide considerar como parámetro de diseño el DQO, debido a que este factor tiene gran influencia en el adecuado funcionamiento del humedal artificial. Al analizar las concentraciones de DQO del efluente del tratamiento primario como secundario (ver Cuadro IV y Cuadro V), se puede visualizar que ninguno de los efluentes cumple con el límite permisible establecido por el Reglamento de Vertido y Reúso de aguas residuales. Sin embargo, ambos modelos lograron altas remociones del contaminante por lo que, realizando ajustes en el diseño, específicamente en el caudal y la concentración de DQO, se lograría cumplir con el límite establecido por la normativa.

A partir de ello, se decide implementar el humedal como tratamiento terciario, es decir mantener el sistema de tratamiento actual con el que cuenta la empresa y agregar los humedales. Lo anterior se hace con la finalidad de que la concentración de materia orgánica con la que se vaya a alimentar los humedales sea la más baja posible. Esto debido a que se recomienda que estos sistemas no sean alimentados con aguas residuales que presenten elevadas cargas orgánicas, ya que puede saturar el sustrato, afectar el funcionamiento del sistema en corto plazo y por consiguiente incrementar los costos de mantenimiento [114].

4.3 Escalamiento del diseño preliminar del humedal artificial

La constante de velocidad de remoción de primer orden se determinó considerando colocar los humedales como tratamiento terciario. Por lo que utilizando la ecuación 6 y 7, el área de las cajas ($0,35 \text{ m}^2$), la porosidad del sustrato (0,20), la concentración de DQO del afluente y del efluente de los modelos secundarios, así como, la concentración base. Se obtuvo que la constante de remoción para el flujo tapón fue de 0,031 m/d y para el de tapón modificado de 0,035 m/d (ver apéndice 19). Sin embargo, para efectos del presente estudio se decidió diseñar los humedales a partir de la constante de flujo tapón, debido a que no se ve influenciada por la variabilidad de la concentración de materia orgánica en el agua residual.

Según la literatura, para climas tropicales la constante ronda entre 0,075 m/d y 0,48 m/d [48], [100], [115]. A nivel nacional, un estudio que utilizó *Heliconia psittacorum* como vegetación reportó una constante de remoción de 0,041 m/d [47]. Al comparar los valores reportados con el obtenido en el presente estudio se puede visualizar que este difiere, lo cual se puede adjudicar a la concentración de la materia orgánica y la temperatura de la zona de estudio [47]. A partir de lo expuesto, el escalamiento del diseño preliminar de los humedales se realizó con la constante obtenida y no con valores reportados, ya que esta se ajusta a las condiciones presentes en la zona.

En lo que respecta al caudal de alimentación, este se determinó por medio del área y la concentración de DQO. Para ello, se consideró un área disponible de 75 m^2 , la cual fue determinada en el primer objetivo cuando se realizó la evaluación del sistema de tratamiento

con el que cuenta actualmente la empresa. Además, se tomó en cuenta una concentración de materia orgánica de 4 329 mg/L y una constante de remoción de 0,031 m/d; dando como resultado un caudal de alimentación de 0,9 m³/d y un tiempo de retención hidráulica de 15 días. Otros estudios han reportado valores de (3 a 15) días para humedales subsuperficiales [45], [116], [117], por lo que se puede visualizar que el tiempo de retención es adecuado.

En cuanto al diseño de los humedales, se decidió dividir el área total (75 m²) en dos humedales en configuración en paralelo (38 m², cada uno). Por tanto, la dimensión de cada humedal es de 7,40 m de largo y 5,20 m de ancho. Lo anterior se hizo con la finalidad de que cuando se deba realizar mantenimiento, se pueda trabajar con un sistema y así evitar detener la planta de tratamiento.

Una vez establecida el área, se prosiguió a diseñar el bordo de contención de los humedales, es decir, las paredes de los humedales. Para ello, se decidió realizar una estructura de concreto de 15,40 m de largo, 5,60 m de ancho y 1,50 m de alto. Es importante mencionar, que la altura se subdivide de la siguiente manera: 10 cm de contrapiso de concreto, 90 cm de sustrato que corresponde a la profundidad efectiva del humedal [45] y 50 cm de resguardo en caso de que se dé la acumulación de sedimentos, agua y basura [116]. A continuación, se muestra una representación de esta (figura 13).

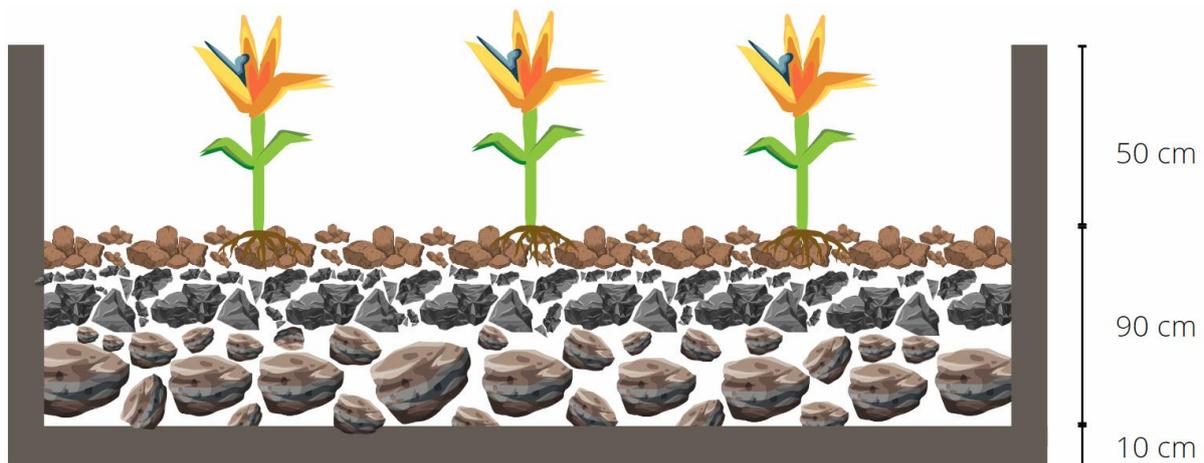


Fig.13. Distribución de la altura del humedal artificial, elaboración propia.

Para el sistema de alimentación y distribución, se decidió implementar tubería sanitaria de PVC de 1 ½" [45] con una separación de 1 m entre tuberías [118]. En cuanto a los orificios, estos serán de 6 mm de diámetro, distanciados cada 0,6 m y deberán colocarse en la parte superior de la tubería para que todos lleguen a tener el mismo caudal [45] (ver apéndice 25). Seguidamente, se presenta el plano del sistema de alimentación y distribución.

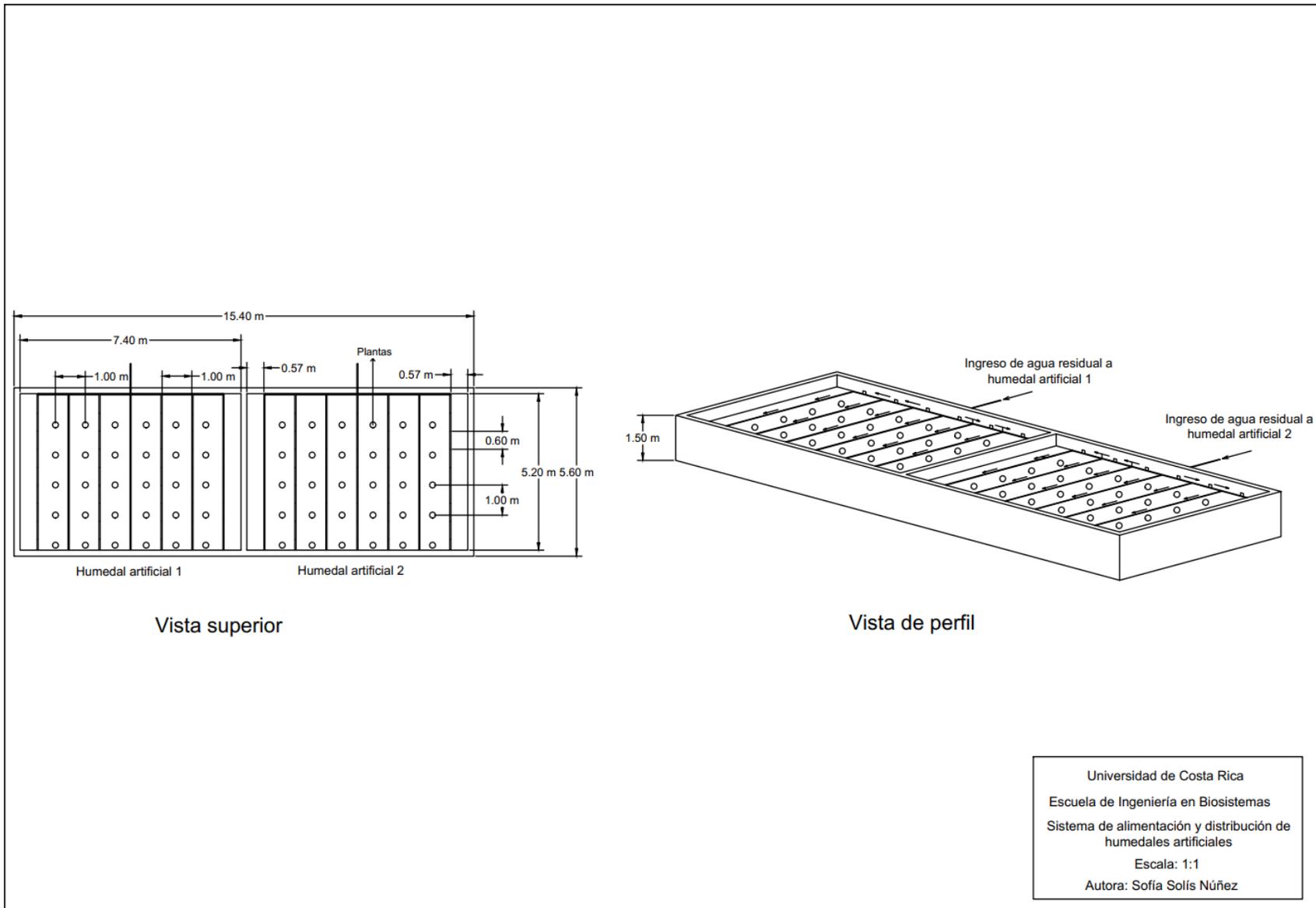


Fig. 14. Plano del sistema de alimentación y distribución de los humedales artificiales, elaboración propia.

Por otra parte, el sistema de drenaje estará conformado por tubería corrugada de PVC de 4" [45], con un espaciamiento de 1 m entre cada tubería [118] y el mismo arreglo de orificios del sistema de alimentación [45] (ver apéndice 26). Además, a cada ramal se le deberá incorporar una tubería vertical de 1 m de largo para airear el sistema, esto con la finalidad de brindar condiciones aeróbicas al sustrato y con ello mejorar el rendimiento de oxidación de la materia orgánica [53].

Es importante mencionar, que al sistema de drenaje se le deberá dar una inclinación de 0,5 % con respecto al nivel de suelo, esto para facilitar el drenaje completo cuando sea requerido [45], [116]. A continuación, se presentan los planos del sistema de drenaje (figura 15).

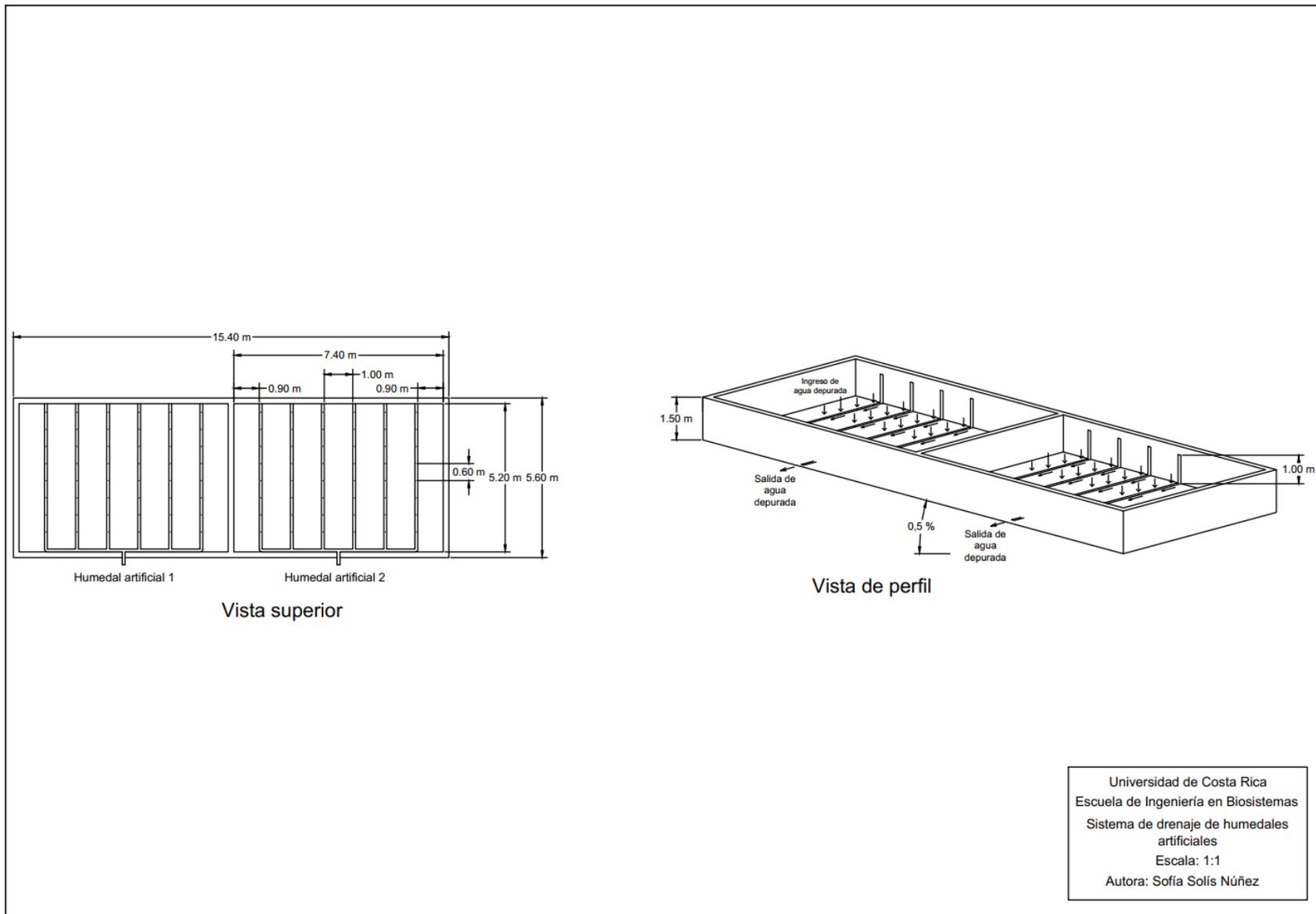


Fig. 15. Plano del sistema de drenaje de los humedales artificiales, elaboración propia.

En lo que respecta al sustrato, este se subdividirá en una capa inferior de 10 cm canto rodado, una capa intermedia de 30 cm de piedra cuarta de origen volcánico y una capa superior de 50 cm de granito de río [45], [119]. Tal como se muestra en la figura 16.

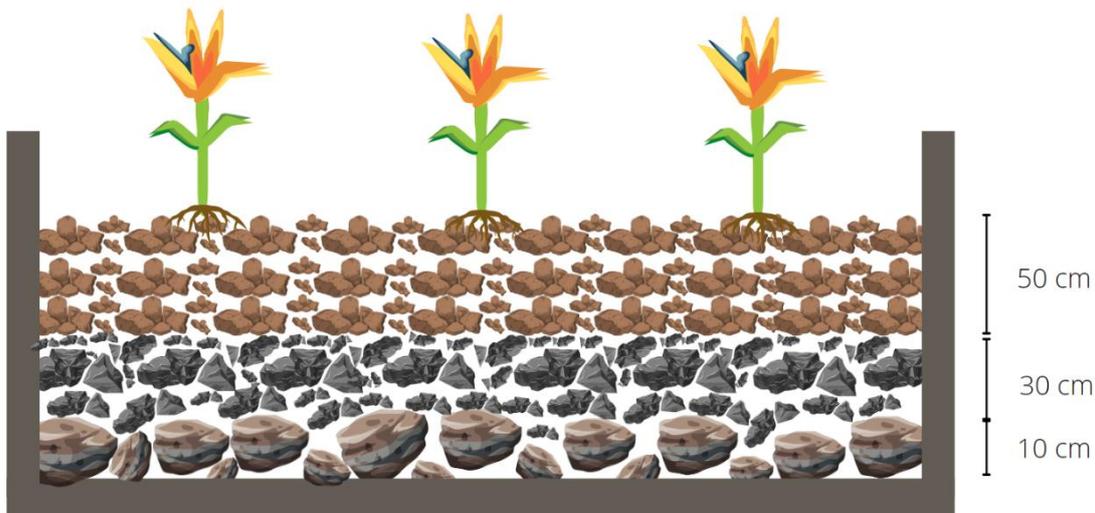


Fig. 16. Distribución del sustrato en los humedales artificiales, elaboración propia.

Finalmente, para la vegetación se colocará *Heliconia psittacorum* distribuida cada 1 m² [116]. Por lo que cada humedal tendrá 30 plantas. Seguidamente se presenta una representación:

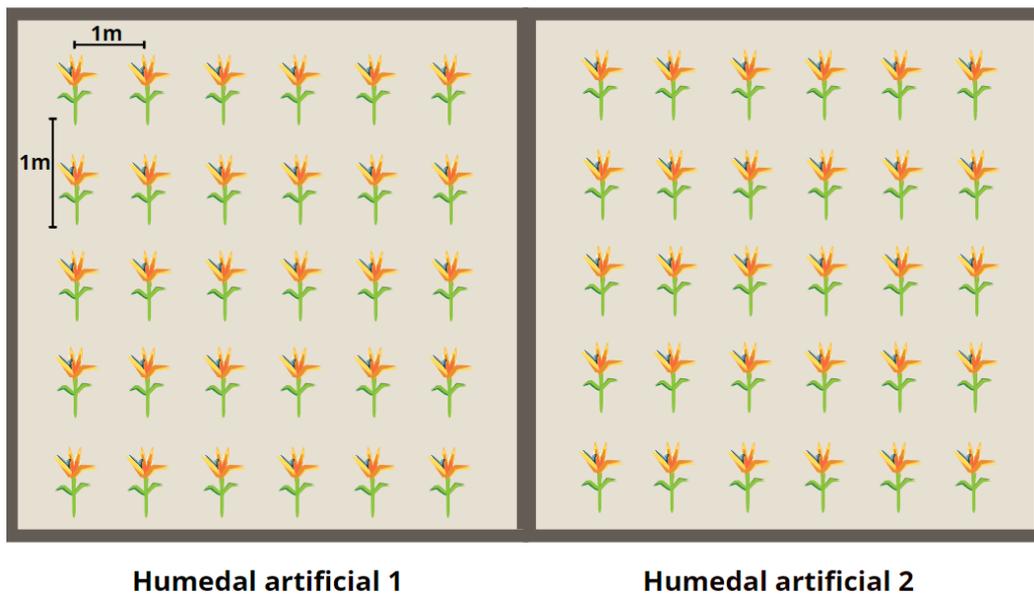


Fig. 17. Distribución de vegetación en los humedales artificiales, elaboración propia.

La estructura de entrada de los humedales se diseñó tomando en consideración que tuviera la capacidad de almacenar el caudal de alimentación de los humedales, es decir, 0,9 m³/d y que además se tuviera un margen de seguridad para evitar desbordamientos de la estructura [81]. A partir de esto, se diseñó un vertedero de concreto de 1 m³, el cual estará conformado por la tubería de entrada y dos tuberías de salida. De manera específica, la tubería de entrada corresponderá a PVC sanitario de 3” y se deberá colocar en el fondo del vertedero para evitar turbulencias dentro de la estructura. Por otra parte, las tuberías de salida serán de PVC sanitario de 1 ½”, con T a las salidas y se ubicarán a 0,25 m de altura para que la alimentación de ambos humedales se dé de manera uniforme.

