

CAPÍTULO I
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 ANTECEDENTES

Las primeras nociones científicas relacionadas con el uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas usadas, remontan a 1946 con el procedimiento llamado Max Plank Institute System (MPIS) desarrollado por Seidel, el cual conlleva varias etapas sucesivas. Las plantas generalmente utilizadas son el *Phragmites australis* (Carrizo), la *Scirpus sp.* (scirpe), *Iris sp.* (Iris) y *Typha sp.* (quenuilla) (Londoño Cardona & Marín Vanegas, 2009).

Así mismo, en España se han realizado humedales artificiales en el río Cataluña, Cantabria, León Andalucía, Barcelona pudiendo ser este trabajo replicable como una alternativa de solución ambiental (Alarcón Kolb & Marull, 1997).

A nivel internacional consideraron que desde 1976 se reportan en Sudáfrica, Estados Unidos De Norteamérica y Gran Bretaña experiencias en sistemas con áreas inundadas, como pantanos y manglares naturales, a partir de 1986 se empiezan a introducir los sistemas de humedales construidos. En la actualidad este tipo de sistemas se aplica en varios países de Europa, América, África y Australia, no solamente para tratar aguas residuales domésticas, sino también para tratar efluentes con muy distintas características (Arcos Ramos, Cantellano DE Rosas, Nabor Ma. de la Luz, García Morales, & Solís Casas, 1999).

Humedales construidos utilizando micrófitos flotantes en la fitorremediación lograron demostrar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales con materia orgánica, nutrientes y sustancias tóxicas como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y mercurio. Debido al bajo costo de instalación y poco consumo de energía convencional, es de importancia utilizarlo en poblados rurales siendo muy prácticos su montaje y sistema de operación de estos sistemas de tratamiento. Aun cuando los procesos de depuración de aguas residuales con micrófitos flotantes no están rigurosamente claros. (Martelo & Lara Borrero, 2012).

El uso de los humedales de tratamiento para el saneamiento de aguas residuales es cada vez más aceptado en diferentes partes del mundo. Hoy en día los humedales de flujo

superficial son comunes en diferentes países europeos como Inglaterra, Francia, Dinamarca, Alemania e Italia entre otros, siendo también apropiados para los países latinoamericanos, solo que se requiere una mayor difusión y comprensión del funcionamiento de estos sistemas de tratamiento para las condiciones ambientales propias. (Alarcón Herrera, Zurita Martínez, Lara Borrero, & Vidal, 2018).

El análisis de los resultados demostró que existen diferencias significativas en la eficiencia de ambas plantas (Totora y carrizo), para los parámetros fisicoquímicos (Turbidez, SST, SDT, NA, NT, Aluminio, Bario, DBO₅ y Demanda Química de Oxígeno (DQO)) se demuestra que la *Scirpus californicus* (Totora) tiene mayor eficiencia para la absorción y remoción de nutrientes en el tratamiento de agua residual doméstica, los cuales obtuvieron eficiencias del 94.5% de Turbidez, 97.2% de SST, 95.4% NA, 95.99% NT, 98.98% Aluminio, 51.06% de Bario, 93.39% de DBO₅ y DQO, mientras que en los análisis para los parámetros microbiológicos (Coliformes totales y termotolerantes, *E-Coli*) se demuestra que *Phragmites Australis* (Carrizo) tiene mayor capacidad depuradora; es decir, tiene mayor eficiencia con el 92% C-de Total, 95% de C-Term y 95.2% de *E-coli* (Chugden Romero & Verastegui Ortiz, 2020).

Así mismo, en la ciudad de La Paz un estudio en trasplante y desarrollo de cuatro helófitos (*Schoenoplectus tatora*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis* y *Juncus sp.*) en un substrato de un espesor de alrededor de 10 cm. Fue verificado el crecimiento, densidad, floración. También se monitoreo la calidad de las aguas servidas en el afluente y los efluentes por métodos fisicoquímicos y microbiológicos. Estos estudios demostraron que la totora se adaptó mejor al tratamiento de aguas residuales, alcanzando niveles de tratamiento secundario y avanzado. Se demostró la debilitación de los tallos de la totora por el gran contenido de nutrientes en las aguas servidas, recomendando varias cosechas de la biomasa verde por año para evitar el doblamiento de los tallos (Taucer, 1993).

Según parámetros determinados en el estudio del tratamiento de aguas servidas con el uso de totora, el análisis de datos señala que el tratamiento de baja densidad de siembra de totora proporciona valores más bajos en cuanto al contenido de N total y P total 1,36

%, 8,98 ppm respectivamente. En comparación el tratamiento realizado con una alta densidad 2,58%, 9,67 ppm. Respectivamente. Globalmente podemos apreciar que existe una disminución del contenido de nitrógeno total y P total con el agua servida bajo tratamiento de alta y baja densidad siembra, lo cual comprueba el efectivo del uso de plantas acuáticas en el tratamiento de aguas servidas (Flores Choque, 2013).

Por lo general, en cuanto a la reducción del fósforo, encontramos que los LES (libre de escorrentía superficial) son más eficientes que los ESS (escorrentía subsuperficial). Los ecosistemas de flujos libres disminuyen la concentración de P a menos de 1 mg/ℓ, en tanto que, en los subsuperficiales, los valores de P son mucho más variables. La remoción de P en los humedales construidos se debe a procesos complejos de adsorción y precipitación con aluminio, hierro, arcillas y materia orgánica. Se adicionan también las condiciones matriciales de aerobiosis, anaerobiosis, decantación, floculación, evapotranspiración y fotoxidación. (Fundación MEDMIN , 2003).

Se realizó experimentos con la totora como agente de purificación de aguas residuales, en la ciudad de La Paz recopilando conocimientos adquiridos con la totora como agente descontaminante de aguas, se trata de ensayos de laboratorio en medio estático y en medio dinámico. La mayoría de los trabajos se refiere a la capacidad de la totora de absorber los contaminantes como nutrientes al Nitrato, Amonio y Fosfato. Algunas especies vegetales captan y acumulan nutrientes, metales tóxicos, como Cadmio, Cromo y Plomo; ayudando a la mineralización del suelo con la ayuda de los microorganismos existentes (Franken, 1998).

1.2 MARCO HISTÓRICO

Los Humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia en la remoción de contaminantes que está sustentada con diferentes experiencias y estudios a nivel de todo el mundo, es por consiguiente que se menciona algunos de estos resultados obtenidos:

Los humedales artificiales se presentan como una nueva opción en la reducción de la contaminación ocasionada por aguas residuales, lograr rendimientos eficientes está supeditado al diseño y operación de estos humedales adecuando las características al agua a tratar (Miglio Toledo & Villarroel Cárdenas, 2012).

Experiencias en Bogotá acerca de la factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales realizadas en año 2014 nos brinda importantes resultados acerca de nutrientes solubles, donde se determinó:

En la depuración de efluentes residuales con humedales obtuvo rendimientos de eliminación entre 80 a 95 % para la DBO₅ y 70 a 95 % para SST, como también valores medios de 52 %, 40 % y 43 % para el nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal y fósforo total, respectivamente. (Espinosa Ortiz, 2014).

En Trujillo-Perú en el año 2018 donde se estudió la remoción de nitritos y fosfatos por plantas acuáticas, donde se concluye que las planta *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) presenta mayor eficiencia en la remoción de nitritos y fosfatos alcanzando un 69,34% y 62,71% respectivamente; en comparación con los humedales artificiales de *Typha angustifolia* (Totorá) con un 55,49% y 41,67% y *Cyperus rotundus* (Cebollín) con un 41,67% y 28,71% respectivamente. (Alfaro Pereda & Arellano Zapata, 2018).

En 2019 se realizó la determinación de la eficiencia de tres especies macrófitas para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la ciudad de Lima, Perú donde se concluye:

La especie *Typha domingensis* (totorá) fue sembrada en el primer sistema (H1); la especie *Phragmites australis* (carricillo), en el segundo sistema (H2); y la especie

Schoenoplectus americanus (junco), en el tercer sistema (H3). El tiempo de retención en cada sistema fue de 48 horas. Se determinó la calidad del agua residual antes del ingreso a los humedales y a la salida en cada sistema. La eficiencia de remoción de la Demanda Bioquímica Oxígeno (DBO_5) fue de 86,7 %, 83,4 % y 87 % para *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) respectivamente; para la DQO se obtuvo, 70,37%, 72,85 % y 70,12 % en cada uno; para el caso de los Fosfatos, 43,89 %, 35,91 % y 47,96 %; para los aceites y grasas, 97,10 %, 95,91 % y 96,90 %. Otros parámetros analizados (parámetros básicos, Amonio, SST,) mostraron valores aceptables a la salida de los sistemas (Mellado Delgado, 2019).

Otra investigación realizada acerca de la totora en humedales artificiales realizada en Chiclayo, Perú en el año 2019 nos brinda algunos resultados y consideraciones en la implementación de los humedales artificiales, específicamente concluye:

El humedal artificial a escala laboratorio demostró una efectiva remoción de los parámetros analizados, alcanzando eficiencia en la remoción de la Demanda Biológica De Oxígeno (DBO_5) y 71% en la Demanda Química De Oxígeno (DQO); sólidos disueltos totales un 73%; y un 100% en reducción de Coliformes totales y fecales; asimismo, se obtuvo un pH constante de entre 6,5 – 9,5, con una temperatura de 25. °C; obteniéndose un agua residual con características favorables a ser reutilizadas. Asimismo, los humedales artificiales no requieren de personal altamente capacitado, por lo tanto, los costos de operación y mantenimiento son bajos; y aplicables a comunidades donde los recursos económicos son bajos. El diseño del humedal para depurar las aguas residuales se logró hacer con datos de las viviendas; el caudal fue 5 $m^3/día$ y el parámetro DBO_5 inicial de 270 gr/m^3 , dichos datos permitieron realizar la implementación del humedal con un largo de 1 m, un ancho de 0,56 m y una altura de 0,60 m; también, se consideró una pendiente del 1%. Dicho sistema trabajo con la especie macrófita emergente *Scirpus californicus*, debido a su alta eficiencia en la remoción de contaminantes y con un tiempo de retención de 15 días y 25 días. Las medidas del humedal fueron las apropiadas para mejorar la calidad del agua residual.

Por ello que, el comportamiento del humedal artificial demuestra una alentadora eficiencia como tratamiento secundario de los efluentes de las lagunas de estabilización. (Cubas Zamora & Mireles Adrianzén, 2019).

En la Paz, Bolivia en la gestión 2003 se da a conocer la importancia de los humedales artificiales en la investigación “Uso de totorales para la descontaminación en Bolivia” donde ya se menciona:

Los humedales (artificiales y naturales) se consideran como ecosistemas altamente transformadores y acumuladores de materia orgánica. En particular, los naturales son unos de los más importantes, debido a su especial condición hidrológica y su función como ecotono entre sistemas terrestres y acuáticos. En nuestro caso, la totora (*Schenoeplectus tatora*) planta nativa del Lago Titicaca reúne las condiciones adecuadas y eficientes como un depurador de aguas domésticas en ecosistemas contruidos de tratamiento controlado, llegando a obtener una alta eficiencia en la depuración de los efluentes de aguas servidas bajo el enfoque de ecosistemas artificiales contruidos. (Fundación MEDMIN , 2003).

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 Aguas residuales

Las aguas residuales por lo general son una mezcla de todo efluente generado por diversas actividades antropogénicas que son derramadas sin tratamiento ocasionando impactos negativos hacia el medio ambiente y la salud humana. Por ello es necesario tomar medidas de prevención mediante diferentes tipos de tratamientos de aguas residuales. (Romero Rojas, 2010).

La creación de las plantas de tratamiento de aguas residuales se fundamenta en la depuración de estas aguas contaminadas. Al momento de tener un adecuado tratamiento de aguas residuales estamos ayudando a un consumo sostenible del agua y sobre todo a la regeneración del medio ambiente y de sus ecosistemas (Rodríguez Fernández, 2006)

1.3.2 Impactos negativos de las aguas residuales

La disposición de aguas residuales sin tratamientos y las aguas residuales tratadas inadecuadamente, contaminan los cuerpos de agua natural. A su vez, por infiltración en el subsuelo se contaminan las aguas subterráneas, pudiéndose convertir en focos infecciosos para la salud de la población, puede provocar la destrucción de hábitats acuáticos esenciales para la supervivencia de numerosas especies. La sedimentación y el aumento de nutrientes en el agua pueden dar lugar a floraciones de algas nocivas que agotan el oxígeno, se generan malos olores que causan conflictos con la población aledaña. (Lara, 2009)

1.3.3 Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado. La composición varía influenciada por algunos factores como son los hábitos alimentarios, consumo de agua, uso de productos de limpieza en el hogar, etc. Asimismo, sufre también diversificaciones respecto al tiempo, cambian en el transcurso

de las distintas horas del día, en función de los días de la semana y se presentan variaciones estacionales. (Espinosa Ortiz, 2014).

1.3.4 Reactor anaerobio de flujo ascendente RAFA (UASB)

(RAFA) o UASB son los reactores anaerobios de flujo ascendente (por sus siglas en inglés). En este tipo de reactor, el agua es introducida por el fondo y sube por una lámina de lodos sedimentados. En estos reactores, los microorganismos y bacterias se agrupan formando biogránulos y/o flóculos. Estos agregados densos poseen buenas cualidades de sedimentación. La turbulencia natural causada por el propio caudal del afluente y la producción de biogás, provoca el buen contacto entre agua residual y fango biológico en el sistema RAFA. El efluente de los reactores necesita un tratamiento posterior para lograr degradar la materia orgánica remanente, nutrientes y patógenos. Este postratamiento puede ser a través de sistemas convencionales aeróbicos, como lagunas de estabilización. Igual que en otros tipos de tratamiento de aguas residuales, en los RAFA también son necesarias etapas previas de adecuación del afluente antes de ingresarlas al reactor como, por ejemplo, eliminación de aceites, grasas y arena. (MMAyA, 2013).

1.3.5 Tipo de tratamientos de aguas residuales

Debido al aumento de población (demanda) y escases del agua se ha visto la necesidad de crear tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, las cuales se clasifican en convencionales y no convencionales (López, 2016).

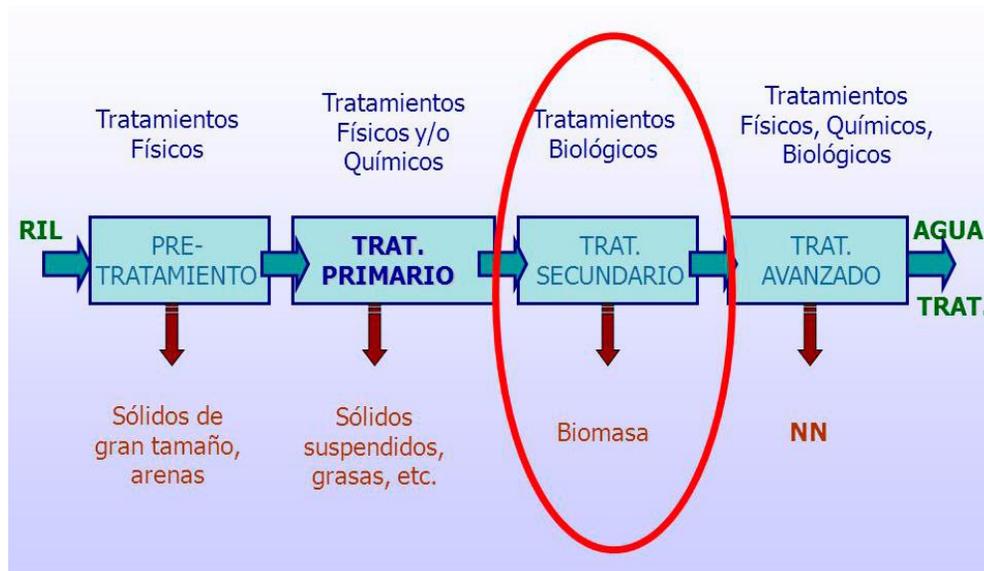
1.3.5.1 Tratamientos Convencionales

Este tipo de tratamientos han sido implementados a lo largo de los años dando resultados favorables a la depuración de aguas residuales, sin embargo, ocasionan problemas en su mantenimiento y operación que implican un alto costo (Bracho, Barquilla, & Moreno Arias, 2016).

Existen diferentes procesos para tratar las aguas residuales. Para empezar, se realiza un pretratamiento, en el que se ejecutan procesos como desbaste, dilaceración y eliminación de arenas y grasas. A continuación, se efectúa un tratamiento primario, el

cual se encarga de sedimentar la materia separándola del agua que se está depurando. Posteriormente el agua residual atraviesa por un tratamiento secundario en el que se produce la oxidación parcial de la materia orgánica que no ha sido eliminada en los procesos previos. Por último, se realizan tratamientos de acabado, llamados tratamientos terciarios, estos comprenden la eliminación de nutrientes, minerales, microorganismos y la eliminación y estabilización de fangos (Muñoz , 2011).

Imagen 1: Etapas de tratamiento para las aguas residuales



Fuente: (Spena Group, 2017).

1.3.5.2 *Tratamientos no convencionales*

Estos tratamientos son adaptables para comunidades medianas y pequeñas por su versatilidad, adaptabilidad, fácil integración en el entorno natural y bajo costo de implantación y explotación (Grisales, 2010)

Existen diferentes tipos de tecnologías no convencionales, una de ellas son las que utilizan el terreno como elemento depurador y se aplican de forma superficial (filtros verdes) o subsuperficial (zanjas, lechos y pozos filtrantes). También existen los humedales artificiales que pueden ser de flujo libre y flujo subsuperficial, estos imitan el proceso natural de depuración de ríos y lagos (Castellanos Carvajal, 2018).

1.3.6 Tecnologías de tratamiento terciario

El propósito del tratamiento terciario es reducir el número de organismos vivos a niveles aceptables que permitan el posterior reúso de las aguas en riego, o simplemente para alcanzar los niveles de concentración establecidos por norma cuando se realizan las descargas a los cuerpos de agua. También sirve para reducir la carga de nutrientes causantes de la eutrofización de los cuerpos de agua. En el país se emplean lagunas de maduración, humedales con flujo superficial y subsuperficial. En un caso se tiene desinfección con radiación UV. (MMAyA, 2013).

Este tratamiento dependerá de la disposición final que se pretenda dar a las aguas residuales tratadas. Aquí se busca la remoción fundamentalmente de nutrientes como el nitrógeno y fósforo, y evitar que la descarga del agua residual ocasione eutrofización, ya que ello desencadena el consumo de oxígeno disuelto con posteriores impactos a la vida acuática del cuerpo receptor (Ministerio, 2009)

1.3.7 Humedal artificial

Los humedales construidos son sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Los humedales construidos también se denominan humedales artificiales. (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

En depuración de aguas residuales, generalmente se consideran humedales aquellos sistemas que usan macrófitas (plantas que se ven a simple vista), en contraposición a los micrófitos (generalmente microalgas), y por tanto los lagunajes no suelen ser considerados como humedales. (Lahora Cano, 1999)

La remoción de los contaminantes en los humedales ocurre a través de las especies vegetales presentes. Los contaminantes, en su mayoría, son también nutrientes esenciales para las plantas, tales como nitrato, amonio y fosfato. Muchas especies de plantas utilizadas en humedales son también capaces de captar e incluso acumular

significativamente metales tóxicos como, por ejemplo, cadmio y plomo. También las bacterias, como otros microorganismos en el suelo, captan y almacenan nutrientes, algunos otros contaminantes y asimismo son responsables para la degradación de la materia orgánica. (MMAyA, 2013).

1.3.8 Funciones generales de los humedales artificiales

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales; estas son:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento. (García, Bayona , & Morato, 2004)

1.3.9 Tipos de humedales artificiales

Los tipos más recientes de humedales artificiales se hacen en función de la presencia o no de una superficie libre de agua en contacto con la atmósfera, o bien varían en función de la circulación del agua o flujo de la misma. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

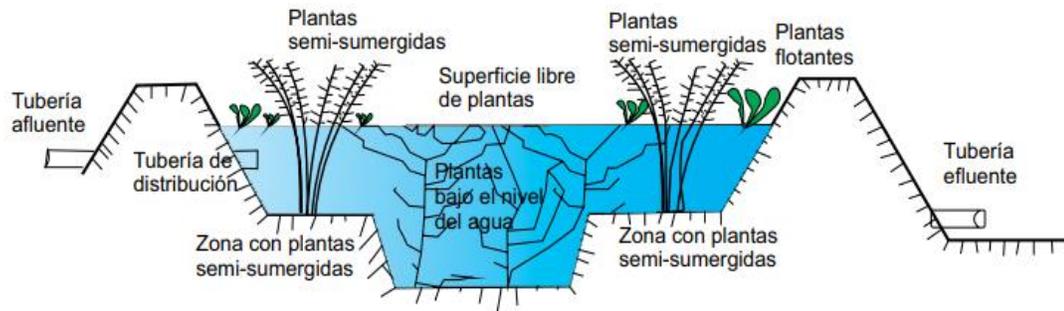
Un humedal es artificial cuando se trata de un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, construido por el hombre, en el que se han sembrado plantas acuáticas, y contado con los procesos naturales para tratar el agua residual. (Mamani Coarite, 2018).

1.3.9.1 Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)

Son sistemas de tratamiento secundario o avanzado en los cuales el agua residual se encuentra en contacto con la atmósfera y constituye la fuente principal de oxígeno para la aireación, por lo que, predominan las zonas aeróbicas que favorecen los mecanismos de remoción de contaminantes. (Villarrol Ávalos, 2005).

Estos tipos de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje natural con una profundidad de la lámina de agua entre 0,3 y 0,5 m, y con plantas. Se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados en una depuradora. La eliminación de fósforo y nitrógeno es poco efectiva en HFS (humedales de flujo superficial), en muchas ocasiones se recurre a aumentar el tamaño del humedal y los tiempos de retención hidráulico, para la obtención de mayor eficiencia de eliminación de nutrientes. (Alarcón Herrera, Zurita Martínez, Lara Borrero, & Vidal, 2018)

Imagen 2: Tipos de macrófitas en humedales artificiales



Fuente: (Wagner, 2010)

1.3.9.2 Humedales artificiales de flujo sub-superficial:

Los sistemas de flujo subsuperficial están contruidos típicamente en forma de un lecho o canal que, al igual que el sistema de flujo libre, puede o no tener una barrera que impida la percolación del agua hacia el subsuelo, además contiene un medio apropiado (grava, arena u otro material) que soporta el crecimiento de las plantas; la vegetación emergente es la misma que en el sistema de flujo libre. La profundidad del medio en estos humedales de flujo subsuperficial tiene un rango de 0,3 a 0,9 m, siendo el valor más común el de 0,6 m. El nivel del agua está por debajo de la superficie del soporte y fluye únicamente a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre al agua residual, en donde las raíces penetran hasta el fondo del lecho, para lo cual el material que conforma el lecho filtrante deber ser suficientemente grande para permitir un flujo

subterráneo a largo plazo sin obstrucciones. Las raíces y tubérculos (rizomas) de las plantas crecen en los espacios de poros de la grava (Lahora Cano, 1999).

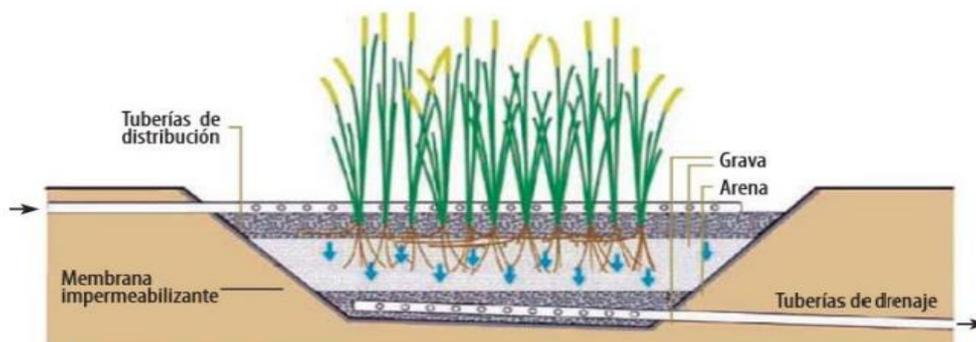
Son aquellos en los cuales el agua pasa por el sustrato, generalmente se utilizan para tratar aguas residuales provenientes de poblaciones pequeñas. Es necesario que el fondo del lecho del humedal tenga una pendiente de 1% para facilitar el tránsito del agua mediante el sustrato. Según el tipo de flujo del agua se dividen en dos grupos: (Muñoz Tello & Vasquez Perez, 2020).

1.3.9.3 Humedales artificiales de flujo sub-superficial vertical:

El agua residual se desplaza a través del sustrato de forma vertical en intervalo, para poder favorecer a los procesos anaerobios como la nitrificación, se coloca conductos que permitan la aireación y se pueda producir la remoción de contaminantes (El Portal Del Agua Desde México, 2022).

Los HA FSSV (humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical) tienen efectividad relativamente baja en lo que se refiere a la eliminación de Sólidos en suspensión y coliformes fecales, pero la eliminación de Nitrógeno a través de la secuencia nitrificación - desnitrificación es eficiente debido a la elevada oxigenación y a la alternancia óxica y anóxica, causada por el intermitente flujo de agua. Asimismo, la eliminación de fósforo también se produce por precipitación. (Langergraber, 2008).

Imagen 3: Corte transversal de un humedal artificial de flujo vertical

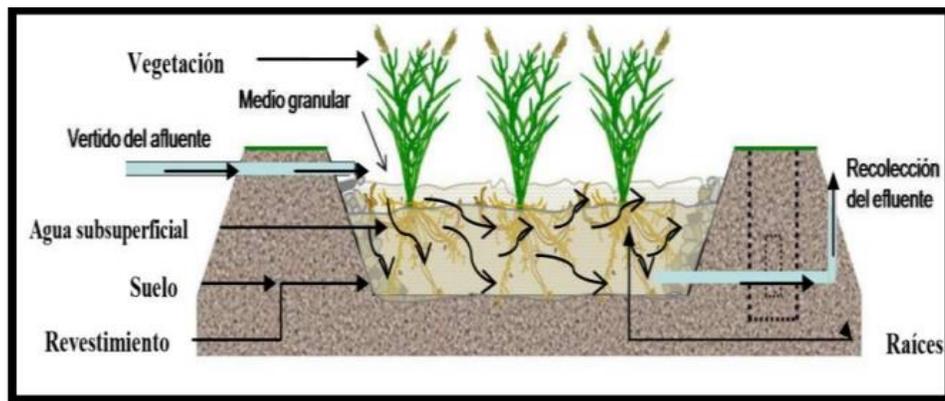


Fuente: Adaptado de (Morel Diener, 2008)

1.3.9.4 Humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal:

El agua residual a tratar se desplaza de forma continua de forma horizontal a través del sustrato, se desarrollan diversos procesos entre ellos la desnitrificación, las condiciones anaerobias serán óptimas si el nivel del agua se encuentra debajo del sustrato. En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. (El Portal Del Agua Desde México, 2022).

Imagen 4: Humedal artificial de flujo superficial horizontal



Fuente: (García & Corzo, 2008)

1.3.10 Especies de vegetación

Existe gran variedad de plantas que se utilizan para tratamiento de aguas residuales en mediante los sistemas de humedales artificiales, dependen del tipo de humedal construido y se clasifican en tres grupos: flotantes, sumergidas y emergentes. Los tres grupos son aptos para humedales construidos de tipo superficial, pero solo las especies emergentes son utilizadas en los humedales de tipo subsuperficial.

Flotantes: Son aquellas plantas que tienen todo su cuerpo vegetativo flotando total o parcialmente en el agua, entre ellas tenemos:

- *Azolla filiculoides* (Flor del Pato, Azola)
- *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua)
- *Chrysopogon zizanioides* (Vetiver)

Sumergidas: Especies cuyo cuerpo vegetativo está inmerso en el agua, pero con la característica que se encuentran arraigadas al sustrato. Sus flores y hojas pueden estar flotando en la superficie del agua.

- *Ceratophyllum demersum* (Hilo de agua)
- *Egeria densa* (Luchecillo)
- *Potamogeton linguatus* (Huiro, Ahuiranque)

Emergentes: Son plantas que tienen gran parte de su cuerpo vegetativo fuera del agua, pero sus raíces y parte del tallo y hojas se encuentran sumergidas.

- *Alisma lanceolatum* (Llantén de agua, Hualtata)
- *Canna lily* (Canna sp.)
- *Colocasia esculenta* (Taro, Elephant ear)
- *Phragmites australis* (Carrizo)
- *Typha dominguensis* (Totora)
- *Juncus sp.* (Vidal & Hormazábal, 2016)

1.3.11 Componentes de Humedales Construidos

Los humedales construidos pueden ser de diferentes flujos como se mencionó anteriormente, pero es de gran importancia que al momento de su construcción los componentes utilizados generen actividades biológicas y a su vez creen una sucesión ecológica, proporcionando un rendimiento y eficiencia adecuados (Mena Cabrera, 2014).

Los principales componentes de los humedales construidos son: agua, material de soporte y plantas acuáticas, todos estos deben trabajar conjuntamente para que se produzca el desarrollo de microorganismos, los cuales emergen por los nutrientes del agua que ingresa al humedal (Mena Cabrera, 2014).

1.3.11.1 Agua

Este componente es esencial para el funcionamiento de los humedales. Al momento en que este ingresa e interactúa con los demás componentes se generan reacciones fisicoquímicas que dan como resultado la propagación de organismos (Mena Cabrera, 2014).