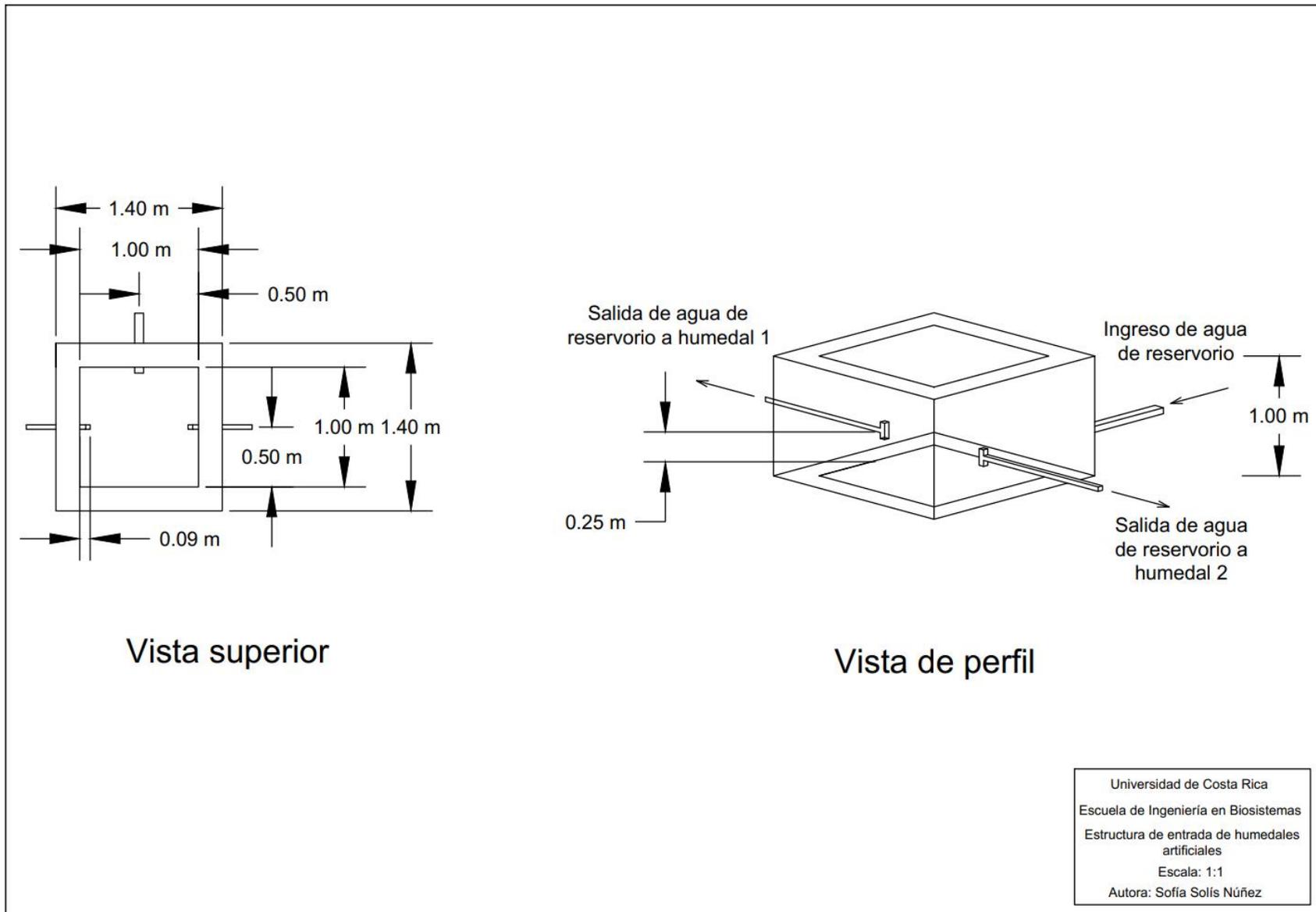


Fig. 18. Plano de estructura de entrada de los humedales, elaboración propia.

En lo respecta a la estructura de salida, los manuales de diseño establecen que esta debe ser de la misma altura del humedal y las tuberías se deben colocar en el fondo de la estructura. Además, se menciona que, si se requiere cambiar la configuración del humedal, es decir de flujo vertical a horizontal o viceversa, se debe incorporar una tubería vertical cuya altura asegure un volumen similar a la altura del sustrato del humedal artificial [81].

Por lo tanto, para la presente investigación se diseñó una estructura de concreto de 1,10 m² y 1,50 m de profundidad, conformada por una tubería de entrada y de salida. Profundizando, la tubería de entrada será corrugada de PVC de 4” y la de salida de PVC sanitario de 4”, ambas colocadas en el fondo de la estructura. Además, a la tubería de salida se le incorporó una tubería vertical de 0,85 m de alto para que en caso de que la empresa requiera cambiar los humedales de flujo vertical a horizontal, lo pueda hacer.

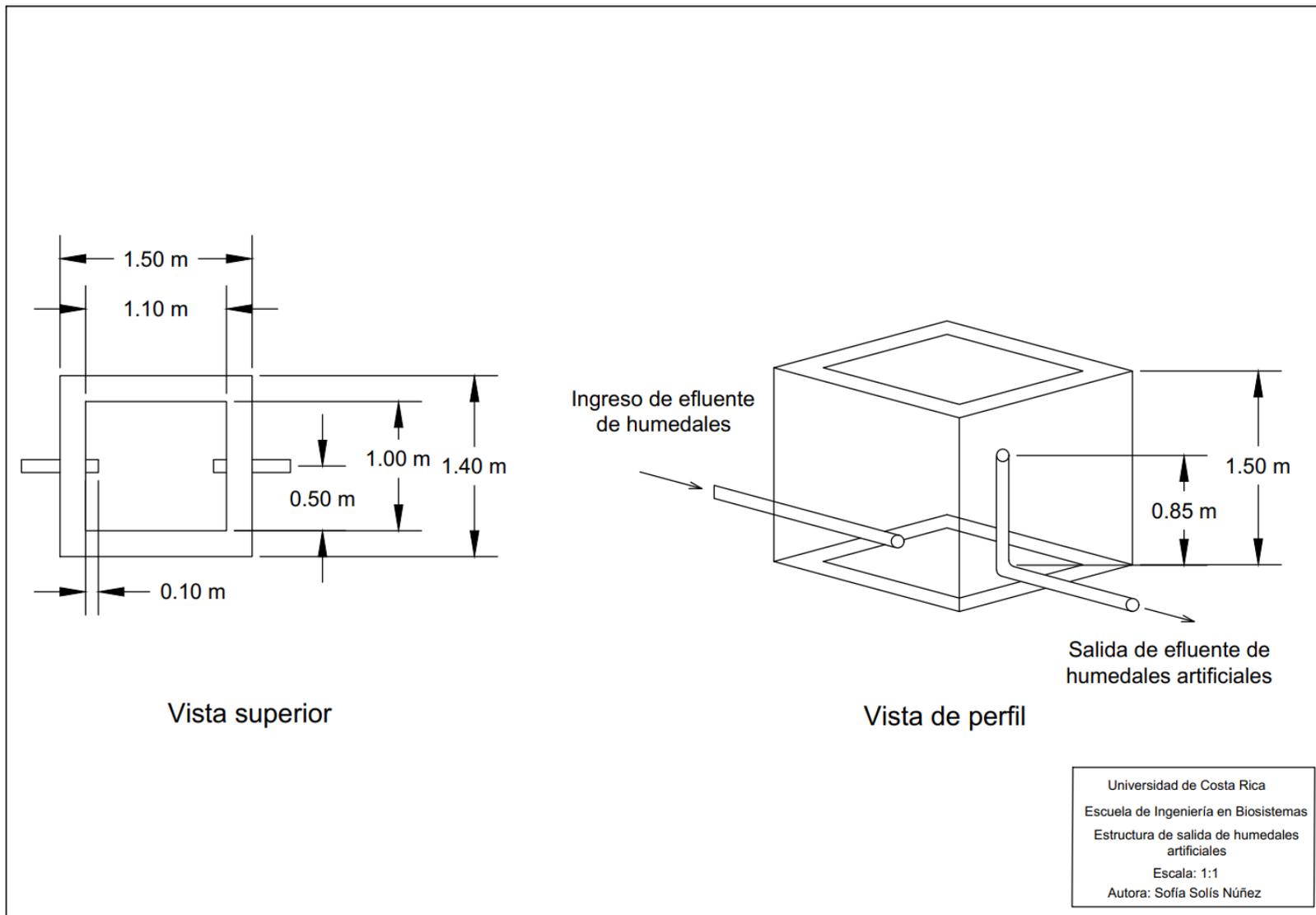


Fig. 19. Plano de estructura de salida de los humedales, elaboración propia.

El vertedero de aforos será tipo triangular y de concreto debido a que es lo que normalmente se implementa en los sistemas de tratamiento de aguas residuales [43]. Para diseñar la carga del vertedero (h), se tomó en consideración el caudal de salida de los humedales artificiales (0,9 m³/d), una abertura de 15 ° (φ) debido a que el flujo es bajo, un coeficiente de descarga del vertedero de 0,62 (C_d) y la siguiente ecuación [120]–[122]:

$$Q = C_d * \frac{8}{15} * \sqrt{2g} * \tan \frac{\phi}{2} * h^{\frac{5}{2}} \quad (15)$$

Por lo que sustituyendo los valores en la ecuación 15 se obtiene como resultado una carga de 0,6 m, a la cual se le añadió un margen de seguridad de 0,1 m en caso de que se presenten flujos anormales [122]. Posteriormente, se estableció que la altura fuera de 1,5 m para asegurar que la relación H/P fuera menor o igual a 0,4 [122]. Por lo tanto, el vertedero sería de 2,00 m de largo, 0,79 m de ancho y 1,50 m de alto; con un ángulo de 15 ° y una carga de 0,6 m. En lo que respecta a las tuberías, tanto para la entrada como para la salida, se utilizará PVC sanitario de 4”.

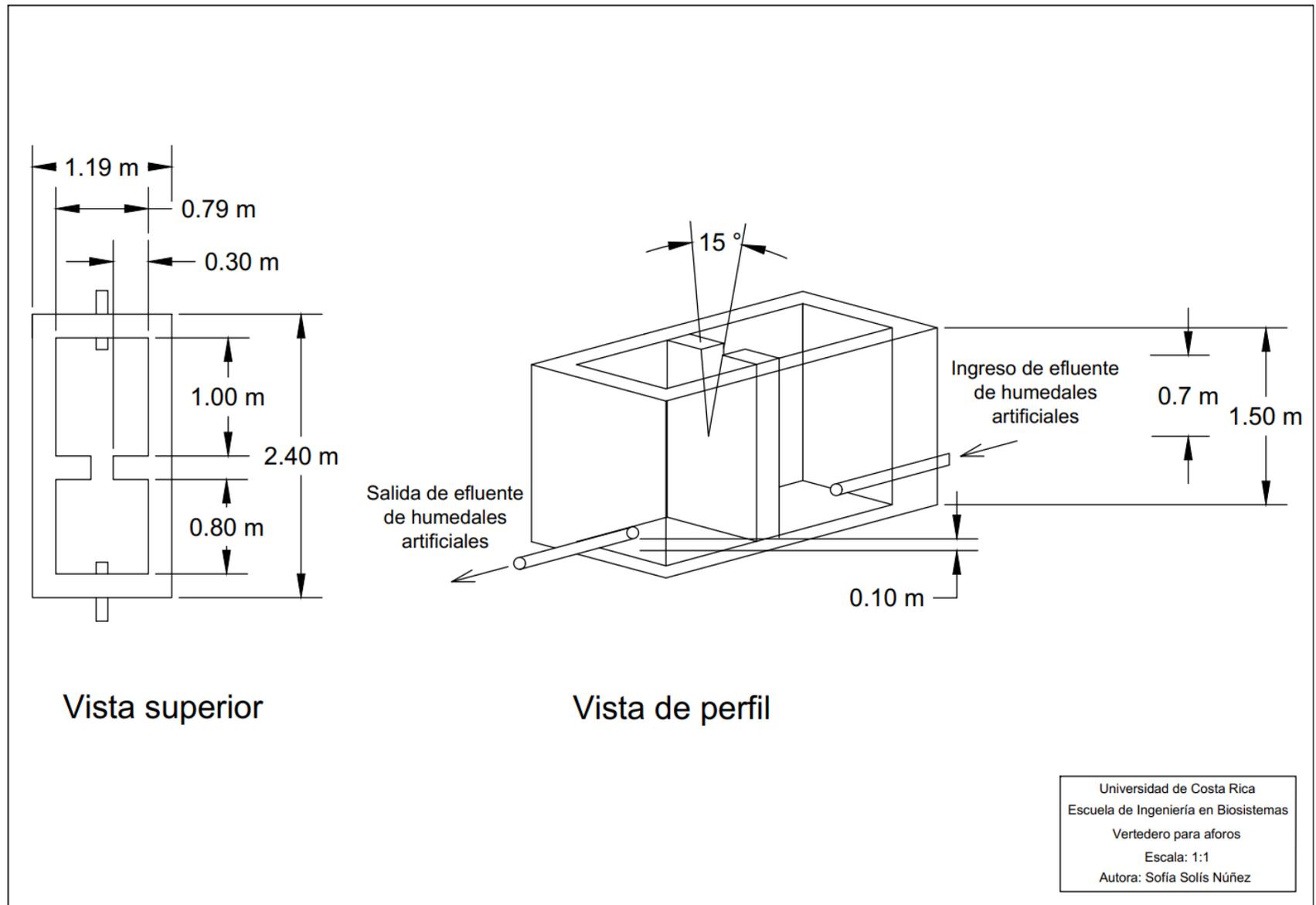


Fig. 20. Plano de estructura de vertedero para aforo, elaboración propia.

Como previamente se mencionó, el humedal requiere un caudal de alimentación de $0,9 \text{ m}^3/\text{d}$ sin embargo, el caudal de operación de la planta de tratamiento es de $0,26 \text{ L/s}$ ($22 \text{ m}^3/\text{d}$). Por lo tanto, se requiere incorporar un reservorio que permita controlar el caudal de alimentación de los humedales.

A partir de ello, se propone incluir una estructura de concreto de 1 m^3 que contenga una bomba sumergible de aguas residuales, esto con la finalidad de poder transportar el efluente del tratamiento secundario hasta el reservorio. En cuanto al reservorio, la tubería de salida deberá tener una válvula de bola para poder controlar el caudal de salida y así asegurar el caudal de alimentación de los humedales. Además, se recomienda incluir en la base una estructura que le asegure la altura suficiente para que el caudal sea transportado por gravedad hacia la entrada de los humedales.

Por otro lado, se deberá asegurar que entre la estructura de entrada de los humedales y los sistemas de humedales haya una pendiente del 1% para que ambas unidades sean alimentadas por gravedad. Por lo tanto, el sistema de tratamiento de aguas residuales, incluyendo los humedales, quedaría de la siguiente forma:

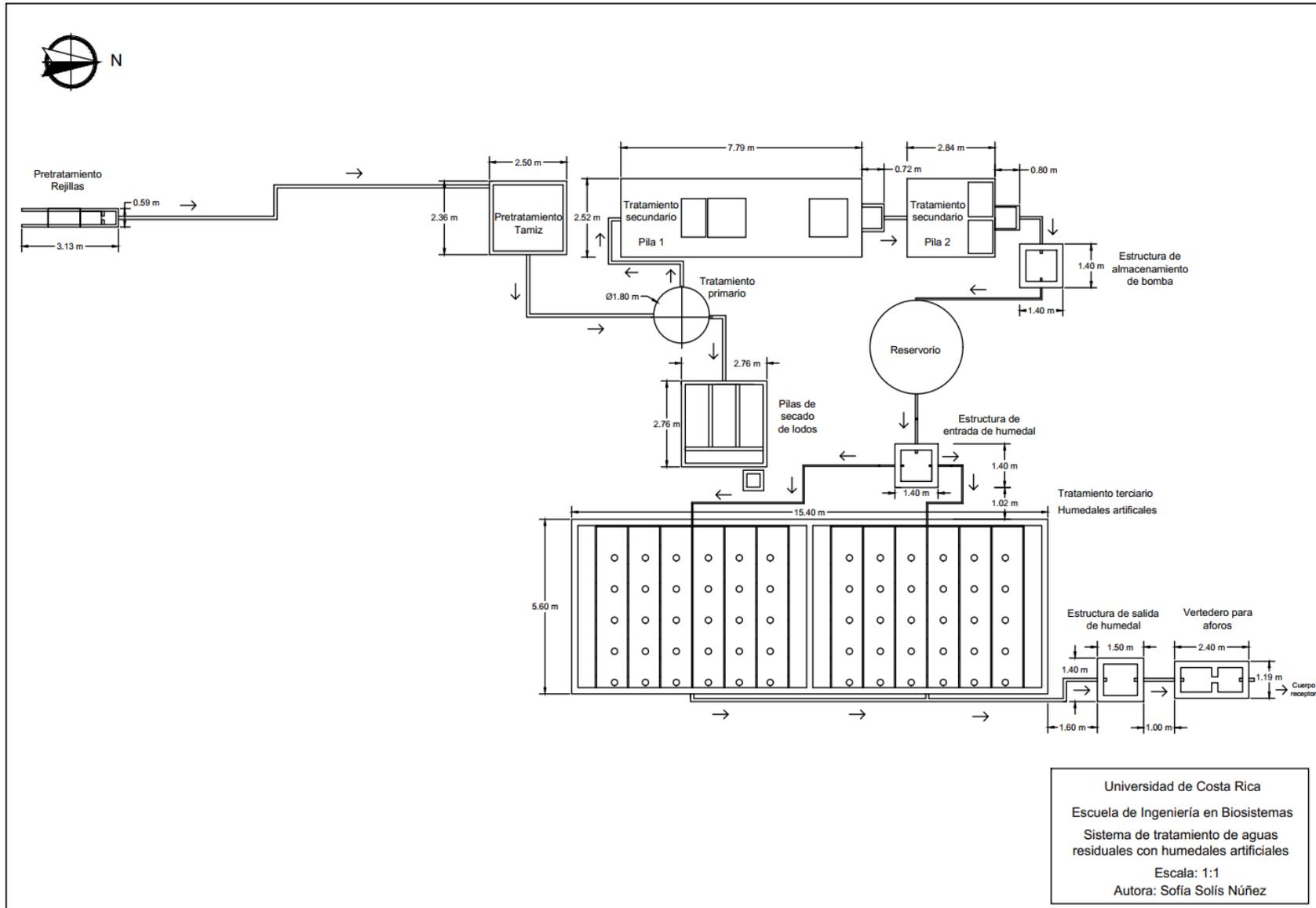


Fig. 21. Plano del sistema de tratamiento de aguas residuales incluyendo humedales artificiales y estructuras complementarias, elaboración propia.

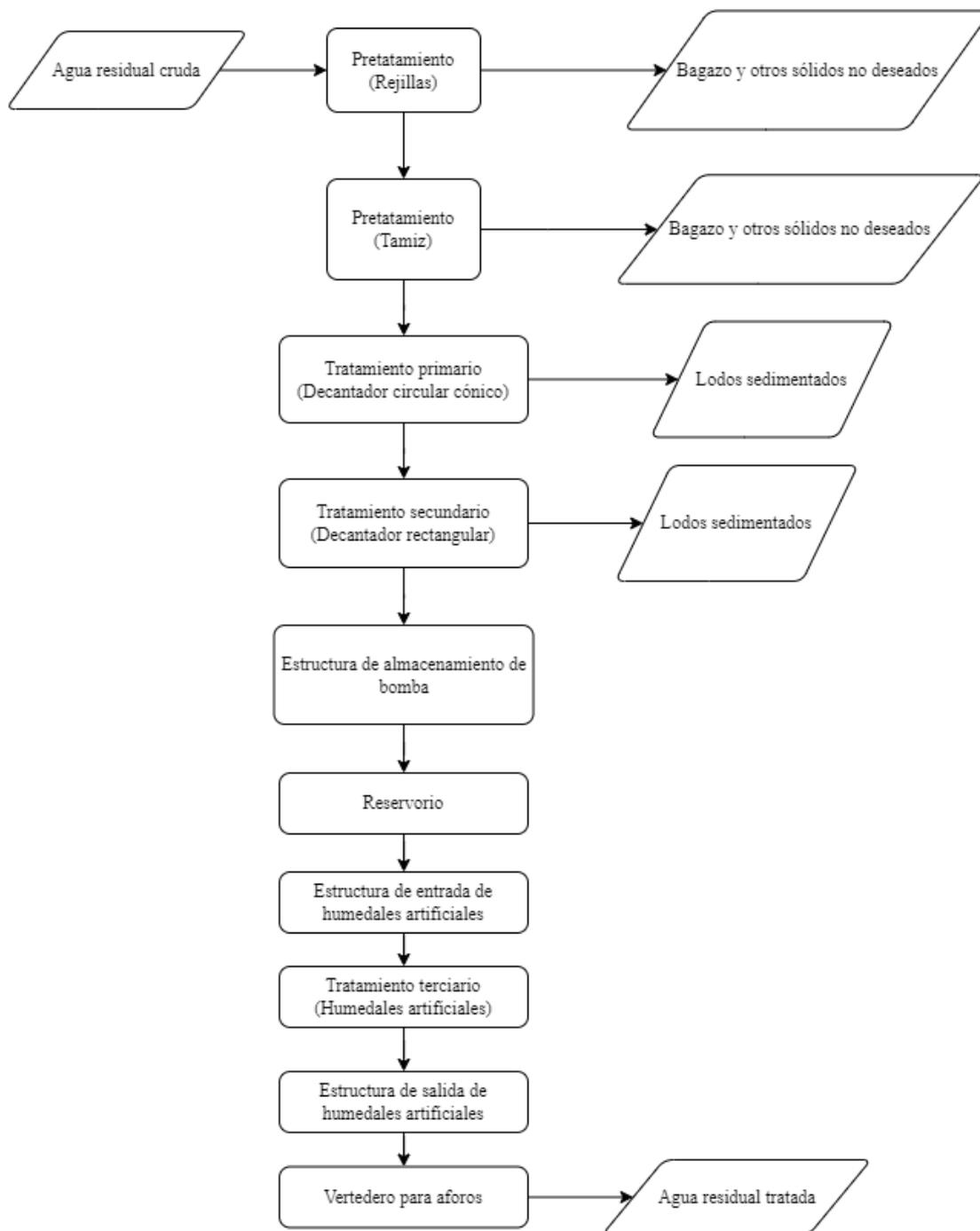


Fig. 22. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales incluyendo humedales artificiales y estructuras complementarias, elaboración propia.

En lo que respecta al mantenimiento de los humedales, este se subdivide en tres ítems: ajuste del nivel del agua, mantenimiento de un flujo uniforme en la entrada y salida del humedal y el manejo de la vegetación [81]. Seguidamente, se va a profundizar en cada apartado.

El ajuste del nivel de agua es una variable importante por monitorear debido a que afecta la propagación de oxígeno atmosférico en la cubierta vegetal y la fase húmeda, así como, el tiempo de retención hidráulica. A partir de ello, se deberá estar revisando que los humedales reciban el caudal de alimentación y si se da la presencia de cambios considerables en el nivel de agua se deberá investigar las causas que puedan estar influyendo, como salidas obstruidas y fugas [81].

Por otra parte, el mantenimiento de un flujo uniforme en las estructuras de entrada y salida permite asegurar que el humedal trabaje de manera adecuada y por consiguiente se logre la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual. Por lo tanto, se deberá inspeccionar y limpiar de manera frecuente las estructuras de entrada y salida para remover cualquier desecho que las pueda obstruir. Además, se recomienda limpiar las paredes de las estructuras, a través de un rociador de alta presión o medios mecánicos, para remover limos bacterianos que se puedan desarrollar [81].

En cuanto al manejo de la vegetación, se deberá asegurar que la cubierta vegetal se encuentre libre de malezas y cualquier otra vegetación no deseada (hojarasca). Asimismo, para propiciar una cubierta eficiente se deberá realizar una poda del 10 % al 15 % de la vegetación de dos a tres veces al año, esto para eliminar primordialmente especies vegetales con tonalidad amarillenta. Además, se puede realizar una resiembra para asegurar que no haya áreas sin vegetación [116].

4.4 Inversión asociada a la construcción del humedal artificial

Como anteriormente se mencionó, la inversión del proyecto se subdividió en tres secciones principales, elementos estructurales adicionales, mano de obra requerida para la construcción de las estructuras y permisos municipales. Seguidamente, se detalla la inversión de cada una estos.

Para el caso de la inversión del sustrato, se tomó en consideración la cantidad requerida de cada sustrato (36 m³ de granito de río, 21 m³ piedra cuarta de origen volcánico y 7 m³ piedra de río tipo canto rodado) y la presentación disponible por el vendedor para estimar cuanto material se debía solicitar. Una vez determinadas las cantidades, se procedió a determinar los valores de mercado incluyendo el transporte hasta la empresa.

En cuanto a la tuberías, accesorios y material de obra gris, se consideró lo requerido por cada estructura propuesta. De manera específica, se determinó el tipo y cantidad de tubería y accesorios para el sistema de alimentación, distribución y drenaje de los humedales, así como el de las estructuras complementarias. Mientras que, para el material de obra gris se consideró las especificaciones del maestro de obras para cada estructura. Una vez obtenidos los materiales, se procedió a determinar los valores de mercado, a través de diferentes cotizaciones. Es importante mencionar, que los materiales de obra gris se cotizaron en tres puntos de venta diferentes por ser el escenario más crítico.

Por otro lado, la bomba propuesta se seleccionó con base al caudal de operación de la planta de tratamiento (22 m³/d), la distancia a recorrer (9,25 m) y que fuera adecuada para transportar aguas residuales. Es importante rescatar, que no se tomó en consideración la carga que puede aportar la pendiente debido a que se visualizó, mediante Google Earth Pro, que esta no es significativa (<0,5 %). Si bien es cierto que la bomba presenta un margen de seguridad para contemplar esta carga, se recomienda realizar un estudio topográfico de la zona para corroborar la selección de esta.

En lo que respecta al reservorio, este se seleccionó de tal forma que pudiera almacenar el volumen de agua residual que sale del tratamiento secundario, es decir, 22 m³. No obstante, se recomienda realizar más mediciones de caudal para corroborar el dimensionamiento de este.

Por otra parte, la estimación de mano de obra se consultó a un maestro de obras y se subdividió en dos partes, el requerido para construir las estructuras grises y los elementos internos del humedal (movimiento de tierra, tuberías de alimentación y drenaje y la instalación del sustrato

y vegetación). Por lo tanto, para la obra gris se estima una duración de 1 mes y 11 días y se requiere como trabajadores un operario, ayudante de operario y peón.

Mientras que, la construcción de los elementos internos del humedal va a tener una duración de 15 días y se necesita como trabajadores un operario, peón, fontanero y ayudante de fontanería. Respecto a los salarios, estos se estimaron con base a los salarios mínimos por ocupación del 2023, establecidos por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social [123]. Además, se consideraron las cargas sociales y la póliza de seguro.

Finalmente, se tomaron en cuenta los permisos municipales requeridos para poder incluir las estructuras propuestas dentro de la planta de tratamiento. En lo que respecta al costo de estos permisos, este corresponde a un 2,5 % del costo total de la obra. Además, se incluyeron los costos asociados a los servicios de agua y luz. Estos se estimaron a partir de la mencionado por el maestro de obras en cuanto a requerimiento de m^3 para el servicio de agua, y de equipos y tiempo de utilización para el servicio de electricidad. Es importante mencionar, que no se incluyó los costos asociados a la adquisición de la vegetación debido a que la misma se encuentra cerca de la empresa. A continuación, se presenta la inversión del proyecto para los tres escenarios:

CUADRO VI
Inversión del proyecto para los escenarios propuestos (en colones).

Sustrato			
Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Sustrato	2 994 137,52	2 994 137,52	2 994 137,52
Transporte	935 000,00	935 000,00	935 000,00
Tuberías			
Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Tuberías y accesorios	632 379,78	632 379,78	632 379,78
Transporte	15 000,00	15 000,00	15 000,00
Obra gris			
Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Materiales de obra gris	4 297 556,81	4 657 186,68	4 005 674,00
Transporte	242 000,00	250 000,00	245 000,00
Permisos municipales			
Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Permiso	91 160,74	94 837,04	88 271,91
Póliza de riesgo ante el INS	136 741,11	142 255,56	132 407,87
Bomba			
Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Bomba	237 499,45	237 499,45	237 499,45
Transporte	5 429,80	5 429,80	5 429,80
Reservorio			
Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Reservorio	2 331 970,00	2 331 970,00	2 331 970,00
Transporte	85 000,00	85 000,00	85 000,00
Mano de obra			
Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Construcción de obra gris	2 276 033,44	2 276 033,44	2 276 033,44
Construcción de humedal	1 100 422,45	1 100 422,45	1 100 422,45
Servicios			
Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Servicio de electricidad	19 038,87	19 038,87	19 038,87
Servicio de agua	25 350,00	25 350,00	25 350,00
Inversión del proyecto	15 424 719,97	15 801 540,59	15 128 615,09

Como se puede visualizar, el último escenario presenta la menor inversión del proyecto, siendo esta de 15 128 615,09 CRC o de 28 388,69 USD, utilizando un tipo de cambio de 532,91 CRC para el día 20 de mayo del 2023. Además, si se analiza la distribución de la inversión por sección (figura 23) se puede observar que la adquisición de los materiales de obra gris (28 %), sustrato (26 %), mano de obra (22 %) y el reservorio (16 %) son las que requieren una mayor inversión, mientras que las otras secciones no son tan representativas.

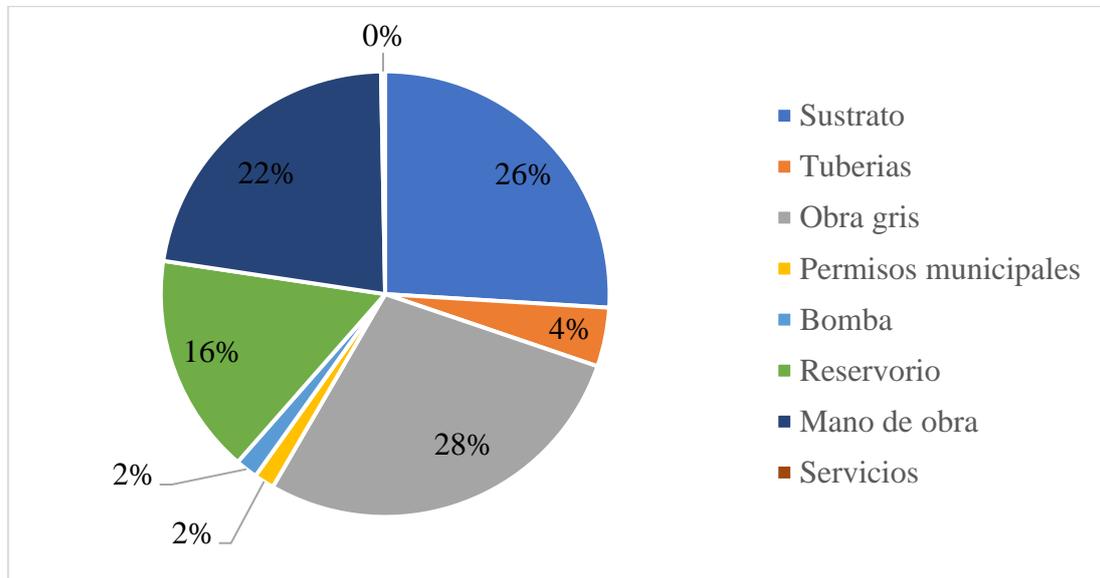


Fig. 23. Distribución de la inversión del proyecto por sección, elaboración propia.

Al visualizar que los materiales de obra gris son los que tiene mayor influencia en la inversión, se puede considerar realizar el bordo del humedal de otro material, como arcilla con geomembrana anclada, para disminuir el costo del proyecto. Sin embargo, se deberá considerar las especificaciones de diseño que conlleva la implementación de este tipo de material para que el humedal funcione adecuadamente [116].

5 CONCLUSIONES

La industria azucarera se caracteriza por verter grandes cantidades de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica y flujos contaminantes en los cuerpos de agua, por lo que deben de implementar sistemas de tratamiento. A partir de ello, los humedales artificiales vienen a ser una alternativa a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales, ya que no solo permiten depurar las aguas a través de procesos biológicos, físicos y químicos; sino también que aportan un biosistema que atrae fauna y armonía con el medio ambiente.

Para el primer objetivo específico, se obtuvo como resultado:

- El sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa se encuentra conformado por un tratamiento preliminar, primario y secundario; así como una pila de lodos.
- Existen tres escenarios que tienen influencia en la planta de tratamiento, los cuales son mantenimiento, operación y sin operación.
- El caudal promedio que ingresa a la planta de tratamiento cuando la empresa está en actividad productiva es de 0,26 L/s.
- El caudal promedio asegura tiempos de retención óptimos para el decantador primario y secundario (5 y 18 h, respectivamente).
- Se identificó que la puntera y los evaporadores aportan caudales representativos a la planta de tratamiento, (9 y 23) L/s.
- El contenido de materia orgánica (3 336 mg/L) y pH (4,2) no cumplen con los límites permisibles establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales para este tipo de industria.

Para el segundo objetivo específico, se obtuvo como resultado:

- Los modelos del tratamiento primario lograron remover un 86,7 % de DQO, 12,5 % de N_T y 62,5 % de PO_4^{3-} del efluente del tratamiento primario.
- Los modelos del tratamiento secundario lograron remover un 58,4 % de DQO, 25,2 % de N_T y 82,6 % de PO_4^{3-} del efluente del tratamiento secundario.
- Se decide implementar los humedales como tratamiento terciario ya que el ingreso de altas concentraciones de este parámetro puede saturar el sustrato y por consiguiente afectar la funcionalidad de los humedales a corto plazo.

Para el tercer objetivo específico, se obtuvo como resultado:

- Se debe implementar dos humedales subsuperficiales verticales en paralelo de 38 m², de 1,5 m de altura y alimentados con un caudal de 0,9 m³/d.
- Se deberá incorporar una estructura de entrada de 1 m³ que distribuya de manera uniforme el caudal de alimentación a ambos humedales y una estructura de salida de 1,68 m³ para recoger el efluente del humedal.

- Se deberá implementar un reservorio de 22 m³ para almacenar el volumen del tratamiento secundario y distribuirlo a los humedales de acuerdo con el caudal de diseño.
- Se propone un vertedero triangular para aforos de 2 m de largo, 0,79 m de ancho y 1,50 m de alto; con la finalidad de facilitar el punto de muestreo de caudales para futuros análisis.

Para el cuarto objetivo específico, se obtuvo como resultado:

- El proyecto requiere una inversión de 15 128 615,09 CRC, lo que corresponde a 28 388,69 USD con un tipo de cambio de 532,91 CRC para el día 20 de mayo del 2023.
- La adquisición de los materiales de obra gris representa el mayor costo del proyecto, representando el 28 % de la inversión

En síntesis, la implementación de un humedal artificial en el sistema de tratamiento actual de la empresa no solo le va a permitir mejorar aún más el tratamiento de las aguas residuales, sino también en crear un biosistema que atraiga fauna a la zona. Además, la operación y mantenimiento de estos sistemas es mínima y de baja complejidad por lo que se puede capacitar a algún colaborador de la empresa para que la realice.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda incluir en el tratamiento preliminar rejillas con diferentes espaciamientos y con una inclinación de 45 °, ver apéndices 32-34. Lo anterior se propone con la finalidad de asegurar que se recolecten las diferentes partículas que ingresan. Además, se aconseja extraer de manera constante los sólidos recolectados para evitar obstrucciones en el sistema.

Por otra parte, se recomienda incorporar un tanque de homogenización, después del pretratamiento y antes del tratamiento primario, para que reciba los caudales pico y los distribuya de manera continua a la planta de tratamiento. Esto para asegurar los tiempos de retención de las diferentes etapas y con ello el tratamiento del agua residual.

En cuanto a mantenimiento general de la planta de tratamiento, se aconseja verificar de manera constante el nivel de lodos en el decantador primario y secundario. Además, cuando se realice la extracción de los lodos se deberá dejar una capa de estos para evitar extraer toda la comunidad de microorganismos.

En lo que respecta a las estructuras y equipos que se propusieron, se aconseja realizar un análisis topográfico de la zona para corroborar que la bomba propuesta tenga la capacidad para cumplir con la carga requerida. Este se estima que puede rondar entre los 170 000 colones, de acuerdo con las tarifas establecidas por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA) para dicho análisis.

Por otro lado, se recomienda calibrar el vertedero de aforos después de que se instale, esto con la finalidad de comprobar que la carga sea adecuada para el caudal de alimentación. Además, se aconseja realizar más aforos para confirmar que el dimensionamiento del reservorio es adecuado. Asimismo, se deberá realizar una prueba piloto para conocer el grado de abertura de la válvula de salida que garantice el caudal de alimentación de los humedales.

En cuanto a la inversión, es relevante mencionar que pueden surgir costos imprevistos en la inversión debido a la influencia de escenarios externos y la inflación. Asimismo, se deberá considerar la vida útil del sistema, la cual ronda entre los 20 a 25 años, para realizar mantenimiento correctivo y preventivo. Además, se aconseja investigar otro tipo de material para el bordo del humedal, esto con la finalidad de visualizar si el diseño y la inversión es más accesible a realizarlo con concreto.

Finalmente, se recomienda realizar un seguimiento del sistema una vez incorporado los humedales. Para ello, se recomienda realizar aforos y análisis de los parámetros fisicoquímicos del efluente del sistema de tratamiento con una periodicidad de cuatro meses. Lo anterior con la finalidad de generar registros que confirmen el funcionamiento adecuado del sistema de tratamiento o bien que indiquen si se requiere realizar mejoras.

Además, se aconseja que cuando la empresa no esté en producción se cambie la configuración de lo humedales, es decir cambiar de flujo vertical a horizontal, para que la vegetación no se vea afectada por la ausencia de agua.

7 LIMITACIONES

Entre las primeras limitaciones que se presentaron en la investigación se puede hacer alusión a la presencia de sólidos de gran tamaño en el punto de muestreo del caudal, lo que dificultó la utilización de un método más preciso para determinar el caudal.

En lo que respecta a las mediciones de los parámetros fisicoquímicos, se presentó el inconveniente de que las mediciones NO_3^- , NH_3 - y PO_4^{3-} solo se pudiera realizar una vez por mes, debido a que se requería transportar las muestras hasta el laboratorio de la escuela. Lo anterior ocasionó que las mediciones de estos parámetros fueran limitadas.

Otro inconveniente de la misma índole fue con la prueba de DBO, en la cual se tuvo que repetir los análisis tres veces debido a la detención de la cámara de refrigeración y por consiguiente afectando los análisis.

En cuanto a las estructuras que se deben implementar junto al humedal artificial se presentó la limitación de no poder realizar más mediciones de caudal para corroborar el dimensionamiento del reservorio. Además, el no contar con las curvas de nivel del sistema de tratamiento limitó la verificación de la carga de la bomba propuesta.

8 REFERENCIAS

- [1] E. Centeno Mora y A. Murillo Marín, “Tipología de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales ordinarias instaladas en Costa Rica”, *Rev. Ciencias Ambient.*, vol. 53, núm. 2, pp. 97–110, 2019, doi: 10.15359/rca.53-2.5.
- [2] L. Farrás, “La basura también ahoga a los ríos”, *La Vanguardia*, mar. 10, 2019. <https://tinyurl.com/y7rbf292> (consultado may 30, 2021).
- [3] G. Castillo Rodríguez y E. Sáez Peña, *Estrategia Nacional Para La Recuperación De Cuencas Urbanas 2020-2030*. San José, Costa Rica, 2020.
- [4] S. Estopá Consuegra, “Estudio comparativo y dimensionamiento básico de diversas tipologías de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del polígono industrial Moncada III (Moncada, Valencia)”, Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
- [5] A. Rodriguez Latorre, “Diseño de un humedal artificial para el municipio de Arcos de las Salinas (Teruel)”, Universidad Politécnica de Valencia, 2017.
- [6] C. Marín Acosta, R. Solís Silván, G. López Ocaña, R. Bautista Margulis, y M. Romellón Cerino, “Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México”, *Rev. Iberoam. las Ciencias Biológica y Agropecu.*, vol. 5, núm. 10, p. 20, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/ycknzfzx>.
- [7] Asamblea General de las Naciones Unidas [ONU], “64/292. El derecho humano al agua y el saneamiento”, 2010. doi: 10.18268/bsgm1908v4n1x1.
- [8] UNESCO, *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*, vol. 8, núm. 18. París: UNESCO, 2017.
- [9] M. Díaz-de los Rios, F. Eng-sanchez, Y. Herrera-Diaz, y Y. Lorenzo-Acosta, “El manejo de los residuales líquidos de la industria de azúcar y sus derivados en Cuba, en el contexto de las legislaciones ambientales actuales”, *ICIDCA*, vol. 50, núm. 3, pp. 59–63, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/yu49yjkx>.
- [10] La Gaceta, “Alcance N° 8 a La Gaceta N° 55”, San José, Costa Rica, 2007.
- [11] C. Alfaro, R. Pérez, y M. Solano, “Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional”, *Rev. Ciencias Ambient.*, vol. 45, núm. 1, pp. 63–71, 2013, doi: 10.15359/rca.45-1.6.
- [12] L. Parrao López, “Diseño y construcción de un prototipo de humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domesticas”, Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.
- [13] R. E. Aguilar, “Engineering in the tropics: Evaluating a solar-powered anaerobic digestion and hybrid constructed treatment wetland system to treat agricultural wastes in Costa Rica”, Michigan State University, 2018.
- [14] D. Rivera Vergara, “Humedales de flujo subsuperficial como biofiltros de aguas residuales en Colombia”, *Cuad. Act.*, vol. 7, pp. 99–107, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/y54593hf>.
- [15] S. Viracucha, “Tratamiento biológico de aguas residuales generadas en un ingenio azucarero - con la tecnología de lodos activados”, Unviersidad Central del Ecuador,

- 2012.
- [16] C. F. Trejos Salazar, “Agroindustrias de azúcar en centroamérica: Revisión de las políticas de fomento productivo para la promoción de la competitividad. Análisis comparativo”, Universidad Nacional, 2018.
- [17] E. Chavarría Soto, M. Chaves Solera, J. Salazar Blanco, J. Barrantes Mora, y A. Bermúdez Loría, “80 años de vida institucional del sector cañero: Breve recorrido por su historia”, *Entre cañeros*, vol. 16, p. 37, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/3w2whr8u>.
- [18] A. Rodríguez Morales, E. Chavarría Soto, I. Medina Mora, J. Montenegro Ballesteros, M. Chaves Solera, y Z. Solano Valverde, “NAMA Caña de Azúcar Costa Rica”, San José, Costa Rica, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P40-11128.pdf>.
- [19] S. Mora Ramírez, L. Jiménez Carvajal, I. Brade Monge, y J. C. Jiménez Flores, “Indicadores Macroeconómicos 2018-2022”, San José, Costa Rica, 2022. [En línea]. Disponible en: http://www.sepsa.go.cr/docs/2022-016-Indicadores_Macroeconomicos_2018-2022.pdf.
- [20] Sistema de Información Cultural de Costa Rica (Sicultura), “Asodulce, Trapiche ecológico”, *Sistema de Información Cultural de Costa Rica (Sicultura)*, 2014. <https://tinyurl.com/4xpeec4d> (consultado jun. 15, 2021).
- [21] A. García Quito y W. Ludizaca Viracocha, “Diseño de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la comunidad del Tabacay, cantón Azogues, provincia De Cañar”, Universidad de Cuenca, 2017.
- [22] J. Agudelo Patiño y A. Alvear Daza, “Estudio de la sedimentabilidad de los sólidos presentes en el tratamiento primario del agua residual doméstica de la ciudad de Cali”, Universidad del Valle, 2015.
- [23] C. Millan Melo y L. Polania Villegas, “Propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa SOMOS K S.A”, Universidad de América, 2018.
- [24] S. López Loma, “Validación del método respirométrico para determinar DBO5 en aguas residuales y naturales en el distrito metropolitano de quito”, Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [25] J. D. Ramos Ascue, “Medición en línea de la DQO mediante correlación del coeficiente de absorción espectral de la luz UV”, *Prod. y Limpia*, vol. 13, núm. 2, pp. 67–76, 2018, doi: 10.22507/pml.v13n2a8.
- [26] A. N. Ardila Arias, J. Reyes Calle, E. Arriola Villaseñor, y J. A. Hernández, “Remoción fotocatalítica de DQO, DBO5 y COT de efluentes de la industria farmacéutica”, *Rev. Politécnica*, vol. 8, núm. 15, pp. 9–17, 2012, [En línea]. Disponible en: <https://biblat.unam.mx/hevila/Revistapolitecnica/2012/no15/1.pdf>.
- [27] HACH, “Nitrógeno - Productos y descripción general de los parámetros de calidad del agua ”, *HACH*, 2022. <https://es.hach.com/parameters/nitrogen> (consultado may 24, 2022).
- [28] K. Valera, “Caracterización de las aguas residuales de la industria azucarera Tres Valles, en Honduras”, Universidad Zamorano, 2016.