La calidad del agua puede generar efectos importantes en la eficiencia del funcionamiento del humedal ya que trabaja en conjunto con la atmósfera por medio de la precipitación y la evapotranspiración (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

1.3.11.2 Material De Soporte

También conocido como material granular o sustrato poroso, pueden ser: grava, roca, suelo, arena y materiales orgánicos. En este material se da la permanencia de microorganismos y el tiempo de retención hidráulica depende de las características de éste (Zúñiga Del Canto, 2004)

1.3.11.3 Plantas acuáticas

La vegetación se encargará de proporcionar un medio de desarrollo para los microorganismos para que estos puedan realizar el tratamiento biológico y la transferencia de oxígeno por medio de las raíces y rizomas. Varios estudios que se han realizado han demostrado que este tipo de plantas ayudan a la eliminación de contaminantes (Zúñiga Del Canto, 2004).

1.3.12 Principales mecanismos de remoción en humedales artificiales

Cuadro 1: Mecanismos de remoción en humedales artificiales

Parámetro	Mecanismos de remoción en humedales de flujo superficial	Mecanismos de remoción en humedales de flujo subsuperficial
Materia orgánica	Conversión biológica de la DBO ₅ soluble por acción de las bacterias aerobias, facultativas y anaerobias presentes en la superficie de la planta y entre los detritos. La DBO ₅ particulada es eliminada por filtración, adsorción y sedimentación	Conversión biológica por acción de las bacterias facultativas y anaerobias presentes en la superficie de la planta y entre los detritos del relleno sólido del humedal.
Nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización
Fósforo	Sedimentación y asimilación por las plantas y microorganismos	Filtración, sedimentación, adsorción y asimilación por las plantas y microorganismos
Materia en suspensión	Filtración y sedimentación	Filtración y sedimentación
Metales pesados	Sedimentación y absorción por las plantas y superficie de detritos	Sedimentación y absorción por las raíces de las plantas y superficie de detritos
Patógenos	Radiación UV, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas	Sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas
Trazas de contaminantes orgánicos	Absorción, volatilización y biodegradación	Absorción y biodegradación

Fuente: (Arias A & Brix, 2016)

1.3.13 Diseño de humedales

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de depuración. En los modelos de diseño se asume un flujo en condiciones uniformes y de tipo pistón. Para llegar a poder intentar acercarse al modelo ideal (flujo pistón) es muy importante realizar un cuidadoso diseño hidráulico y los métodos constructivos apropiados. El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales. La energía para romper esta resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y salida del humedal, para dar esta energía se le asigna al fondo del humedal una pendiente con una salida de altura variable. Para el diseño de humedales se deben considerar los siguientes criterios:

1. Se consideran reactores biológicos.
2. Se considera que el flujo a través del medio poroso es flujo pistón y en forma uniforme.
3. La ley de Darcy describe el flujo a través del medio poroso.

Existen dos tipos de humedales de flujo subsuperficial:

- Humedal subsuperficial de flujo horizontal.
- Humedal subsuperficial de flujo vertical.

Para el diseño de este tipo de humedales los pasos a seguirse son:

1.3.13.1 Cálculo del área superficial

El cálculo del área superficial se realiza en función al parámetro contaminante que se desea disminuir o remover, generalmente los diseños se realizan para disminución de la DBO₅.

El área superficial se calcula a través de la ecuación 1:

$$AS = \frac{Q * Ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{KT * h * n}$$

Donde

AS=Área superficial

Q= caudal de diseño del humedal (m³/d)

C= concentración efluente (mg/ℓ)

Co= concentración afluente (mg/ℓ)

KT= Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura

h= profundidad del humedal (m)

n= porosidad del medio granular (porcentaje expresado en fracción)

La constante de reacción de primer orden se calcula mediante la

Ecuación 2:

$$KT = 1,104 * 1,06^{T^2-20}$$

Donde:

T₂= temperatura del agua (°C). La profundidad del humedal generalmente varia de 0,3 a 1 m (valor usual 0,6m), con una pendiente de 0,1 a 1%, siendo el valor usual de 0,5%.

1.3.13.2 Sustrato

Es el medio donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración. Para el diseño se recomienda utilizar grava con menos de 30 mm (3/4") de diámetro que parece ser la que funciona mejor

1.3.13.2.1 Tipos de sustratos y sus características.

Cuadro 2: tipos de sustratos y sus características

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /d)	Porosidad, n %
Arena gruesa	2	100-1000	22-32
Arena gravosa	8	500-5000	30-35
Grava fina	16	1000-10000	35-38
Grava media	32	10000-50000	36-40
Roca gruesa	128	50000-250000	38-45

Fuente: elaboración propia.

1.3.13.3 Relación largo – ancho

Para calcular el ancho del humedal consideramos la ley de Darcy (ecuación 3), para flujo en medio poroso.

$$Ac = \frac{Q}{(Ks * S)}$$

Donde:

Ac= área vertical en m²

Q= caudal medio en m³/s

Ks= Conductividad hidráulica (m/s)

S = pendiente (m/m)

1.3.13.4 Ancho Del Humedal (m)

Se determina en función al área vertical y la profundidad del nivel de agua a tratar.

$$W = \frac{Ac}{h}$$

1.3.13.5 El largo del humedal

Se determina en función al ancho y al área superficial como se muestra en la ecuación 5

$$L = \frac{As}{W}$$

Donde:

As= Área superficial del humedal (m²)

W= ancho del humedal (m)

1.3.13.6 Relación Largo-Ancho (L/A)

Mientras mayor es la relación largo-ancho se tiene mejor depuración de las aguas, pero se tiene problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros. Por ello se recomienda relación largo – ancho de: 2:1, 3:1 y 4:1 (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Cuadro 3: Parámetros generales de diseño de humedales

Parámetros	Unidad	Intervalo	Valor Usual
Tiempo de retención hidráulico	d	4-15	7
Profundidad agua	m	0,1-0,8	0,6
Área	m ² /ha	2,5-5	
Carga orgánica	g DBO ₅ /m ² .dia	3-7,5	<11
Carga orgánica	kg DBO ₅ /ha.dia	<70	
Carga hidráulica	m ³ /m ² .dia	0,1-0,2	
Grava ingreso salida	mm	50-100	50
Grava media	mm	3-6 5-10 6-12	19
Coefficiente de uniformidad		3-5	<5
Profundidad medio	m	0,70-1,5	0,7
Pendiente	%	0,1	0,5
Relación largo-ancho		2:1-7:1	3:1
Tubería perforada tamaño	in	3-4	4

Fuente: (Delgadillo, Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, 2010).

1.3.14 Especies de macrófitas seleccionadas

1.3.14.1 *Azolla filiculoides* (Azola, helecho de agua)

Reino: Vegetal.

Phylum: *Telemophytae*.

División: *Tracheophytae*.

Subdivisión: *Pteropsidas*.

Clase: *Filicopsida*

Orden: *Hydropteridales - Salviniiales*

Familia: *Azollaceae*

Nombre común: Azola

Fuente: (Herbario Regional, 2023)

Imagen 5: *Azolla filiculoides*



Fuente: (Alorza, 2012)

Pequeño helecho acuático flotante procedente de América, extendiéndose desde el Sudeste de Estados Unidos hasta el Sur de Brasil, Argentina y Uruguay.

Los tallos miden hasta 1,5 cm de longitud y se presentan divididos dicotómicamente, cubiertos, totalmente, de hojas papilosas. Las raíces son numerosas, de hasta 6 cm. de longitud, simples, de tonos marrones y no fijadas al sustrato. Las hojas son bilobuladas, de 1 a 2 milímetros, imbricadas, con el lóbulo superior provisto de papilas y el margen hialino ancho. Su coloración varía del verde en verano al rojo o púrpura en los meses de otoño e invierno. Las megasporas cuentan con tres flotadores y las microesporas se presentan agrupadas en masas mucilaginosas denominadas 'másculas'. Mantiene relaciones simbióticas con la cianoprocarionta *Anabaena azollae*, que vive en cavidades de las hojas, lo cual le facilita vivir en aguas pobres gracias a la capacidad de *A. azollae* para fijar nitrógeno atmosférico. (Alorza, 2012).

Hábitat preferente: Prefiere humedales y cursos lentos de agua, tanto naturales como artificiales. Tiene preferencia por las aguas eutrofizadas con altos niveles de fósforo.

Características del ecosistema nativo y del ecosistema invadido: habita tanto en aguas continentales (charcas, lagunas, pantanos, arroyos...) como artificiales (canales,

acequias, embalses, etc.). Así como en zonas de aguas más o menos estancadas. (Alorza, 2012).

Época de reproducción: La especie se reproduce, normalmente, en las áreas donde invade, con una fase de megaesporangio y otra de microesporangio. La reproducción sexual es escasa y comporta la formación de prótalos sobre esporas flotantes, lo que implica un ciclo vital totalmente acuático. También se multiplica vegetativamente por fragmentación del tallo el cual, al ser flotante, se dispersa largas distancias aprovechando los cursos de agua. Tolerancia a factores ambientales estresantes: su crecimiento está limitado por la concentración de fósforo en el agua. (DG Medio Ambiente, 2022)

Composición química de azolla: La composición química de la célula está basada en carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S), fósforo (P) y agua (H₂O). La célula tiene su propio metabolismo, obtiene materia y energía del ambiente, mantiene un equilibrio interior, se reproduce, desarrolla y se adapta al ambiente. (Trindade & Palma Silva, 2011)

En caso de deficiencia de algunos elementos Azolla cambiará sus características.

Deficiencia de Fósforo: Cambia su color a café-rojizo, las raíces se tornan frágiles y se alargan.

Deficiencia de Calcio: Los lóbulos dorsales se vuelven rojizos, *Anabaena* sale al medio ambiente.

Deficiencia de Potasio: Se torna amarillenta y después de color pardo.

Deficiencia de Hierro: Disminuye la cantidad de clorofila hasta tornarse amarillenta.

1.3.14.1.1 Plagas y enfermedades

Azola como todas las plantas es susceptible al ataque de plagas y enfermedades. Algunos organismos llegan a infestar las raíces y se pegan a las hojas, incluyendo los siguientes:

Hongos: Como la *rymnacea* que causa manchas grises en la superficie de las hojas.

Insectos: En especial los lepidópteros como el barrenador, barrenillo pardo, barrenillo gris, gusano hilandero y ácaros, estos se alimentan de las hojas de las plantas.

Moluscos: Como caracoles de tierra y de agua, cangrejos y pulgas de agua que se comen las raíces y las hojas de las plantas. (Cabezas Monteros, 2011)

1.3.14.1.2 Simbiosis de Azolla-Anabaena (AA)

Azolla es un helecho semi-acuático, constituye el ejemplo de un sistema simbiótico sinérgico. En la hoja del lóbulo dorsal, hay una cavidad del elipsoide con una cianobacteria llamada *Anabaena azollae*. Esta cavidad de la hoja se comporta como la unidad de la interfaz fisiológica y dinámica de esta asociación simbiótica donde los flujos metabólicos y energéticos principales ocurren. Todas estas ideas y estudios, reflejan la importancia de este helecho y permite tener una visión más amplia y dinámica de la caracterización del sistema de simbiosis de *Azolla-Anabaena*. (Carrapico, 2010)

1.3.14.1.3 Producción y ventajas

Para la propagación se utiliza 10g de *Azolla* sembrados en una piscina con un nivel de 10 cm de profundidad, donde el cultivo se multiplica durante 12 d. Esta cantidad de *Azolla* alcanza un peso promedio relacionado de 0,14 t/d/ha. Adicionalmente se conoce que *Azolla* duplica su peso cada 27 d en promedio y durante 3 meses que es su ciclo de vida siempre que las condiciones de medio ambientales sean favorables.

Entre las ventajas de cultivar *Azolla* se encuentran:

- Aumento de materia orgánica.
- Ahorro del uso de fertilizantes.
- Mejora de la estructura del suelo.
- Ayuda al control de malezas acuáticas.
- Proporciona forrajes nutritivos en intervalos de 15-20 d. (Ruiz Alencastro, 2015).

1.3.14.2 *Cyperus* sp. (Pasto)

Reino: Vegetal

Phylum: *Telemophytæ*

División: *Tracheophytæ*

Sub división: *Anthophyta*

Clase: *Angiospermae*

Sub clase: *Monocotyledoneae*

Orden: *Cyperales*

Familia: *Cyperaceae*

Nombre científico: *Cyperus* sp.

Nombre común: *Cyperus*, pasto.

Imagen 6: *Cyperus* sp



Fuente: (Gómez Laurito, 2003)

La familia *Cyperaceae* incluye unos 115 géneros y alrededor de 3600 especies, con una distribución cosmopolita. En Costa Rica hay 25 géneros y 210 especies, de los cuales 10 géneros y 35 especies se encuentran en la Estación Biológica La Selva (abreviada en el resto de este artículo como “LS”). En LS la familia *Cyperaceae* es más frecuente en áreas abiertas (pastizales, orillas de senderos y caminos, claros de bosque, entre otros), charcas y otros sitios húmedos y en menor grado en sitios boscosos (Gómez Laurito, 2003).

Hierbas anuales o perennes, los rizomas o estolones simpodiales. Tallos sólidos, excepcionalmente huecos, algunas veces septados, trígono, cilíndricos, ocasionalmente tetragonales o pentagonales. Hojas alternas, trísticas, rara vez dísticas o polísticas, basales o caulinares, envainantes en la base, sésiles, las láminas lineares (como en *Poaceae*), filiformes o setosas, rara vez reducidas o ausentes, usualmente rígidas por la abundancia de sílice, la venación paralela; vainas cerradas; lígulas membranáceas, laminares o reducidas a pelos cortos e inconspicuos o ausentes. Inflorescencias en racimos, panículas, cimas, capítulos, espigas. Familia de 115 géneros y más de 4.000 especies, con distribución cosmopolita, está representada en la flora de todos los países, ocupando el 5º lugar entre las familias de plantas con flores, después de *Orchidaceae*, *Fabaceae*, *Asteraceae* y *Poaceae*; crece preferentemente en sitios con

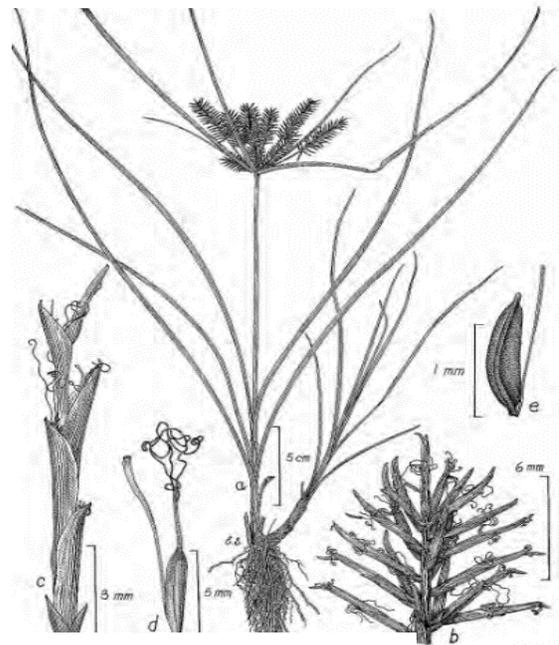
suelos húmedos, de las zonas templadas. En el pasado el papiro (*Cyperus papyrus L.*) fue usado en la fabricación de papel. Actualmente su uso potencial se amplía, algunas especies se utilizan como forraje, en la alimentación como *C. esculentus cv.* chufa, otras en la terapéutica popular mexicana, como fuente de terpenos en la industria farmacéutica, como materia prima en artesanías y actualmente se están realizando experimentos con especies de *Cyperus* como fitorremediadores de sitios contaminados. (Perez, 2012).

La familia Cyperaceae aparentemente es monofilética, con base en la morfología y análisis cladísticos. Es la única familia que contiene cuerpos cónicos de sílice, que la distinguen de otras monocotiledóneas. Actualmente están divididas en cuatro subfamilias: *Mapanioideae*, *Cyperoideae*, *Caricoideae* y *Scleroideae*

Hierbas perennes, rizomatosas, de 40-60 cm de alto. Tallos rígidos, trígonos, de 2-3 mm de ancho en la base, glabros. Hojas de 15-60 cm de largo, 3-7 mm de ancho; vainas verde-rojizas, de 1,0-1,5 cm de largo. Brácteas 7-8, desiguales, de 6-40

cm de largo. Inflorescencias en capítulos o glomérulos globosos a ovoides, de 7-15 mm de largo y ancho, con 30-50 espiguillas, los rayos primarios 6-10, de 1-7 cm, ascendentes, los rayos secundarios 1-4, de 1,0-1,5 cm; espiguillas ovoides, de 4-6 mm de largo, 1,8-3,0 mm de ancho, con 10-18 glumas, las raquillas rojas, sin alas; glumas verdes, blanquecinas o pardas, oblongo-lanceoladas, de 1,4- 1,5 mm de largo, 0,8-1,0 mm de ancho, los ápices agudos, bicarinadas basalmente, trinervadas, deciduas; estambres 1, el filamento de 1,5-2,0 mm, la antera de 0,5-0,7 mm; gineceo tricarpelar, el estilo de 0,2-0,4 mm, los estigmas 3, de 0,4-0,6 mm. Aquenios pardos, elipsoidales

Imagen 7: Ilustración *Cyperus*



Fuente: (Perez, 2012)

a angostamente elipsoidales, trígono, de 0,9-1,2 mm de largo, 0,3-0,4 mm de ancho, los ápices agudos, estipitados, papilosos.

Distribución. Estados Unidos, México (Chiapas, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Oaxaca, Sinaloa, San Luis Potosí, Sonora y Veracruz), América Central, Antillas y América del Sur (norte de Argentina).

Tipos de vegetación. Vegetación ruderal y de sitios húmedos. Floración y fructificación en el mes de julio. (Perez, 2012)

1.3.14.3 *Typha domingensis* (totora)

Reino: Vegetal

Phylum: *Telemophytæ*

División: *Tracheophytæ*

Sub división: *Anthophyta*

Clase: *Angiospermae*

Sub clase: *Monocotyledoneae*

Orden: *Pandanales*

Familia: *Typhaceae*

Nombre científico: *Typha domingensis* Pers.

Nombre común: Totora

Fuente: (Herbario Regional, 2023)

Imagen 8: *Typha domingensis*



Fuente: (UTAD, 2014)

Es una monocotiledónea, pertenece a la familia *Typhaceae*. Se dice que es una hierba perenne, rizomatosa que crece aproximadamente de 1 a 5 m de altura, se caracteriza por poseer hojas con láminas lineares acintadas, que miden aproximadamente de 40 a 220 cm de largo y 0,5 a 2 cm de ancho, mostrándose plana en la cara superior y levemente convexa al inferior de la planta. Sus flores son unisexuales, pequeñas, dispuestas en espigas densas. Presenta flores estaminadas que se encuentra en la parte superior de la espiga, además tienen flores postiladas que se encuentran en la parte

basal, esta especie florece en la primavera, su fruto fusiforme mide aproximadamente 1 a 1,5 mm de largo. Están distribuidas en pantanos y humedales, tiene una amplia distribución mundial, formando densas colonias de totorales. Debido a su elevada resistencia hacia los contaminantes, esta especie es evaluada y utilizada para los tratamientos de diversos efluentes en los humedales naturales y artificiales. (Torres Callupe, 2017).

Tienen epidermis muy delgadas a fin de reducir la resistencia al paso de gases, agua y nutrientes y tejidos; grandes espacios intercelulares que forman una red de conductos huecos en los que se almacena y circula aire con oxígeno. Esto permite la transferencia de oxígeno desde el aire y órganos fotosintéticos, y desde ahí hacia las raíces. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

1.3.14.3.1 Morfología de la totora

Raíces: Por su origen son adventicias y, se originan a partir del rizoma maduro y conformado principalmente por raíces secundarias, las que forman penachos delgados. Dan anclaje a la planta en el substrato de fondo, su desarrollo es horizontal, y crece de manera paralela a la superficie del suelo (fondo). Su diámetro varía en torno a 1 mm de grosor de acuerdo a la edad de la planta y al medio del suelo que la sustenta. (PELT-ADESU, 2001) .

Rizoma: El rizoma viene a ser un tallo modificado que se desarrolla inmediatamente después de la raíz y también de manera paralela al suelo. Su estructura interna está compuesta por un cilindro central con muchos haces libero-leñosos. Su corteza es de color blanco, con nudos a cada 2 a 6 cm, de donde brotan las yemas que posteriormente se convierten en tallos (PELT-ADESU, 2001).

Los rizomas contienen gran cantidad de sustancias de reserva, las que permiten a las plantas de totora mantenerse durante los períodos de sequía (estado de latencia). Cuando vuelven los períodos de humedad, rebrotan inmediatamente las yemas. Los rizomas y las yemas se encuentran protegidas por unas hojas modificadas de color marrón claro amarillo, a manera de escamas (catáfilas). (PELT-ADESU, 2001).

El tallo de acuerdo a su situación se clasifica en dos partes:

Tallo aéreo. - Es la parte del tallo que sobresale del agua, es de color verde intenso por la clorofila que contiene. En su interior presenta un tejido parenquimatoso no clorofílico (tejidos simples no diferenciados) La forma de su sección va de triangular a circular, dependiendo de la edad de la planta, situación climática, nutrientes del sustrato de fondo, etc.

La parte fuera del agua presenta un tejido parenquimático llamado “aerenquima” que contiene aire, el cual favorece la circulación del aire en el tejido esponjoso, así como le permite flotar en el agua. El tejido parenquimático, desarrolla funciones de almacenamiento, respiración y en algunos casos realiza la fotosíntesis. (PELT-ADESU, 2001).

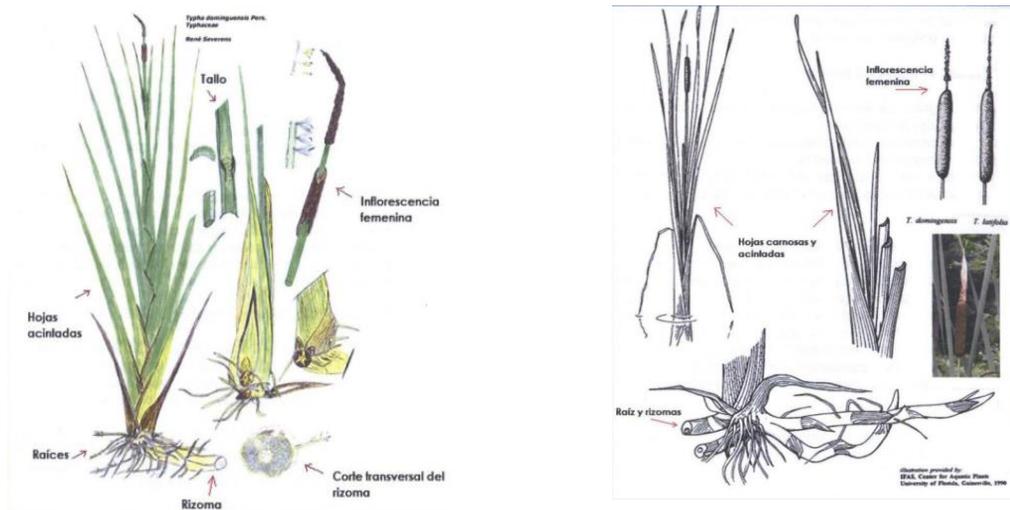
Tallo sumergido. - Es la parte que se comienza en el rizoma maduro, con una parte blanquecina (por falta de clorofila) denominada “chullo” que almacena disacáridos y se usa como alimento humano, y alcanza hasta el nivel de agua. Los tallos pueden crecer de 30 a 100 cm o más de altura cada 4 meses aproximadamente, lo que está en función del sustrato, hábitat y medio ambiente, llegan a alcanzar alturas de 2 a 6 m. El tallo que se encuentra sumergido, contiene clorofila, pero en la parte basal tiene una coloración blanquecina, denominada comúnmente como “Chullo”, debido principalmente porque allí no inciden los rayos solares, llegando a almacenar disacáridos que le dan un sabor dulce y agradable. (Delgadillo, Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, 2010).

Xilema. - La xilema está formado por vasos leñosos o tráqueas. Incluyen también las denominadas traqueidas, formadas por células alargadas con orificios llamados puntuaciones, que las comunican entre sí. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

Floema. - El floema está constituido por tubos o células cribosas. Entre las células existen tabiques con agujeros o cribas que se obturan a bajas temperaturas y dificultan la conducción de sustancias orgánicas. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

Inflorescencia. - La inflorescencia es del tipo Umbela, caracterizada porque las primeras ramificaciones dan lugar a su vez a otras umbelas pequeñas y la umbelilla dispuesta en sus ejes terminales tiene un número variable de flores, en el que cada eje terminal está cubierto de una bráctea escamosa de color café oscuro de 3 a 5 mm de longitud. (PELT-ADESU, 2001)

Imagen 9: Ilustración de totora



Fuente: (V & Proosdij, 2001)

1.3.14.3.2 Características fenológicas de la totora

Se realizó un seguimiento de las fases fenológicas de la totora en las zonas de inundación del lago Menor, incluyo a las provincias de Omasuyos, Manco Kapac, Ingavi y los Andes del departamento de La Paz, en la cual observó que la máxima floración alcanza en los meses de marzo, abril y parte de mayo. La fructificación ocurre durante los meses de mayo y junio. La segunda floración ocurre en el mes de septiembre, continuando con la fructificación en el mes de noviembre. (Loza, 2004).

Reproducción. - En la mayoría de los casos, la totora se reproduce vegetativamente. La reproducción por semillas es muy limitada debido a que generalmente no logran germinar.

La reproducción vegetativa es por desarrollo de propágulos vegetativos; o sea, mediante células especializadas en propagar la planta (meristemos), agrupadas en estructuras especiales (rizomas). De esta manera se producen individuos nuevos, pero adaptados al medio ambiente. (Mamani Coarite, 2018)

1.3.15 Ventajas y desventajas del humedal artificial

Ventajas:

- El sistema es muy estable en la operación y eficiente para la remoción de materia orgánica y nutrientes, condiciones que permiten disponer el efluente en ambientes naturales. Los humedales artificiales se consideran una opción efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales debido a su estabilidad operativa, su capacidad para eliminar contaminantes y devolver agua tratada a entornos naturales sin causar daños al medio ambiente.
- Pueden operar sin ningún consumo energético, debido a que no se usa bombas ni aereadores ya que carece de equipos electromecánicos y su diseño es simple.
- La operación es sencilla y con bajo costo a causa de que se emplean procesos biológicos naturales, como la filtración, la absorción y la actividad de microorganismos, no se emplean equipos electromecánicos significa un menor costo de operación y mantenimiento
- Perfecta integración a el medio rural y urbano ya que pueden ser adaptados para que sean visualmente atractivos, con plantas acuáticas y áreas verdes que mejoran la apariencia de una zona.
- Generalmente no producen olores desagradables a diferencia de algunos sistemas de tratamiento más intensivos, los humedales artificiales no suelen requerir agitación mecánica constante, lo que puede aumentar la liberación de olores.

Desventajas:

- Requieren de un proceso de desinfección para eliminar totalmente los organismos patógenos, sobre todo cuando se trata sólo aguas residuales. Es necesario un paso adicional de desinfección para garantizar la eliminación completa de los organismos patógenos y cumplir con los estándares de calidad del agua.
- Debido a la acumulación de sólidos, obstrucción de canales y raíces puede colmatarse en poco tiempo, si es que no se cuenta con sistemas de pretratamiento adecuados
- En zonas de altitud elevada puede ocurrir que las plantas empleadas no se adapten. Por ello, habría que realizar estudios in situ con especies locales.
- Un débil compromiso, así como la desorganización de los usuarios, hacen que estos proyectos no tengan éxito, debido a que no se destina los recursos necesarios y se no siguen las mejores prácticas de operación y mantenimiento (SINiA, 2008).

1.3.16 Parámetros a muestrear

1.3.16.1 Nitrógeno total

El nitrógeno total es la suma de todas las formas de nitrógeno presentes en el agua, incluidos el amoníaco y el nitrógeno enlazado orgánicamente (nitrógeno total Kjeldahl), el nitrito y el nitrato. (HCAH, 2022)

1.3.16.2 Fósforo total/Fósforo orgánico

El fósforo total es la suma de todas las formas de fósforo existentes: ortofosfato o fosfatos, fosfatos condensados y fósforo orgánico. El fósforo orgánico suele encontrarse en forma de fosfatos contenidos en el interior o unidos a un compuesto orgánico. (Company, 2022)

1.3.16.3 pH del agua

El pH del agua determina la solubilidad (cuánto puede disolverse en ella) y la biodisponibilidad (cuánto pueden consumir los organismos acuáticos) de sustancias químicas como nutrientes (fósforo, nitrógeno y carbono) y metales pesados (plomo, cobre, cadmio, etc.). Por ejemplo, además de afectar la cantidad y forma de fósforo que es más abundante en el agua, el pH también determina si está disponible para los organismos acuáticos. En el caso de los metales pesados, la solubilidad determina su toxicidad. Los metales son más tóxicos a valores de pH más bajos porque son más solubles. (Carbotecnia, 2022)

1.3.16.4 Temperatura

La temperatura juega un papel muy importante en la eficiencia de remoción en humedales artificiales, esto debido a que la mayoría de los procesos de remoción en el sistema son de carácter biológico. En el caso en que la temperatura sea inferior a 10°C las reacciones responsables para la remoción de DBO₅ y nitrógeno disminuyen su velocidad. Mientras que, si la temperatura aumenta de manera significativa, aumenta la saturación del agua, disminuyendo la solubilidad del oxígeno, acelerando las reacciones químicas y biológicas que consumen oxígeno, lo que produce olores desagradables por la producción de metano, ácido sulfhídrico y materia orgánica parcialmente oxidada (Londoño Cardona & Marín Vanegas, 2009).