- [29] Y. de la Oz - Izquierdo, Y. Izquierdo-González, y O. M. López-Delgado, “Caracterización y tratamiento de aguas residuales del central azucarero " Manuel Fajardo ", para disminuir la contaminación en la fabricación de azúcar”, *ICIDCA. Sobre los Deriv. la Caña Azúcar*, vol. 51, núm. 3, pp. 72–74, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223158039011.pdf>.
- [30] P. K. Poddar y O. Sahu, “Quality and management of wastewater in sugar industry”, *Appl. Water Sci.*, vol. 7, núm. 1, pp. 461–468, 2017, doi: 10.1007/s13201-015-0264-4.
- [31] S. Sarfraz, A. Siddique, F. Qamar, S. Raza, y A. Majeed, “A perspective review on methodologies for treating sugar industry effluents”, *Int. J. Environ. Sci. Nat. Resour.*, vol. 21, núm. 4, pp. 117–122, 2019, doi: 10.19080/ijesnr.2019.21.556067.
- [32] J. Fito, N. Tefera, y S. W. H. Van Hulle, “Sugarcane biorefineries wastewater: bioremediation technologies for environmental sustainability”, *Chem. Biol. Technol. Agric.*, vol. 6, núm. 1, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1186/s40538-019-0144-5.
- [33] O. Rosseaux-reve, “Estudio de las aguas industriales y residuales en la UEB Central Azucarero ‘ Paquito Rosales ’”, *Tecnol. Química*, vol. 34, núm. 3, pp. 172–183, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543783001.pdf%0A>.
- [34] A. M. Molina Jimenez, “Evaluación de la carga contaminante en los procesos de producción de azúcar molino fulton II, molino farrel, refinería y elaboración en el Ingenio del Cauca Incauca S.A, Colombia”, Universidad Autónoma de Occidente, 2008.
- [35] C. A. Alomia Quitero, “Formulación de un Plan de Manejo Ambiental (PMA) para la operación y control de vertimientos en la PTAR del Trapiche Lucerna”, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2019.
- [36] M. Brenes Pereira, “Utilización de cenizas en el tratamiento de las aguas residuales procedentes del Beneficio de Café de CoopeVictoria R.L.”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2006.
- [37] Poder Ejecutivo, “Reglamento de aprobación y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales N° 31545-S-MINAE”, 2003. [En línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/2p8wksej>.
- [38] CONAGUA, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: pretratamiento y tratamiento primario*, vol. 4. México, D.F: CONAGUA, 2010.
- [39] L. Huerta Sanz, “Diseño del pretratamiento de agua residual urbana mediante procesos con membranas”, Universidad de Valladolid, 2020.
- [40] K. J. Llumiquinga Mancheno y K. E. Minta Piguabe, “Diseño de un sistema de tratamiento y recirculación de agua residual generada en la lubricadora JOB”, Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [41] P. H. Dodane y M. Bassan, “Tanques de sedimentación y espesamiento”, en *Manejo de Lodos Fecales*, Primera., L. Strande, M. Ronteltap, y D. Brdjanovic, Eds. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2014, p. 17.
- [42] J. A. Gutiérrez Rosero, Á. I. Ramírez Fajardo, R. Rivas, B. Linares, y D. Paredes, “Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua”, *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 13, núm. 25, pp. 13–27, 2014, doi: 10.22395/rium.v13n25a1.

- [43] W. A. Lozano Rivas, *Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales*. Bogotá, Colombia, 2012.
- [44] J. Rabat Blázquez, “Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración”, Universidad de Alicante, 2016.
- [45] O. Delgadillo, A. Camacho, L. Pérez, y M. Andrade, *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA), 2010.
- [46] G. Morales, D. López, I. Vera, y G. Vidal, “Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas”, *Theoria*, vol. 22, núm. 1, pp. 33–46, 2013, [En línea]. Disponible en: [http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/194/v/v22-1/vidal_theo22\(1\)-2013.pdf](http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/194/v/v22-1/vidal_theo22(1)-2013.pdf).
- [47] J. A. Venegas Castillo, “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”, Universidad de Costa Rica, 2020.
- [48] F. Zurita, J. De Anda, y M. A. Belmont, “Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands”, *Ecol. Eng.*, vol. 35, núm. 5, pp. 861–869, 2009, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.026.
- [49] J. M. Sánchez, “Flora ornamental española”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.arbolesornamentales.es/HELICONIACEAE.pdf>.
- [50] E. Jerez, “El cultivo de las heliconias”, *Cultiv. Trop.*, vol. 28, núm. 1, pp. 29–35, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215858005.pdf>.
- [51] F. M. Sosa Rodríguez, “Revisión bibliográfica cultivo del género Heliconia”, *Cultiv. Trop.*, vol. 34, núm. 1, pp. 24–32, 2013, [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v34n1/ctr04113.pdf>.
- [52] L. Sandoval, S. A. Zamora-Castro, M. Vidal-Álvarez, y J. L. Marín-Muñiz, “Role of wetland plants and use of ornamental flowering plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A review”, *Appl. Sci.*, vol. 9, núm. 4, pp. 1–17, 2019, doi: 10.3390/app9040685.
- [53] V. A. Tsihrintzis, “The use of Vertical Flow Constructed Wetlands in Wastewater Treatment”, *Water Resour. Manag.*, vol. 31, núm. 10, pp. 3245–3270, 2017, doi: 10.1007/s11269-017-1710-x.
- [54] A. Panadero Barberá, “Propuesta de humedal artificial que actúe como filtro verde supletorio para la EDAR de Gandia ”, Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
- [55] S. D. Rodríguez Rodríguez y Y. Vargas Niño, “Evaluación del potencial de humedales artificiales piloto, implementados con la especie Heliconia pssitacorum, en la remediación de aguas residuales domésticas de bajo caudal para zonas rurales de Piedemonte Llanero”, Universidad Santo Tomás, 2019.
- [56] L. Bayas Jiménez, “Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en poblaciones rurales de la Sierra Norte del Ecuador; aplicación a la parroquia Lita”, Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
- [57] M. I. Fernández Gonzalvo, “Desarrollo de un modelo matemático para el diseño y la

- gestión de humedales artificiales subsuperficiales”, Universidad Politécnica de Valencia, 2017.
- [58] R. H. Kadlec y S. Wallace, *Treatment Wetlands*, Second edi. Boca Ratón: Taylor & Francis Group, 2009.
- [59] C. S. C. Calheiros, A. O. S. S. Rangel, y P. M. L. Castro, “Treatment of industrial wastewater with two-stage constructed wetlands planted with *Typha latifolia* and *Phragmites australis*”, *Bioresour. Technol.*, vol. 100, pp. 3205–3213, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2009.02.017.
- [60] V. A. Riggio, B. Ruffino, G. Campo, E. Comino, C. Comoglio, y M. Zanetti, “Constructed wetlands for the reuse of industrial wastewater: A case-study”, *J. Clean. Prod.*, vol. 171, pp. 723–732, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.081.
- [61] T. Saeed y T. Khan, “Constructed wetlands for industrial wastewater treatment: Alternative media, input biodegradation ratio and unstable loading”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, p. 103042, 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103042.
- [62] T. Saeed, S. Muntaha, M. Rashid, G. Sun, y A. Hasnat, “Industrial wastewater treatment in constructed wetlands packed with construction materials and agricultural by-products”, *J. Clean. Prod.*, vol. 189, pp. 442–453, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.115.
- [63] V. Torrijos, O. G. Gonzalo, A. Trueba-Santiso, I. Ruiz, y M. Soto, “Effect of by-pass and effluent recirculation on nitrogen removal in hybrid constructed wetlands for domestic and industrial wastewater treatment”, *Water Res.*, vol. 103, pp. 92–100, 2016, doi: 10.1016/j.watres.2016.07.028.
- [64] J. Zambonino, “Análisis de alternativas para el tratamiento de aguas industrias del ingenio azucarero del Norte de Iancem”, Universidad central del Ecuador, 2013.
- [65] P. A. Patel y N. Dharaiya, “Phytoremediation of sugar industry effluent using *Typha angustata* and *Phragmites australis* through constructed wetland”, *J. Chem. Biol. Phys. Sci.*, vol. 4, núm. 1, pp. 846–851, 2014, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/260882942_Phytoremediation_of_Sugar_Industry_Effluent_Using_Typha_angustata_and_Phragmites_australis_through_Constructed_Wetland.
- [66] E. Cisneros, H. Rivas, M. Díaz, y C. A¹, “Tratamiento de las aguas residuales del Ingenio Casasano en un humedal de flujo intermitente”, *Inst. Mex. Tecnol. del Agua*, pp. 1–8, 2011, [En línea]. Disponible en: <https://tinyurl.com/ybr8ndrs>.
- [67] J. Leon Sáenz y N. Arroyo Blanco, *Desarrollo histórico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en el siglo XX: Aspectos económicos, institucionales y tecnológicos*. San José, Costa Rica: Instituto de Investigaciones en Ciencias Económicas, 2012.
- [68] Gerente administrativo, “Comunicación personal”, 2021.
- [69] V. Piedra Quesada, *División territorial administrativa de la República de Costa Rica*, Primera ed. San José, Costa Rica: Imprenta Nacional, 2017.
- [70] Comité Sectorial Agropecuario de la Región Central Occidental, “Comité Sectorial Regional Agropecuario: Plan Regional de Acciones Climáticas y Gestión de Riesgos 2018-2022”, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.infoagro.go.cr/InfoRegiones/Documents/PACGR_2018-

2022_RegionCentralOccidental.pdf.

- [71] HACH company, *Nitrogen Ammonia Method 8155*, 10a ed. HACH company, 2015.
- [72] HACH company, *Phosphorus Reactive (Orthophosphate) Method 8048*. HACH company, 2017.
- [73] HACH company, *Nitrate Method 8039*, 10a ed. HACH company, 2019.
- [74] HACH company, *Oxygen Demand Chemical Method 8000*. HACH company, 2021.
- [75] HACH, “¿Cuál es la relación entre DBO, DQO y TOC?”, *HACH*, feb. 02, 2022. https://essupport.hach.com/app/answers/answer_view/a_id/1027408/~/?¿cuál-es-la-relación-entre-dbo%2C-dqo-y-toc%3F- (consultado may 24, 2022).
- [76] Y. J. Zhao *et al.*, “Efficiency of two-stage combinations of subsurface vertical down-flow and up-flow constructed wetland systems for treating variation in influent C/N ratios of domestic wastewater”, *Ecol. Eng.*, vol. 37, núm. 10, pp. 1546–1554, 2011, doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.06.005.
- [77] O. A. Castillo Ayala y A. Ortega Hernández, “Propiedades petrofísicas: análisis, interpretación y aplicación en un pozo petrolero al noreste de la República Mexicana”, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [78] M. R. Rodríguez-González, J. Molina-Burgos, A. Jácome-Burgos, y J. Suárez-López, “Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas”, *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 14, núm. 2, pp. 223–235, 2013, doi: 10.1016/s1405-7743(13)72238-8.
- [79] G. Dotro *et al.*, *Biological Wastewater Treatment Series*, 1 edición., vol. 7. London, United Kingdom: IWA Publishing, 2017.
- [80] V. M. Arteaga Cortez, “Propuesta metodológica para la construcción de humedales artificiales”, Colegio de Postgraduados, 2018.
- [81] UN-HABITAT, *Constructed wetlands manual*. Kathmandu, Nepal, 2008.
- [82] S. Aguirres Solís, M. Vargas Urbanos, M. Zeron Canchas, M. Cruz Huaranga, y S. Flores Gómez, “Tratamiento primario de aguas servidas mediante tanque séptico en urbanización de Lurigancho, Lima”, *Rev. Investig. Ciencia, Tecnol. y Desarro.*, vol. 4, núm. 2, pp. 29–41, 2018, doi: 10.17162/rictd.v4i2.1095.
- [83] G. Michelena-Alvarez, D. Alonso-Estrada, y O. López-Delgado, “Solución ambiental de efluentes de una empresa azucarera con ingenio, destilería y bioeléctrica”, *ICIDCA*, vol. 52, núm. 3, pp. 61–74, 2018, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/343794506_Solucion_ambiental_de_efluentes_de_una_empresa_azucarera_con_ingenio_destileria_y_bioelectrica.
- [84] G. L. Cárdenas Calvachi y I. A. Sánchez Ortiz, “Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública”, *Univ. y Salud*, vol. 15, núm. 1, pp. 72–88, 2013, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007&lang=pt.
- [85] M. J. Del Campo, “Sistemas de tratamiento de remoción de nitrógeno y fósforo, de efluentes de industrias de la cuenca del río Santa Lucía”, Universidad de la República,

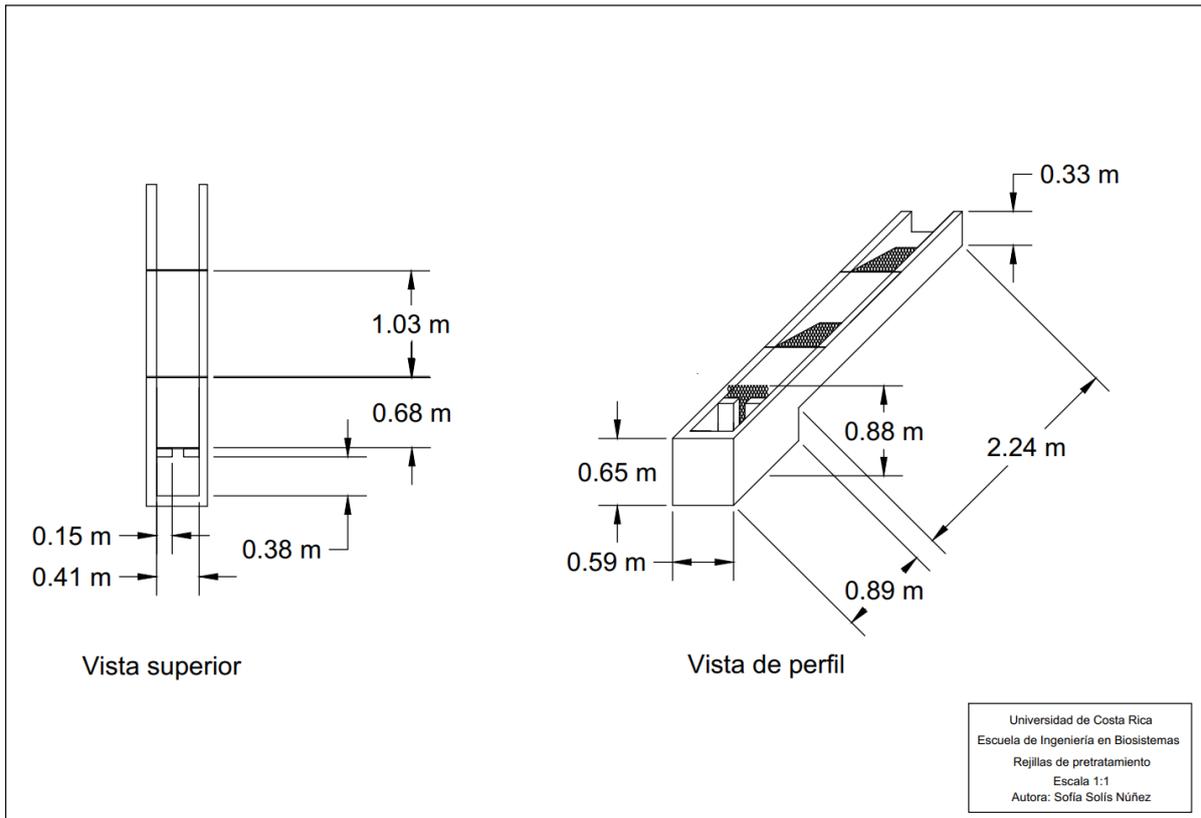
- 2018.
- [86] A. F. García Contrerass y J. F. Rodríguez Mesa, “Evaluación de la eficiencia en la degradación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en un prototipo de reactor de lecho móvil a partir de la variación de los tiempos de retención”, Universidad de la Salle, 2019.
- [87] E. Balaguer Arnandis, “Estudio de la influencia del tiempo de retención hidráulico en un reactor biológico secuencial (SBR) de depuración de aguas residuales procedentes de una tenería y optimización de la fase de sedimentación”, Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [88] I. V. Santiesteban, Y. Otaño Guerra, R. Vega Guerra, y Á. E. López Jiménez, “Sistema de tratamiento de residuales líquidos de la industria azucarera colombiana y la contaminación ambiental en la cuenca hidrográfica del Río Tana”, *Rev. caribeña Ciencias Soc.*, núm. 2014_05, p. 49, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.eumed.net/rev/caribe/2014/05/tratamiento-residuos-liquidos.pdf>.
- [89] N. S. Ali, K. Mo, y M. Kim, “A case study on the relationship between conductivity and dissolved solids to evaluate the potential for reuse of reclaimed industrial wastewater”, *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 16, núm. 5, pp. 708–713, 2012, doi: 10.1007/s12205-012-1581-x.
- [90] E. Pérez-López, “Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica”, *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 29, núm. 3, pp. 3–14, 2016, doi: 10.18845/tm.v29i3.2884.
- [91] J. D. Bolaños, N. Montero, N. Rodríguez, y A. Sánchez, “Calidad de aguas superficiales: estudio de la quebrada Estero, ubicada en el cantón de San Ramón, Costa Rica”, *Pensam. actual*, vol. 15, núm. 25, pp. 61–76, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pensamiento-actual/article/view/22593/24018>.
- [92] L. Paredes Gilón, “Remoción de contaminantes en la estabilización de humedales contruidos de flujo vertical, sembrados con Heliconia (sp), para el tratamiento de aguas residuales domésticas”, Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [93] J. J. Salas Rodríguez, J. R. Pidre Borcardo, y L. Sánchez Fernández, “Humedales artificiales”, en *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*, Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), Ed. 2007, p. 114.
- [94] E. Ortega, Y. Ferrer, J. J. Sala, C. Aragón, y Á. Real, *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010.
- [95] D. Gonzales Restrepo, “Remoción de contaminantes en humedales contruidos de flujo vertical sembrados con Heliconia Psittacorum y alimentados con diferentes frecuencias”, Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.
- [96] V. Solano de la Cruz, F. Orduña Gaytán, N. . Vallejo Cantú, A. Alvarado Lassman, y J. . Méndez Contreras, “Remoción de contaminantes de agua residual de la industria azucarera utilizando un sistema híbrido”, *J. CIM*, vol. 7, núm. 1, pp. 1473–1479, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://zenodo.org/record/4278271#.Y-WbMnZBxPY>.
- [97] V. Solano de la Cruz, “Tratamiento de un agua residual azucarera utilizando un sistema híbrido (Digestión Anaerobia-Humedal Construido)”, Tecnológico Nacional de Orizaba, 2020.