1.3.16.5 Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)

En los humedales artificiales la remoción de DBO₅ se da por la absorción de compuestos orgánicos y por oxidación bacterial. La remoción de materia orgánica se da por sedimentación rápidamente debido al flujo lento en los sistemas subsuperficiales lo cual ocasiona que cerca del 50% de la DBO₅ sea removida al inicio del humedal. El resto de la materia orgánica es removida al entrar en contacto con los microorganismos (Lara, 2009)

1.3.16.6 Coliformes Fecales

Constituyen un subgrupo de los coliformes totales, son de tipo bastoncitos de 0,0002-0,0003 mm por 0,002 a 0,003 mm, son aerobios/anaerobios facultativos no esporulados. Se diferencian de los coliformes totales por ser tolerantes a temperaturas elevadas (creciendo a 44,5 °C), lo que les permite estar mejor adaptados a la vida al interior del animal. Del total de coliformes fecales presentes en las heces humanas, entre el 90% y el 100% corresponden a *Escherichia coli* (E. coli), ya que un gramo de excremento humano contiene entre cinco mil millones y cincuenta mil millones de coliformes fecales; es decir que más del 40% del peso húmedo de los excrementos humanos son células bacterianas (San Vicente, 2003).

1.4 MARCO LEGAL

1.4.1 Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia (CPEPB)

Artículo 16.

Toda persona tiene derecho al agua y a la alimentación.

Artículo 20.

I. Toda persona tiene derecho al acceso universal y equitativo a los servicios básicos de agua potable, alcantarillado, electricidad, gas domiciliario, postal y telecomunicaciones.

II. Es responsabilidad del Estado, en todos sus niveles de gobierno, la provisión de los servicios básicos a través de entidades públicas, mixtas, cooperativas o comunitarias. En los casos de electricidad, gas domiciliario y telecomunicaciones se podrá prestar el servicio mediante contratos con la empresa privada. La provisión de servicios debe responder a los criterios de universalidad, responsabilidad, accesibilidad, continuidad, calidad, eficiencia, eficacia, tarifas equitativas y cobertura necesaria; con participación y control social.

III. El acceso al agua y alcantarillado constituyen derechos humanos, no son objeto de concesión ni privatización y están sujetos a régimen de licencias y registros, conforme a ley.

1.4.1.1 Derecho al medio ambiente

Artículo 33

Las personas tienen derecho a un medio ambiente saludable, protegido y equilibrado. El ejercicio de este derecho debe permitir a los individuos y colectividades de las presentes y futuras generaciones, además de otros seres vivos, desarrollarse de manera normal y permanente.

1.4.1.2 Medio ambiente, recursos naturales, tierra y territorio

Artículo 342

Es deber del Estado y de la población conservar, proteger y aprovechar de manera sustentable los recursos naturales y la biodiversidad, así como mantener el equilibrio del medio ambiente.

1.4.1.3 Recursos hídricos

Artículo 373

El agua constituye un derecho fundamentalísimo para la vida, en el marco de la soberanía del pueblo. El Estado promoverá el uso y acceso al agua sobre la base de principios de solidaridad, complementariedad, reciprocidad, equidad, diversidad y sustentabilidad.

Artículo 374

I. El Estado protegerá y garantizará el uso prioritario del agua para la vida. Es deber del Estado gestionar, regular, proteger y planificar el uso adecuado y sustentable de los recursos hídricos, con participación social, garantizando el acceso al agua a todos sus habitantes. La ley establecerá las condiciones y limitaciones de todos los usos.

1.4.2 Ley 1333 de Medio Ambiente - 27 de abril de 1992

Tiene por objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población.

1.4.2.1 Título I. disposiciones generales capítulo I objeto de la ley

Tiene por objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población.

Artículo 3

El medio ambiente y los recursos naturales constituyen patrimonio de la Nación, su protección y aprovechamiento se encuentran regidos por ley y son de orden público.

De los reglamentos mencionados, dos de ellos tienen que ver directamente con el uso de las ARD tratadas.

1.4.2.2 Título II de la gestión ambiental

Artículo 5

La política nacional del medio ambiente debe contribuir a mejorar la calidad de vida de la población, sobre las siguientes bases:

- 1.- Definición de acciones gubernamentales que garanticen la preservación, conservación, mejoramiento y restauración de la calidad ambiental urbana y rural.
- 2.- Promoción del desarrollo sostenible con equidad y justicia social tomando en cuenta la diversidad cultural del país.
- 3.- Promoción de la conservación de la diversidad biológica garantizando el mantenimiento y la permanencia de los diversos ecosistemas del país.

- 4.- Optimización y racionalización el uso de aguas, aire suelos y otros recursos naturales renovables garantizando su disponibilidad a largo plazo.
- 5.- Incorporación de la dimensión ambiental en los procesos del desarrollo nacional.
- 6.- Incorporación de la educación ambiental para beneficio de la población en su conjunto.
- 7.- Promoción y fomento de la investigación científica y tecnológica relacionada con el medio ambiente y los recursos naturales.
- 8.- Establecimiento del ordenamiento territorial, a través de la zonificación ecológica, económica, social y cultural.
- 9.- Creación y fortalecimiento de los medios, instrumentos y metodologías necesarias para el desarrollo de planes y estrategias ambientales del país priorizando la elaboración y mantenimiento de cuentas patrimoniales con la finalidad de medir las variaciones del patrimonio natural nacional.
- 10.- Compatibilización de las políticas nacionales con las tendencias de la política internacional en los temas relacionados con el medio ambiente precautelando la soberanía y los intereses nacionales.

1.4.2.3 Título III de los aspectos ambientales

Artículo 17

Es deber del Estado y la sociedad, garantizar el derecho que tiene toda persona y ser viviente a disfrutar de un ambiente sano y agradable en el desarrollo y ejercicio de sus actividades.

Artículo 18

El control de la calidad ambiental es de necesidad y utilidad pública e interés social. La Secretaría nacional y las Secretarías Departamentales del Medio Ambiente promoverán y ejecutarán acciones para hacer cumplir con los objetivos del control de la calidad ambiental.

Artículo 19

Son objetivos del control de la calidad ambiental:

- 1.- Preservar, conservar, mejorar y restaurar el medio ambiente y los recursos naturales a fin de elevar la calidad de vida de la población.
2. Normar y regular la utilización del medio ambiente y los recursos naturales en beneficio de la sociedad en su conjunto.
- 3.- Prevenir, controlar, restringir y evitar actividades que conlleven efectos nocivos o peligrosos para la salud y/o deterioren el medio ambiente y los recursos naturales.
- 4.- Normar y orientar las actividades del Estado y la Sociedad en lo referente a la protección del medio ambiente y al aprovechamiento sostenible de los recursos naturales a objeto de garantizar la satisfacción de las necesidades de la presente y futuras generaciones.

1.4.2.4 Reglamento en materia de contaminación hídrica – 1995

Título II del marco institucional

Artículo 10

Para efectos del presente Reglamento y a nivel departamental, el Prefecto tendrá las siguientes atribuciones y funciones:

- a) ejecutar las acciones de prevención de la contaminación de los cuerpos de agua, saneamiento y control de la calidad de los recursos hídricos, así como las actividades técnicas ambientales en coordinación con los Organismos Sectoriales Competentes y los Gobiernos Municipales.
- b) establecer objetivos en materia de calidad del recurso hídrico.
- c) identificar las principales fuentes de contaminación, tales como las descargas de aguas residuales, los rellenos sanitarios activos e inactivos, las escorias y desmontes mineros, los escurrimientos de áreas agrícolas, las áreas geográficas de intensa erosión de los suelos y las de inundación masiva.

- d) proponer al MDSMA la clasificación de los cuerpos de agua en función de su aptitud de uso
- e) otorgar los permisos de descarga de aguas residuales crudas o tratadas.
- f) aprobar el reúso, por el mismo usuario, de aguas residuales crudas o tratadas, descargadas al cuerpo receptor.
- g) levantar y mantener un inventario de los recursos hídricos referido a la cantidad y calidad de todos los cuerpos de agua a nivel departamental, a fin de determinar sus estados natural y actual.
- h) dar aviso al MDSMA y coordinar con Defensa Civil en casos. Que ameriten una declaratoria de emergencia hídrica a nivel departamental por deterioro de la calidad hídrica.

Artículo 13

La Autoridad ambiental competente realizará inspecciones sistemáticas de acuerdo con el Reglamento de Prevención y Control Ambiental. Las inspecciones incluirán monitoreo de las descargas de aguas residuales crudas o tratadas para verificar si los informes de caracterización a los que hace referencia el presente reglamento son representativos de la calidad de las descargas.

En lo referente a la prevención y control de la contaminación hídrica, en el marco del desarrollo sustentable, dentro del reglamento se especifican:

- Límites permisibles de contaminación hídrica
- Procedimientos técnico - administrativos
- Descargas al alcantarillado y a cuerpos de agua
- Monitoreo y evaluación de la calidad hídrica
- Uso de aguas según calidad
- Prevención y control de la contaminación
- Conservación del recurso

Este reglamento contiene en su Anexo A, algunas características técnicas de calidad de aguas que se deben cumplir, entre ellos están:

- Límites máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso (4 Clases)
- Valores máximos admisibles para parámetros en cuerpos receptores (80 parámetros)
- Límites permisibles para descargas líquidas en mg/L (25 parámetros) Respecto a reúso de aguas.

Artículo 67

establece que el reúso de aguas residuales crudas o tratadas por terceros, será autorizado por el Prefecto (actualmente Gobernador) cuando el interesado demuestre que estas aguas satisfacen las condiciones de calidad establecidas en el Reglamento.

1.4.2.5 Capítulo III. De los gobiernos municipales

Artículo 11

Los Gobiernos Municipales, para el ejercicio de las atribuciones y competencias que les reconoce la ley en la presente materia, deberán, dentro del ámbito de su jurisdicción territorial:

- a) realizar acciones de prevención y control de la contaminación hídrica, en el marco de los lineamientos, políticas y normas nacionales.
- b) identificar las fuentes de contaminación, tales como las descargas residuales, los rellenos sanitarios activos e inactivos, escorias metalúrgicas, colas y desmontes mineros, escurrimientos de áreas agrícolas, áreas geográficas de intensa erosión de suelos y/o de inundación masiva, informando al respecto al Prefecto.
- c) proponer al Prefecto la clasificación de los cuerpos de agua en función a su aptitud de uso.
- d) controlar las descargas de aguas residuales crudas o tratadas a los cuerpos receptores.

e) dar aviso al Prefecto y coordinar con Defensa Civil en casos que ameriten una emergencia hídrica, a nivel local por deterioro de la calidad hídrica.

1.4.2.6 Capítulo IV. De los organismos sectoriales competentes

Artículo 12

Los Organismos Sectoriales Competentes, en coordinación con el MDSMA y el Prefecto, participarán en la prevención y control de la calidad hídrica mediante propuestas relacionadas con:

- a) normas técnicas sobre límites permisibles en la materia de su competencia.
- b) políticas ambientales para el sector en materia de contaminación hídrica, las mismas que formarán parte de la política general del sector y de la política ambiental nacional.
- c) planes sectoriales y multisectoriales considerando la prevención y el control de la calidad hídrica.

1.4.2.7 Título IV. Del monitoreo, evaluación, prevención, protección y conservación de la calidad hídrica

Artículo 47

Todas las descargas de aguas residuales crudas o tratadas a ríos arroyos, procedentes de usos domésticos, industriales, agrícolas, ganaderos o de cualquier otra actividad que contamine el agua, deberán ser tratadas previamente a su descarga, si corresponde, para controlar la posibilidad de contaminación de los acuíferos por infiltración, teniendo en cuenta la posibilidad de que esos ríos y arroyos sirvan para usos recreacionales eventuales y otros que se pudieran dar a estas aguas. Para el efecto se deberá cumplir con lo siguiente:

- a) en caso de arroyos, dichas aguas residuales crudas o tratadas deberán satisfacer los límites permisibles establecidos en el presente reglamento para el cuerpo receptor respectivo.

b) toda descarga de aguas residuales a ríos, cuyas características no satisfagan los límites de calidad definidos para su clase, deberá ser tratada de tal forma que, una vez diluida, satisfaga lo indicado en el Cuadro N° 1 del presente reglamento.

c) cuando varias industrias situadas a menos de 100 metros de distancia una de la otra descargue sus aguas residuales a un mismo tramo de río, la capacidad de dilución será distribuida proporcionalmente al caudal de descarga individual, considerando el caudal mínimo del río y como está descrito en el Art. 45 del presente Reglamento.

1.4.3 Reglamento en materia de contaminación hídrica

1.4.3.1 Título I. Disposiciones generales capítulo I

Capítulo II de las siglas y definiciones

Aguas residuales crudas: Aguas procedentes de usos domésticos, comerciales, agropecuarios y de procesos industriales, o una combinación de ellas, sin tratamiento posterior a su uso.

Aguas residuales tratadas: Aguas procesadas en plantas de tratamiento para satisfacer los requisitos de calidad en relación a la clase de cuerpo receptor a que serán descargadas.

Área de descarga: Área de influencia directa de la descarga de aguas residuales crudas o tratadas a un cuerpo receptor que incluye a los puntos de descarga y de dilución o al sistema de drenaje o alcantarillado.

Contaminación de aguas: Alteración de las propiedades físico-químicas y/o biológicas del agua por sustancias ajenas, por encima o debajo de los límites máximos o mínimos permisibles, según corresponda, de modo que produzcan daños a la salud del hombre deteriorando su bienestar o su medio ambiente.

Cuerpo receptor: Medio donde se descargan aguas residuales crudas o tratadas.

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno (en mg/ℓ). Es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer biológicamente la materia orgánica carbonácea. Se determina en laboratorio a una temperatura de 20° C y en 5 días.

Descarga: Vertido de aguas residuales crudas o tratadas en un cuerpo receptor.

DQO: Demanda Química de Oxígeno (en mg/ℓ). Cantidad de oxígeno necesario para descomponer químicamente la materia orgánica e inorgánica. Se determina en laboratorio por un proceso de digestión en un lapso de 3 horas.

Efluente contaminado: Toda descarga líquida que contenga cualquier forma de materia inorgánica y/u orgánica o energía, que no cumpla los límites establecidos en el presente reglamento.

Límite permisible: Concentración máxima o mínima permitida, según corresponda, de un elemento, compuesto o microorganismo en el agua, para preservar la salud y el bienestar humanos y el equilibrio ecológico, en concordancia con las clases establecidas.

Sólidos sedimentables: Volumen que ocupan las partículas sólidas contenidas en un volumen definido de agua, decantadas en dos horas; su valor se mide en mililitros por litro (ml/ℓ).

Sólidos suspendidos totales: Peso de las partículas sólidas suspendidas en un volumen de agua, retenidas en papel filtro N.º 42.

Tratamiento: Proceso físico, químico y/o biológico que modifica alguna propiedad física, química y/o biológica del agua residual cruda.

Capítulo II

Artículo 6

Se considera como: Parámetros básicos, los siguientes: DBO₅; DQO; Colifecales NMP; Oxígeno Disuelto; Arsénico Total; Cadmio; Cianuros; Cromo Hexavalente; Fosfato Total; Mercurio; Plomo; Aldrín; Clordano; Dieldrín; DDT; Endrín; Malatión; Paratión.

Artículo 35

Los valores máximos establecidos en la clasificación de aguas de los cuerpos receptores del Cuadro N° A-1 no podrán ser excedidos en ningún caso con las descargas de aguas residuales crudas o tratadas una vez diluidas en las aguas del cuerpo receptor,

con excepción de aquellos parámetros que durante la clasificación hayan excedido los valores del Cuadro N° A-1, según especifica el Art. 7.

Artículo 46

Todas las descargas a lagos de aguas residuales crudas o tratadas procedentes de usos domésticos, industriales, agrícolas, ganaderos o cualquier otra actividad que contamine el agua, deberán ser tratadas previamente a su descarga hasta satisfacer la calidad establecida del cuerpo receptor.

Artículo 62

La desinfección de las aguas residuales crudas o tratadas es imprescindible cuando la calidad bacteriológica de esas aguas rebasa los límites establecidos y constituye riesgo de daño a la salud humana o contaminación ambiental.

1.4.4 Ley n ° 2029

1.4.4.1 Ley de 29 octubre de 1999. Ley de servicios de agua potable y alcantarillado sanitario

Capítulo III

servicios de agua potable y alcantarillado

Artículo 9.

competencia nacional

Las políticas, normas y regulación de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario son de competencia nacional. Las concesiones, la regulación de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario y las servidumbres relacionadas con los mismos son competencia de la superintendencia de saneamiento básico.

Artículo 23.

Conservación del agua y el medio ambiente

Los prestadores de servicios de agua potable o servicios de alcantarillado sanitario deben de proteger el medio ambiente conforme a las disposiciones de la ley 1333 de 15 de julio de 1992 y su reglamentación, así como promover el uso eficiente y

conservación del agua potable, mediante la utilización de equipos, materiales y técnicas constructivas que no deterioren el medio ambiente y que contribuyan a la conservación del agua, la promoción del uso de dispositivos ahorradores de agua y la orientación a los usuarios para la disminución de fugas dentro de los sistemas de aguas potables, así como el adecuado tratamiento y disposición de las aguas residuales.

CAPÍTULO II
MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Bolivia se halla situada en la zona central de América del Sur, entre los meridianos 57° 26' y 69° 38' de longitud occidental del meridiano de Greenwich y los paralelos 9° 38' y 22° 53' de latitud sur, por lo tanto, abarca más de 13° geográficos. La extensión territorial es de 1.098.581 km²

Limita al Norte y al Este con el Brasil, al sur con la Argentina, al Oeste con el Perú, al Sudeste con el Paraguay y al Sudoeste con Chile.

El Departamento de Tarija se ubica al extremo sur de Bolivia, el mismo consta de una superficie de 37.623 km²., geográficamente se encuentra dividido en seis provincias: Méndez, Cercado, Avilés, O'Connor, Aniceto Arce y Gran Chaco.

La provincia Aniceto Arce con 5.205 km² posee dos secciones municipales: Padcaya y Bermejo. El municipio de Padcaya cuenta con una superficie de 4.225 km²

2.1.1 Ubicación espacial del municipio

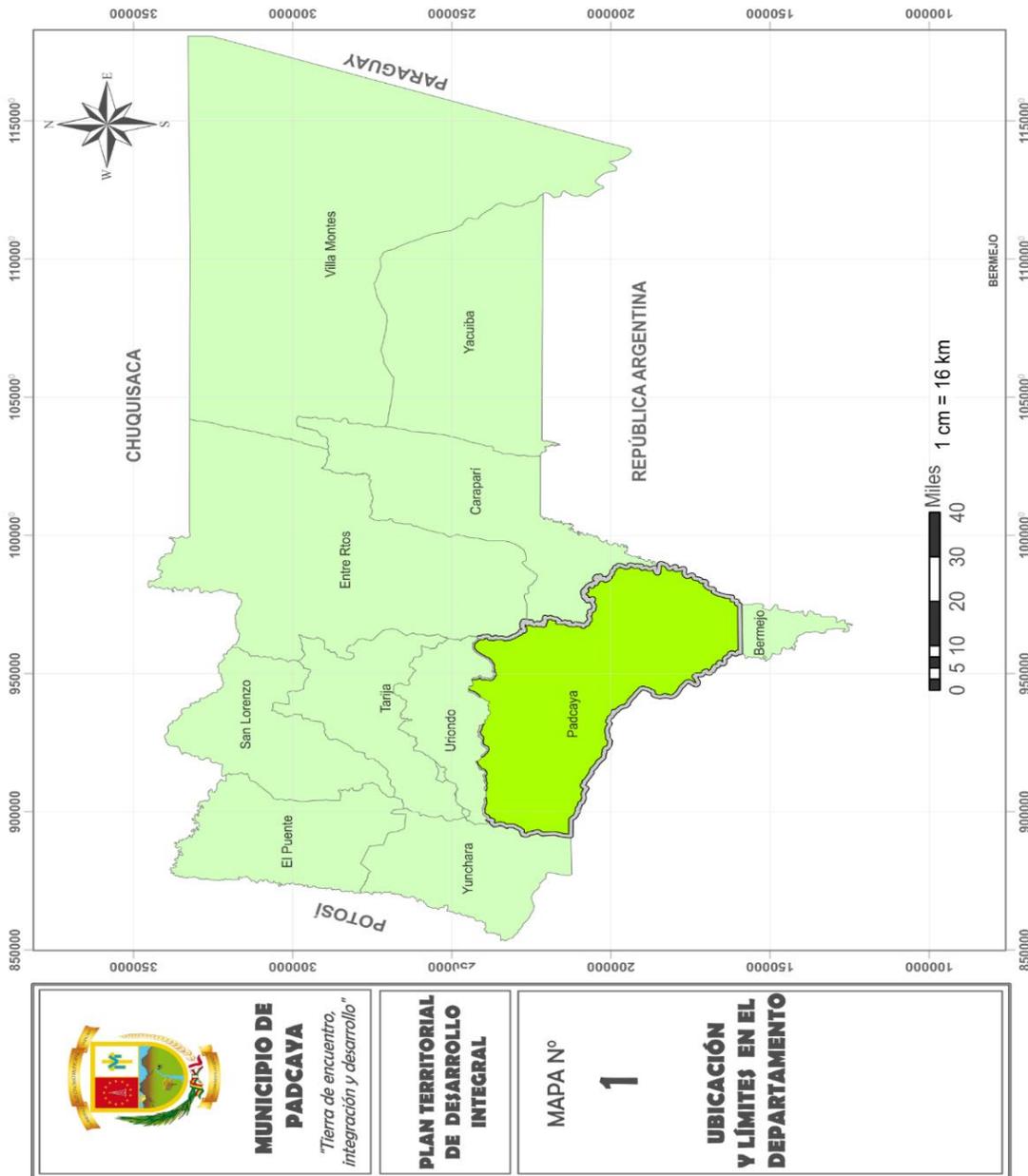
Cuadro 5: Superficie de la provincia

Provincia	Capital de provincia	Superficie km ²	Municipios	Superficie
				Km ²
Aniceto Arce	Padcaya	5.205	Bermejo	980
			Padcaya	4225

Fuente: Elaboración propia. PTDI Padcaya 2016

El Municipio de Padcaya se encuentra ubicado a 49 Km. De la ciudad de Tarija, conectada mediante la ruta 1 de red fundamental de caminos, carretera internacional asfaltada que llega hasta el municipio de Bermejo y frontera con la República de la Argentina, se ubica entre los paralelos: 22°35'51'' y 21°46'08'' de latitud Sur; y entre los meridianos: 65°05'35'' y 64°04'39'' de longitud Oeste.

Mapa 1: Ubicación geográfica y límites en el departamento



Fuente:(PTDI Padcaya 2016).

2.1.2 Delimitación

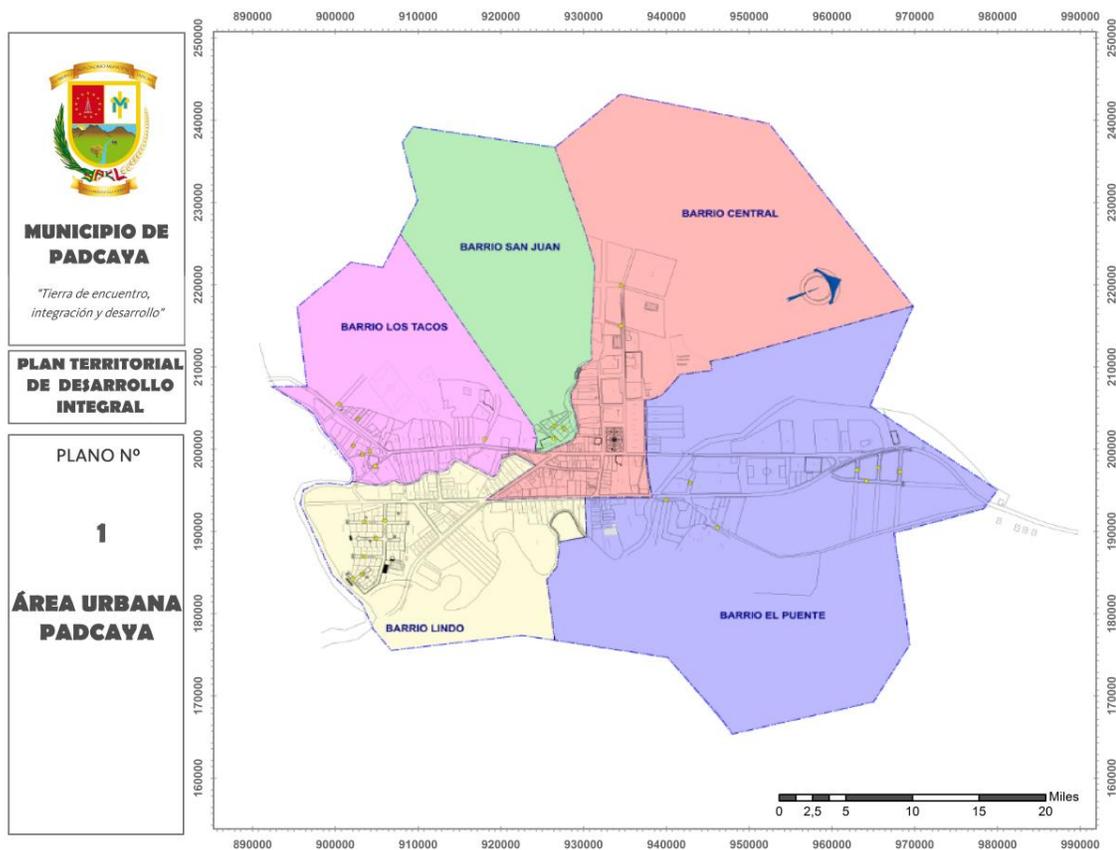
2.1.2.1 Límite Geográfico

El trabajo se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la Planta De Tratamiento De Aguas Residuales de la localidad de Padcaya, la cual se encuentra ubicada en la

comunidad de Cabildo zona “Los Potreros” provincia Aniceto Arce departamento de Tarija del estado plurinacional de Bolivia, situado en las coordenadas - 21.90360516489436, -64.7004127877698

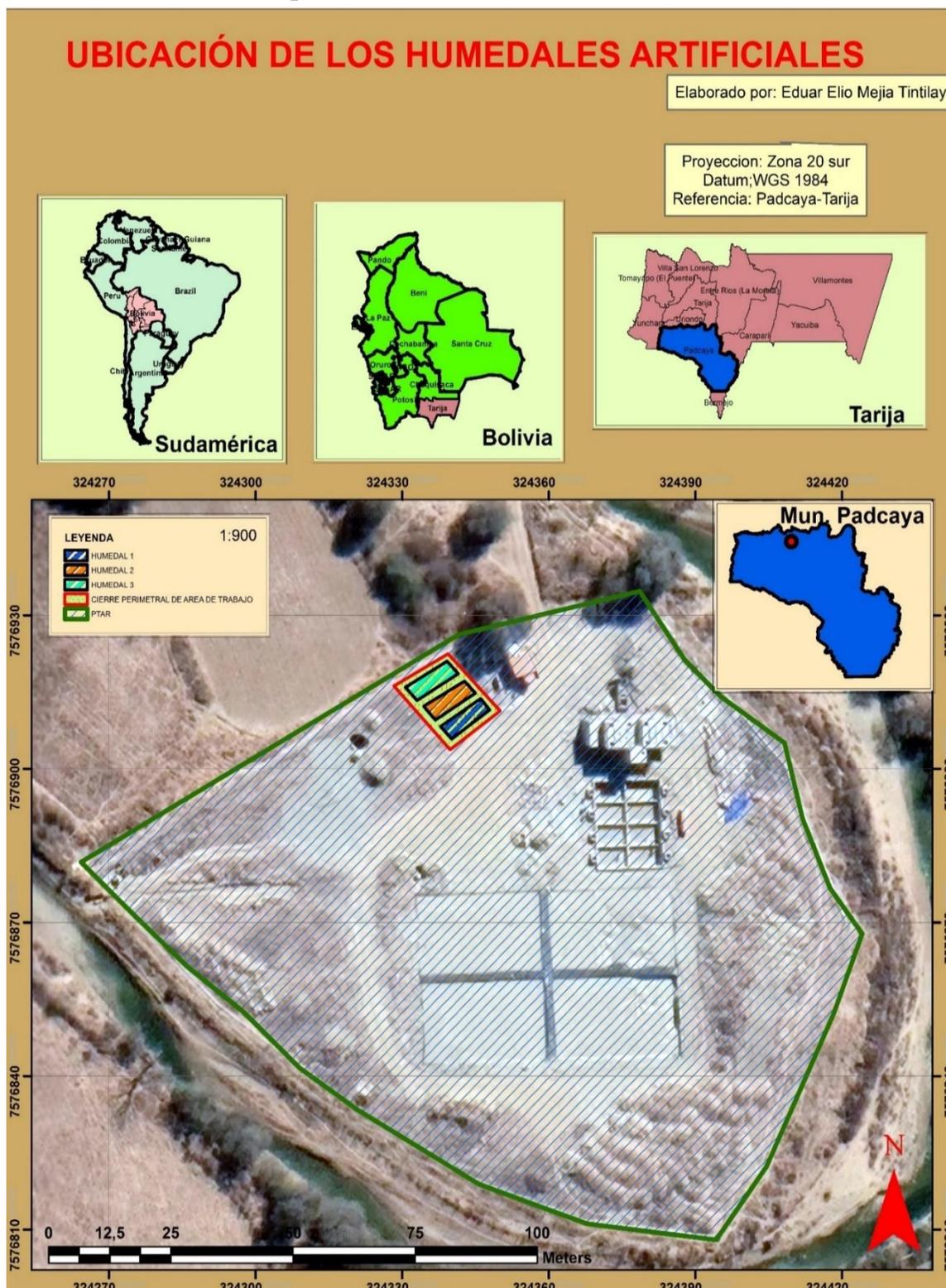
Esta PTAR recibe la mayor parte de las aguas residuales de la mancha urbana de Padcaya incluyendo a Barrio Lindo, Barrio Los Tacos, Barrio Central, Barrio El Puente y parte de la comunidad de Huacanqui.

Mapa 2: Área urbana Padcaya



Fuente: (PTDI Padcaya , 2016)

Mapa 3: Ubicación de los humedales artificiales



Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Principales centros poblados

El Municipio de Padcaya es un municipio predominantemente rural a excepción de la capital que tiene 1.437 habitantes, según el CENSO 2012; cuentan con otros centros poblados de menor población como Rosillas, Chaguaya, La Mamora y Cañas que tienen entre 253 y 900 habitantes. rural; la población, en su gran mayoría, vive en zonas dispersas, con las poblaciones de Padcaya, Rosillas, La Mamora, Cañas, La Merced y Camacho tienen una ocupación más nucleada o concentrada; mientras que Santa Clara, San Telmo, Mecoya son comunidades con sectores nucleados y sectores dispersos; el resto de las comunidades tienen como características la ocupación dispersa de su territorio.

Se debe aclarar que: Padcaya, Chaguaya y la Mamora son centros poblados categorizados como centros urbanos.

2.1.4 Límite temporal

La investigación se llevó a cabo desde agosto de 2022 hasta mayo de 2023. Durante el primer mes, se construyó los humedales artificiales y se plantó las macrófitas, permitiendo aproximadamente 35 d para que las plantas se adaptaran. Luego, fue aplicado el 100% de concentración de aguas residuales. Después de esperar el tiempo de retención previamente definido, fueron tomadas muestras de cada uno de los humedales. Posteriormente, se realizó un seguimiento de cómo evolucionaban las plantas en el agua residual. En junio de 2023, se realizó una segunda toma de muestras de agua de la misma manera que en la primera ocasión. Una vez completado el muestreo, se extrajo las plantas para realizar la última medición de brotes, flores y el tamaño de las raíces.

2.1.5 Factores Climaticos

2.1.5.1 Clima

El verano se caracteriza principalmente por una temperatura y humedad relativa alta y masas de aire inestables, produciéndose precipitaciones aisladas de alta intensidad y corta duración. Por otro lado, el invierno se caracteriza por temperaturas y humedad

relativa generalmente bajas y la ausencia de precipitaciones, asociadas a la llegada de frentes fríos provenientes del sur.

2.1.5.2 *Temperatura*

La temperatura media anual en Padcaya es de 16,7 °C, con una máxima y mínima promedio de 24,6 °C y 8,8 °C respectivamente.

2.1.5.3 *Precipitación*

De acuerdo a información recolectada, la precipitación media anual de 619,60 mm/año.

Tabla 1: Características climáticas de Padcaya

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE PADCAYA														
Índice	Unidad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
Temp. Max. Media	°C	26,1	25,5	25,2	23,9	23,3	23,5	24	24,3	23,8	25,2	25,3	25,2	24,6
Temp. Min. Media	°C	13,2	12,9	12,5	10,3	6,1	4	3,4	4,6	6,1	9,2	11,3	12,2	8,8
Temp. Media	°C	19,6	19,2	18,9	17,1	14,7	13,8	13,7	14,5	15	17,2	18,3	18,7	16,7
Temp. Max. Extr.	°C	34,5	34,2	34	36	34	34	35	40	37	37,5	36	35,4	40
Temp. Min. Extr.	°C	5,7	5	3,5	-2	-3	-9,3	-8	-9	-5	-1	2	3,2	-9,3
Días con Helada		0	0	0	0	1	4	4	2	1	0	0	0	13
Humed. Relativa	%	72	73	74	72	67	62	60	59	62	63	68	70	67
Nubosidad Media	Octas	5	5	5	4	4	3	3	2	3	4	5	5	4
Precipitación	Mm	145,4	108,4	90,1	23,3	3,9	1,1	1	4,2	10,7	46,5	71,8	113,5	619,6
Pp. Max. 24 hrs.	Mm	193	61	44	48,7	19,1	6	8	20,5	30	128	49	91	193
Días con Lluvia		14	13	10	4	1	0	0	1	2	6	9	11	71
Direc. Del Viento		SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
Vel. Del Viento	km/hra	2,9	2,3	2,2	2,6	2,3	2	2,5	2,6	2,8	2,8	2,9	3,2	2,6
Evapotranspiración Potencial	Mm	123,1	103,6	101,1	83,6	73,1	66,3	72,5	87,4	95,2	120,6	122,1	125,8	1175,3

Fuente: SENAMHI

2.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación tiene un enfoque mixto entre cuantitativo y cualitativo

2.2.1 *Cuantitativo*

La metodología cuantitativa utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente, y confía en la medición numérica. (Alvaréz, 2011).

En el presente trabajo se realizó un estudio en su mayoría cuantitativo, debido a que se recogió los datos de los análisis de laboratorio antes y después del tratamiento, también las mediciones que se realizaron de las plantas son de manera cuantitativa, con esto se comprobó la hipótesis de la cual son más eficientes las macrófitas en la remoción de nutrientes solubles del agua residual y la adaptación de estas a lo largo del tiempo.

2.2.2 Cualitativo

La investigación cualitativa es muy útil en las primeras fases de los proyectos de investigación, además de que permite también analizar los datos utilizados en las ciencias sociales y adquirir un conocimiento profundo a través del análisis de textos (y palabras, más que números). (Fernández, 2002).

Se usó en el análisis de información en la fase inicial del trabajo y en la observación del desarrollo y adaptación que lograron las plantas, también fue útil en la explicación del porque existen diferencias entre los niveles de remoción de contaminantes, como en la formulación de las conclusiones.

2.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación se llevó a cabo de manera experimental, siguiendo un enfoque longitudinal y explicativo. En primer lugar, se estableció, analizó y recolectó la información necesaria para el estudio. A partir de esta información, se realizaron observaciones que permitieron describir y analizar los resultados antes y después de la aplicación de los humedales artificiales.

2.3.1 Experimental:

Esta modalidad tradicional de estudio se orienta más dentro de la investigación cuantitativa que la cualitativa, aunque esta no se excluye. Su propósito es validar o comprobar una hipótesis. Para ello se vale del experimento el cual “consiste en someter un objeto de estudio a la influencia de ciertas variables, en condiciones controladas y conocidas por el investigador, para observar los resultados que la variable produce en el objeto” (Cerdeira, 2000)

Se comprobó mediante ensayo en campo cual especie de macrófita logró una mejor remoción de contaminantes, para lo cual se usó tres especies distintas, modificando así las variables y teniendo control sobre la misma, luego se observó los resultados de cada una de los humedales artificiales implementados.

2.3.2 Longitudinal

La variable de estudio es medida en dos o más ocasiones; por ello, se realizan comparaciones (antes y después). Se llevó a cabo mediciones del agua residuales antes del ingreso a los humedales artificiales y a la salida de los sistemas, a fin de determinar las concentraciones de los parámetros: Nitrógeno Total, Fósforo Total, pH del Agua, Temperatura, Demanda Biológica De Oxígeno (DBO₅) y Coliformes Fecales.

2.3.3 Explicativa:

La explicación también es un instrumento utilizado en muchos tipos de investigación; es casi el objetivo final, la meta o la exigencia, ya que busca respuesta a una pregunta fundamental, por el deseo de conocer y saber del ser humano:” ¿Por qué?”. Averigua las causas de las cosas, hechos o fenómenos de la realidad. La explicación es un proceso que va mucho más allá de la simple descripción de un objeto, diríamos que es más avanzada, pues una cosa es evidenciar como es algo, o recoger datos y descubrir hechos en sí, y otra muy distinta explicar el por qué. “este es el tipo de investigación que más profundiza nuestro conocimiento de la realidad, debido a que explica la razón, el porqué de las cosas, y es por lo tanto más complejo y delicado, pues el riesgo de cometer errores aumenta considerablemente. (Sabino, 1998)

Se aplicó este tipo de investigación, ya que se da una explicación de como cada especie de macrófita acuática *Typha dominguensis* (totora), *Cyperus sp* (pasto) y *Azolla filiculoides* (Azola, helecho de agua) son eficientes para tratar aguas residuales domésticas en los sistemas de humedales artificiales, evaluando el comportamiento de cada ensayo en diferentes etapas de desarrollo.

2.4 MÉTODO

El método general empleado es el método experimental; el método específico a utilizar fue la observación científica junto con el método analítico.

2.4.1 *Experimental*

El método experimental es un enfoque de investigación científica que implica la manipulación deliberada de variables independientes para observar y medir los efectos resultantes en las variables dependientes, con el objetivo de establecer relaciones causales. En este método, se diseñan experimentos controlados para evaluar y probar hipótesis científicas. La clave del método experimental radica en la capacidad de controlar las condiciones experimentales y realizar comparaciones sistemáticas entre grupos de tratamiento y grupos de control. Los resultados obtenidos se someten a análisis estadísticos para determinar la validez de las hipótesis formuladas. El método experimental es fundamental para la obtención de evidencia empírica sólida y la formulación de conclusiones basadas en datos recopilados de manera controlada y sistemáticas (Gortari, 1979).

El método experimental fue empleado con rigurosidad en este estudio, comenzando con la fase inicial de observación detallada del problema inherente a la presencia de nutrientes solubles en el agua residual. Esta etapa preliminar permitió identificar de manera precisa las variables clave que requerían investigación.

Posteriormente, se llevó a cabo una exhaustiva recopilación de información relacionada con el uso de macrófitas en humedales artificiales y los procesos implicados en su construcción. Este paso fue fundamental para establecer una base teórica sólida y contextualizar el marco conceptual del estudio.

Con base en la información recopilada, se formularon hipótesis específicas que delineaban las posibles reducciones de contaminantes que podrían lograrse mediante la implementación de humedales artificiales con macrófitas. Estas hipótesis proporcionaron un marco estructurado para la experimentación que seguiría.

Se llevo a cabo la implementación de tres humedales artificiales diseñados con el propósito de evaluar la eficacia en la reducción de contaminantes. Durante esta etapa, se llevó a cabo la recolección sistemática de datos.

Los datos recopilados fueron sometidos a un análisis detenido, empleando métodos científicos y estadísticos apropiados. Este proceso permitió evaluar de manera objetiva la eficiencia de los humedales artificiales en la reducción de nutrientes solubles.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se procedió a la formulación de conclusiones fundamentadas en los hallazgos del estudio. Estas conclusiones no solo sintetizaron los resultados experimentales, sino que también proporcionaron información valiosa para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la gestión de aguas residuales y la conservación del medio ambiente. En conjunto, el estudio se desarrolló de manera sistemática, siguiendo las etapas fundamentales del método científico para asegurar la validez y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

2.4.2 Observación científica

La observación científica es el elemento central del método o proceso científico. La habilidad básica del científico es realizar una observación.

La observación científica consiste en recibir conocimiento del mundo exterior a través de nuestros sentidos o el registro de información por medio de herramientas e instrumentos científicos. La información registrada durante un experimento puede ser denominada observación científica. (Cerde, 2000)

Este método fue fundamental para recopilar información sobre el desarrollo de las macrófitas. Desde el momento de la siembra, se registraron cuidadosamente los cambios en longitud y desarrollo, así como las diversas etapas de crecimiento. La observación científica permitió obtener datos detallados sobre el comportamiento y evolución de las plantas, también se llevó a cabo el registro de datos obtenidos en laboratorio para su posterior análisis y comparación.

2.4.3 Analítico

El método analítico es aquel método de investigación que consiste en la desmembración de un todo, sus partes o elementos para observar las causas, la naturaleza y los efectos. Es la observación y examen de un hecho en particular, es necesario conocer la naturaleza del fenómeno y objeto que se estudia para comprender su esencia. Este método nos permite conocer más del objeto de estudio, con lo cual se puede: explicar, hacer analogías, comprender mejor su comportamiento y establecer nuevas teorías. (Ruiz L, 2007)

Se examinaron las causas, la naturaleza y los efectos observados al analizar los cambios que ocurren en las macrófitas implantadas y en los laboratorios. Esto permitió explicar y comprender el comportamiento de los humedales artificiales y su relación con las especies implantadas de manera más clara.

2.5 TÉCNICAS

2.5.1 La recopilación bibliográfica

Permite la elaboración de las bases teóricas de la investigación. En esta fase se acude a todas las fuentes posibles, bibliotecas, instituciones afines, salas de estudio tratando de ubicar información sobre el tema, revisando: libros, revistas, periódicos, tesis, guías (Vara Horna, 2012)

La recopilación bibliográfica se realizó en la etapa inicial, se realizó a una revisión de la información secundaria relacionada al tema de investigación para obtener datos para la implementación correcta de los humedales.

- Herramientas de la investigación bibliográfica
- Revisiones documentales y bibliográficas.
- Fuentes de información científica.
- Gestores bibliográficos.
- Documentos y Guías escritas, auditivas, video gráficas, virtuales.

- Información de gabinete, internet.

2.5.2 La observación

Esta técnica se utiliza cuando el investigador corrobora y verifica los datos y la información sobre la situación real del problema, esta se define como: El registro visual de lo que ocurre en una situación real consignando los acontecimientos pertinentes de acuerdo con algún esquema previsto y según el problema que se estudia. (Canales, 2006).

La observación fue empleada en los periodos de adaptación de las plantas para lo cual se empleó las siguientes herramientas para el registro:

- Filmadora.
- Cámara fotográfica.
- Hojas de campo.
- Libreta de anotaciones.
- Cinta métrica

2.6 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE INVESTIGACIÓN

2.6.1 Técnicas de recolección de datos secundarios:

Recolección de información: A través de documentales, bibliografías y tesis.

2.6.2 Técnicas De Recolección De Datos Primarios:

Para efectos de investigación se realizaron las siguientes actividades:

Se construyeron tres humedales artificiales en la PTAR de la comunidad de Cabildo con los siguientes procedimientos:

- Se selecciono un área de terreno cercana al reactor UASB
- Se realizó la limpieza del terreno.
- Se excavó una zanja para cada humedal artificial.
- Se realizó la impermeabilización de las paredes y suelo.

- Se construyó el sistema de recolección de aguas.
- Como material de soporte se utilizó grava y piedra, que se colocó alrededor de la tubería de drenaje y en la parte inferior.
- Se realizó el colocado de sistema de distribución del humedal subsuperficial vertical y horizontal.
- Se procedió a la siembra de las tres especies de macrófitas seleccionadas
- Se dió un periodo de adaptación para las plantas de 35 d.
- Se llevó un registro del crecimiento de las plantas y su desarrollo con una frecuencia semanal.

Para lo cual fue empleada de manera semanal una planilla (**ver Anexo 5**)

2.6.3 Caracterización De La Calidad De Agua

Para determinar la calidad del agua residual doméstica proveniente de los reactores UASB. se realizaron dos análisis en el laboratorio con la finalidad de determinar los parámetros físico-químicos antes y después del tratamiento.

2.6.4 Desarrollo Morfológico De Las Especies Acuáticas Utilizadas

Se observó y registro el desarrollo morfológico y los cambios de las especies acuáticas empleadas antes, durante y después del tratamiento.

2.7 ESTRUCTURA METODOLÓGICA

2.7.1 Fase De Gabinete

Se realizó la recopilación bibliográfica necesaria acerca de la construcción, clasificación, mantenimiento y demás criterios técnicos necesarios para garantizar el buen funcionamiento de los humedales artificiales, además una revisión acerca de las especies seleccionadas y experiencias en otras regiones y su desempeño en humedales artificiales, para la realización del presente trabajo, también se investigó las diferentes leyes y normas relacionadas con el uso de humedales como tratamientos no convencionales de aguas residuales, se investigó acerca de los parámetros necesarios

para evaluar el desempeño en la remoción de nutrientes solubles y su importancia por último se recopiló información proporcionada por el municipio de Padcaya para realizar un breve diagnóstico de la situación actual.

2.7.1.1 Cálculo Del Área Superficial

El área superficial se calcula a través de la ecuación 1:

$$AS = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{KT * h * n}$$

Reemplazando:

Donde:

$$Q = 0,3 \text{ (m}^3\text{/día)}$$

$$C = 50 \text{ (mg/ } \ell \text{) nitrógeno total}$$

$$C_0 = 12 \text{ (mg/ } \ell \text{) nitrógeno total}$$

KT = Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura

Donde se obtuvieron los siguientes datos para el diseño de los humedal

$$h = 0,50 \text{ (m)}$$

$$n = 35\% - 0,35$$

$$AS = \frac{\frac{0,3 \text{ m}^3}{\text{día}} * \ln\left(\frac{50 \text{ mg/}\ell}{12 \text{ mg/}\ell}\right)}{KT * 0,50 \text{ m} * 0,35}$$

$$AS = \frac{\frac{0,3 \text{ m}^3}{\text{día}} * \ln\left(\frac{50 \text{ mg/}\ell}{12 \text{ mg/}\ell}\right)}{0,7783 * 0,50 \text{ m} * 0,35}$$

$$AS = 2,895 \text{ m}^2$$

Obtenido este resultado se redondeó a 3 m² para mejor facilidad en la construcción de los humedales, las mismas áreas fueron usada en el humedal libre, solo igualando la cantidad de agua a tratar. Los parámetros seleccionados fueron los más altos registrados los cuales corresponden al Nitrógeno Total y el nivel deseado de depuración a requerir son los mismos del que los límites máximos permisibles para descargas líquidas, se utilizó grava fina por lo cual la porosidad media es del 35%.

La constante de reacción de primer orden se calcula mediante la Ecuación 2:

$$KT = 1,104 * 1,06^{T2-20}$$

$$KT = 1,104 * 1,06^{14-20}$$

$$KT = 0,7783$$

Donde:

$$T2 = 14(^{\circ}\text{C})$$

La temperatura fue tomada con la ayuda de un termómetro en campo en la salida de los reactores UASB.

2.7.1.2 *Relación Largo – Ancho*

Para calcular el ancho del humedal consideramos la ley de Darcy (ecuación 3), para flujo en medio poroso.

$$Ac = \frac{Q}{(Ks * S)}$$

$$Ac = \frac{Q}{(Ks * S)}$$

$$Ac = \frac{0,00003472 \text{ m}^3/\text{s}}{(0,0115740 \text{ m/s} * 0,01\text{m})}$$

$$Ac = 0,2999 \text{ m}^2$$

Se redondeo a 0,30 m², sin embargo, para la construcción se usaron 0,50 m² de área transversal la cual es mucho mayor a la requerida, con lo cual se logró garantizar que el flujo del agua, sin que esta encontrara resistencia con el sustrato colocado.

Donde:

$$Ac = \text{área vertical en m}^2$$

$$Q = 0,00003472 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Ks = 0,0115740 \text{ (m/s)}$$

$$S = 1/100 \text{ (m/m)}$$

2.7.1.3 *Ancho Del Humedal (m)*

Se determina en función al área vertical y la profundidad del nivel de agua a tratar.

$$W = \frac{Ac}{h}$$

$$W = \frac{0,50 \text{ m}^2}{0,50 \text{ m}}$$

$$W = 1 \text{ m}$$

Con lo cual el diseño de los humedales fue de 1m de ancho

2.7.1.4 El Largo Del Humedal

Se determina en función al ancho y al área superficial como se muestra en la ecuación 5

Donde:

$$L = \frac{As}{W}$$

$$L = \frac{3 \text{ m}^2}{1 \text{ m}}$$

$$L = 3 \text{ m}$$

$$As = 3 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$W = 1 \text{ (m)}$$

Con lo cual los humedales fueron construidos con dimensiones un poco mayores a las requeridas para realizar el tratamiento de las aguas residuales provenientes de los reactores UASB, pero son ideales en proporcionalidad de tamaño.

2.7.2 Fase De Campo

Se realizó la selección de las especies a colocar en los humedales artificiales de acuerdo a las características que presentaban y la predominancia en zonas de alta humedad y anegamiento, siendo *Cyperus sp.* La más predominante y que se encontraba en mayor abundancia en las orillas de los ríos aledaños.

2.7.2.1 Selección del sitio

Para la selección del sitio de construcción de los tres humedales se tomó en cuenta un espacio cercano a la salida de los reactores UASB, para tener una mayor facilidad en

la conducción del agua residual, dicho espacio se encuentra en inmediaciones de la PTAR al lado de la caseta de bombeo.

2.7.2.2 Implementación de los humedales

Antes de la implementación de los humedales se realizó las debidas solicitudes al municipio de Padcaya los cuales son dueños del terreno donde se encuentra la PTAR en conjunto con el comité de agua potable y alcantarillado encargados de la operación y el funcionamiento, dichas solicitudes fueron aprobadas.

Una vez designada el área de construcción para los humedales, donde no interfiriera con las operaciones de la planta y que se encontrara cerca de la salida de los reactores UASB se procedió a la delimitación para realizar la excavación.

En la segunda semana del mes de agosto se realizó la limpieza y el acondicionamiento del terreno retirando maleza y arbustos y demás objetos que pudieran bloquear el acceso y dificultar el trabajo de construcción de los tres humedales artificiales, Se procedió a medir con la ayuda de una cinta métrica las dimensiones de cada humedal dejando 1 m. de espacio de humedal al otro humedal para las labores de mantenimiento y control, se demarcó con la ayuda de tanza y estacas de hierro y yeso, formando ángulos rectos.

Se procedió a realizar la excavación usando azada, palas rectas y cuchara, la profundidad de los humedales es de 50 cm. en su lado más alto y 47 cm en su parte más baja con una pendiente del 1% para que se drene con mayor facilidad, esto se realizó con la ayuda de un nivel de mano y una regla de hierro, el largo de cada humedal es de 3 m de largo y 1 m de ancho.

Se colocó una capa impermeabilizante en las paredes y en el suelo en cada humedal, la capa fue de una carpa de lona de 4 m x 4 m, se realizó los dobleces y se aseguró con un poco de tierra.

La construcción del sistema de recolección para el humedal 1 y 2 se realizó con un 2 tubo de PVC de 8 in, de longitud de 45 cm agujereados en forma de micrófono con un diámetro de 8 mm.

Se colocó piedras de alrededor de 10 a 15 cm. en la base de los dos humedales (H1 y H2) para que estos funcionen como drenaje para la recolección del agua, para obtener las muestras de agua y no se saturen con rapidez, una vez colocado la piedra se ubicó los tubos de PVC en el final del humedal donde la pendiente era menor y se procedió a llenar los humedales con grava chancada de diámetro de 15 mm a 20 mm, para evitar cortes en la capa impermeabilizante en los bordes se usó grava normal debido a que esta no tiene puntas ni filo, se usó aproximadamente 1,2 m³ de grava para cada humedal.

Para el humedal número 1 (H1) en donde se sembró totora solo se colocó un politubo de ¾ con una válvula para controlar el caudal de salida, este sistema de distribución es de flujo subsuperficial de flujo vertical.

Para el humedal número 2 (H2) donde se sembró pasto se colocó una válvula de salida junto con una manguera agujereada de 2 mm. que simula la distribución de un flujo subsuperficial de flujo vertical.

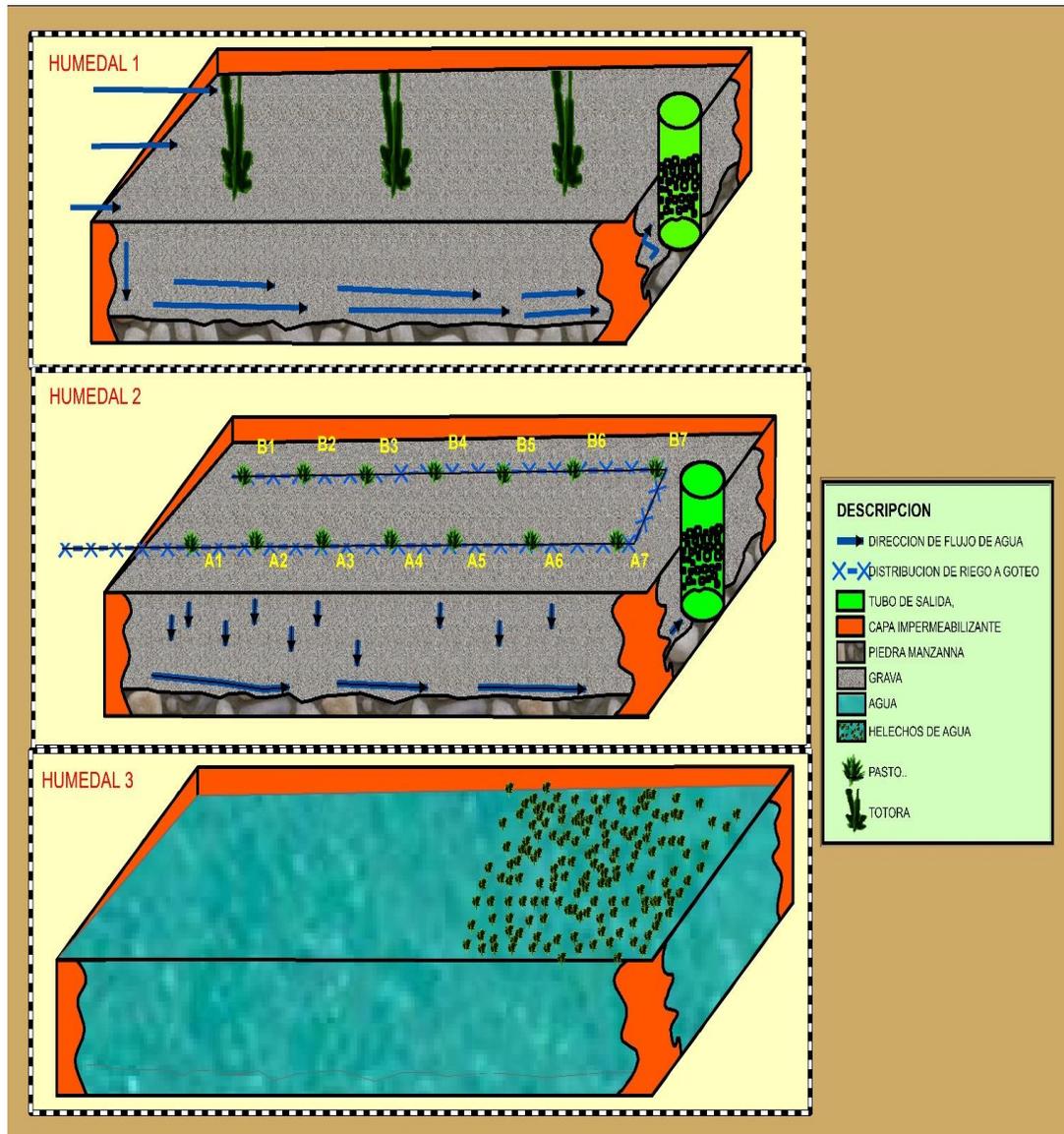
2.7.2.3 Introducción de las tres especies de macrófitas a los humedales artificiales

El 22 de agosto del 2022 Se procedió a la siembra de la macrófitas colocando en el humedal número 1 (H1) *Typha dominguensis* (totora) a una profundidad de 20 cm en la grava, con una densidad inicial de 1 por cada m², en total se colocaron tres, las longitudes se especificarán posteriormente junto con su código y todo el seguimiento de su crecimiento.

Se realizó la siembra de *Cyperus sp* en el humedal número 2 (H2) a una profundidad de 12 cm debido a las características de la planta, estos con una densidad inicial de 4 por cada m² en total fueron colocadas 14 plantas, a cada una para un mejor control y monitoreo se les asignó un código.