- [98] A. D. Moncada Suaza, “Análisis del desempeño y operación de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical para tratamiento de agua residual doméstica en países tropicales”, Universidad Católica de Manizales, 2016.
- [99] H. Hoffman, C. Platzer, M. Winker, y E. Muench, *Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Eschborn: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN, 2011.
- [100] M. de la L. Merino Solís, “Mecanismo de remoción de materia orgánica y nutrientes en un sistema de tratamiento pasivo de aguas residuales municipales”, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C (CIATEJ), 2017.
- [101] E. Villegas Urbina, “Remoción de fósforo y nitrógeno de aguas residuales domésticas, mediante humedales artificiales de flujo vertical empleando antrasita y tereftalato de polietileno, en la localidad de Toma, Carhuaz-Ancash”, Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”, 2018.
- [102] M. C. Perdana, H. B. Sutanto, y G. Prihatmo, “Vertical subsurface flow (VSSF) constructed wetland for domestic wastewater treatment”, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 148, núm. 1, p. 9, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/148/1/012025.
- [103] C. B. López Revelo, “Evaluación de humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento secundario de efluentes agroindustriales”, Universidad Zamorano, 2016.
- [104] M. C. Perdana, S. Hadisusanto, y I. L. S. Purnama, “Implementation of a full-scale constructed wetland to treat greywater from tourism in Suluban Uluwatu Beach, Bali, Indonesia”, *Heliyon*, vol. 6, núm. 10, p. 9, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05038.
- [105] H. Sutanto y P. Bawole, “Possibility study of implementing vertical constructed wetland for domestic waste water treatment in Urban Kampong”, *J. Teknosains*, vol. 10, núm. 2, pp. 179–187, 2021, doi: 10.22146/teknosains.63801.
- [106] M. I. Reyes, A. Guido, S. G. Carrillo, y C. Durán, “Remoción de Fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio”, *Química Cent.*, vol. 2, núm. 1, pp. 25–32, 2011, [En línea]. Disponible en: <http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/QUIMICA/article/view/546>.
- [107] J. P. Elizondo Barquero, “Evaluación de las condiciones de septicidad en el Colector María Aguilar del Alcantarillado Sanitario Metropolitano”, Universidad de Costa Rica, 2004.
- [108] M. Z. Justin, D. Vrhovšek, A. Stuhlbacher, y T. G. Bulc, “Treatment of wastewater in hybrid constructed wetland from the production of vinegar and packaging of detergents”, *Desalination*, vol. 246, núm. 1–3, pp. 100–109, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.03.045.
- [109] M. L. Jaramillo-Gallego, R. M. Agudelo-Cadavid, y G. A. Peñuela-Mesa, “Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal”, *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, vol. 34, núm. 1, pp. 20–29, 2016, doi: 10.17533/udea.rfnsp.v34n1a03.
- [110] E. Y. Alzate Amariles, “Influencia del pH y el tipo de macrofitas en la remoción de materia orgánica y cadmio de un drenaje sintético de minería de carbón, por medio de

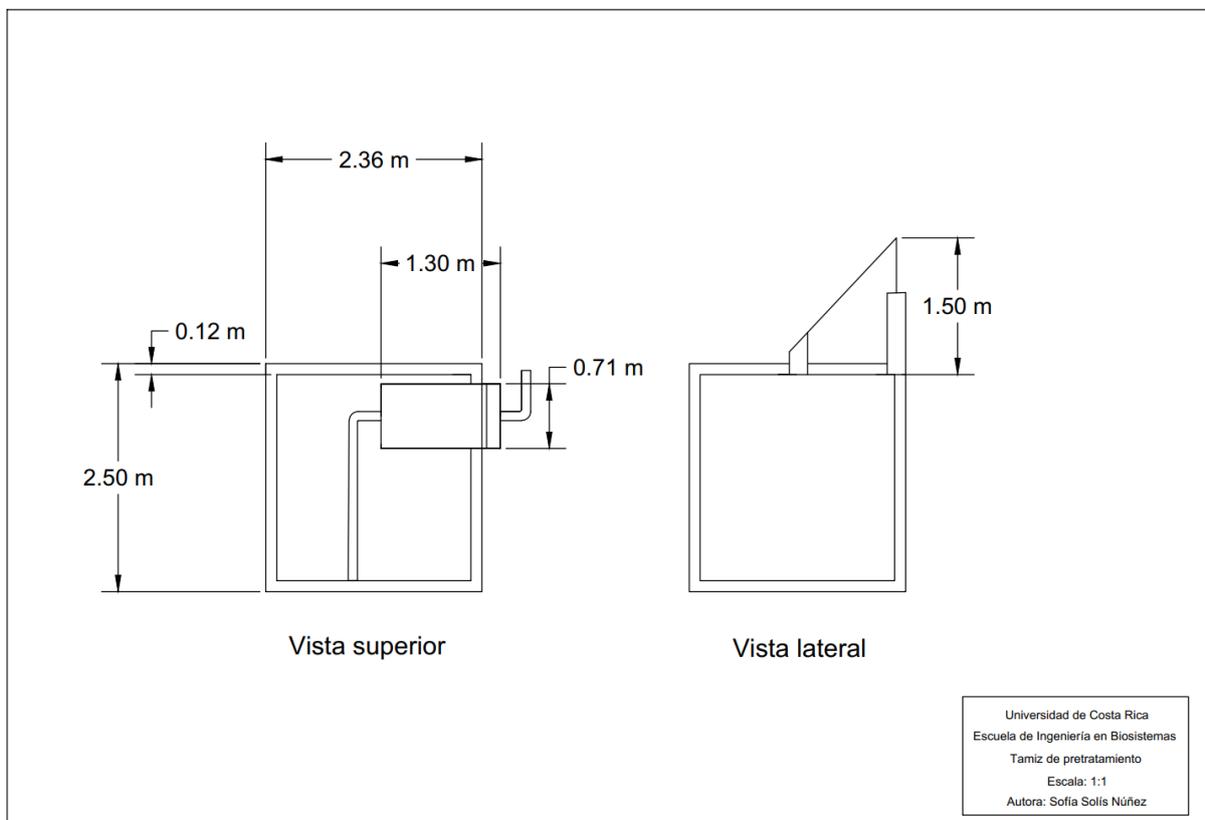
- humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto”, Universidad de Antioquia, 2015.
- [111] M. F. Duque Archila y C. L. Noriega Sandoval, “Producción de brotes de heliconias en humedales artificiales de evapotranspiración con reúso de aguas residuales del beneficio del café”, Universidad Libre, 2018.
- [112] C. E. Carvajal Arias, P. Ortiz, y A. L. Vega Beltran, “Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando bambusa sp en la finca el recreo ubicada en Tauramena, Casanare”, *Rev. Tecnol.*, vol. 16, núm. 1, pp. 65–76, 2018, doi: 10.18270/rt.v16i1.2317.
- [113] Á. X. Torres Bojorges, N. A. Hernández Razo, A. A. Fausto Urquieta, y F. Zurita Martínez, “Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de Nitrógeno”, *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 33, núm. 1, pp. 37–47, 2017, doi: 10.20937/RICA.2017.33.01.03.
- [114] J. Mena Sanz, L. Rodriguez, J. Núñez, y J. Villaseñor, “Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos”, 2009, p. 25, [En línea]. Disponible en: http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/2643_JMena.pdf.
- [115] G. M. P. R. Weerakoon, K. B. S. N. Jinadasa, J. Manatunge, B. Wijesiri, y A. Goonetilleke, “Kinetic modelling and performance evaluation of vertical subsurface flow constructed wetlands in tropics”, *J. Water Process Eng.*, vol. 38, núm. July, p. 10, 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101539.
- [116] CONAGUA, *Manual de agua potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales*. México D.F: CONAGUA, SEMANART, 2015.
- [117] R. Kincanon y A. S. McAnally, “Enhancing commonly used model predictions for constructed wetland performance: As-built design considerations”, *Ecol. Modell.*, vol. 174, núm. 3, pp. 309–322, 2004, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2003.09.030.
- [118] M. Pérez Villar, E. Domínguez, Y. González Roche, y T. Jimenez Llano, “Diseño de un humedal subsuperficial vertical para la depuración de las aguas residuales de la Universidad Central ‘Marta Abreu’ de Las Villas”, *Afinidad Rev. química teórica y Apl.*, vol. 72, núm. 569, pp. 37–41, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/291707/380205>.
- [119] J. García Serrano y A. Corzo Hernández, “Depuración con Humedales Construidos: Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial”, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>.
- [120] L. Skertchly Molina, *Manual de diseño de estructuras de aforo*. México: IMTA, 1988.
- [121] C. F. Lippi Dominguez, “Caracterización experimental del flujo de aproximación a una obra hidraulica en un modelo físico 2D (H:V)”, Universidad Nacional de Córdoba, 2016.
- [122] G. Sotelo Ávila, *Hidráulica General*. México D.F: Editorial LIMUSA S.A, 1997.
- [123] Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, “Lista de salarios mínimos del sector privado”, 2023. <https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html> (consultado mar. 30, 2023).

9 APÉNDICES

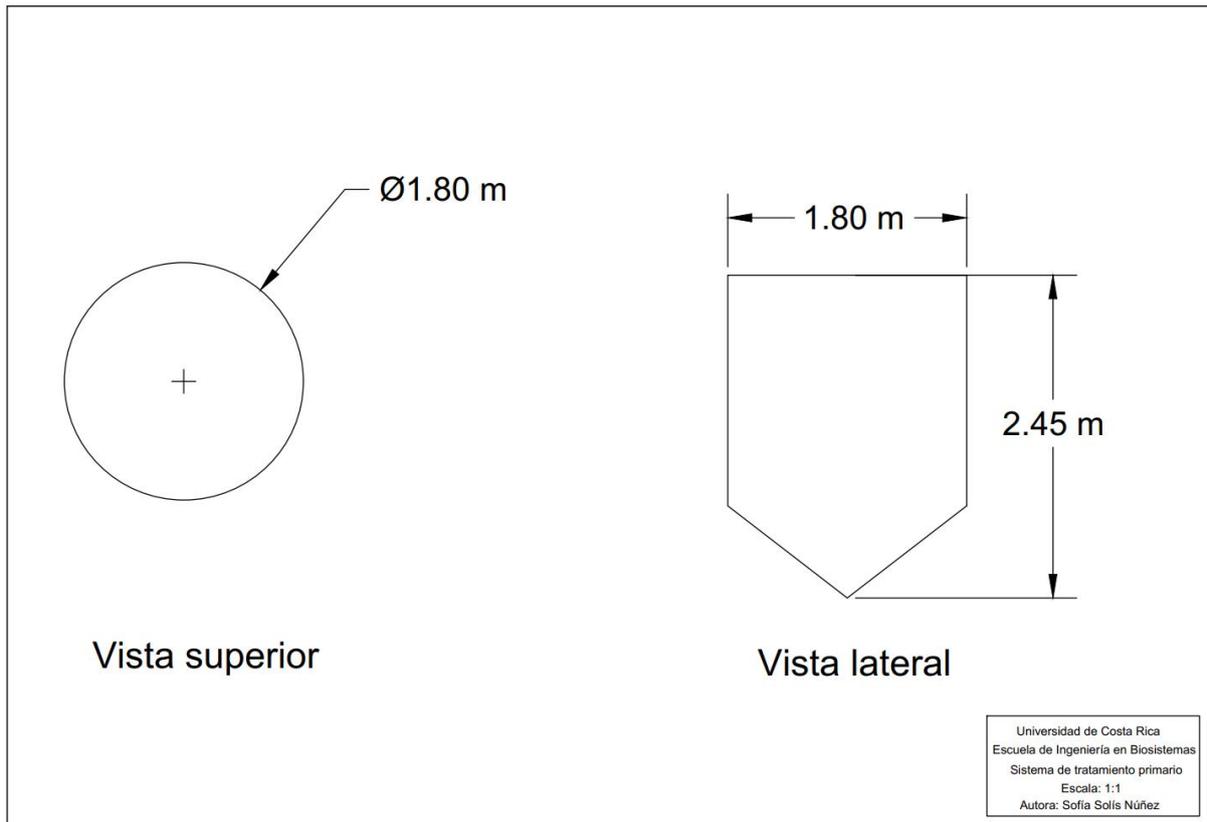
APÉNDICE 1. Plano de rejillas del tratamiento preliminar, elaboración propia.



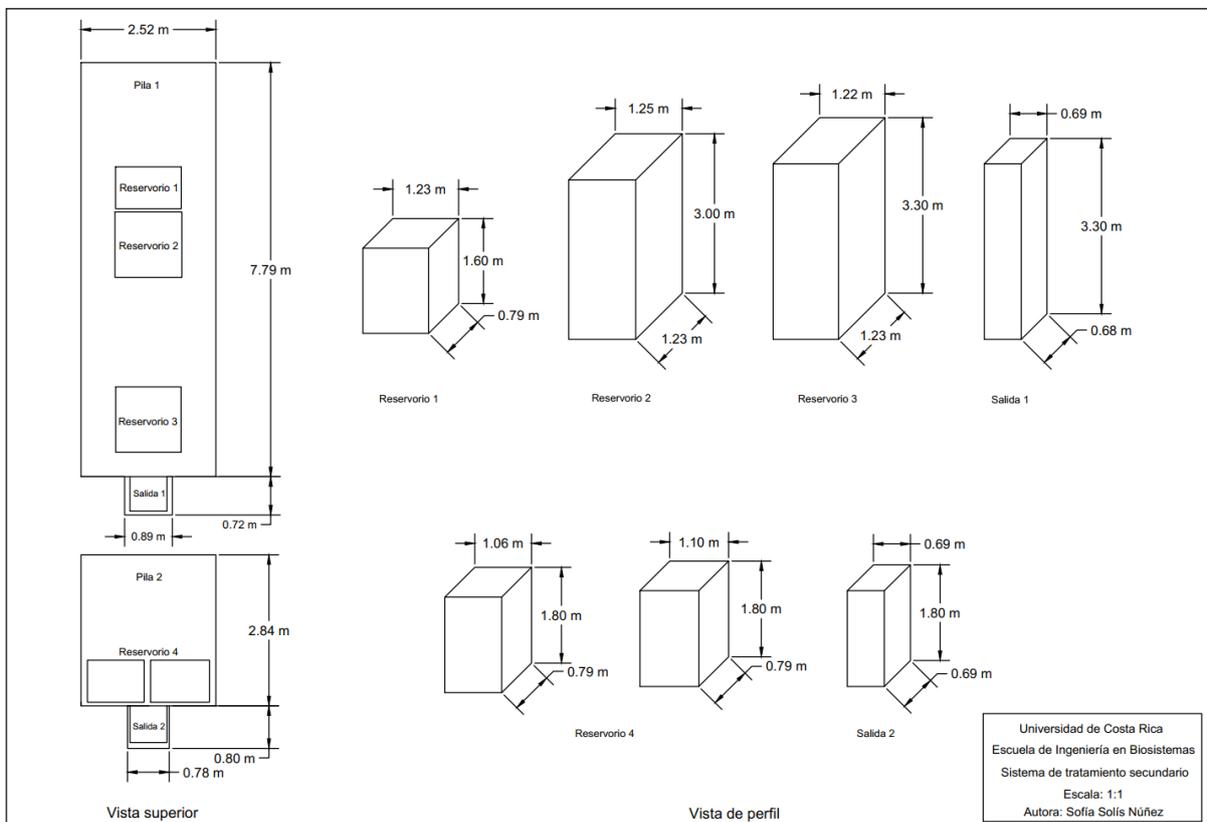
APÉNDICE 2. Plano de tamiz del tratamiento preliminar, elaboración propia.



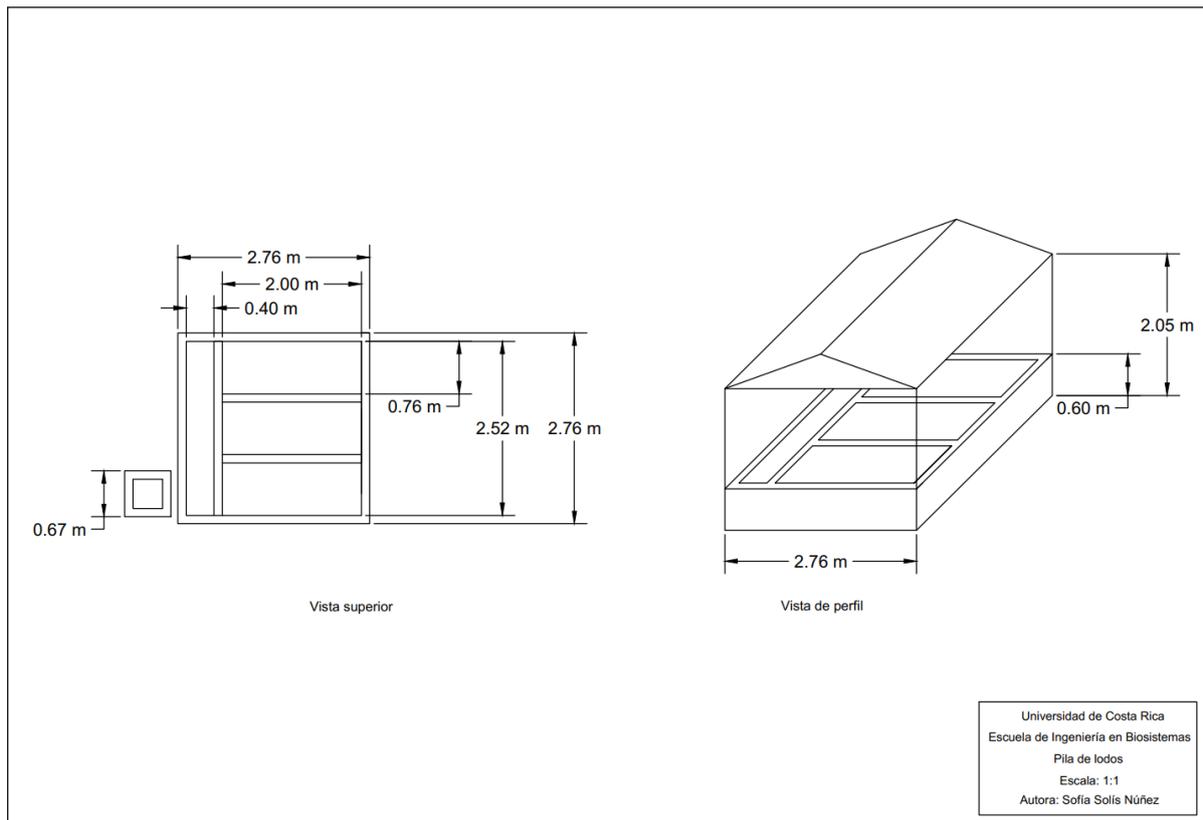
APÉNDICE 3. Plano del sistema de tratamiento primario, elaboración propia.



APÉNDICE 4. Plano del sistema de tratamiento secundario, elaboración propia.



APÉNDICE 5. Plano de pila de secado de lodos, elaboración propia.



APÉNDICE 6. Memoria de cálculo del caudal de alimentación de los modelos de humedales artificiales.

Parámetros de entrada:

- A: Área de las cajas, 35 m².
- C_i: Concentración de DQO del afluente a tratar, 5 205 g/m³ (tratamiento primario) y 3 336 g/m³ (tratamiento secundario).
- B_i: Carga orgánica del contaminante, 20 g/m²/d (con base en literatura).

Ecuación:

$$Q = \frac{1000 * A (m^2) * B_i (g/m^2/d)}{C_i (g/m^3)}$$

Resultado:

$$Q_{\text{modelos del tratamiento primario}} = \frac{1000 * 35 m^2 * 20 g/m^2/d}{5 205 g/m^3} = 1,35 L/d$$

$$Q_{\text{modelos del tratamiento secundario}} = \frac{1000 * 35 m^2 * 20 g/m^2/d}{3 336 g/m^3} = 2,10 L/d$$

APÉNDICE 7. Memoria de cálculo de la carga hidráulica de los modelos de humedales artificiales.

Parámetros de entrada:

- C_i : Concentración de DQO del afluente a tratar, 5 205 g/m^3 (tratamiento primario) y 3 336 g/m^3 (tratamiento secundario).
- B_i : Carga orgánica del contaminante, 20 $g/m^2/d$ (con base en literatura).

Ecuación:

$$CH = \frac{1000 * B_i (g/m^2/d)}{C_i (g/m^3)}$$

Resultado:

$$CH_{modelos\ del\ tratamiento\ primario} = \frac{1000 * 20\ g/m^2/d}{5\ 205\ g/m^3} = 3,84\ mm/d$$

$$CH_{modelos\ del\ tratamiento\ secundario} = \frac{1000 * 20\ g/m^2/d}{3\ 336\ g/m^3} = 6,00\ mm/d$$

APÉNDICE 8. Memoria de cálculo de la porosidad promedio ponderada para el sustrato utilizado en los modelos.

Parámetros de entrada:

- ϕ_i : Porosidad de cada sustrato, 14,98 % (piedra cuarta de origen volcánico) y 25 % (granito de río).
- h_i : Espesor de cada capa, 18 cm (piedra cuarta de origen volcánico) y 18,5 cm (granito de río).

Ecuación:

$$\phi = \frac{\sum_1^n \phi_i (\%) * h_i (cm)}{\sum_1^n h_i (cm)}$$

Resultado:

$$\phi = \frac{(25\ \% * 18,5\ cm) + (14,98\ \% * 18\ cm)}{(18\ cm + 18,5\ cm)} = 20\ \%$$

APÉNDICE 9. Memoria de cálculo del tiempo de retención hidráulica de los modelos de humedales artificiales.

Parámetros de entrada:

- A: Área de las cajas, 35 m².
- h: Altura de las cajas, 43,5 m.
- ε: Porosidad promedio ponderada, 0,2.
- Q_{modelos del tratamiento primario}: Caudal de alimentación de los modelos del tratamiento primario; 1,35 m³/d.
- Q_{modelos del tratamiento secundario}: Caudal de alimentación de los modelos del tratamiento secundario; 2,10 m³/d.

Ecuación:

$$\tau = \frac{A (m^2) * h(m) * \varepsilon \text{ (en decimal)}}{Q (m^3/d)}$$

Resultado:

$$\tau_{\text{modelos del tratamiento primario}} = \frac{35 m^2 * 43,5 m * 0,2}{1,35 m^3/d} = 23 d$$

$$\tau_{\text{modelos del tratamiento secundario}} = \frac{35 m^2 * 43,5 m * 0,2}{2,10 m^3/d} = 15 d$$

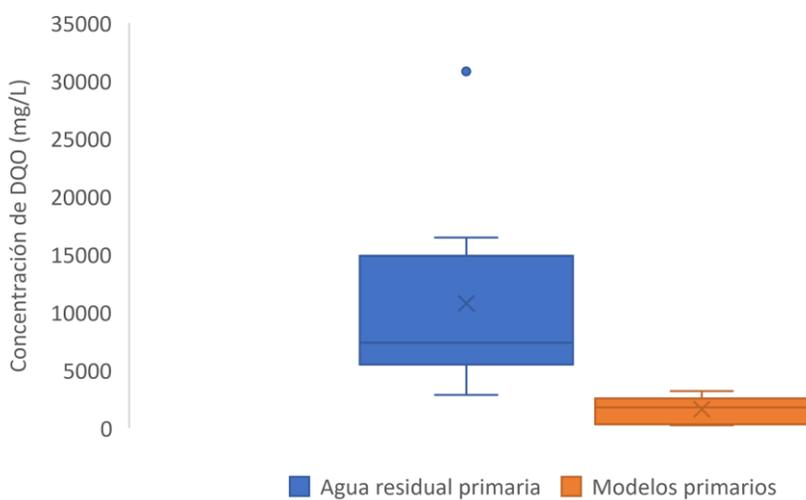
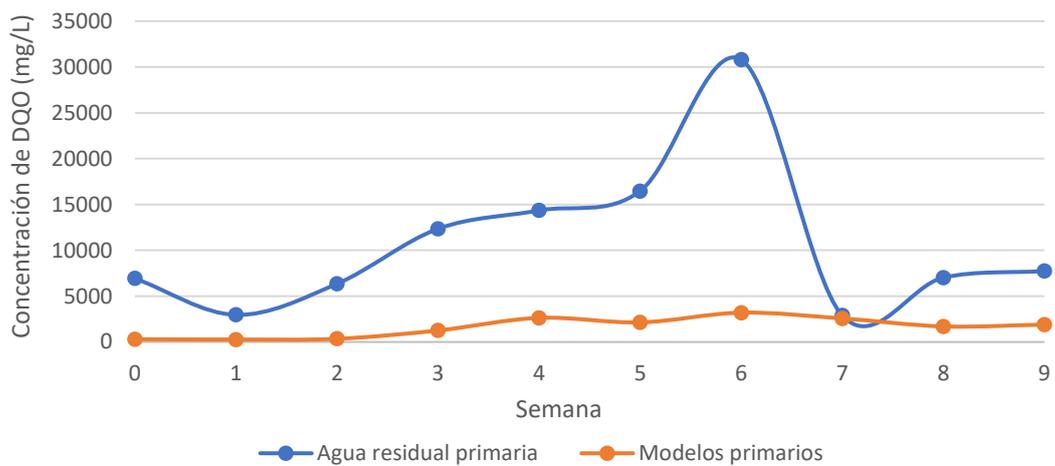
APÉNDICE 10. Reporte visual de la turbiedad del agua residual primaria y sus respectivos modelos.