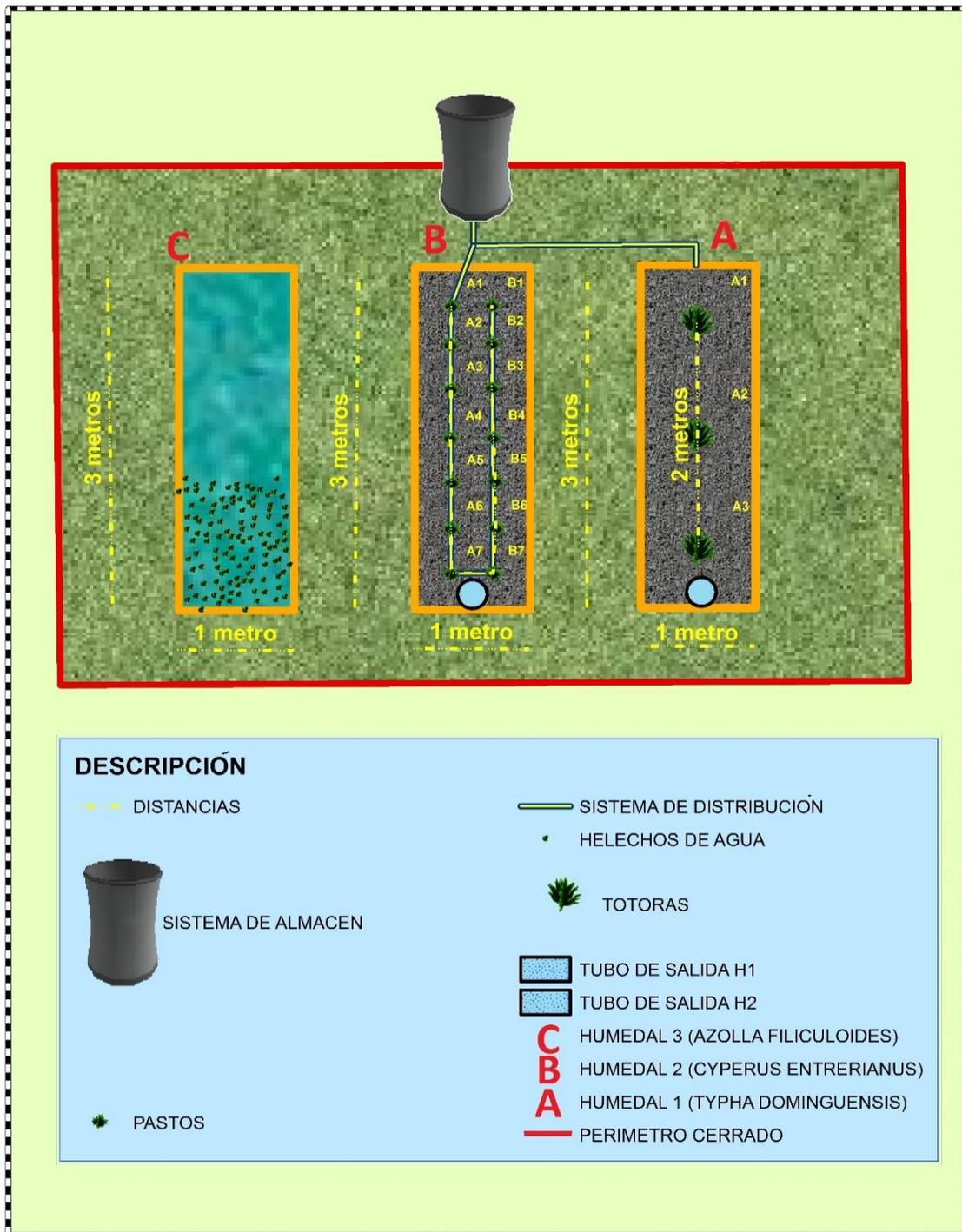
En el humedal número 3 (H3) se realizó la siembra de *Azolla filiculoides* (Azola, helecho de agua) usando un 30% del área de espejo de agua lo cual es aproximadamente 0,9 m² la siembra de esta especie fue la más sencilla

Imagen 8: Corte transversal de los humedales artificiales



Fuente: Elaboración propia

Imagen 9: Vista en planta de los humedales artificiales



Fuente: Elaboración propia

Para evitar el ingreso de animales o personas ajenas a la investigación se realizó el cerrado del perímetro con cuatro hilos de alambre de púa, dejando un espacio de 1,50 m para realizar todas las demás operaciones de control y toma de muestras.

- Durante el periodo inicial de adaptación, se buscó garantizar condiciones óptimas para el desarrollo de las macrófitas recién sembradas. En la primera semana posterior a la siembra, se optó por suministrar agua directamente del río cercano, trabajando con un total de 700 litros por cada humedal durante la primera semana en lugar de utilizar agua residual. Esta decisión se tomó con el objetivo de proporcionar a las plantas un entorno inicial exento de concentraciones elevadas de sustancias nocivas para las macrófitas, permitiendo que las mismas se aclimataran de manera efectiva a su nuevo hábitat, esto resultó fundamental para favorecer un proceso de adaptación exitoso.
- En el transcurso de la segunda semana, se realizó una dilución que implicó combinar 550 litros de agua proveniente del río, representando el 75% del total, con 175 litros de agua residual derivada de los reactores UASB, correspondientes al 25% restante. Esta estrategia se implementó con el objetivo de establecer una concentración específica que favoreciera las necesidades de las macrófitas.
- Mientras que en la tercera semana, se llevó a cabo una dilución de 350 litros de agua procedente del río, representando el 50% de la mezcla, con otros 350 litros de agua residual proveniente de los reactores UASB, constituyendo el restante 50% de la solución. Esta estrategia buscó mantener un equilibrio entre las características del agua del río y los elementos presentes en el agua residual de los reactores UASB. Esta concentración tiene por objetivo proporcionar a las macrófitas un entorno gradualmente desafiante, permitiendo una adaptación continua y optimizando las condiciones para su desarrollo saludable en el hábitat designado.
- En la cuarta semana del periodo de adaptación, se diluyeron 175 litros de agua

proveniente del río, representando el 25% de la mezcla, con 550 litros de agua residual proveniente de los reactores UASB, constituyendo el 75% restante. La dilución se implementó con el objetivo de introducir gradualmente el agua residual, aportando así una diversidad de nutrientes y sustancias beneficiosas para el desarrollo sostenido de las macrófitas.

- Por tanto, en la semana 5, se llevó a cabo la aplicación de 700 litros de aguas procedentes de los reactores UASB, representando la totalidad del contenido de agua residual, hacia los humedales artificiales, permitiendo que estos alcancen durante este periodo su eficiencia máxima.

2.7.2.4 Periodo de observación de la adaptación de las especies

Para la toma de datos de la adaptación alcanzada de cada especie se usó una cinta métrica y unas planillas en donde se registró el desarrollo de las hojas, raíces, tallos, nuevos brotes y el tamaño de la superficie alcanzada por la especie de *Azolla filiculoides*, también se registraron cambios importantes como la floración, cambios de coloración, engrosamiento del tallo, de igual manera fueron tomadas algunas fotografías de los cambios más importantes transcurridos durante las distintas etapas del funcionamiento de los humedales.

2.7.2.5 Funcionamiento del humedal al 100% de su capacidad

Una vez realizada toda la instalación, la siembra de las macrófitas y transcurrido el tiempo de adaptación de las plantas se puso en funcionamiento el humedal al 100 % de su capacidad, para la adecuada distribución del agua residual se usó un tinaco de 300 ℓ, el agua de los humedales fue renovada cada 7 d.

2.7.2.6 Toma de muestras y análisis de laboratorio inicial de las aguas residuales antes del tratamiento

Para la realización de la toma de muestra se usó la guía para la toma de muestras de agua residual. Esta publicación fue elaborada por el Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico (SENASBA) y aprobada por el Ministerio De Medio Ambiente Y Agua Del Estado Plurinacional De Bolivia (MMYA).

En la cual se siguieron los siguientes principios:

Lugar: elegir un lugar adecuado para tomar la muestra.

Para el primer muestro de aguas se seleccionó la salida de los reactores UASB debido a que en este lugar se tiene un agua residual muy bien mezclada, y no existe riesgo de que se toque las paredes con el muestreador para evitar que ingresen sedimentos, aumentando la concentración en los resultados.

Para el segundo muestreo fue seleccionada la salida de los humedales del 1 y 2 y para la toma de muestras del humedal tres se realizó de manera directa.

Tiempo: considerar el tiempo adecuado para tomar la muestra.

Todas las muestras fueron tomadas en horario de 7:30 am a 8:00 am evitando clima desfavorable como ser lluvia o llovizna

Frecuencia: tomar las muestras en la frecuencia adecuada.

En la primera etapa se realizó dos muestreos, El primer muestro en temporada de estiaje fue realizado en fecha 11 de octubre del 2022, para establecer los niveles iniciales antes del tratamiento usando los humedales artificiales, teniendo un tiempo de retención de 7 d, el segundo muestro fue en fechas 18 de octubre de la gestión 2022.

En la segunda etapa de igual manera fueron realizados dos muestreos, se realizó el primer muestro en fechas 17 de mayo del 2023 con un tiempo de retención de 7 d, el segundo muestro fue realizado en fechas 24 de mayo del 2023, estos no fueron tomados en las fechas previstas debido a un retraso en las labores de mantenimiento y adecuación por parte de la empresa a cargo, como así también errores en el uso de materiales de construcción en el quemador de gases de los reactores UASB, las muestras de la segunda etapa fueron tomadas durante una prueba de funcionamiento de los reactores.

Técnica: usar una técnica del muestreo adecuada.

En las dos etapas se realizaron la técnica de muestreos simples, por su facilidad y rapidez para determinar la composición en el instante que es tomada, además por que

no representa errores relativos de relevancia, además de que el agua no tenía alteraciones en cuanto a caudal y concentraciones debido a que no existen descargas inusuales y estas es constante.

Materiales usados:

- 1 conservadora.
- 8 botellas PET de dos litros etiquetadas.
- 8 frascos estériles etiquetados.
- 1 termómetro.
- bolsas de hielo.
- guantes de látex.
- 1 ℓ de agua destilada.
- 8 planillas para el registro de datos.
- 1 bolígrafo indeleble.
- 2 ℓ de agua destilada.

2.7.2.7 Procedimiento realizado:

Una vez identificadas los principios y técnica a utilizar se preparó todo:

- Colocado de guantes de látex
- Se colocó el hielo en la conservadora
- Se llenó la documentación necesaria para evidenciar el muestreo, al no proveer el laboratorio de las mismas se usó el proporcionado por la guía en su anexo que se adjunta a continuación. Ver **anexo 5**
- En la primera y segunda etapa del primer muestro del agua proveniente de los reactores UASB, antes de realizar el tratamiento con los humedales. Se procedió a sacar la muestra de agua usando 1 frasco esterilizado de 100 ml para la obtención de los parámetros bacteriológicos. Dejando en el interior un poco

de aire para evitar la muerte de los microorganismos. Seguidamente se enjuago la botella con el agua residual y se dejó llenar 1 botella PET de dos litros para el análisis físico-químico.

- En la primera y segunda etapa del segundo muestro del agua proveniente de los humedales artificiales, 7 d después del ingreso del agua residual se sacaron tres muestras usando tres frascos estériles de 100 ml, de la misma manera que en la primera etapa, pero ahora una para cada humedal, también fueron extraídas tres muestras para los parámetros físico-químico usando tres botellas PET de 2 ℓ para cada humedal.
- Se lleno las etiquetas de los recipientes debidamente con los datos necesarios junto con los formularios. Dichas etiquetas se anexan a continuación.
- Se refrigeró las muestras inmediatamente y fueron trasladadas hacia los laboratorios correspondientes.

Imagen 10: etiqueta colocada en las muestras

ETIQUETA MUESTRA DE AGUA		
RESPONSABLE:		
PROVINCIA:	PUNTO DE MUESTREO:	
MUNICIPIO:		
PTAR:		
FECHA DE MUESTREO:	HORA:	
CÓDIGO DE LA MUESTRA:		
TIPO DE MUESTREO:	PUNTUAL ()	COMPUESTO ()
VOLUMEN:		
ADICIONES (ACIDIFICACIÓN O CONSERVANTES):		
OBSERVACIONES:		

Fuente: Elaboración propia

2.7.3 Fase Postcampo

2.7.3.1 Crecimiento y adaptación de las especies seleccionadas

En la siguientes tablas se presenta los datos obtenidos a partir de las mediciones que iniciaron en la puesta en marcha el 22 de agosto del 2022 hasta el 24 de mayo de la gestión 2023, estos datos fueron obtenidos de forma semanal de manera periódica, dichas mediciones son de la longitud de las hojas, tallos, número de brotes nuevos, para la especie de azola se midió el área ocupada y una medición de la profundidad de las

raíces que se realizó en la etapa inicial y final para no perjudicar el desarrollo de las plantas, cada planta tiene su respectiva codificación para mejorar el control, también se usó las planillas para anotar observaciones y cambios en las macrófitas que se detallan a continuación.

2.7.3.1.1 Crecimiento del tallo del humedal 1

Tabla 2: Crecimiento (cm) de tallo humedal 1 (*Typha dominguensis*) totora

Fecha	H1-A	H1-B	H1-C	Media	Min	Max	varianza	desviación estándar	coeficiente de variación
22-ago-22	55,0	65,0	54,0	58,0	54,0	65,0	24,7	5,0	8,56
29-ago-22	55,0	65,0	54,0	58,0	54,0	65,0			
5-sep-22	55,9	65,4	54,6	58,6	54,6	65,4	555,8	23,6	52,17
12-sep-22	55,9	65,4	54,6	58,6	54,6	65,4			
19-sep-22	55,9	65,4	54,6	58,6	54,6	65,4			
26-sep-22	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	0,1	0,3	6,43
3-oct-22	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0			
10-oct-22	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0			
17-oct-22	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0			
24-oct-22	5,2	5,8	5,4	5,5	5,2	5,8			
31-oct-22	5,3	6,0	5,8	5,7	5,3	6,0	0,1	0,4	5,78
7-nov-22	7,0	6,3	6,2	6,5	6,2	7,0			
14-nov-22	7,0	6,6	6,3	6,6	6,3	7,0			
21-nov-22	7,3	6,6	6,3	6,7	6,3	7,3			
28-nov-22	7,5	6,6	6,5	6,8	6,5	7,5	0,5	0,7	9,64
5-dic-22	8,1	6,9	6,9	7,3	6,9	8,1			
12-dic-22	8,3	6,9	7,0	7,4	6,9	8,3			
19-dic-22	8,3	6,9	7,0	7,4	6,9	8,3			
26-dic-22	9,1	8,0	7,8	8,3	7,8	9,1	6,0	2,5	19,29
2-ene-23	10,1	9,2	9,2	9,5	9,2	10,1			
9-ene-23	12,2	11,2	11,2	11,5	11,2	12,2			

16-ene-23	14,6	11,2	11,2	12,3	11,2	14,6			
23-ene-23	16,4	13,4	13,7	14,5	13,4	16,4			
30-ene-23	17,1	15,5	14,5	15,7	14,5	17,1			
6-feb-23	17,4	15,8	14,7	15,9	14,7	17,4	1,2	1,1	6,52
13-feb-23	18,0	16,1	16,0	16,7	16,0	18,0			
20-feb-23	18,2	16,4	16,2	16,9	16,2	18,2			
27-feb-23	18,7	16,9	16,6	17,4	16,6	18,7			
6-mar-23	19,0	17,2	17,0	17,7	17,0	19,0	1,5	1,2	6,69
13-mar-23	19,3	17,4	17,2	18,0	17,2	19,3			
20-mar-23	20,1	17,8	17,5	18,5	17,5	20,1			
27-mar-23	20,9	18,0	17,7	18,9	17,7	20,9			
3-abr-23	21,5	18,0	17,9	19,1	17,9	21,5	3,7	1,9	10,00
10-abr-23	21,5	18,0	17,9	19,1	17,9	21,5			
17-abr-23	22,5	18,0	17,9	19,5	17,9	22,5			
24-abr-23	22,5	18,0	17,9	19,5	17,9	22,5			
1-may-23	22,5	18,0	17,9	19,5	17,9	22,5	4,6	2,1	11,02
8-may-23	22,5	18,0	17,9	19,5	17,9	22,5			
15-may-23	22,5	18,0	17,9	19,5	17,9	22,5			
24-may-23	22,5	18,0	17,9	19,5	17,9	22,5			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 1: Media del crecimiento de tallo humedal 1 (*Typha dominguensis*) totora (cm vs fecha)



En el gráfico 1 realizado a partir de las medias de la tabla 2 se puede observar que en fechas 22 de agosto del 2022 se realizó la siembra en donde el tamaño promedio de los tallos de la especie *Typha dominguensis* (totora) fue de 58 cm, la altura mínima de 54 cm y el de mayor longitud de 65 cm, el mayor coeficiente de variación se da en el mes septiembre, debido a la poda realizada para evitar la pudrición de la planta, la cual puede darse debido al cambio brusco de condiciones, donde se llegó a dejar una altura de 5 cm, desde ahí se puede observar un crecimiento continuo en los siguientes meses sin una variación muy marcada, excepto en el mes de enero en donde el crecimiento del tallo se acelera y a partir del mes de abril el crecimiento se detiene, el tallo no llegó a la altura que se encuentra en condiciones naturales, se adaptó al sustrato de grava disminuyendo su longitud considerablemente, el promedio final de la longitud del tallo fue 19,45 cm, con un máximo de 22,48 cm y un mínimo de 17,9 cm en fecha 24 de mayo del 2023.

2.7.3.1.2 Crecimiento del tallo del humedal 2

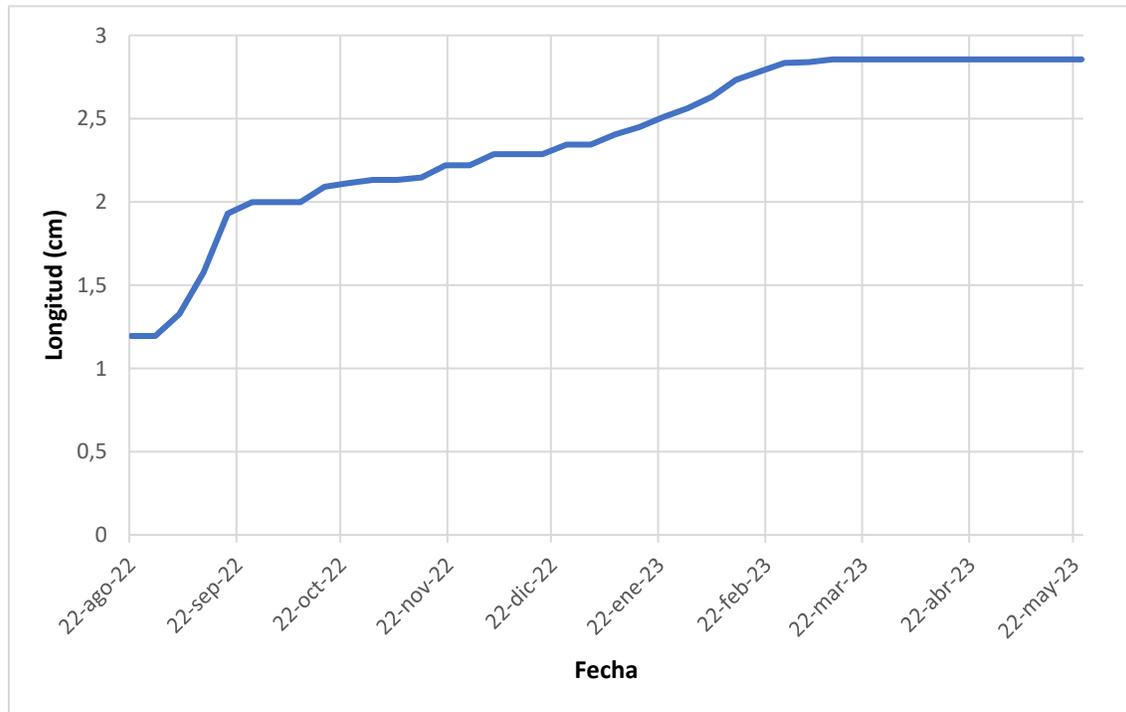
Tabla 3: Crecimiento de tallo humedal 2 (*Cyperus sp.*) pasto (cm)

Fecha	H2-A1	H2-A2	H2-A3	H2-A4	H2-A5	H2-A6	H2-A7	H2-B1	H2-B2	H2-B3	H2-B4	H2-B5	H2-B6	H2-B7	Media	Min	Max	varianza	desviación	coeficiente de variación
22-ago-22	1,2	0,8	1,5	1,3	1,6	1,2	1,4	1,5	1,1	0,8	0,8	1,0	1,3	1,3	1,2	0,8	1,6	0,1	0,3	22,98
29-ago-22	1,2	0,8	1,5	1,3	1,6	1,2	1,4	1,5	1,1	0,8	0,8	1,0	1,3	1,3	1,2	0,8	1,6			
5-sep-22	1,3	0,8	1,6	1,5	1,7	1,2	1,5	1,6	1,2	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3	1,3	0,8	1,7	0,1	0,3	19,32
12-sep-22	1,6	1,3	1,8	1,7	1,8	1,29	1,6	1,9	1,5	1,8	1,3	1,3	1,5	1,5	1,6	1,3	1,9			
19-sep-22	1,9	1,8	2,0	2,1	2,4	1,8	1,8	2,0	1,8	2,1	1,9	1,8	1,9	1,9	1,9	1,8	2,4			
26-sep-22	1,9	1,8	2,2	2,2	2,3	2,0	1,9	2,1	1,8	2,1	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	1,8	2,3			
3-oct-22	1,9	1,8	2,2	2,2	2,3	2,0	1,9	2,1	1,8	2,1	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	1,8	2,3	0,0	0,2	7,93
10-oct-22	1,9	1,8	2,2	2,2	2,3	2,0	1,9	2,1	1,8	2,1	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	1,8	2,3			
17-oct-22	2,0	1,9	2,3	2,4	2,4	2,1	1,9	2,1	2,0	2,2	2,0	2,0	2,1	2,0	2,1	1,9	2,4			
24-oct-22	2,1	2,0	2,3	2,5	2,4	2,1	1,9	2,2	2,0	2,2	2,0	2,0	2,1	2,0	2,1	1,9	2,5			
31-oct-22	2,1	2,0	2,4	2,5	2,4	2,1	2,1	2,2	2,0	2,2	2,0	2,0	2,1	2,0	2,1	2,0	2,5			
7-nov-22	2,1	2,0	2,4	2,5	2,4	2,1	2,1	2,2	2,0	2,2	2,0	2,0	2,1	2,0	2,1	2,0	2,5	0,0	0,2	8,05
14-nov-22	2,1	2,0	2,4	2,6	2,4	2,1	2,2	2,2	2,0	2,2	2,0	2,0	2,1	2,0	2,1	2,0	2,6			
21-nov-22	2,2	2,1	2,4	2,6	2,5	2,2	2,3	2,3	2,0	2,2	2,1	2,0	2,2	2,1	2,2	2,0	2,6			
28-nov-22	2,2	2,1	2,4	2,6	2,5	2,2	2,3	2,3	2,0	2,2	2,1	2,0	2,2	2,1	2,2	2,0	2,6			
5-dic-22	2,2	2,1	2,5	2,6	2,5	2,3	2,4	2,4	2,2	2,2	2,2	2,1	2,2	2,1	2,3	2,1	2,6	0,0	0,2	6,55
12-dic-22	2,2	2,1	2,5	2,6	2,5	2,3	2,4	2,4	2,2	2,2	2,2	2,1	2,2	2,1	2,3	2,1	2,6			
19-dic-22	2,2	2,1	2,5	2,6	2,5	2,3	2,4	2,4	2,2	2,2	2,2	2,1	2,2	2,1	2,3	2,1	2,6			
26-dic-22	2,4	2,3	2,5	2,6	2,5	2,3	2,5	2,4	2,2	2,2	2,4	2,2	2,3	2,1	2,3	2,1	2,6			
2-ene-23	2,4	2,3	2,5	2,6	2,5	2,3	2,5	2,4	2,2	2,2	2,4	2,2	2,3	2,1	2,3	2,1	2,6	0,0	0,1	5,66

9-ene-23	2,4	2,4	2,6	2,6	2,5	2,3	2,5	2,4	2,2	2,4	2,5	2,3	2,4	2,2	2,4	2,2	2,6			
16-ene-23	2,6	2,4	2,6	2,7	2,5	2,3	2,5	2,4	2,4	2,4	2,5	2,3	2,5	2,4	2,4	2,3	2,7			
23-ene-23	2,7	2,5	2,6	2,7	2,5	2,3	2,5	2,5	2,4	2,5	2,6	2,4	2,5	2,5	2,5	2,3	2,7			
30-ene-23	2,7	2,6	2,6	2,8	2,5	2,5	2,6	2,5	2,4	2,5	2,6	2,4	2,6	2,6	2,6	2,4	2,8			
6-feb-23	2,8	2,7	2,6	2,8	2,5	2,5	2,8	2,6	2,5	2,7	2,8	2,4	2,6	2,6	2,6	2,4	2,8			
13-feb-23	2,9	2,8	2,6	2,8	2,5	2,7	2,9	2,6	2,6	2,9	2,9	2,6	2,8	2,8	2,7	2,5	2,9	0,0	0,2	8,26
20-feb-23	3,0	2,9	2,6	2,8	2,5	2,8	3,0	2,6	2,6	2,9	3,1	2,7	2,8	2,8	2,8	2,5	3,1			
27-feb-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,0	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,8	2,5	3,2			
6-mar-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,0	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,8	2,5	3,2			
13-mar-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2	0,1	0,2	7,95
20-mar-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2			
27-mar-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2			
3-abr-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2			
10-abr-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2	0,1	0,2	8,11
17-abr-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2			
24-abr-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2			
1-may-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2			
8-may-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2	0,1	0,2	8,11
15-may-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2			
24-may-23	3,0	3,0	2,6	2,8	2,5	3,2	3,1	2,6	2,6	3,0	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	2,5	3,2			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2: Media de crecimiento de tallo humedal 2 (*Cyperus sp*) pasto (cm vs fecha)



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 2 realizado a partir de las medias de la tabla 3 se puede observar, que en fechas 22 de agosto del 2022 se realizó la siembra en donde el tamaño promedio de los tallos de la especie *Cyperus sp.* (pasto) fue de 1,2 cm la altura mínima de 0,8 cm y el de mayor longitud de 1,6 cm el mayor coeficiente de variación se da en el mes de agosto y septiembre, donde se consiguió un rápido desarrollo del tallo, luego el crecimiento es más uniforme, este crecimiento se redujo a finales del mes de febrero, terminando por detenerse en el mes de marzo, el promedio final de la longitud del tallo fue 2,9 cm con un máximo de 3,2 cm y un mínimo de 2,5 cm en fecha 24 de mayo del 2023.

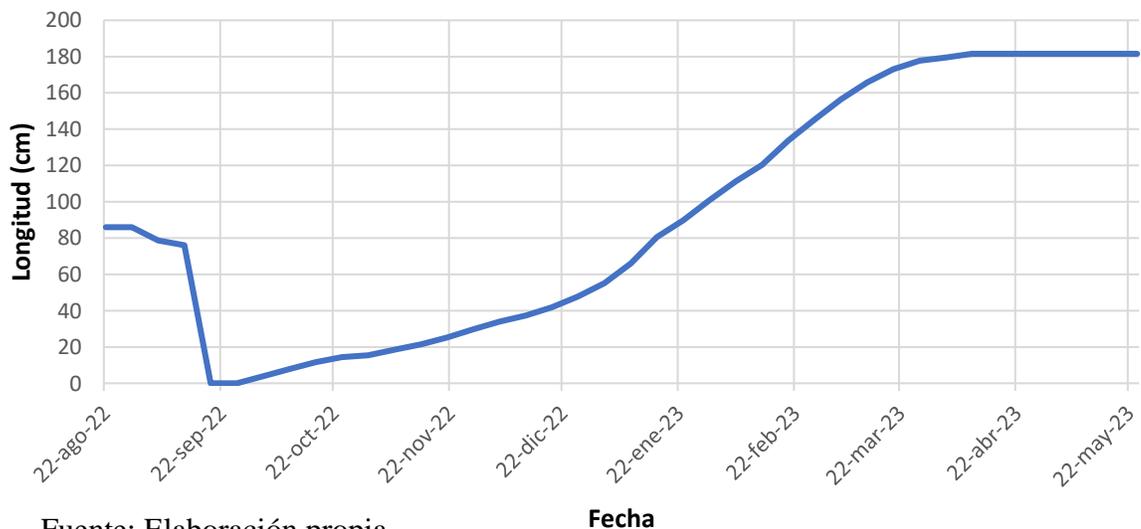
2.7.3.1.3 Crecimiento de las hojas del humedal 1 (*Typha domingensis*) totora (cm)

Fecha	H1-A	H1-B	H1-C	Media	Min	Max	varianza	desviación estándar	coeficiente de variación
22-ago-22	78,3	102,8	76,9	86,0	76,9	102,8			
29-ago-22	78,3	102,8	76,9	86,0	76,9	102,8	141,8	11,9	13,85
5-sep-22	65,5	98,5	72,3	78,7	65,5	98,5			
12-sep-22	60,2	95,5	72,3	76,0	60,2	95,5			
19-sep-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
26-sep-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1601,6	40,0	103,44
3-oct-22	3,5	4,5	3,9	3,9	3,5	4,5			
10-oct-22	8,4	7,2	7,9	7,9	7,2	8,4			
17-oct-22	12,1	11,2	11,5	11,6	11,2	12,1			
24-oct-22	15,2	13,9	14,3	14,5	13,9	15,2			
31-oct-22	17,2	14,0	15,2	15,5	14,0	17,2	18,8	4,3	40,65
7-nov-22	22,2	17,2	16,1	18,5	16,1	22,2			
14-nov-22	24,8	20,6	18,8	21,4	18,8	24,8			
21-nov-22	28,5	25,4	21,8	25,2	21,8	28,5			
28-nov-22	33,1	29,9	26,2	29,7	26,2	33,1	24,8	5,0	21,03
5-dic-22	38,0	34,1	30,0	34,0	30,0	38,0			
12-dic-22	41,2	37,8	33,2	37,4	33,2	41,2			
19-dic-22	46,3	41,1	38,1	41,9	38,1	46,3			
26-dic-22	52,0	47,2	44,3	47,8	44,3	52,0	37,4	6,1	15,19
2-ene-23	59,8	54,4	51,2	55,2	51,2	59,8			
9-ene-23	69,7	65,7	62,4	65,9	62,4	69,7			
16-ene-23	88,6	78,8	74,2	80,6	74,2	88,6			
23-ene-23	102,2	80,9	86,5	89,9	80,9	102,2			
30-ene-23	112,1	94,2	96,5	100,9	94,2	112,1	308,3	17,6	22,37
6-feb-23	123,1	104,6	106,2	111,3	104,6	123,1	269,4	16,4	12,85

13-feb-23	134,8	115,2	111,0	120,3	111,0	134,8			
20-feb-23	148,3	129,9	123,2	133,8	123,2	148,3			
27-feb-23	160,1	141,2	134,8	145,4	134,8	160,1			
6-mar-23	170,1	153,7	145,2	156,3	145,2	170,1			
13-mar-23	176,3	163,8	157,2	165,8	157,2	176,3			
20-mar-23	181,1	170,2	167,8	173,0	167,8	181,1			
27-mar-23	185,1	176,3	171,7	177,7	171,7	185,1	123,6	11,1	6,61
3-abr-23	185,1	180,1	173,1	179,4	173,1	185,1			
10-abr-23	185,1	183,3	176,2	181,6	176,2	185,1			
17-abr-23	185,1	183,3	176,2	181,6	176,2	185,1			
24-abr-23	185,1	183,3	176,2	181,6	176,2	185,1	17,9	4,2	2,34
1-may-23	185,1	183,3	176,2	181,6	176,2	185,1			
8-may-23	185,1	183,3	176,2	181,6	176,2	185,1			
15-may-23	185,1	183,3	176,2	181,6	176,2	185,1			
24-may-23	185,1	183,3	176,2	181,6	176,2	185,1	14,7	3,8	2,11

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3: Media de crecimiento de las hojas humedal 1 (*Typha dominguensis*) totora (cm vs fecha)



Fuente: Elaboración propia

fue de 86 cm, teniendo un mínimo de 76,9 cm y como longitud máxima de 102,8 cm el coeficiente de variación se mantiene bajo en el primer mes, reduce un poco debido

a que las hojas se secaron un poco en las puntas hasta el mes de agosto, luego de esto se empezaron a secar debido al cambio brusco de condiciones y se empezó a podrir el tallo desde la parte superior, el coeficiente de variación se ve muy elevado en el mes de septiembre debido a la poda realizada en donde se recortó de la hoja y parte del tallo, en el mes de octubre se puede observar un rápido crecimiento de las hojas, posteriormente el crecimiento de las hojas es más uniforme hasta el mes de marzo en donde llegaron a su máxima longitud, en los siguientes meses ya no se registró crecimiento de hojas, la longitud media final fue de 181,6 cm, la mínima de 176,2 cm y la altura máxima de 185,1 cm.

2.7.3.1.4 Crecimiento de las hojas del humedal 2

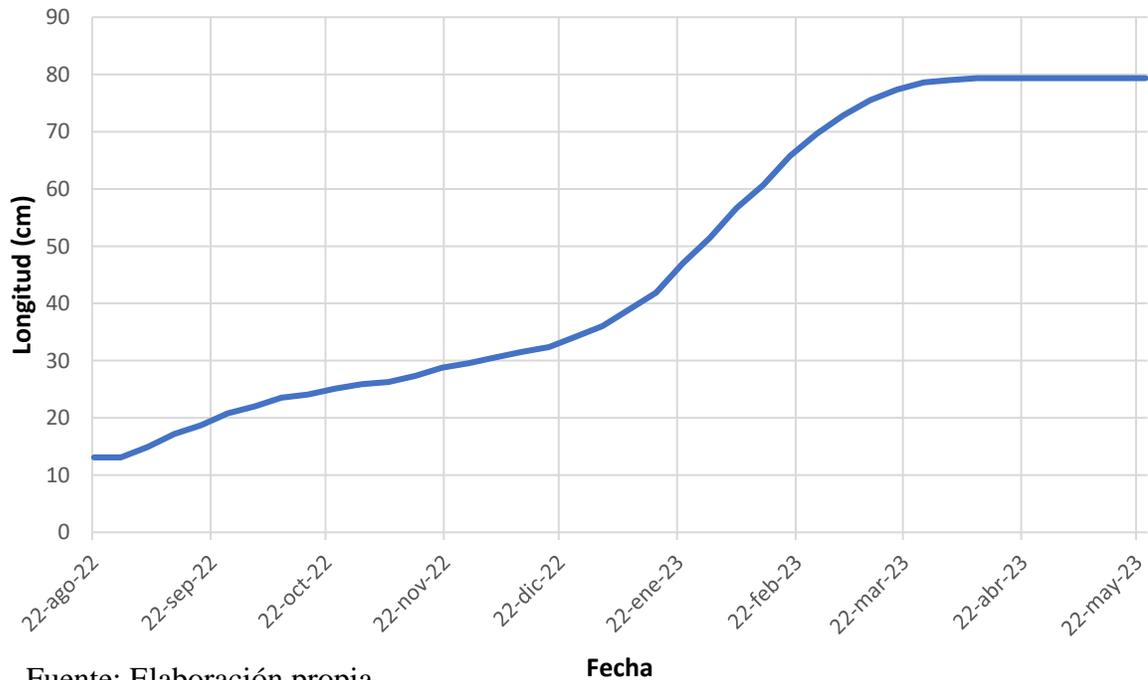
Tabla 5: Crecimiento de las hojas humedal 2 (*Cyperus sp*) pasto (cm)

Fecha	H2-A1	H2-A2	H2-A3	H2-A4	H2-A5	H2-A6	H2-A7	H2-B1	H2-B2	H2-B3	H2-B4	H2-B5	H2-B6	H2-B7	Media	Min	Max	varianza	desviación estándar	coeficiente de variación
22-ago-22	15,9	12,9	19,9	9,8	12,7	10,0	12,9	14,8	11,8	8,8	8,9	11,9	15,9	16,9	13,1	8,8	19,9	9,95	3,15	24,09
29-ago-22	15,9	12,9	19,9	9,8	12,7	10,0	12,9	14,8	11,8	8,8	8,9	11,9	15,9	16,9	13,1	8,8	19,9			
5-sep-22	18,2	15,4	20,5	10,8	15,7	11,9	15,4	16,8	13,5	10,0	10,1	13,2	18,0	19,1	14,9	10,0	20,5	12,43	3,53	19,68
12-sep-22	19,2	16,7	21,9	11,94	17,7	13,5	17,9	18,5	15,8	13,2	12,1	15,6	20,0	21,4	17,2	12,1	21,9			
19-sep-22	21,3	18,2	22,9	15,2	19,7	16,2	18,5	19,5	16,8	16,0	16,5	17,6	20,7	23,0	18,7	15,2	23,0			
26-sep-22	23,4	20,5	25,9	18,3	20,5	19,5	20,1	21,4	19,5	18,7	18,5	19,0	21,4	24,8	20,8	18,3	25,9			
3-oct-22	25,8	22,1	26,1	19,3	21,9	20,7	21,8	22,5	20,8	20,2	20,0	21,5	22,1	23,1	22,0	19,3	26,1	5,82	2,41	10,00
10-oct-22	27,9	24,1	27,0	21,3	22,8	21,9	23,0	23,8	21,9	22,5	21,7	22,9	24,1	24,8	23,6	21,3	27,9			
17-oct-22	28,1	25,1	27,5	22,1	23,1	22,0	23,5	24,8	22,3	23,1	22,2	23,1	24,9	25,3	24,1	22,0	28,1			
24-oct-22	30,2	25,9	28,5	23,1	23,1	22,5	25,8	25,4	23,5	24,0	23,8	24,1	25,3	26,2	25,1	22,5	30,2			
31-oct-22	31,1	26,0	29,7	24,2	25,1	22,5	26,3	26,4	23,9	26,4	23,8	24,1	25,9	26,9	25,9	22,5	31,1			
7-nov-22	32,4	26,1	30,9	24,6	27,1	22,5	23,1	27,4	24,0	28,5	23,8	24,1	26,0	27,4	26,3	22,5	32,4	9,75	3,12	11,16
14-nov-22	33,0	28,2	31,2	25,8	28,0	23,5	24,0	28,9	25,0	29,2	24,8	25,9	27,1	28,0	27,3	23,5	33,0			
21-nov-22	35,4	30,5	33,6	27,2	29,0	25,1	24,8	30,1	26,2	30,3	26,0	26,9	28,0	30,0	28,8	24,8	35,4			
28-nov-22	36,0	31,3	34,1	28,5	29,8	26,2	25,3	31,0	26,8	31,0	26,7	27,7	28,6	30,9	29,5	25,3	36,0			
5-dic-22	36,0	33,7	35,1	30,3	30,0	30,0	27,1	31,1	27,3	32,6	27,2	28,0	28,8	31,1	30,6	27,1	36,0	10,49	3,24	10,07
12-dic-22	38,5	33,8	35,1	30,9	30,4	30,4	31,7	31,7	27,9	34,3	27,9	28,0	29,1	32,0	31,5	27,9	38,5			
19-dic-22	39,8	34,3	36,2	31,0	30,9	31,1	33,9	32,1	29,1	35,2	28,2	28,7	30,2	32,5	32,4	28,2	39,8			
26-dic-22	41,3	35,9	37,1	32,6	31,3	32,0	36,2	33,5	31,8	37,5	31,7	29,8	33,1	34,6	34,2	29,8	41,3			
2-ene-23	44,2	37,3	38,4	35,5	32,8	33,0	39,2	34,9	33,2	38,0	34,5	30,3	36,6	37,1	36,1	30,3	44,2	47,06	6,86	15,93
9-ene-23	48,1	40,2	40,2	38,9	34,4	34,2	42,8	38,3	35,4	40,2	37,9	32,5	39,9	42,1	38,9	32,5	48,1			
16-ene-23	52,0	44,2	42,2	41,8	38,6	37,0	45,2	42,2	38,4	41,9	40,0	35,1	41,4	46,1	41,9	35,1	52,0			
23-ene-23	57,1	49,2	47,1	48,2	42,3	40,2	49,9	47,2	44,1	47,0	46,9	42,1	46,8	50,2	47,0	40,2	57,1			

30-ene-23	62,9	55,2	50,3	54,2	46,1	42,2	55,9	50,3	48,4	50,0	51,3	47,1	51,3	54,3	51,4	42,2	62,9			
6-feb-23	67,9	60,3	55,9	59,9	49,5	49,7	60,1	55,0	53,8	55,7	56,3	53,1	56,4	60,0	56,7	49,5	67,9	47,98	6,93	10,97
13-feb-23	72,5	65,3	60,1	64,2	53,0	54,3	64,1	58,3	57,7	60,1	60,8	55,6	60,0	63,9	60,7	53,0	72,5			
20-feb-23	77,9	70,7	66,1	69,3	58,3	59,8	69,3	63,2	62,7	65,5	64,3	59,2	64,8	68,8	65,7	58,3	77,9			
27-feb-23	80,3	76,2	69,2	74,2	63,2	63,1	72,2	66,9	66,3	70,0	68,7	62,8	69,4	72,1	69,6	62,8	80,3			
6-mar-23	84,2	79,7	69,5	77,5	66,9	65,2	76,3	69,3	69,3	73,4	73,2	65,4	74,2	76,3	72,9	65,2	84,2	42,86	6,55	8,61
13-mar-23	88,0	81,7	70,4	80,6	70,1	67,4	79,6	71,3	70,6	75,4	77,2	67,2	78,2	79,3	75,5	67,2	88,0			
20-mar-23	90,2	82,7	71,0	82,3	71,5	69,2	82,1	73,1	71,2	76,2	80,2	68,1	82,5	82,8	77,4	68,1	90,2			
27-mar-23	90,2	82,7	71,3	85,3	72,7	69,4	84,2	74,0	72,3	77,2	83,2	69,1	85,8	83,1	78,6	69,1	90,2			
3-abr-23	90,2	82,7	71,3	85,3	73,0	69,4	85,2	74,7	72,5	77,2	85,2	69,6	86,3	84,1	79,0	69,4	90,2	50,84	7,13	9,00
10-abr-23	90,2	82,7	71,3	85,3	73,6	69,4	86,5	74,7	72,5	77,2	86,0	69,6	87,8	84,3	79,3	69,4	90,2			
17-abr-23	90,2	82,7	71,3	85,3	73,6	69,4	86,5	74,7	72,5	77,2	86,0	69,6	87,8	84,3	79,3	69,4	90,2			
24-abr-23	90,2	82,7	71,3	85,3	73,6	69,4	86,5	74,7	72,5	77,2	86,0	69,6	87,8	84,3	79,3	69,4	90,2			
1-may-23	90,2	82,7	71,3	85,3	73,6	69,4	86,5	74,7	72,5	77,2	86,0	69,6	87,8	84,3	79,3	69,4	90,2	51,64	7,19	9,06
8-may-23	90,2	82,7	71,3	85,3	73,6	69,4	86,5	74,7	72,5	77,2	86,0	69,6	87,8	84,3	79,3	69,4	90,2			
15-may-23	90,2	82,7	71,3	85,3	73,6	69,4	86,5	74,7	72,5	77,2	86,0	69,6	87,8	84,3	79,3	69,4	90,2			
24-may-23	90,2	82,7	71,3	85,3	73,6	69,4	86,5	74,7	72,5	77,2	86,0	69,6	87,8	84,3	79,3	69,4	90,2			

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 4: Media de crecimiento de las hojas humedal 2 (*Cyperus sp*)
pasto (cm vs fecha)**



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4 realizado a partir de las medias de la tabla 5 se puede observar, que en la primera medición realizada en fecha 22 de agosto del 2022 el tamaño promedio de las hojas fue de 13,1 cm, teniendo un mínimo de 8,8 cm y como longitud máxima de 19,9 cm, el coeficiente de variación es elevado durante los dos primeros meses debido a las diferencias de longitud de los individuos, la cual a lo largo de los siguientes meses se normaliza e iguala, es en el mes de enero y febrero que se puede observar el mayor desarrollo de las hojas reflejado de igual manera en el coeficiente de variación, se alcanzó el máximo desarrollo de las hojas a finales del mes de marzo, la media final fue de 79,3 cm, la mínima y de 63,4 cm y la altura máxima de 90 cm.

2.7.3.1.5 Número de brotes del humedal 1

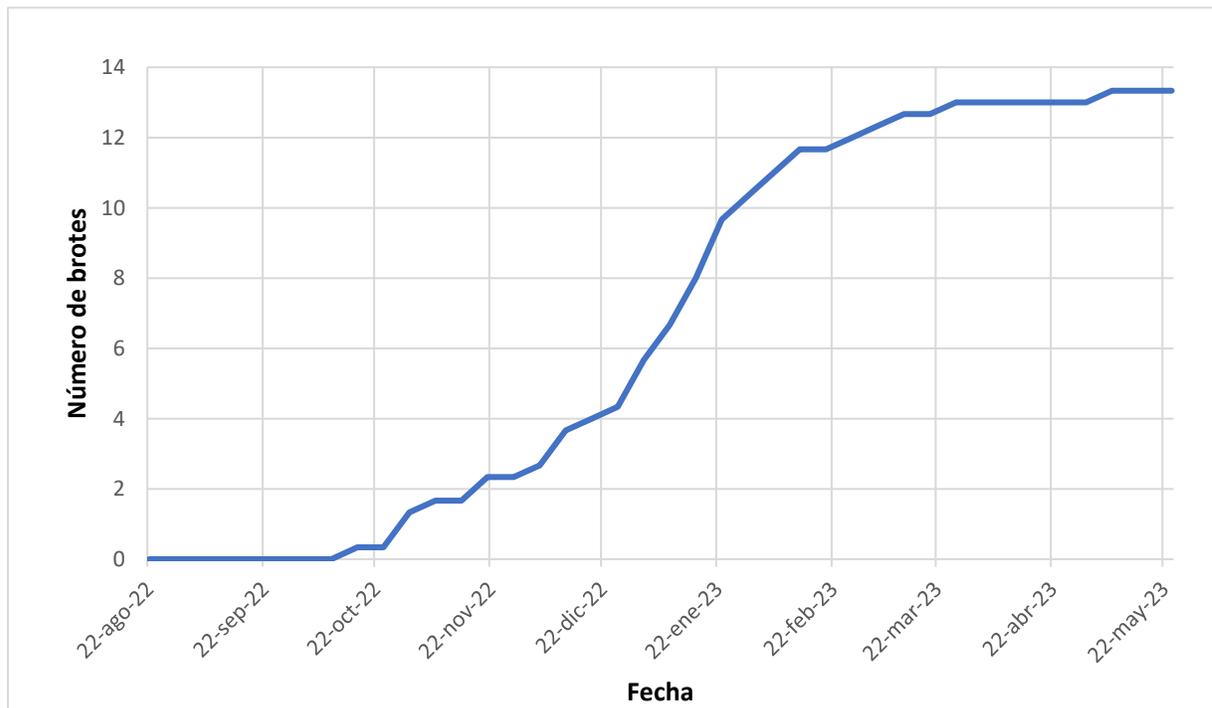
Tabla 6: Número de brotes humedal 1 (*Typha dominguensis*) totora

Fecha	H1-A	H1-B	H1-C	Media	Min	Max	varianza	desviación estándar	coeficiente de variación
22-ago-22	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	#¡DIV/0!
29-ago-22	0	0	0	0	0	0			
5-sep-22	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	#¡DIV/0!
12-sep-22	0	0	0	0	0	0			
19-sep-22	0	0	0	0	0	0			
26-sep-22	0	0	0	0	0	0			
3-oct-22	0	0	0	0	0	0	0,64	0,80	200,00
10-oct-22	0	0	0	0	0	0			
17-oct-22	0	1	0	0	0	1			
24-oct-22	0	1	0	0	0	1			
31-oct-22	1	3	0	1	0	3			
7-nov-22	1	3	1	2	1	3	0,67	0,82	40,82
14-nov-22	1	3	1	2	1	3			
21-nov-22	2	3	2	2	2	3			
28-nov-22	2	3	2	2	2	3			
5-dic-22	2	4	2	3	2	4	1,72	1,31	35,79
12-dic-22	3	5	3	4	3	5			
19-dic-22	3	6	3	4	3	6			
26-dic-22	4	6	3	4	3	6			
2-ene-23	6	7	4	6	4	7	4,86	2,21	27,34
9-ene-23	7	8	5	7	5	8			
16-ene-23	8	10	6	8	6	10			
23-ene-23	10	11	8	10	8	11			
30-ene-23	10	12	9	10	9	12			
6-feb-23	10	14	9	11	9	14	3,41	1,85	15,94
13-feb-23	11	14	10	12	10	14			
20-feb-23	11	14	10	12	10	14			
27-feb-23	12	14	10	12	10	14			
6-mar-23	13	14	10	12	10	14	3,56	1,89	14,89

13-mar-23	13	15	10	13	10	15			
20-mar-23	13	15	10	13	10	15			
27-mar-23	13	15	11	13	11	15			
3-abr-23	13	15	11	13	11	15	2,67	1,63	12,56
10-abr-23	13	15	11	13	11	15			
17-abr-23	13	15	11	13	11	15			
24-abr-23	13	15	11	13	11	15			
1-may-23	13	15	11	13	11	15	3,85	1,96	14,82
8-may-23	13	16	11	13	11	16			
15-may-23	13	16	11	13	11	16			
24-may-23	13	16	11	13	11	16			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5: Media del número de brotes humedal 1 (*Typha dominguensis*) totora (brotes vs fecha)



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 5 realizado a partir de las medias de la tabla 6 se puede observar, que el registro de los brotes inició al momento de la siembra el 22 de agosto del 2022, los

primeros brotes surgieron a finales del mes de octubre siendo este el mes con el mayor coeficiente de variación, los meses de mayor surgimiento de brotes fue de diciembre, enero y parte de febrero, en los meses posteriores se disminuyó el surgimiento de los mismos hasta el 24 de mayo del 2023, el promedio de brotes por planta fue de 13 con un mínimo de 11 y como máximo 16.

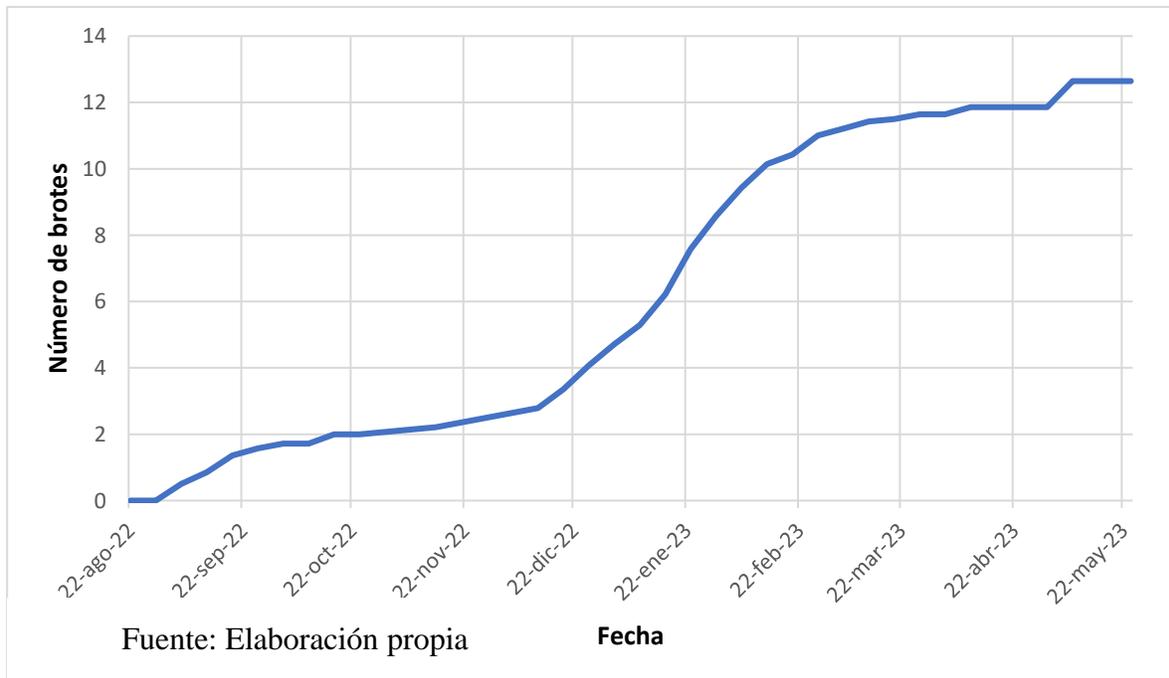
2.7.3.1.6 *Número de brotes del humedal 2*Tabla 7: Número de brotes del humedal 2 (*Cyperus sp*) pasto

Fecha	H2-A1	H2-A2	H2-A3	H2-A4	H2-A5	H2-A6	H2-A7	H2-B1	H2-B2	H2-B3	H2-B4	H2-B5	H2-B6	H2-B7	Media	Min	Max	varianza	desviación estándar	coeficiente de variación
22-ago-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	#¡DIV/0!
29-ago-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
5-sep-22	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0,60	0,78	72,42
12-sep-22	2	1	0	1	0	1	1	0	1	2	0	0	1	2	1	0	2			
19-sep-22	2	2	1	1	2	1	1	0	2	2	1	0	2	2	1	0	2			
26-sep-22	2	2	1	1	2	1	1	1	3	2	1	1	2	2	2	1	3			
3-oct-22	3	2	1	1	2	1	1	1	3	2	1	2	2	2	2	1	3	0,46	0,68	35,75
10-oct-22	3	2	1	1	2	1	1	1	3	2	1	2	2	2	2	1	3			
17-oct-22	3	2	1	2	2	1	2	1	3	2	2	2	2	3	2	1	3			
24-oct-22	3	2	1	2	2	1	2	1	3	2	2	2	2	3	2	1	3			
31-oct-22	3	2	2	2	2	1	2	1	3	2	2	2	2	3	2	1	3			
7-nov-22	3	2	2	2	3	1	2	1	3	2	2	2	2	3	2	1	3	0,39	0,62	27,11
14-nov-22	3	2	3	2	3	1	2	1	3	2	2	2	2	3	2	1	3			
21-nov-22	3	2	3	3	3	2	2	1	3	2	2	2	2	3	2	1	3			
28-nov-22	3	2	3	3	3	2	2	2	3	2	2	3	2	3	3	2	3			
5-dic-22	3	2	4	3	3	3	2	2	3	2	2	3	2	3	3	2	4	1,10	1,05	32,58
12-dic-22	3	2	5	3	3	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	2	5			
19-dic-22	4	5	5	4	5	4	2	2	3	2	2	3	3	3	3	2	5			

26-dic-22	4	5	5	6	5	4	3	3	3	3	4	3	5	4	4	3	6			
2-ene-23	5	5	6	6	7	4	3	5	3	3	5	3	6	5	5	3	7	4,91	2,22	34,23
9-ene-23	6	6	6	6	7	4	6	5	3	3	7	3	7	5	5	3	7			
16-ene-23	8	7	8	6	8	4	9	5	5	4	7	4	7	5	6	4	9			
23-ene-23	9	10	8	8	8	6	10	8	7	5	10	4	8	5	8	4	10			
30-ene-23	10	12	8	10	9	8	10	11	8	6	10	4	8	6	9	4	12			
6-feb-23	11	13	8	12	9	8	11	13	10	6	12	5	8	6	9	5	13	8,04	3,05	29,72
13-feb-23	12	13	10	12	10	9	11	15	10	7	13	5	9	6	10	5	15			
20-feb-23	12	13	10	12	10	10	11	16	10	7	14	6	9	6	10	6	16			
27-feb-23	13	14	10	12	13	10	13	16	10	7	14	6	10	6	11	6	16			
6-mar-23	13	14	10	13	13	10	13	17	10	7	14	6	10	7	11	6	17	9,28	3,05	26,62
13-mar-23	13	14	10	14	13	10	13	17	11	7	14	6	10	8	11	6	17			
20-mar-23	13	14	10	14	13	10	13	18	11	7	14	6	10	8	12	6	18			
27-mar-23	13	14	10	14	13	11	13	18	11	7	14	7	10	8	12	7	18			
3-abr-23	13	14	10	14	13	11	13	18	11	7	14	7	10	8	12	7	18	8,55	2,92	24,77
10-abr-23	14	14	11	14	13	11	13	18	11	8	14	7	10	8	12	7	18			
17-abr-23	14	14	11	14	13	11	13	18	11	8	14	7	10	8	12	7	18			
24-abr-23	14	14	11	14	13	11	13	18	11	8	14	7	10	8	12	7	18			
1-may-23	14	14	11	14	13	11	13	18	11	8	14	7	10	8	12	7	18	8,60	2,93	23,57
8-may-23	15	16	11	14	13	12	14	18	12	9	16	9	10	8	13	8	18			
15-may-23	15	16	11	14	13	12	14	18	12	9	16	9	10	8	13	8	18			
24-may-23	15	16	11	14	13	12	14	18	12	9	16	9	10	8	13	8	18			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 6: Media del número de brotes del humedal 2 (*Cyperus sp*) pasto (cm vs fecha)



En el gráfico 6 realizado a partir de las medias de la tabla 7 se puede observar, que el registro de los brotes inició al momento de la siembra el 22 de agosto del 2022, los primeros brotes surgieron en las primeras semanas del mes de septiembre siendo este el mes con el mayor coeficiente de variación, los meses de mayor surgimiento de brotes fueron de diciembre, enero y parte de febrero, en los meses posteriores se disminuyó el surgimiento de los mismos, siendo el último a finales de marzo, pero el registro fue llevado hasta el 24 de mayo del 2023, el promedio de brotes por planta fue de 13 con un mínimo de 8 y como máximo 18.

2.7.3.1.7 Área ocupada por Azola en el humedal 3

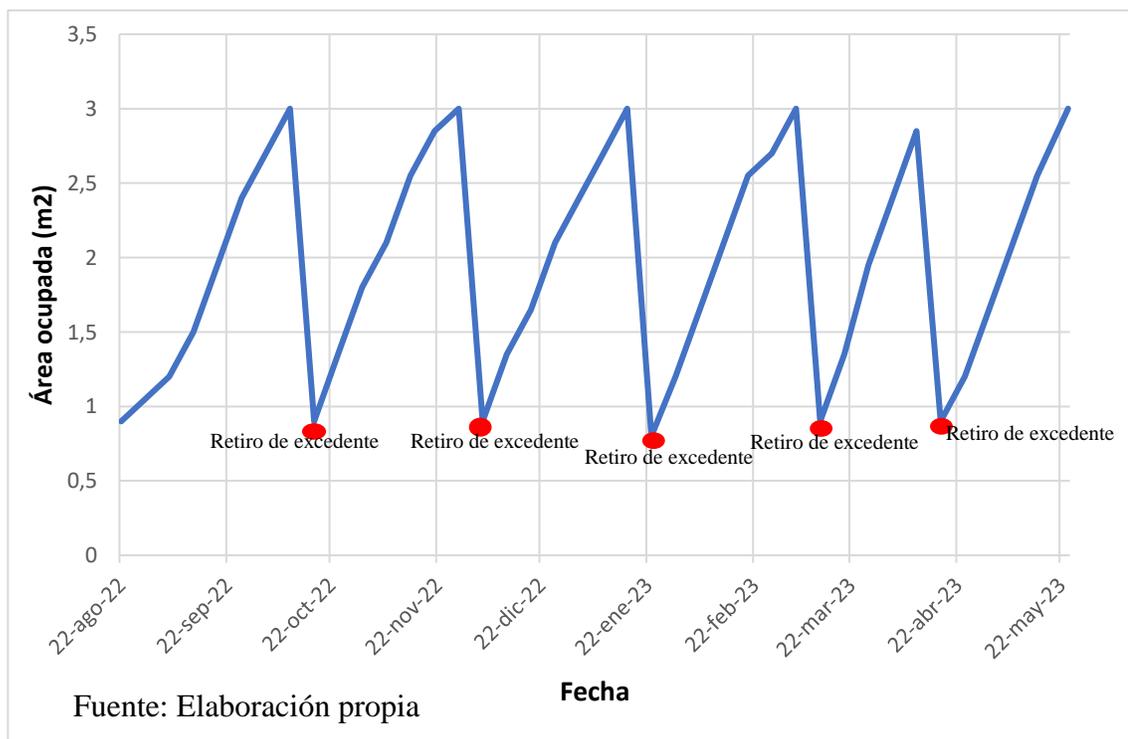
Tabla 8: Área ocupada del humedal 3 (*azolla filiculoides*) (m²)

Fecha	H3-area ocupada	%	retiro de excedente	varianza	desviación estándar	coeficiente de variación
22-ago-22	0,9	30		0,56	0,75	40,56
29-ago-22	1,05	35				
5-sep-22	1,2	40				
12-sep-22	1,5	50				
19-sep-22	1,95	65				
26-sep-22	2,4	80				
3-oct-22	2,7	90				
10-oct-22	3	100	x			
17-oct-22	0,9	30		0,52	0,72	34,81
24-oct-22	1,35	45				
31-oct-22	1,8	60				
7-nov-22	2,1	70				
14-nov-22	2,55	85				
21-nov-22	2,85	95				
28-nov-22	3	100	x			
5-dic-22	0,9	30		0,49	0,70	34,67
12-dic-22	1,35	45				
19-dic-22	1,65	55				
26-dic-22	2,1	70				
2-ene-23	2,4	80				
9-ene-23	2,7	90				
16-ene-23	3	100	x			
23-ene-23	0,9	30		0,54	0,73	36,45
30-ene-23	1,2	40				
6-feb-23	1,65	55				
13-feb-23	2,1	70				
20-feb-23	2,55	85				
27-feb-23	2,7	90				
6-mar-23	3	100	x			

13-mar-23	0,9	30		0,49	0,70	37,09
20-mar-23	1,35	45				
27-mar-23	1,95	65				
3-abr-23	2,4	80				
10-abr-23	2,85	95	x			
17-abr-23	0,9	30		0,54	0,73	38,59
24-abr-23	1,2	40				
1-may-23	1,65	55				
8-may-23	2,1	70				
15-may-23	2,55	85				
24-may-23	3	100	x			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7: Media del área ocupada del humedal 3 (*Azolla filiculoides*) (m² vs fecha)



En el gráfico 7 realizado a partir de las medias de la tabla 8 se puede observar, que el registro inició el 22 de agosto del 2022, las medidas consideradas son de área, debido

a que estas plantas son demasiado pequeñas para tomar las medidas por separado, con lo cual no se consideró el tamaño de tallo ni de las hojas, se inició con 0,9 m² que fueron colocados en el humedal número tres, aproximadamente un 30% del área del humedal, el mayor coeficiente de variación fue registrado desde agosto a inicios de octubre, donde se tomó en cuenta al realizar los coeficientes de variación hasta el momento de hacer el retiro del excedente, cuando el humedal se encontraba cubierto al 100% por las plantas, estos en general son similares sin ninguna alteración de gran importancia, el primer retiro del excedente, fue en fecha 10 de octubre del 2022, el segundo se realizó en fecha 28 de noviembre del 2022, el tercero lo hicimos el 16 de enero de 2023, el cuarto retiro de excedente tuvo lugar el 6 de marzo de 2022, seguido por el quinto el 10 de abril de 2023, y culminando con el retiro final en fecha 24 de mayo, en cada una de las limpiezas de excedente se retiró aproximadamente el 70% de las plantas simulando lo que se debería de hacer en un humedal artificial de este tipo, para llegar a repoblarse por completo le toma aproximadamente un mes y medio (49 d).