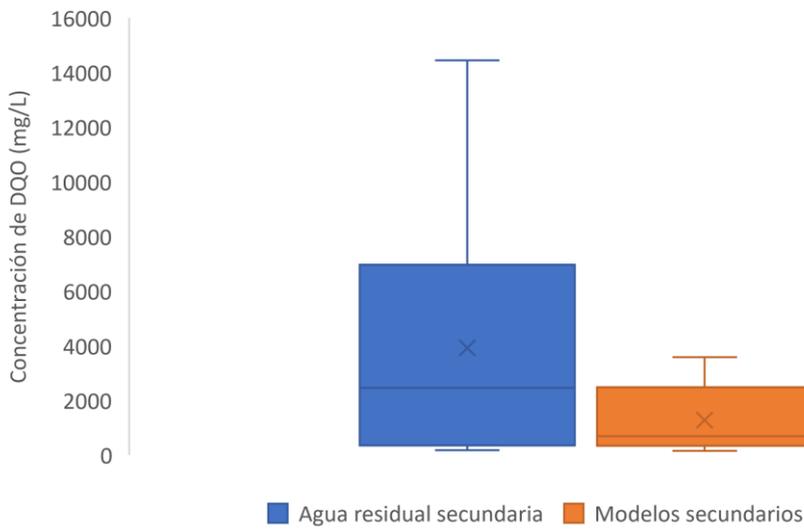
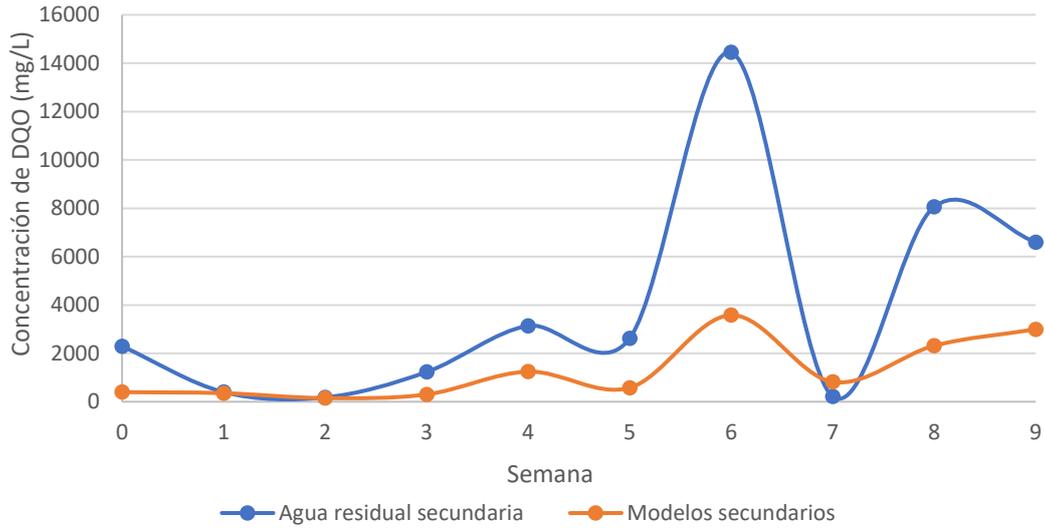


APÉNDICE 11. Reporte visual de la turbiedad del agua residual secundaria y sus respectivos modelos.

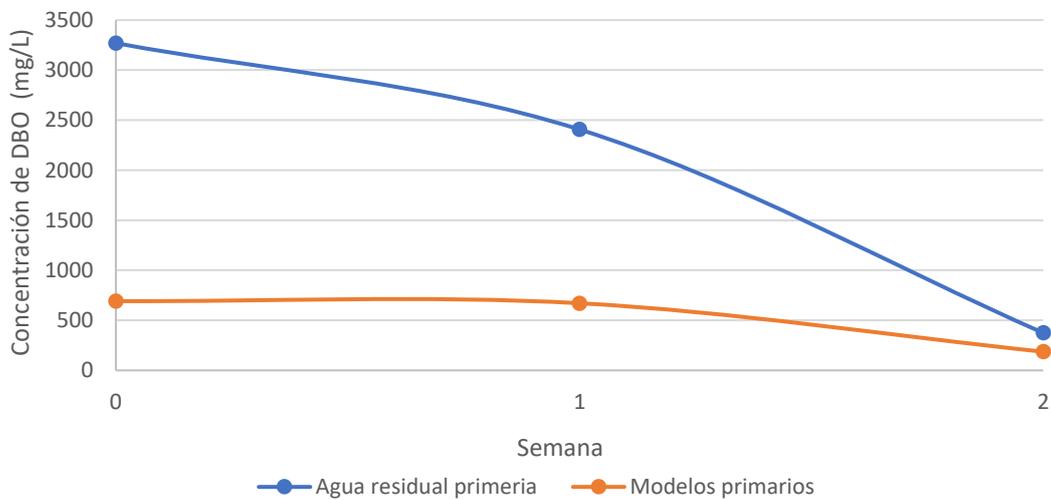


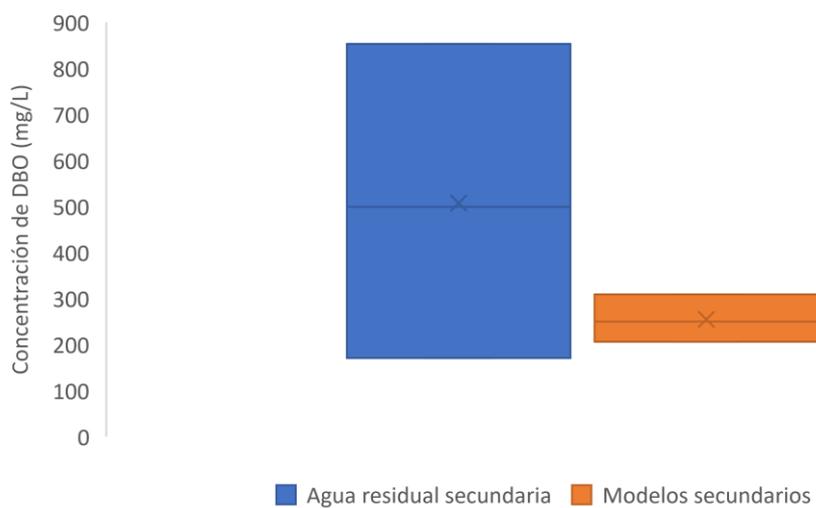
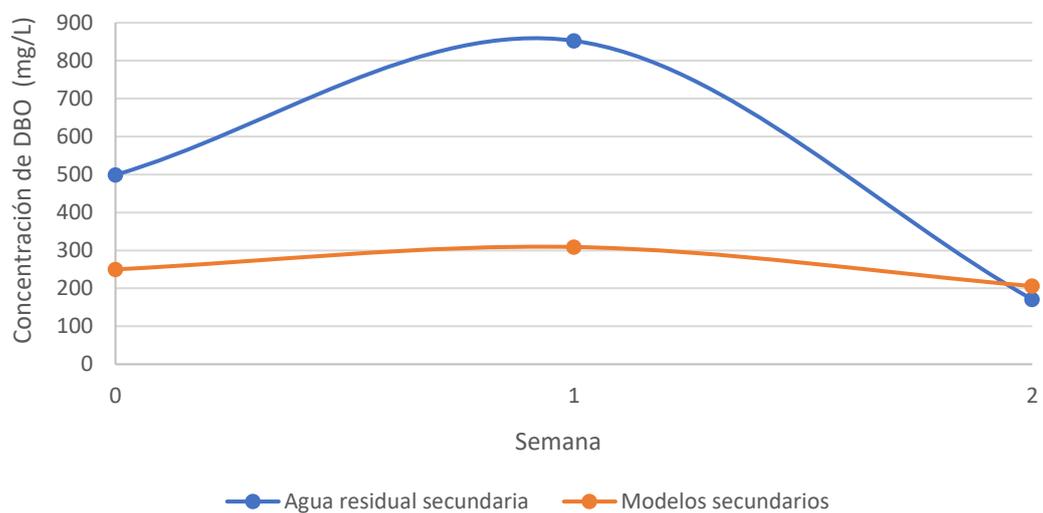
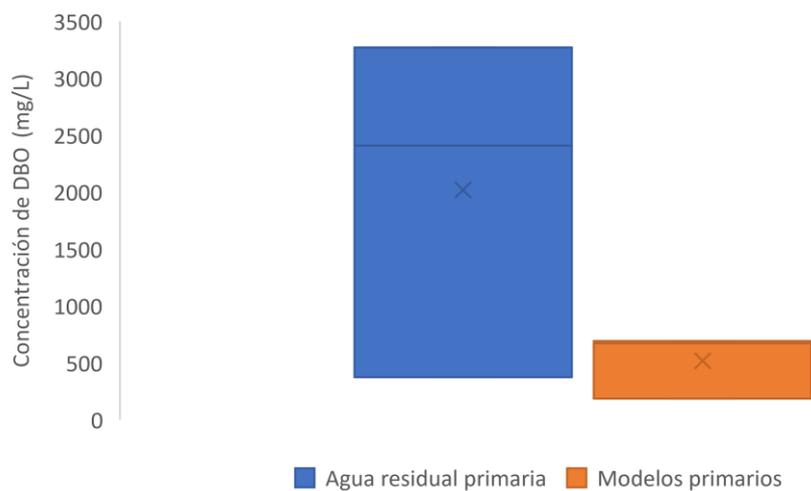
APÉNDICE 12. Concentración de DQO con respecto al tiempo, del agua residual (afluentes) y efluentes del sistema de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.



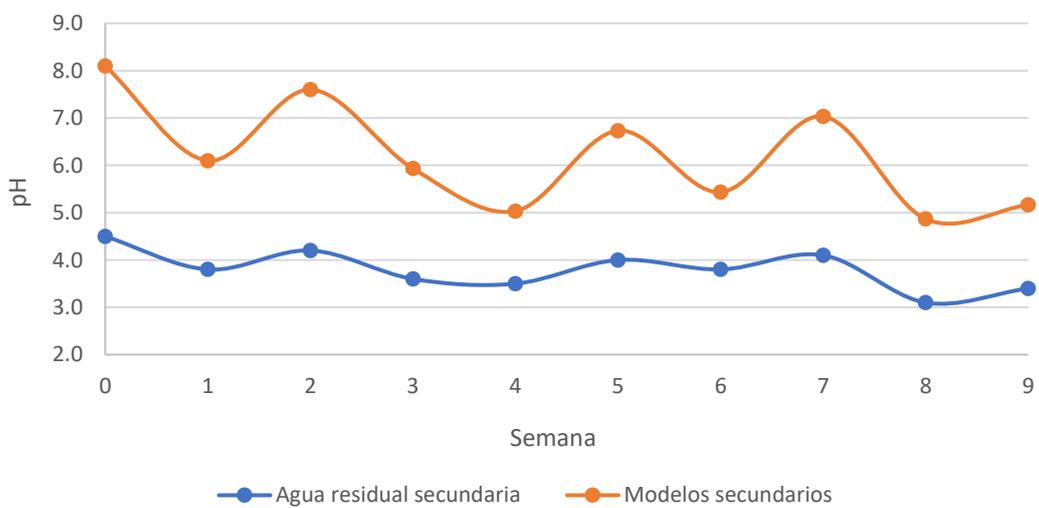
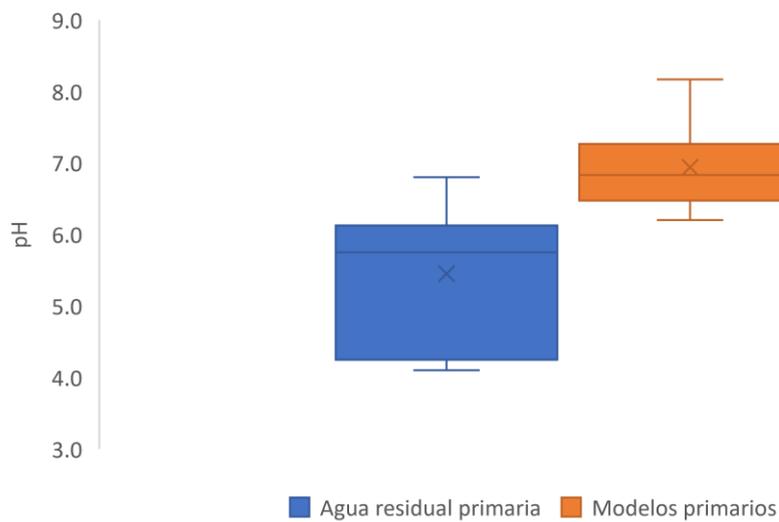
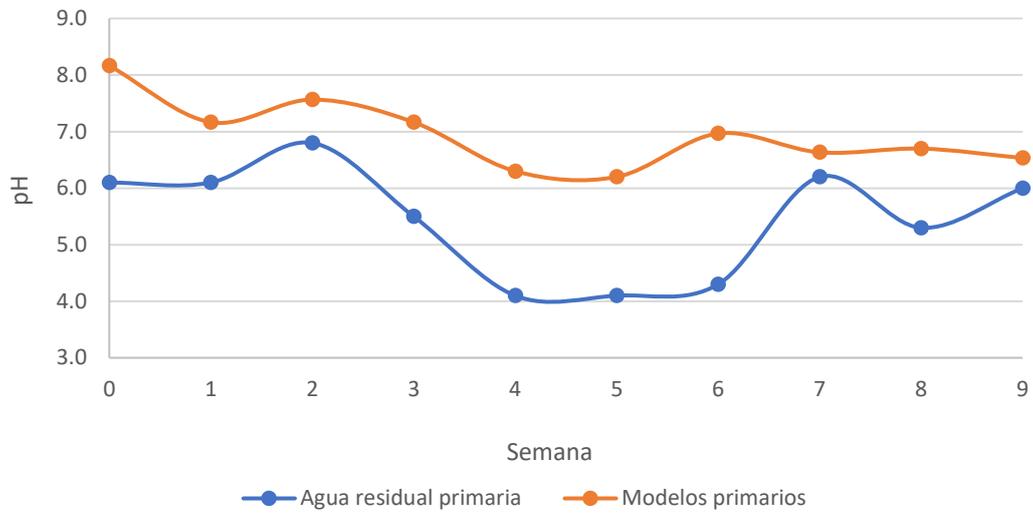


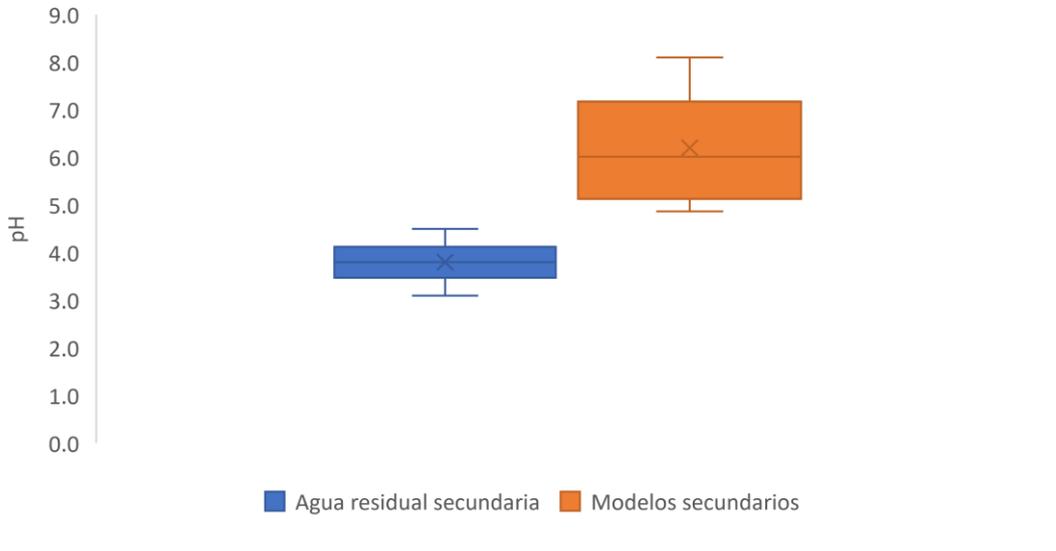
APÉNDICE 13. Concentración de DBO con respecto al tiempo, del agua residual (afluentes) y efluentes del sistema de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.



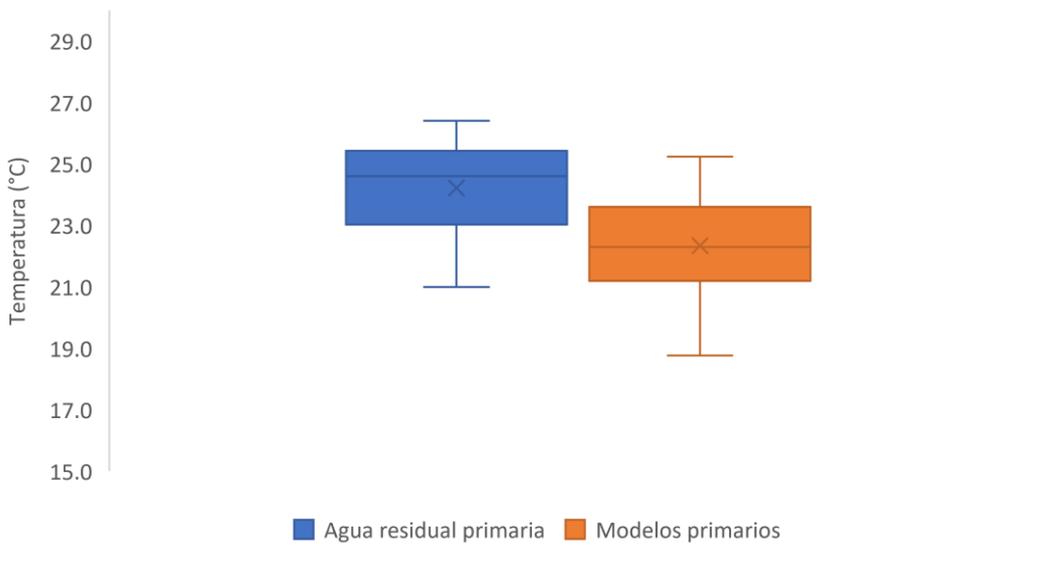
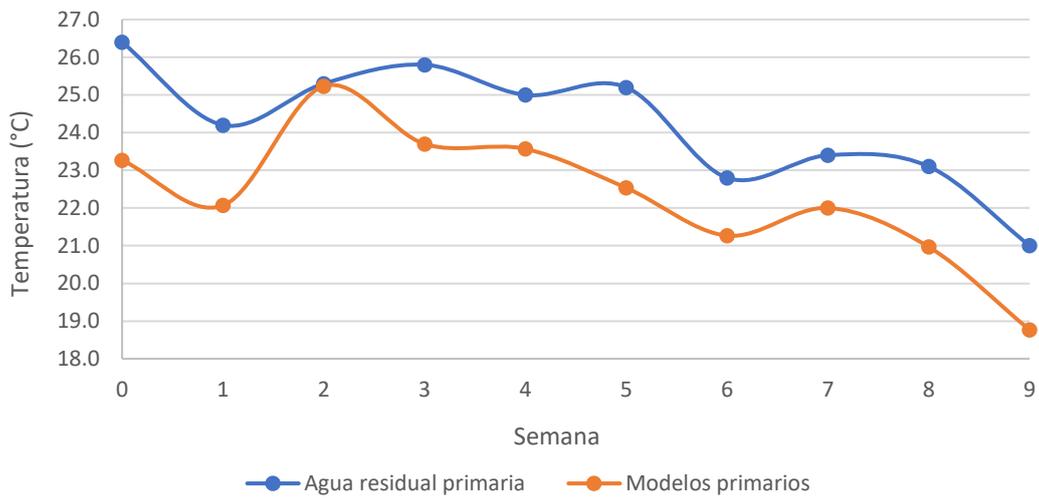


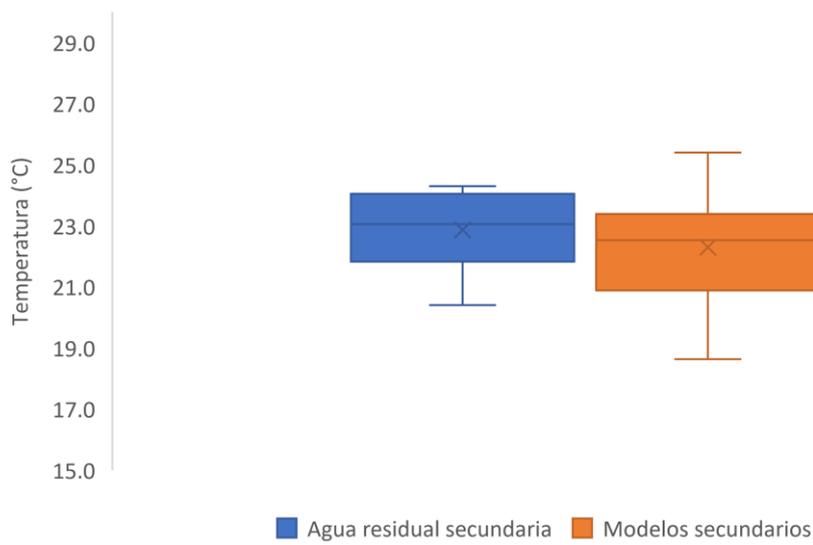
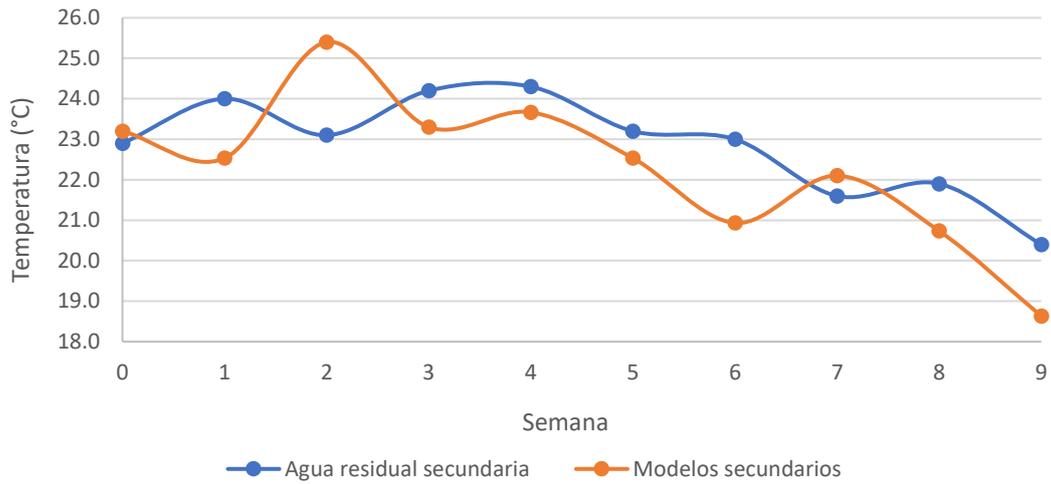
APÉNDICE 14. Concentración de pH con respecto al tiempo, del agua residual (afluentes) y efluentes del sistema de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.