2.7.3.1.8 Desarrollo de la raíz del humedal 1 (*Typha dominguensis*)

tabla 9: Desarrollo de la raíz del humedal 1 (cm)

Fecha	H1-A	H1-B	H1-C	Media	Min	Max
22-ago-22	15,5	17,3	16,8	16,5	15,5	17,3
24-may-23	50,2	55,7	54,1	53,3	50,2	55,7

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla número 9, la medición inicial fue tomada al momento de la siembra el 22 de agosto del 2022, teniendo un promedio de 16,5 cm de longitud, la mínima de 15,4 cm y la máxima de 17,3 cm, no se tomaron más mediciones debido a que al extraer las plantas esto podría perjudicar el desarrollo de las mismas, la medición final fue tomada el 24 de mayo del 2023, del cual se obtuvo una media de 53,3 cm, la mínima de 50,2 y la máxima de 55,7 cm, cabe destacar que las raíces llegaron hasta el fondo del humedal y estas se esparcieron a lo largo de todo el humedal, al excavar para determinar la longitud la mayoría de estas se cortó debido a su fragilidad, con lo cual su longitud puede llegar a ser un poco mayor a la registrada.

2.7.3.1.9 *Desarrollo de la raíz del humedal 2 (Cyperus sp)*

tabla 10: Desarrollo de la raíz del humedal 2 (cm)

Fecha	H2-A1	H2-A2	H2-A3	H2-A4	H2-A5	H2-A6	H2-A7	H2-B1	H2-B2	H2-B3	H2-B4	H2-B5	H2-B6	H2-B7	Media	Min	Max
22-ago-22	15,5	17,3	16,8	5,4	5,6	6,3	4,3	5,2	4,1	5,8	5,3	5,8	3,8	3,9	7,5	3,8	17,3
24-may-23	50,2	55,7	54,1	40,2	43,8	46,7	40,9	42,3	42,0	43,0	45,1	44,5	46,3	37,9	45,2	37,9	55,7

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 10, se tomó una medida inicial de las raíces el 22 de agosto de 2022 al momento de la siembra, de los cuales se obtuvo un promedio de 7,5 cm de longitud, con un mínimo de 3,8 cm y de máximo 17,3 cm. De igual manera solo fueron tomadas dos mediciones para no interferir en el desarrollo de las plantas, una al momento de la siembra y otra al final de la experimentación, la última medición fue tomada el 24 de mayo de 2023, del cual se obtuvo una media de 45,2 cm, como mínimo 37,9 cm, y un máximo de 55,7 cm, las raíces llegaron hasta el fondo del humedal pero en menor medida que las raíces de totora, la longitud de estas puede ser un poco mayor a la registrada, debido a que al extraer para realizar las mediciones se cortaron debido a la dificultad para extraer del sustrato de grava y la fragilidad de las raíces.

2.7.3.1.10 *Desarrollo de la raíz del humedal 3 (Azolla filiculoides)*

Tabla 10: Desarrollo de la raíz del humedal 3

Fecha	H3
22-ago-22	3-5 cm
24-may-23	3-5 cm

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla número 10, la medición de las raíces de *Azolla filiculoides* fueron tomadas al momento de la introducción al humedal, en fechas 22 de agosto del 2022, estas presentaban una variación que llegaba de los 3 cm a 5 cm, no se tomaron más mediciones debido a la uniformidad de todas estas, en fecha 24 de mayo del 2023, se

tomó de nuevo la longitud la cual no tuvo variaciones en longitud encontrándose dentro del rango de 3 cm a 5 cm.

2.7.3.1.11 Cambios y observaciones en el humedal 1

El 22 de agosto al momento de la siembra las plantas se encontraban en óptimas condiciones sin ninguna anomalía, el 29 de agosto estas presentaban hojas secas pudiendo ser el causante el estrés por el nuevo medio, el 5 de septiembre las hojas se resquebrajaron y hubo pérdida de pedazos de las hojas, el 19 de septiembre se nota pudrición de la parte superior a inferior en el tallo, el 26 de septiembre se realizó una poda preventiva para evitar la pudrición total del tallo y de las raíces, se dejó 5 cm de tallo en cada una de las plantas, en los meses siguientes solo se observó el crecimiento de las plantas sin ningún otro cambio de importancia hasta el 16 de enero en donde se notó el engrosamiento del tallo en cada uno de los individuos, otro cambio de gran importancia, es el inicio de la formación de la flor que inició en el 13 de febrero, las flores maduraron a finales del mes de mayo del 2023 con un total de 5 flores al terminar el seguimiento de las mismas.

2.7.3.1.12 Cambios y observaciones en el humedal 2

El 22 de agosto antes de realizar la siembra la mayoría de las plantas presentaban parte de sus hojas secas, debido a la falta de agua por la temporada, en la observación del 29 de agosto estas lograron recuperarse siendo unas pocas con parte de las hojas secas, mientras que en fecha 5 de septiembre solo una de las plantas aún tenía parte de sus hojas secas, señalamos también que en fecha 12 de septiembre se produjo una helada la cual no causó daños en las macrófitas, habiendo realizado una observación el 19 de septiembre donde se pudo apreciar que todas las hojas se encontraban verdes y en perfectas condiciones, las plantas tuvieron un desarrollo normal sin ningún cambio ni alteración hasta el 2 de enero en donde se empezaron a formar las flores, en fecha 23 de enero todos los individuos ya presentaron sus respectivas flores, las mismas maduraron aproximadamente en el mes de abril, enfatizamos también que los brotes nuevos de igual manera florecieron teniendo un promedio de 5 flores por cada individuo sembrado inicialmente.

2.7.3.1.13 Cambios y observaciones en el humedal 3

Al realizar la siembra en fechas 22 de agosto las plantas presentaban y una coloración muy verdosa en sus hojas, ya en el 5 de septiembre se notó una leve coloración de color rojiza y estas se habían aumentado el área de cobertura ocupada en el humedal en muy poco tiempo, el 3 de octubre del 2022 se realizó la primera limpieza del excedente, en este se pudo observar que ya se encontraban desarrollándose organismos acuáticos, también se pudo evidenciar que algunos roedores cayeron al humedal y estos no pudieron salir del mismo siendo su retiro paulatinamente. La siguiente limpieza del excedente fue realizada en fecha 28 de noviembre del 2022, en el control del 19 de diciembre se pudo notar que la coloración se tornaba un poco más verdosa que los meses anteriores la cual se mantuvo hasta el final, por tanto la tercera limpieza fue realizada el 16 de enero del 2023, mientras que la cuarta limpieza fue el 6 de marzo del 2023, la quinta actividad lo hicimos en fecha 10 de abril, y como último retiro de excedentes se llevó a efecto el 24 de mayo, durante el crecimiento no se presentaron dificultades, excepto durante ocasiones esporádicas en donde las algas se propagaban rápidamente, no se logró notar que esto interfiriera en el desarrollo de *Azolla filiculoides*.

2.7.3.2 Interpretación y análisis de los resultados obtenidos del laboratorio

Cálculo de porcentaje de disminución de los contaminantes

Para el cálculo del porcentaje de la disminución de contaminantes se usó la siguiente fórmula:

$$R = \frac{X_1 - X_2}{X_1} * 100\%$$

Donde:

R: Porcentaje de disminución del parámetro X

X1: Valor del parámetro X antes del tratamiento

X2: Valor del parámetro X después del proceso de tratamiento

2.7.3.2.1 Disminución 1 de DBO₅ humedal 1

$$R = \frac{45\text{mg}/\ell - 10,9\text{mg}/\ell}{45\text{mg}/\ell} * 100\%$$

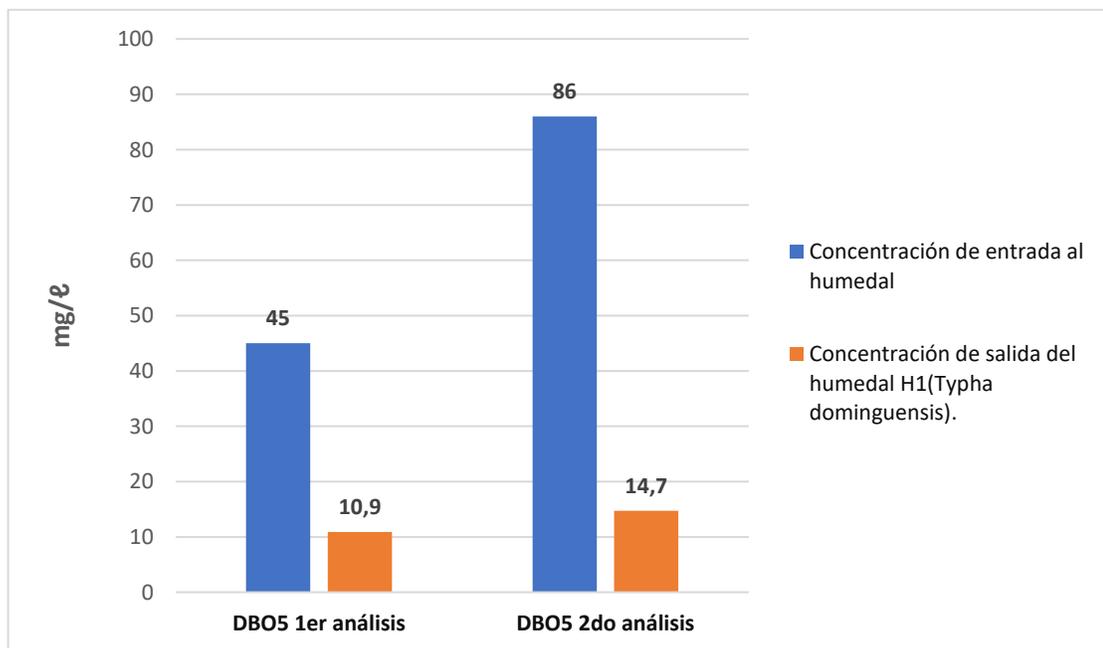
$$R = 75,78\%$$

2.7.3.2.2 Disminución 2 de DBO₅ humedal 1

$$R = \frac{86\text{mg}/\ell - 14,7\text{mg}/\ell}{86\text{mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 82,91 \%$$

Gráfico 8: Niveles de concentración de DBO₅ del humedal 1 (mg/ℓ)



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 8 elaborado con los datos obtenidos en laboratorios se puede notar que, durante la primera etapa, el agua residual proveniente de los reactores UASB con concentración de DBO₅ fue de 45 mg/ℓ, pasados los 7 d. de tiempo de retención se redujo hasta 19,9 mg/ℓ, logrando una remoción del 75,7%, usando la especie *Typha domingensis* (totora).

En la segunda etapa el agua residual presenta una mayor carga de DBO₅ debido a que los reactores no se encontraban en condiciones ideales de funcionamiento, el agua

proveniente de los mismos contenía 86 mg/ℓ, el humedal 1 logró reducir a 14,7 mg/ℓ en 7 d. logrando una remoción del 82,907%.

La disminución de DBO₅ es positiva y demuestra que el proceso de tratamiento de aguas residuales está cumpliendo su función al reducir la contaminación orgánica de excelente manera, de acuerdo a las remociones logradas. Los niveles de DBO₅ son muy elevados en la entrada del humedal teniendo en cuenta que los valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores son de 30 mg/ℓ. En las dos etapas se logró estar por debajo de estos valores, cumpliendo así con la normativa vigente.

2.7.3.2.3 Disminución 1 de DBO₅ humedal 2

$$R = \frac{45\text{mg}/\ell - 11,5\text{mg}/\ell}{45\text{mg}/\ell} * 100\%$$

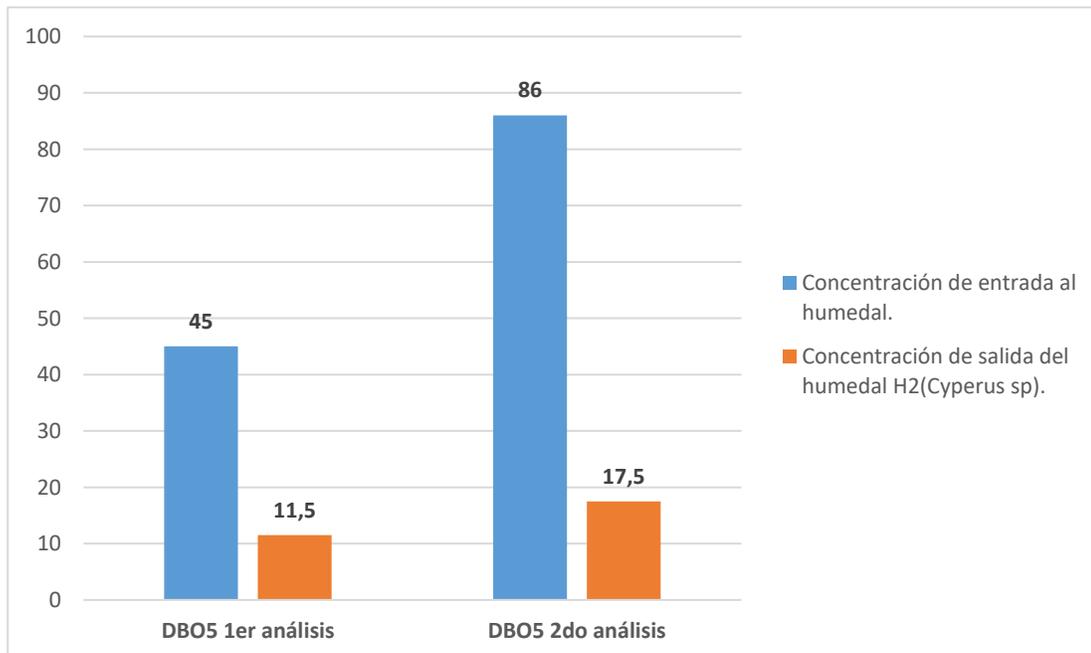
$$R = 74,44\%$$

2.7.3.2.4 Disminución 2 de DBO₅ humedal 2

$$R = \frac{86\text{mg}/\ell - 17,5\text{mg}/\ell}{86\text{mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 79,65 \%$$

Gráfico 9: Niveles de concentración de DBO₅ del humedal 2 (mg/ℓ)



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 9 elaborado con los datos obtenidos en laboratorios se puede notar, que durante la primera etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB con concentración de DBO_5 fue de $45 \text{ mg}/\ell$, pasados los 7 d, de tiempo de retención se redujo hasta $11,5 \text{ mg}/\ell$, logrando una remoción del $74,44\%$, usando *Cyperus sp* (pasto), esta remoción es casi igual a la lograda con el humedal 1.

En la segunda etapa el agua residual presenta una mayor carga de DBO_5 debido a que los reactores no se encontraban en condiciones ideales de funcionamiento, el agua proveniente de los mismos contenía $86 \text{ mg}/\ell$, el humedal 2 logró reducir a $17,5 \text{ mg}/\ell$ en 7 d, logrando una remoción del $79,65 \%$, un poco menor a la lograda por el humedal 1.

La disminución de DBO_5 es positiva y demuestra que el proceso de tratamiento de aguas residuales está cumpliendo su función al reducir la contaminación orgánica en el agua residual. Los niveles de DBO_5 son muy elevados en la entrada del humedal teniendo en cuenta que los valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores son de $30 \text{ mg}/\ell$. En las dos etapas se logró estar por debajo de estos valores, cumpliendo así con la normativa vigente.

2.7.3.2.5 *Aumento 1 de DBO_5 humedal 3*

$$R = \frac{45 \text{ mg}/\ell - 71,2 \text{ mg}/\ell}{45 \text{ mg}/\ell} * 100\%$$

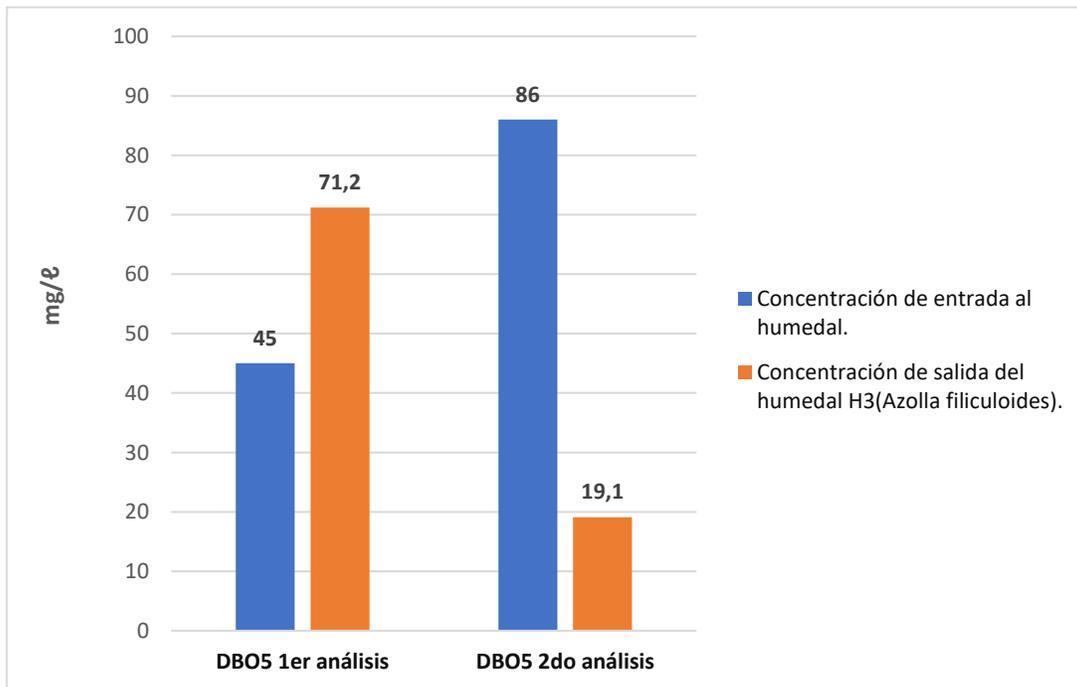
$$R = -58 \%$$

2.7.3.2.6 *Disminución 2 de DBO_5 humedal 3*

$$R = \frac{86 \text{ mg}/\ell - 19,1 \text{ mg}/\ell}{86 \text{ mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 77,79 \%$$

Gráfico 10: Niveles de concentración de DBO₅ del humedal 3 (mg/ℓ)



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 10 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se puede notar que en la primera etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentó una concentración de DBO₅ de 45 mg/ℓ, pasados los 7 d. de retención se aumentó el DBO₅ hasta 71,2 mg/ℓ, este aumento fue del 58 %, hay que destacar que este humedal al momento de tomar esta segunda muestra presentaba una coloración verdosa debido al crecimiento excesivo de algas las cuales pudieron interferir en el proceso de remoción de DBO₅, estos resultados fueron obtenidos del humedal 3 en donde se usó *Azolla filiculoides* (helecho de agua, azola).

En la segunda etapa el agua residual presentó una mayor carga de DBO₅ debido a que los reactores no se encontraban en condiciones ideales de funcionamiento, el agua proveniente de los mismos contenía 86 mg/ℓ, el humedal 2 logró reducir a 19,1 mg/ℓ en 7 d. logrando una remoción del 77,79 %, durante los 7 d. de tiempo de retención, no se logró observar la presencia de algas.

El aumento de DBO₅ es negativo durante la primera etapa, y demuestra que el proceso de tratamiento de aguas residuales no estaba cumpliendo su función. Si bien los valores

máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores son de 30 mg/ℓ, durante la primera etapa en la salida del humedal, este se encontraba muy por encima de estos valores, en la segunda etapa ya sin la proliferación de algas se logró dar cumplimiento con la normativa vigente.

2.7.3.2.7 *Disminución de Nitrógeno Total humedal 1*

$$R = \frac{50,7\text{mg}/\ell - 7,1\text{mg}/\ell}{50,7\text{mg}/\ell} * 100\%$$

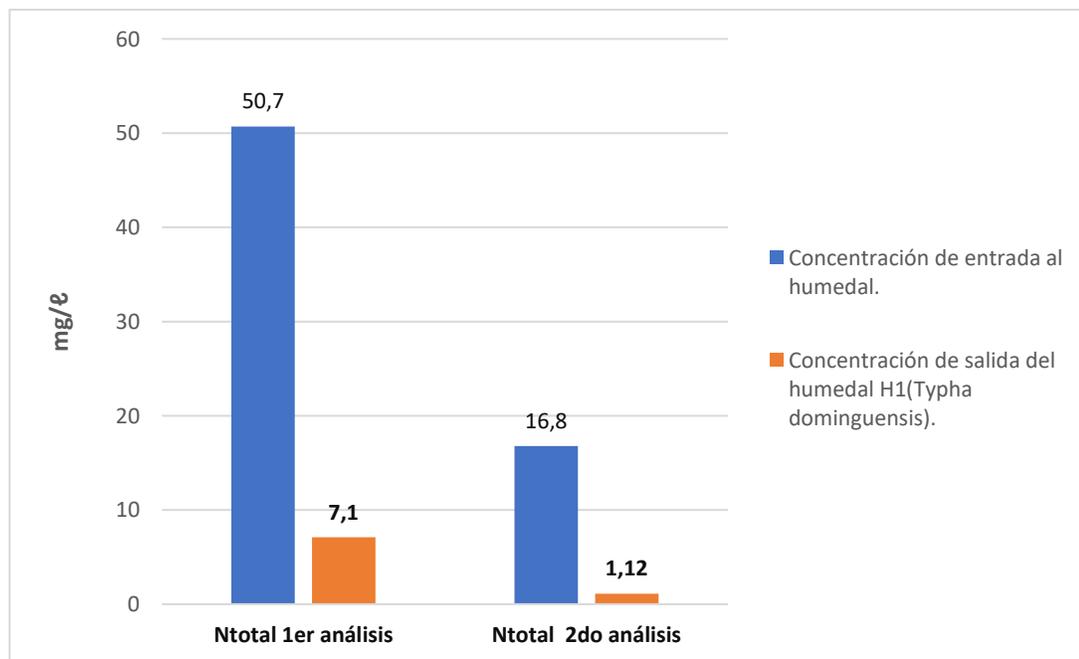
$$R = 85,99 \%$$

2.7.3.2.8 *Disminución de Nitrógeno Total humedal 1*

$$R = \frac{16,80\text{mg}/\ell - 1,12\text{mg}/\ell}{16,80\text{mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 93,33 \%$$

Gráfico 11: Niveles de concentración de N total del humedal 1 (mg/ℓ)



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 11 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se nota que durante la primera etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentaba una concentración de Nitrógeno Total de 50,7 mg/ℓ, pasados los 7 d. de tiempo de retención

se logró una reducir hasta 7,1 mg/ℓ, la remoción lograda fue del 85,99 % usando el humedal 1 con la especie *Thypa dominguensis*.

En la segunda etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentó una concentración menor de nitrógeno total pudiendo esto deberse al que estos no se encontraban en sus condiciones ideales, la concentración fue de 16,80 mg/ℓ y transcurridos los 7 d se obtuvo 1,12 mg/ℓ alcanzando una remoción del 93,33%, con el humedal 1 con la especie *Thypa dominguensis*.

Las remociones de nitrógeno total es una indicación positiva de un proceso de tratamiento de aguas residuales eficiente, lo que sugiere que el sistema está funcionando de manera efectiva para reducir nitrógeno, el cual puede llegar a causar la eutrofización de estas aguas. La información revela que los niveles de Nitrógeno Total en la entrada de los humedales son considerablemente elevados, superando significativamente los 12 mg/ℓ para clase “D” establecidos como valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores. A pesar de la carga sustancial de nitrógeno total, se evidencia que en la salida de ambos humedales se logra satisfacer los requisitos normativos.

2.7.3.2.9 Remoción 1 de Nitrógeno Total humedal 2

$$R = \frac{50,7\text{mg}/\ell - 5,7\text{mg}/\ell}{50,7\text{mg}/\ell} * 100\%$$

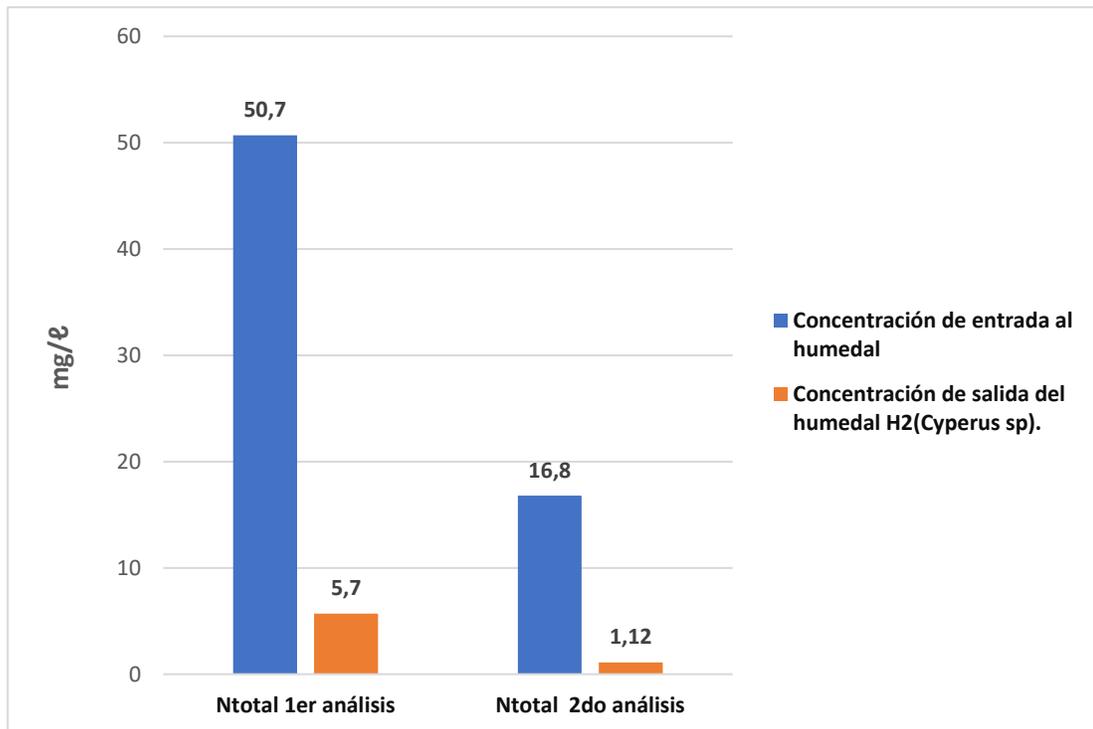
$$R = 88,76 \%$$

2.7.3.2.10 Remoción 2 de Nitrógeno Total humedal 2

$$R = \frac{16,80\text{mg}/\ell - 1,12\text{mg}/\ell}{16,80\text{mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 93,33 \%$$

Gráfico 12: Niveles de concentración de N total del humedal 2 (mg/ℓ)



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 12 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se nota que durante la primera etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentaba una concentración de Nitrógeno Total de 50,7 mg/ℓ, pasados los 7 d. de retención se logró reducir hasta 5,7 mg/ℓ, la remoción lograda fue del 88,76 % usando el humedal 2 con la especie *Cyperus sp.*

Durante la segunda etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentó una concentración menor de nitrógeno total, pudiendo el mismo deberse a que estos no se encontraban en condiciones ideales por problemas en el quemador de gases, la concentración fue de 16,80 mg/ℓ y transcurridos los 7 d. se obtuvo 1,12 mg/ℓ alcanzando una reducción del 93,33 %, con el humedal 2 con la implementación de *Cyperus sp.*

En este humedal, se evidencia claramente la eficacia en la reducción del Nitrógeno Total y su buen desempeño. Al ingresar al humedal, se observa una notable

concentración de Nitrógeno Total, la cual supera ampliamente el límite de 12 mg/ℓ establecido para la clase "D" en los valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores. Sin embargo, es importante destacar que esta carga de Nitrógeno Total a sido reducida significativamente, ubicándose por debajo de los niveles estipulados por la normativa aplicable.