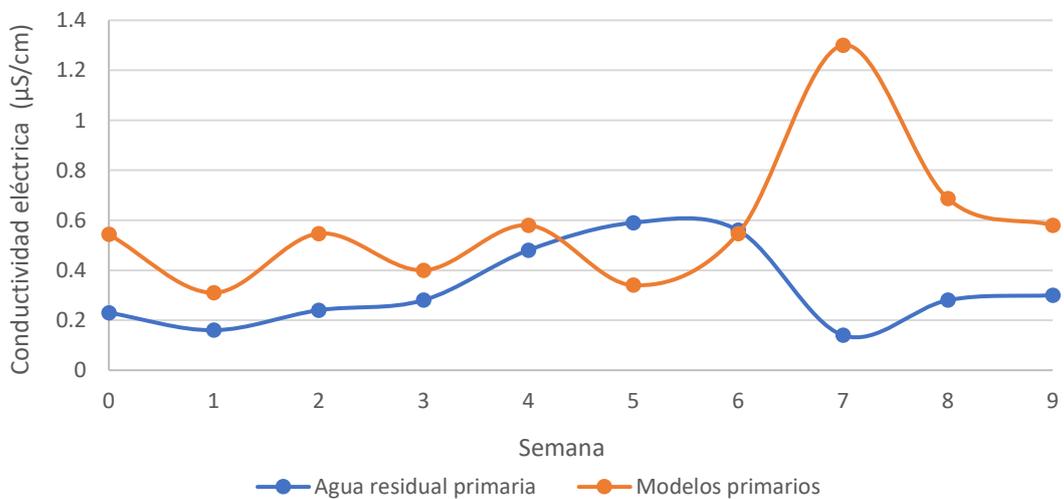


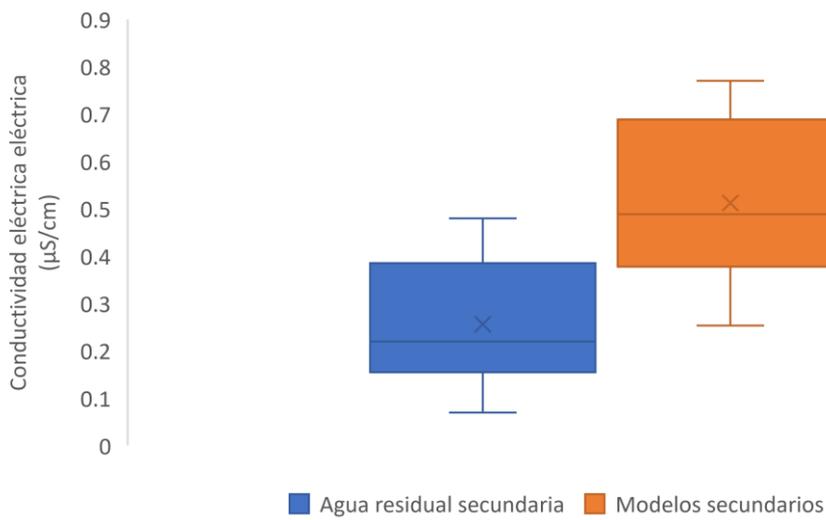
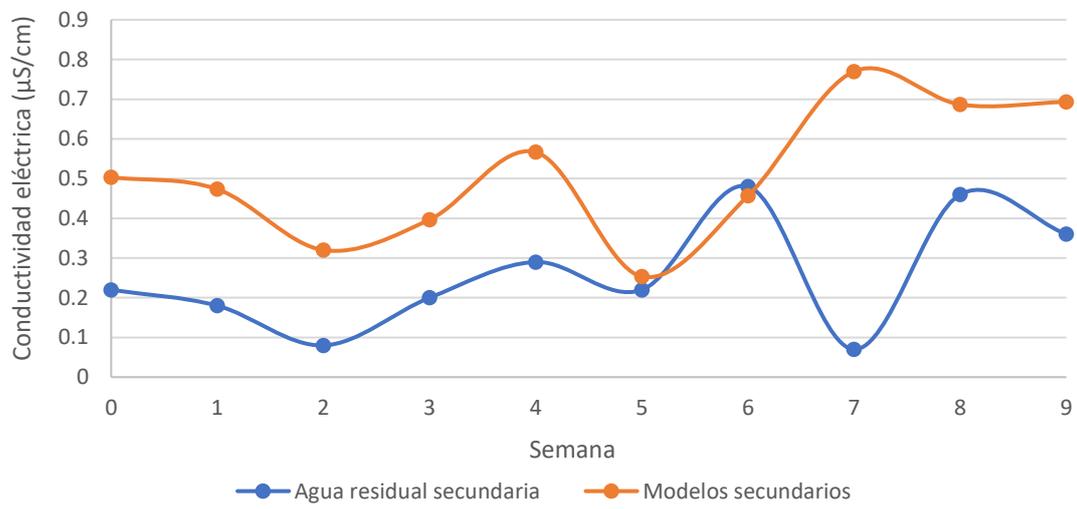
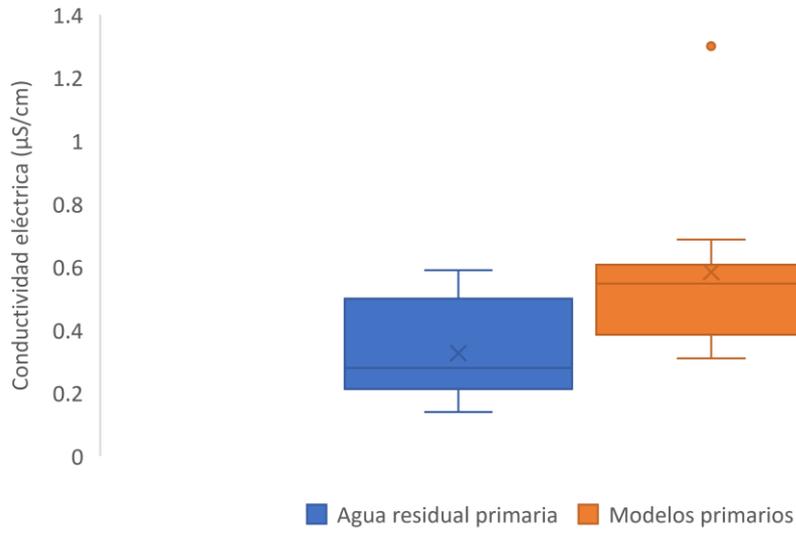
APÉNDICE 15. Concentración de temperatura con respecto al tiempo, del agua residual (afluentes) y efluentes del sistema de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.



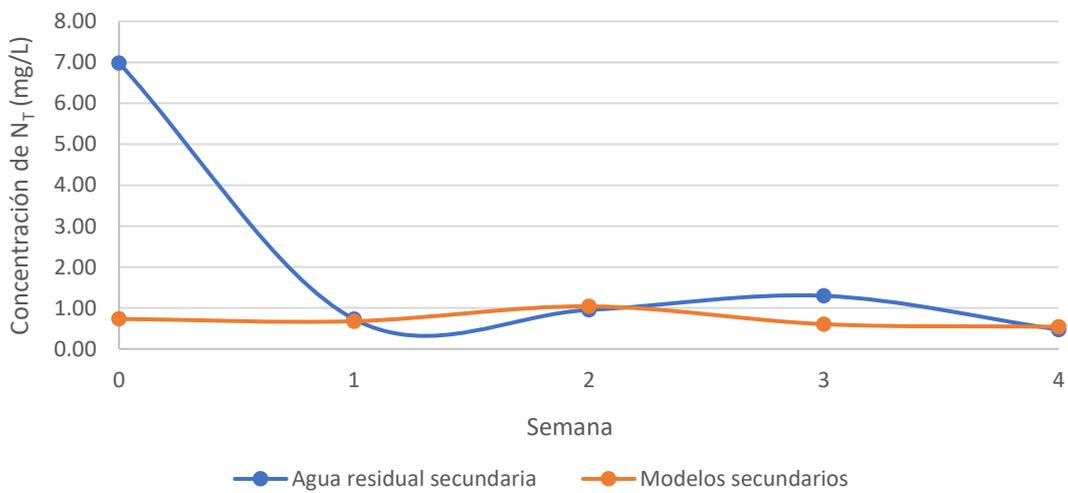
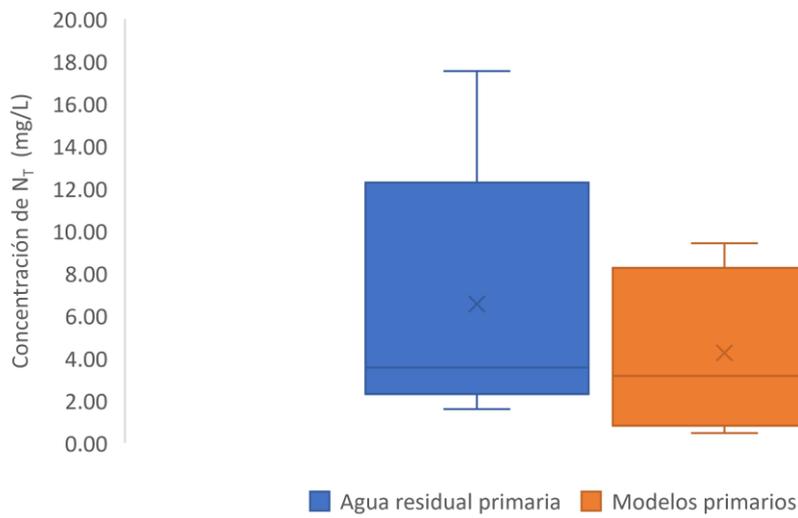
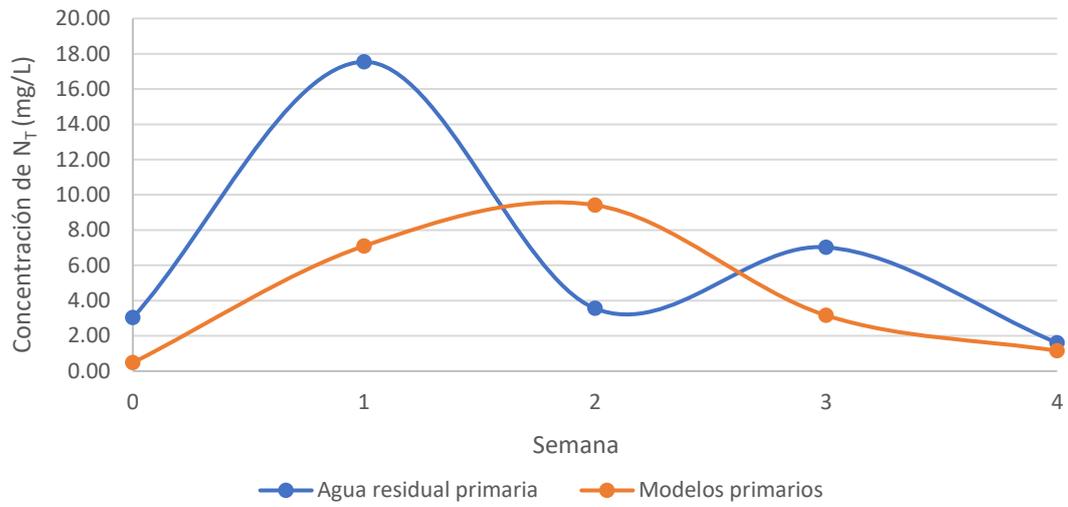


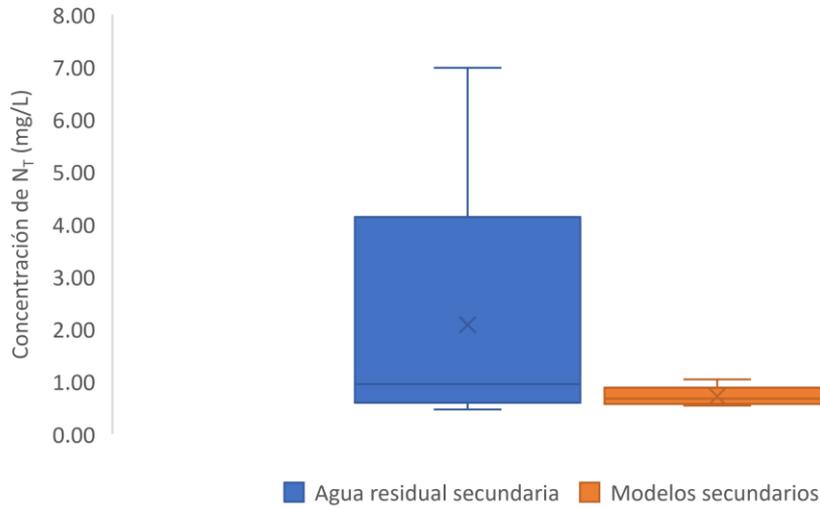
APÉNDICE 16. Concentración de conductividad eléctrica con respecto al tiempo, del agua residual (afluentes) y efluentes del sistema de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.



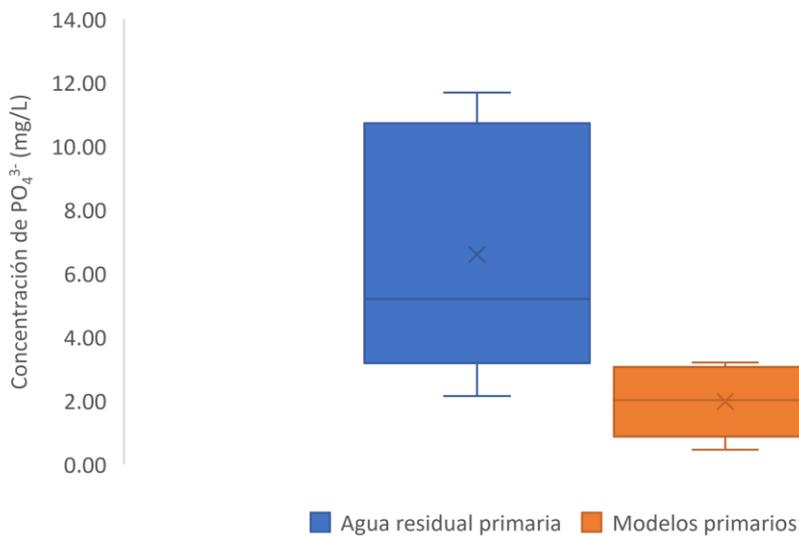
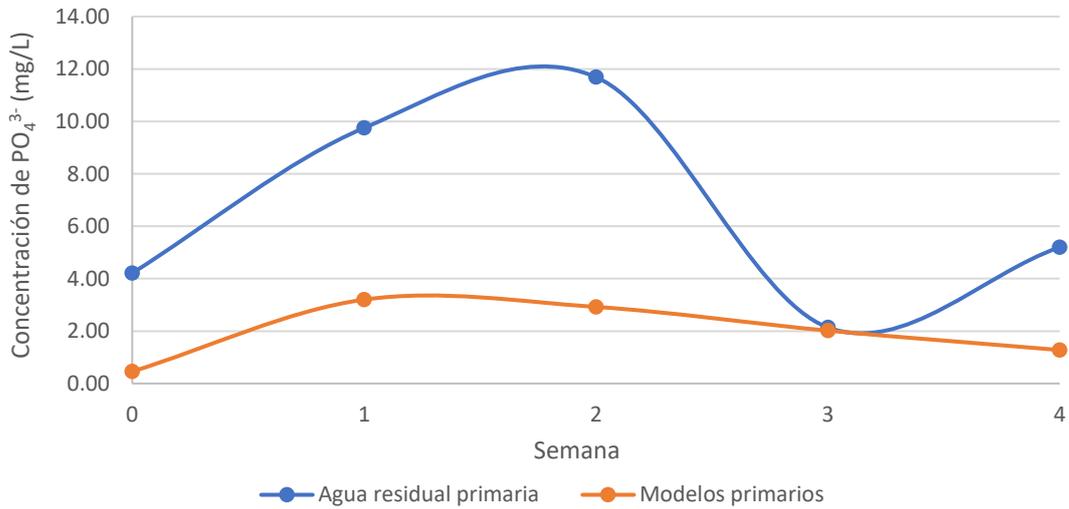


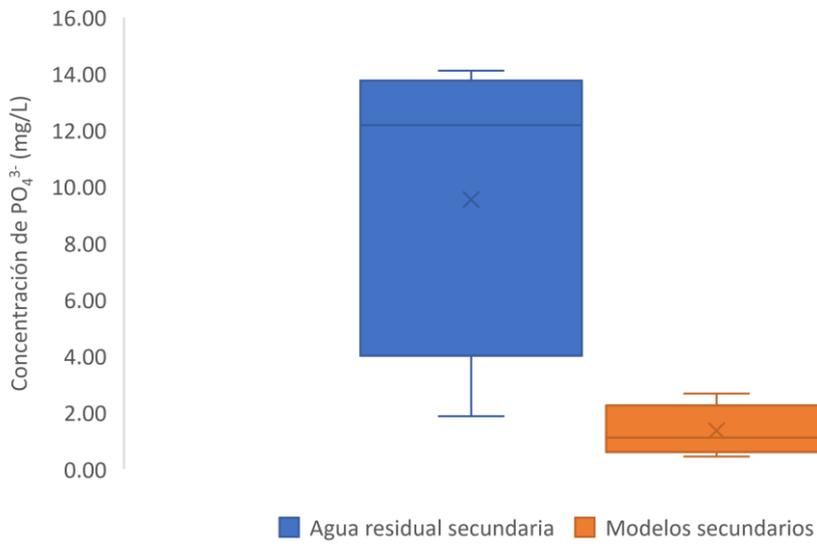
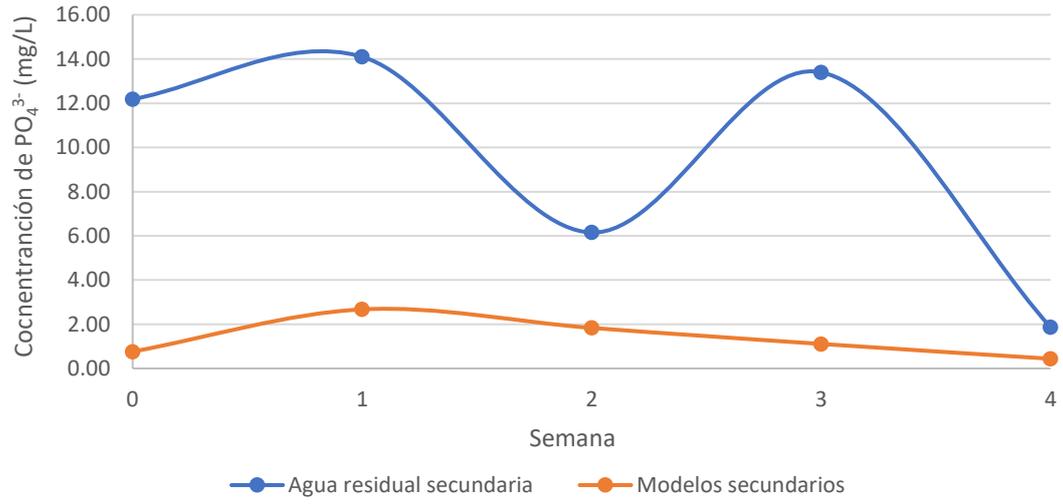
APÉNDICE 17. Concentración de N_T con respecto al tiempo, del agua residual (afluentes) y efluentes del sistema de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.





APÉNDICE 18. Concentración de PO_4^{3-} con respecto al tiempo, del agua residual (afluentes) y efluentes del sistema de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical.





APÉNDICE 19. Memoria de cálculo de la constante de velocidad de remoción de primer orden para el modelo de flujo tapón y tapón modificado.

Parámetros de entrada:

- Q: Caudal de alimentación de los modelos del tratamiento secundario, 2,10 L/d (0,0021 m³/d).
- ε: Porosidad promedio ponderada, 0,2.
- A: Área de las cajas, 35 m².
- C*: Concentración base de los modelos del tratamiento secundario.

Ecuaciones:

$$k_{\text{modelo flujo tapón}} = \frac{Q \text{ (m}^3/\text{d)}}{\varepsilon \text{ (en decimal)} * A \text{ (m}^2)} \ln \left(\frac{c_a \text{ (mg/L)}}{c_e \text{ (mg/L)}} \right)$$

$$C^* = 7,8 + 0,063 * c_a \text{ (mg/L)}$$

$$k_{\text{modelo flujo tapón modificado}} = \frac{Q \text{ (m}^3/\text{d)}}{\varepsilon \text{ (en decimal)} * A \text{ (m}^2)} \ln \left(\frac{c_a \text{ (mg/L)} - C^* \text{ (mg/L)}}{c_e \text{ (mg/L)} - C^* \text{ (mg/L)}} \right)$$

Resultado:

$$k_{\text{modelo flujo tapón}} = \frac{0,0021 \text{ m}^3/\text{d}}{0,2 * 0,35 \text{ m}^2} \ln \left(\frac{2 \ 295 \text{ mg/L}}{396 \text{ mg/L}} \right) = 0,052 \text{ m/d}$$

$$C^* = 3,5 + (0,053 * 2 \ 295 \text{ mg/L}) = 125 \text{ mg/L}$$

$$k_{\text{modelo flujo tapón modificado}} = \frac{0,0021 \text{ m}^3/\text{d}}{0,2 * 0,35 \text{ m}^2} \ln \left(\frac{2 \ 295 \text{ mg/L} - 125 \text{ mg/L}}{396 \text{ mg/L} - 125 \text{ mg/L}} \right) = 0,062 \text{ m/d}$$

Por lo tanto, repitiendo el mismo procedimiento para las mediciones realizadas se obtiene un promedio de:

Cuadro V. Constante de velocidad de remoción de primer orden para el modelo de flujo tapón y tapón modificado.

Concentración del afluente (mg/L)	Concentración del efluente (mg/L)	k _{modelo flujo tapón} (m/d)	C* (mg/L)	k _{modelo flujo tapón modificado} (m/d)
2 295	396	0,052	125	0,062
400	354	0,004	25	0,004
180	150	0,005	13	0,006
1 229	301	0,042	69	0,048
3 140	1 244	0,028	170	0,030
2 621	578	0,045	142	0,052
14 445	3 580	0,042	769	0,047
8 055	2 315	0,037	430	0,042
6 600	2 995	0,024	353	0,026
4 329	1 324	0,031	233	0,035

APÉNDICE 20. Memoria de cálculo del caudal de alimentación de los humedales artificiales.

Parámetros de entrada:

- A: Área del terreno, 75 m².
- K_{modelo flujo tapón}: Constante de velocidad de remoción de primer orden, 0,031 m/d.
- C_{afluente}: Concentración del afluente, 4 329 mg/L.
- C_{efluente}: Concentración del efluente, 300 mg/L.

Ecuación:

$$Q = \frac{A (m^2) * k(m/d)}{\ln(c_a (mg/L)) - \ln(c_e (mg/L))}$$

Resultado:

$$Q = \frac{75 m^2 * 0,031 m/d}{\ln(4 329 mg/L) - \ln(300 mg/L)} = 0,9 m^3/d$$

APÉNDICE 21. Memoria de cálculo del tiempo de retención hidráulica de los humedales artificiales.

Parámetros de entrada:

- A: Área disponible para construir el humedal, 75 m².
- h: Profundidad efectiva del humedal, 0,9 m.
- ε: Porosidad promedio ponderada, 0,2.
- Q: Caudal de alimentación de los humedales artificiales; 0,9 m³/d.

Ecuación:

$$\tau = \frac{A (m^2) * h(m) * \varepsilon (en decimal)}{Q (m^3/d)}$$

Resultado:

$$\tau = \frac{75 m^2 * 0,9 m * 0,2}{0,9 m^3/d} = 15 d$$

APÉNDICE 22. Memoria de cálculo del diseño de la estructura de estrada de los humedales artificiales.

Parámetros de entrada:

- v: Volumen a almacenar, 0,9 m³.
- Margen de seguridad: 0,1 m³.

Ecuación:

$$v = v_{almacenar} (m^3) + Margen (m^3)$$

Resultado:

$$v = 0,9 m^3 + 0,1 m^3 = 1 m^3$$

APÉNDICE 23. Memoria de cálculo del diseño de la estructura de salida de los humedales artificiales.

Altura de la tubería de salida (cambio en la configuración de los humedales artificiales)

Parámetros de entrada:

- $h_{sustrato}$: Profundidad del sustrato de los humedales artificiales, 0,9 m.
- Margen de reducción: 0,05 m.

Ecuación:

$$h_{salida} = h_{sustrato} (m) - Margen (m)$$

Resultado:

$$h_{salida} = 0,9 m - 0,05 m = 0,85 m$$

Área y volumen

Parámetros de entrada:

- h_{salida} : Altura requerida para cambiar la configuración del flujo de los humedales, 0,85 m.
- $v_{efluente}$: Volumen del efluente de los humedales artificiales, 0,9 m³.
- $h_{humedales}$: Altura de los humedales artificiales, 1,5 m.

Ecuaciones:

$$A = \frac{v_{efluente}(m^3)}{h_{salida} (m)}$$

$$v = A (m^2) * h_{humedales} (m)$$

Resultado:

$$A = \frac{0,9 \text{ m}^3}{0,85 \text{ m}} = 1,1 \text{ m}^2$$

$$v = 1,1 \text{ m}^2 * 1,5 \text{ m} = 1,65 \text{ m}^3$$

APÉNDICE 24. Memoria de cálculo del vertedero de aforos.

Carga del vertedero:

Parámetros de entrada:

- Q: Caudal de alimentación de los humedales artificiales; 0,9 m³/d.
- C_d: Coeficiente de descarga del vertedero, 0,62.
- g: Gravedad, 9,81 m/s².
- φ: Abertura del vertedero, 15 °.

Ecuación:

$$H = \left(\frac{Q \text{ (m}^3/\text{d)}}{C_d \text{ (adimensional)} * \frac{8}{15} * \sqrt{2 * g \text{ (m/s}^2)}} * \tan\left(\frac{\phi \text{ (}^\circ\text{)}}{2}\right)} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Resultado:

$$H = \left(\frac{0,9 \text{ m}^3/\text{d}}{0,62 * \frac{8}{15} * \sqrt{2 * 9,81 \text{ m}^2/\text{s}^2}} * \tan\left(\frac{15}{2}\right)} \right)^{\frac{2}{5}} = 0,6 \text{ m}$$

Profundidad del vertedero:

Parámetros de entrada:

- H: Carga de vertedero, 0,6 m.
- P: Profundidad teórica del vertedero, 1,5 m.
- H/P: Relación de carga y profundidad teórica, ≤ 0,4.

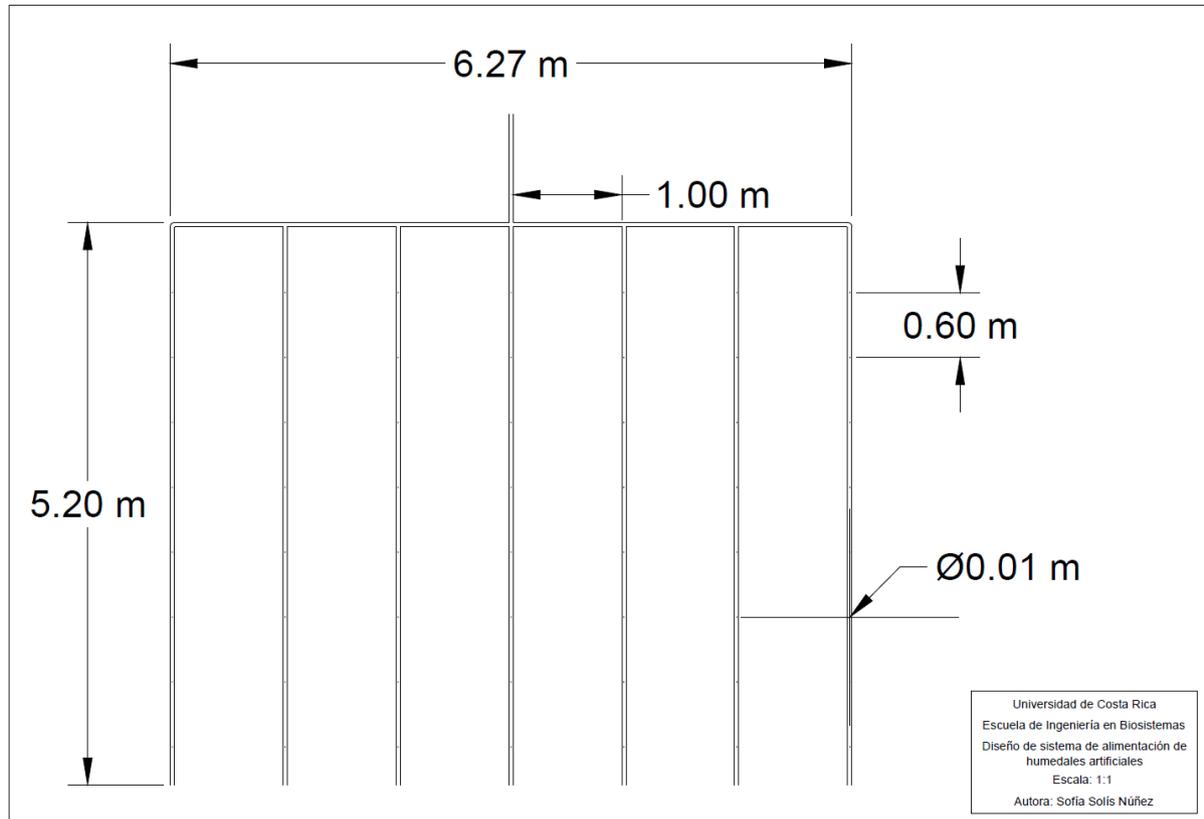
Ecuación:

$$H/P = \frac{H \text{ (m)}}{P \text{ (m)}}$$

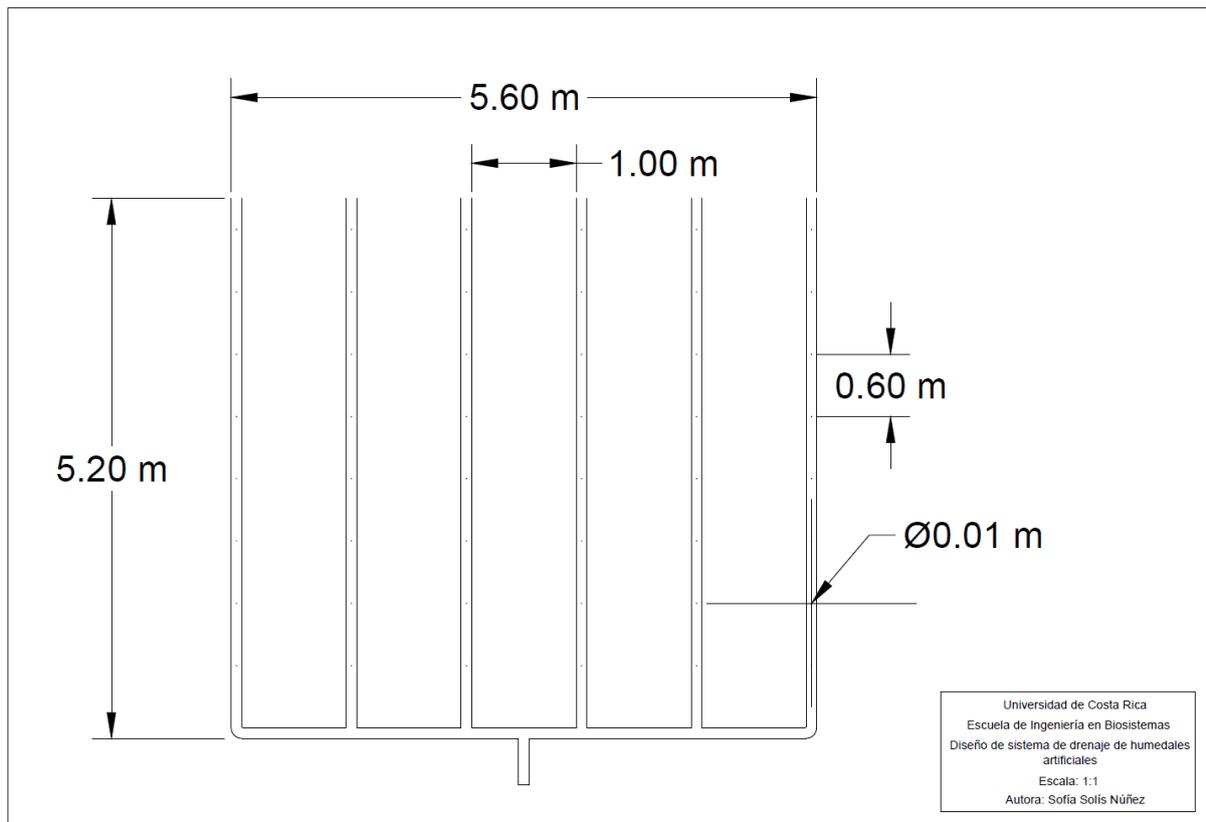
Resultado:

$$H/P = \frac{0,6 \text{ m}}{1,5 \text{ m}} = 0,37 \leq 0,4$$

APÉNDICE 25. Diseño de sistema de alimentación de humedales artificiales, elaboración propia.



APÉNDICE 26. Diseño de sistema de drenaje de humedales artificiales, elaboración propia.



APÉNDICE 27. Inversión correspondiente al sustrato de los humedales artificiales, obtenidos el 17/03/23.

Sustrato	Cantidad requerida (sacos)	Costo unitario (colones)	Costo total (colones)
Granito de río	1 094	2 000	2 188 800,00
Piedra cuarta de origen volcánico	188	2 000	375 824,18
Piedra de río tipo canto rodado	215	2 000	429 513, 34
Costo			2 994 137,52

APÉNDICE 28. Inversión correspondiente a las tuberías y accesorios de los diferentes elementos estructurales, obtenidos el 29/03/23.

Elementos estructurales	Costo total (colones)
Estructura de almacenamiento de bomba	24 047,49
Estructura de entrada de humedales	51 469,83
Sistema de alimentación de humedales	96 507,83
Sistema de drenaje de humedales	392 489,63
Estructura de salida de humedales	63 795,00
Vertedero para aforos	4 070,00
Costo	632 379,78

APÉNDICE 29. Inversión correspondiente a los materiales de obra gris de los diferentes elementos estructurales, obtenidos el 30/03/23.

Elementos estructurales	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
	Costo total (colones)	Costo total (colones)	Costo total (colones)
Estructura de almacenamiento de bomba	73 396,32	67 500,60	75 560,00
Estructura de entrada de humedales	73 396,32	67 500,60	75 560,00
Estructura de humedales	3 300 617,00	3 782 020,00	2 997 499,00
Estructura de salida de humedales	307 577,76	268 050,18	312 955,00
Vertedero para aforos	542 569,42	472 115,30	544 100,00
Costo	4 297 556,81	4 657 186,68	4 005 674,00

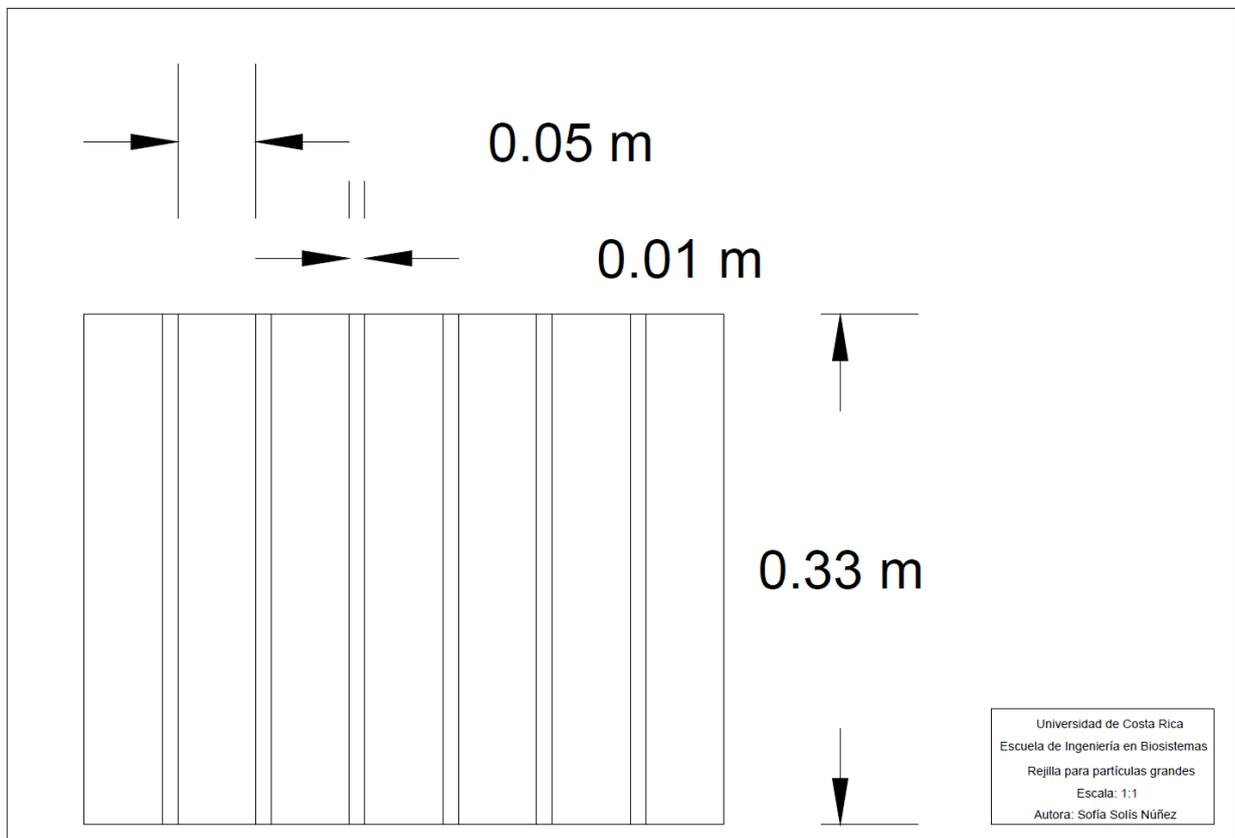
APÉNDICE 30. Inversión correspondiente a la mano de obra requerida para la construcción de la obra gris, obtenidos el 27/03/23.

Actividad	Costo total (colones)
Trabajadores	1 529 894,44
Cargas sociales y póliza de seguro	746 139,00
Costo	2 276 033,44

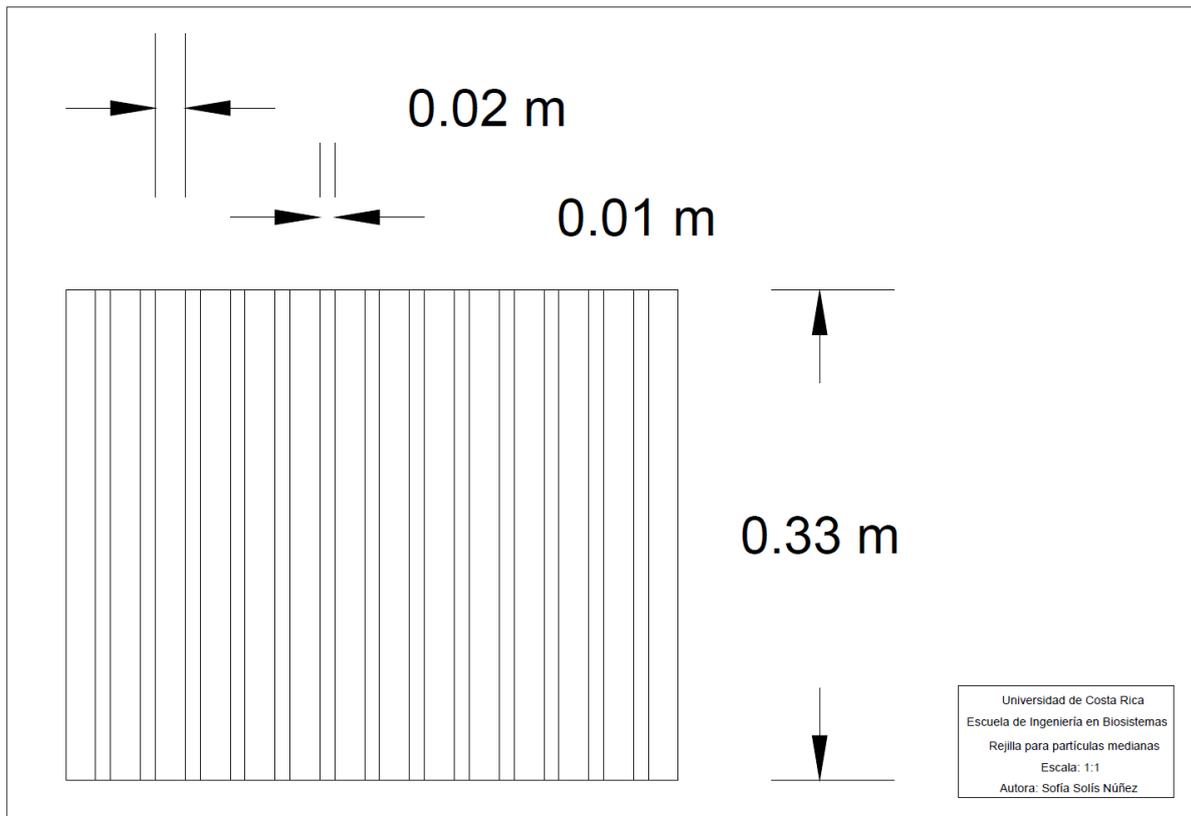
APÉNDICE 31. Inversión correspondiente a la mano de obra requerida para la construcción de los elementos internos del humedal artificial, obtenidos el 29/03/23.

Actividad	Costo total (colones)
Movimiento de tierra	265 155,82
Instalación de tuberías	275 401,17
Colocación de sustrato	369 787,64
Colocación de vegetación	24 893, 82
Cargas sociales y póliza de seguro	165 184,00
Costo	1 100 422,45

APÉNDICE 32. Plano de rejilla para partículas grandes, elaboración propia.



APÉNDICE 33. Plano de rejilla para partículas medianas, elaboración propia.



APÉNDICE 34. Plano de rejilla para partículas pequeñas, elaboración propia.