2.7.3.2.11 Disminución 1 de Nitrógeno Total humedal 3

$$R = \frac{50,7\text{mg}/\ell - 12,4\text{mg}/\ell}{50,7\text{mg}/\ell} * 100\%$$

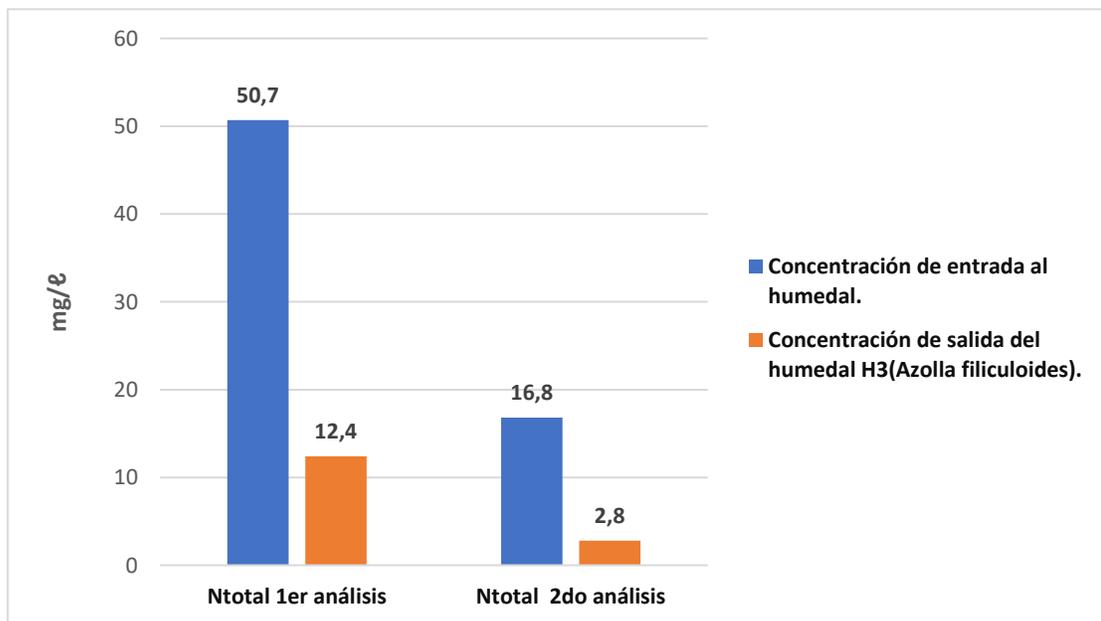
$$R = 75,54 \%$$

2.7.3.2.12 Disminución 2 de Nitrógeno Total humedal 3

$$R = \frac{16,80\text{mg}/\ell - 2,8\text{mg}/\ell}{16,80\text{mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 83,33 \%$$

Gráfico 13: Niveles de concentración de N total del humedal 3 (mg/ℓ)



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 13 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, durante la primera etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentaba una concentración de

nitrógeno total de 50,7 mg/ℓ, pasados los 7 d de tiempo de retención se logró una reducir hasta 12,4 mg/ℓ, la remoción lograda fue del 75,54 % usando el humedal 3 con la especie *Azolla filiculoides*.

En la segunda etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentó una concentración menor de nitrógeno total pudiendo esto deberse al que estos no se encontraban en sus condiciones ideales debido a que fue realizado durante una prueba en el reactor, la concentración fue de 16,80 mg/ ℓ y transcurridos los 7 d se obtuvo 2,8 mg/ℓ alcanzando una remoción del 83,33 %, con el humedal 3 con el uso de *Azolla filiculoides*.

En el contexto de este humedal, se destaca de manera evidente la eficacia en la reducción del Nitrógeno Total y su buen rendimiento. Al ingresar al humedal, se constata una concentración notable de Nitrógeno Total, superando considerablemente el límite de 12 mg/ℓ establecido para la clase "D" según los valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores. Es importante señalar que, durante la primera etapa, no se logró mantener la concentración por debajo de estos límites, aunque la cifra no excedió en gran medida el umbral establecido. Sin embargo, en la segunda etapa del proceso, se a logrado efectivamente reducir la concentración de nitrógeno total, situándose por debajo de los niveles indicados por la normativa vigente

2.7.3.2.13 Disminución 1 de Fósforo Total humedal 1

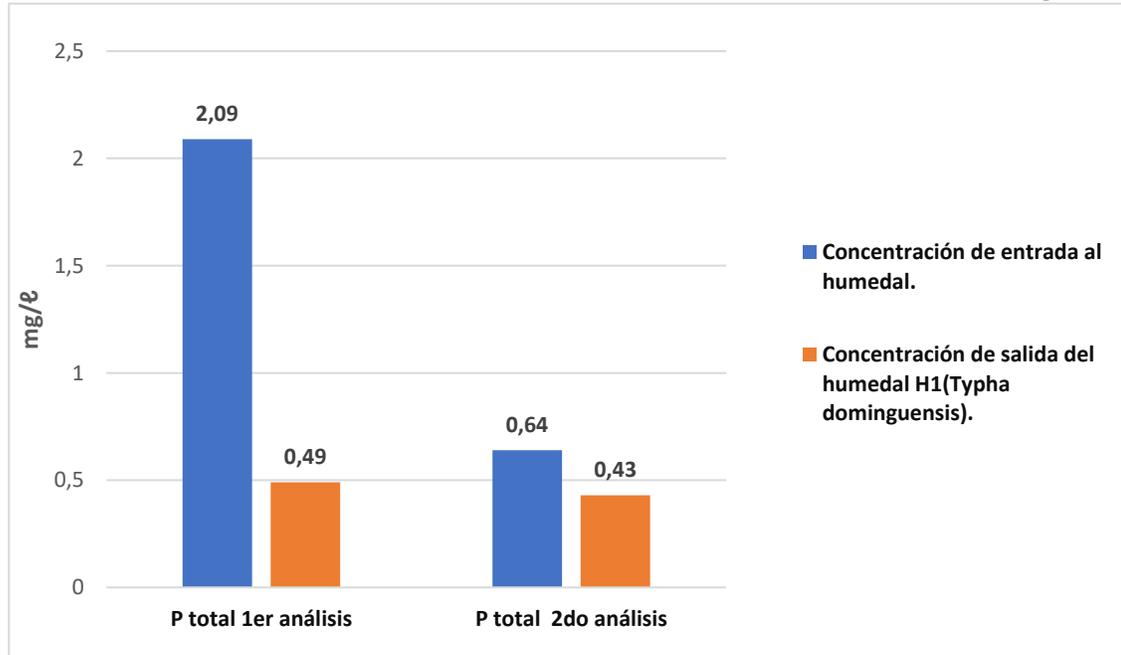
$$R = \frac{2,09\text{mg}/\ell - 0,49\text{mg}/\ell}{2,09\text{mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 76,55\%$$

2.7.3.2.14 Disminución 2 de Fósforo Total humedal 1

$$R = \frac{0,64\text{ mg}/\ell - 0,43\text{mg}/\ell}{0,64\text{ mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 32,81 \%$$

Gráfico 14: Niveles de concentración de P total del humedal 1 (mg/ℓ)

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 14 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se puede observar que en la primera etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB, presentó una concentración de 2,09 mg/ℓ de Fósforo Total, una vez transcurridos los 7 d. de tiempo de retención se logró reducir a 0,49 mg/ℓ, la remoción conseguida fue del 76,55% con el uso del humedal 1 en la cual se encontraba la especie *Thypha dominguensis*

En la segunda etapa al igual que con el nitrógeno total las concentraciones fueron menores debido al inadecuado funcionamiento de los reactores, sin embargo, los niveles de remoción no alcanzaron al de la etapa número 1, en la etapa número dos se logró reducir el Fósforo Total de 0,64 mg/ℓ a 0,43 mg/ℓ alcanzando un nivel de remoción del 32,81% con el uso de *Thypha dominguensis* (humedal 1).

La reducción significativa del Fósforo Total es una señal positiva de que el sistema de tratamiento está funcionando de manera efectiva y cumple con los estándares ambientales, lo que es beneficioso tanto desde una perspectiva ambiental como regulatoria. se tomó en cuenta valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos

receptores, que para aguas de clase “D” es de 1 mg/ℓ, y según se puede apreciar en los dos tratamientos empleados se logró estar por debajo de esta cantidad.

2.7.3.2.15 Disminución 1 de Fósforo Total humedal 2

$$R = \frac{2,09\text{mg}/\ell - 0,49\text{mg}/\ell}{2,09\text{mg}/\ell} * 100\%$$

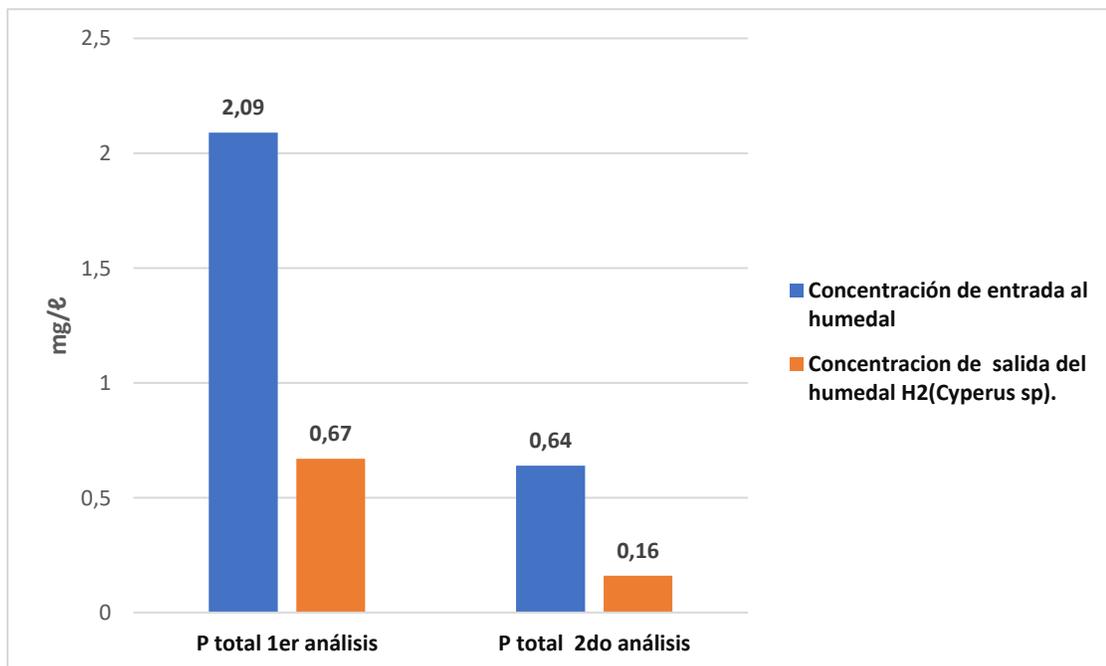
$$R = 67,94 \%$$

2.7.3.2.16 Disminución 2 de Fósforo Total humedal 2

$$R = \frac{0,64\text{ mg}/\ell - 0,16\text{mg}/\ell}{0,64\text{ mg}/\ell} * 100\%$$

$$R = 75 \%$$

Gráfico 15: Niveles de concentración de P total del humedal 2 (mg/ℓ)



Fuente: Elaboración propia

El gráfico 15 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se puede observar que durante la primera etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentó una concentración de 2,09 mg/ℓ de Fósforo Total, una vez transcurridos los 7 d. de tiempo de retención se logró reducir a 0,49 mg/ℓ, la remoción conseguida fue del 67,94% con el uso del humedal 2, en la cual se encontraba la especie *Cyperus sp.*

En la segunda etapa al igual que con el Nitrógeno Total las concentraciones fueron menores debido al no óptimo funcionamiento de los reactores, sin embargo, con este humedal se logró una pequeña mejora en la remoción de Fósforo Total, en la etapa número dos en donde de 0,64 mg/ℓ a 0,16 mg/ℓ alcanzando un nivel de remoción del 75,00 % con el uso de *Cyperus sp.* (humedal 2).

Estos son una señal positiva de que el sistema de tratamiento está funcionando de manera efectiva y cumple con los estándares ambientales, lo que es beneficioso tanto desde una perspectiva ambiental como regulatoria. se tomó en cuenta valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, que para aguas de clase “D” es de 1 mg/ℓ, y según se puede apreciar en los dos tratamientos empleados se logró estar debajo de esta cantidad

2.7.3.2.17 Reducción 1 de Fósforo Total humedal 3

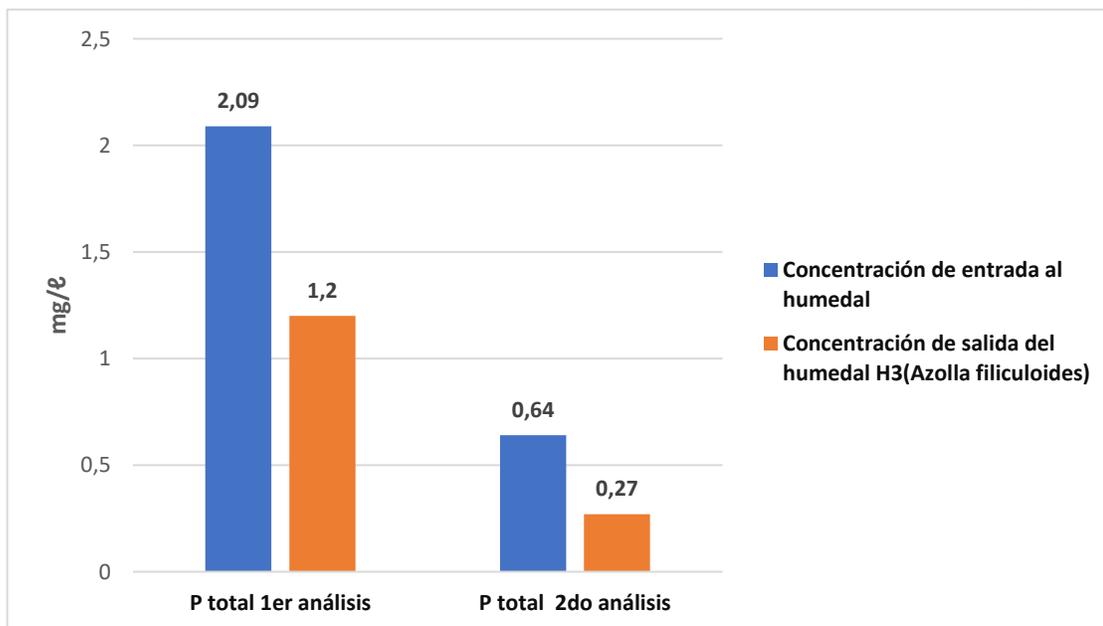
$$R = \frac{2,09 \text{ mg/ℓ} - 1,2 \text{ mg/ℓ}}{2,09 \text{ mg/ℓ}} * 100\%$$

$$R = 42,58\%$$

2.7.3.2.18 Reducción 2 de Fósforo Total humedal 3

$$R = \frac{0,64 \text{ mg/ℓ} - 0,27 \text{ mg/ℓ}}{0,64 \text{ mg/ℓ}} * 100\%$$

$$R = 57,81 \%$$

Gráfico 16: Niveles de concentración de P total del humedal 3 (mg/ℓ)

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 16 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se puede observar que durante la primera etapa el agua residual proveniente de los reactores UASB presentó una concentración de 2,09 mg/ℓ de Fósforo Total, una vez transcurridos los 7 d. de tiempo de retención se logró reducir a 1,2 mg/ℓ, la remoción conseguida fue del 42,58% con el uso del humedal 3 en la cual se encontraba la especie *Azolla filiculoides*.

En la segunda etapa al igual que con el Nitrógeno Total las concentraciones fueron menores debido al no óptimo funcionamiento de los reactores, sin embargo, con este humedal se logró una pequeña mejora en la remoción de Fósforo Total en la etapa número dos en donde de 0,64mg/ℓ a 0,27 mg/ℓ alcanzando un nivel de remoción del 57,81 % con el uso de *azolla filiculoides* (humedal 3). Aunque tuvo una mejor remoción en su segunda etapa, no logró superar a los otros dos humedales.

La disminución significativa en los niveles de Fósforo Total indica de manera positiva que el sistema de tratamiento está operando de forma efectiva y cumple con los estándares ambientales. Esto es beneficioso tanto desde una perspectiva medioambiental como regulatoria. se consideraron los valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, que para aguas de clase “D” es de 1 mg/ℓ. Al

observar los resultados, notamos que en el primer tratamiento no se logró reducir los niveles por debajo de esta cantidad, pero en el segundo tratamiento se consiguió mantener los niveles por debajo de dicho umbral.

2.7.3.2.19 Reducción 1 de Coliformes Fecales humedal 1

$$R = \frac{11000000 \text{ NMP}/100\text{ml} - 930 \text{ NMP}/100\text{ml}}{11000000 \text{ NMP}/100\text{ml}} * 100\%$$

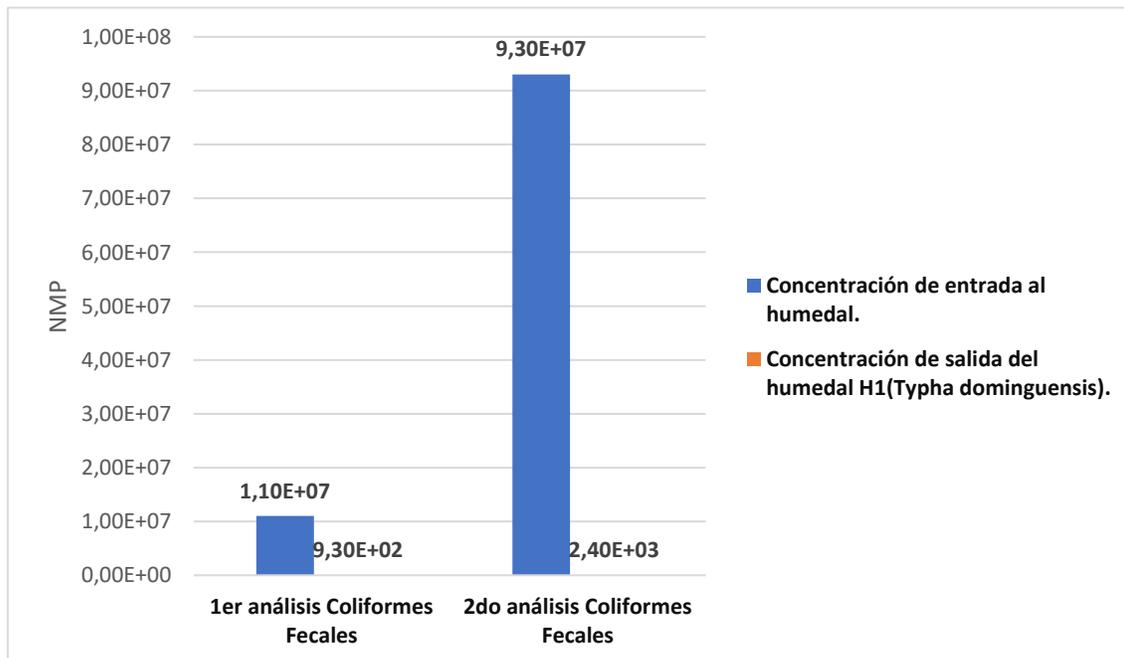
$$R = 99,99 \%$$

2.7.3.2.20 Reducción 2 de Coliformes Fecales humedal 1

$$R = \frac{93000000 \text{ NMP}/100\text{ml} - 2400 \text{ NMP}/100\text{ml}}{93000000 \text{ NMP}/100\text{ml}} * 100\%$$

$$R = 99,99 \%$$

Gráfico 17: Niveles de concentración de Coliformes Fecales del humedal 1 (NMP)



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 17 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, durante la primera etapa se registró una concentración menor a la segunda etapa, debido a que los reactores

no funcionaban en las mejores condiciones, lográndose una alta remoción de Coliformes Fecales reduciendo de 11000000 NMP a 930 NMP la remoción alcanzada fue del 99,99%

Sin embargo, en la segunda etapa la concentración de Coliformes Fecales fue mucho mayor, alrededor de 9 veces más que en la primera etapa, con un valor de 93000000 NMP de los cuales después de 7 d. de tratamiento arrojó un resultado de 2400 NMP, la remoción fue del 99,99%.

La reducción significativa de los coliformes fecales sugiere un óptimo rendimiento y eficacia de los humedales, especialmente cuando se combina con un extenso tiempo de retención. Esto resulta en una eliminación sustancial al ingresar al humedal, ya que los niveles iniciales superaban considerablemente los valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores para aguas de clase "D", establecidos en 5000 NMP/100 ml. Sin embargo, a lo largo de la primera y segunda etapa, se redujo estos niveles significativamente, situándolos muy por debajo de los valores establecidos por la normativa aplicable.

2.7.3.2.21 Reducción 1 de Coliformes Fecales humedal 2

$$R = \frac{11000000 \text{ NMP}/100\text{ml} - 1500\text{NMP}/100\text{ml}}{11000000 \text{ NMP}/100\text{ml}} * 100\%$$

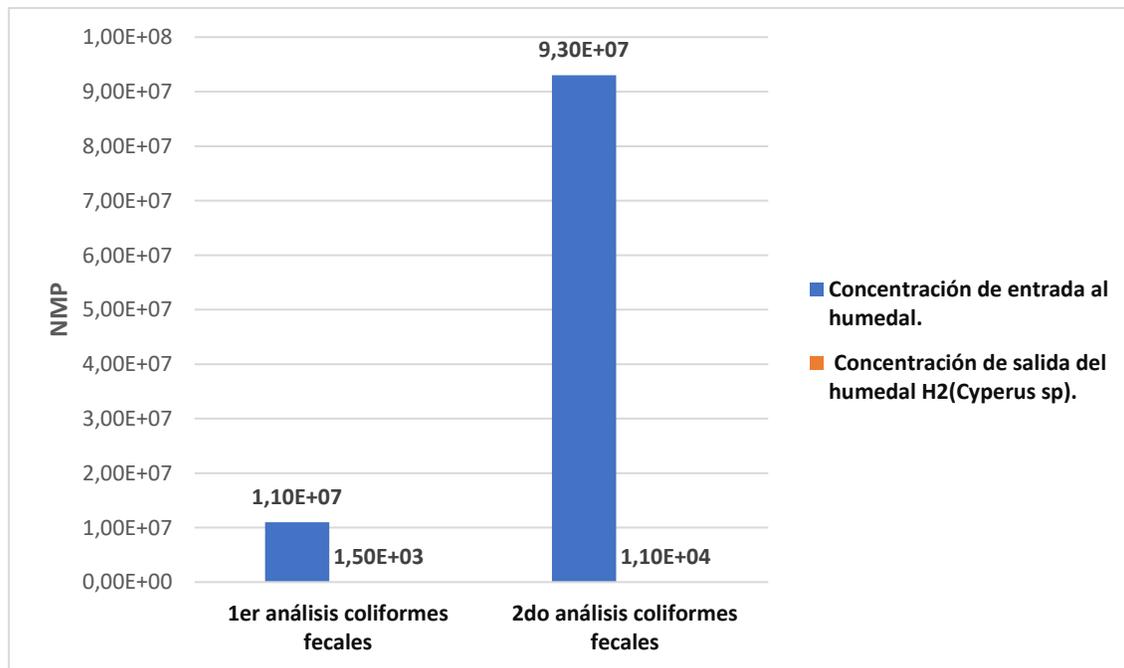
$$R = 99,99 \%$$

2.7.3.2.22 Reducción 2 de Coliformes Fecales humedal 2

$$R = \frac{93000000 \text{ NMP}/100\text{ml} - 11000\text{NMP}/100\text{ml}}{93000000 \text{ NMP}/100\text{ml}} * 100\%$$

$$R = 99,99 \%$$

Gráfico 18: Niveles de concentración de Coliformes Fecales del humedal 2 (NMP)



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 18 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se puede notar una similar situación ocurrida en el humedal 2, ya que durante en la primera etapa se logró una alta remoción de Coliformes Fecales, reduciendo de 11000000 NMP a 1500 NMP la remoción alcanzada fue del 99,99 % un poco menor que la realizada en el humedal 1.

Sin embargo, en la segunda etapa la concentración de Coliformes Fecales fue mucho mayor alrededor de 9 veces más que en el primero con un valor de 93000000 NMP de los cuales después de 7 d de tratamiento muestra un resultado de 11000 NMP, la remoción fue de 99,99%.

La fuerte disminución de los Coliformes Fecales indica un desempeño óptimo de los humedales, especialmente con un extenso tiempo de retención. Esto resulta en una notoria reducción al entrar en el humedal, ya que los niveles iniciales superaban ampliamente los límites permitidos para aguas de clase "D", establecidos en 5000 NMP/100 ml. Aunque en la primera etapa se logró reducir significativamente estos

niveles, situándolos muy por debajo de los valores normativos, en la segunda etapa no se observó el mismo resultado. Es crucial tener en cuenta que la carga microbiológica inicial era considerablemente mayor en la segunda etapa.

2.7.3.2.23 *Remoción 1 de Coliformes Fecales humedal 3*

$$R = \frac{11000000 \text{ NMP}/100\text{ml} - 75000 \text{ NMP}/100\text{ml}}{11000000 \text{ NMP}/100\text{ml}} * 100\%$$

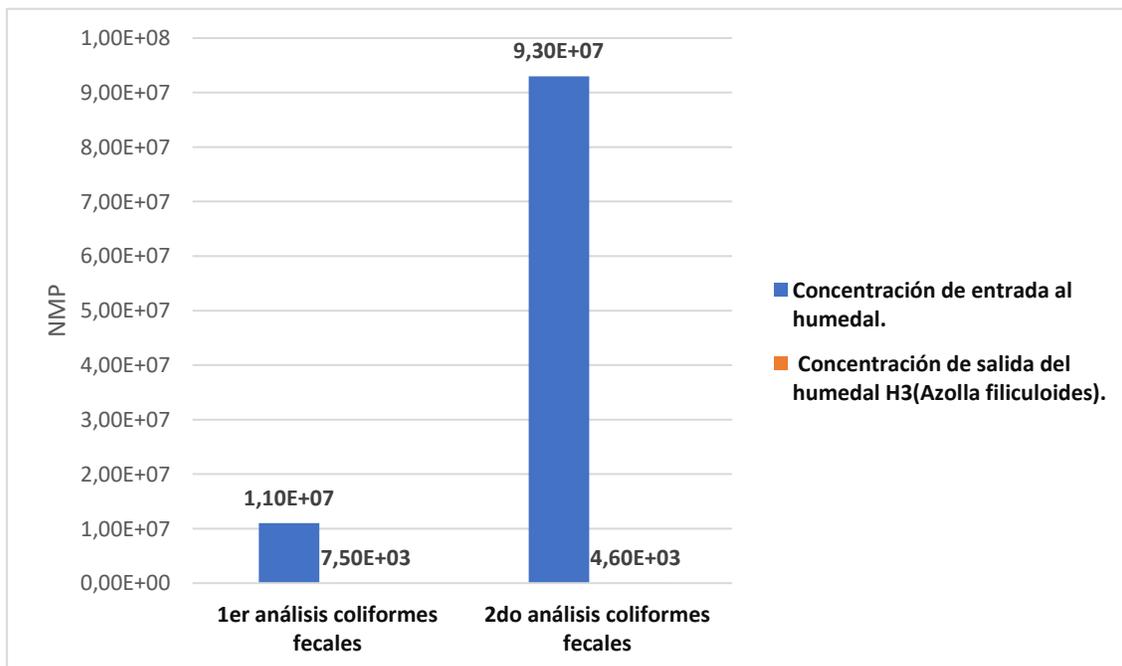
$$R = 99,93 \%$$

2.7.3.2.24 *Remoción 2 de Coliformes Fecales humedal 3*

$$R = \frac{93000000 \text{ NMP}/100\text{ml} - 4600 \text{ NMP}/100\text{ml}}{93000000 \text{ NMP}/100\text{ml}} * 100\%$$

$$R = 99,99 \%$$

Gráfico 19: Niveles de concentración de Coliformes Fecales del humedal 3 (NMP)



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 19 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se nota que al igual que en los anteriores humedales, en la primera etapa se logró una alta remoción de

Coliformes Fecales, reduciendo de 11000000 NMP a 75000 NMP la remoción alcanzada fue del 99,93%.

Sin embargo, en la segunda etapa, la concentración de Coliformes Fecales fue mucho mayor alrededor de 9 veces más que en el primero con un valor de 93000000 NMP de los cuales después de 7 d. de tratamiento dio un resultado de 4600 NMP, la remoción fue de 99,99%.

La marcada reducción de los coliformes fecales indica un rendimiento óptimo de los humedales, especialmente debido al extenso tiempo de retención. Al ingresar al humedal, se produce una notable disminución, ya que los niveles iniciales excedían con creces los límites permitidos para aguas de clase "D", fijados en 5000 NMP/100 ml. Aunque en la primera etapa no se logró reducir estos niveles por debajo de la normativa, en la segunda etapa, a pesar de enfrentar una carga microbiana considerablemente mayor, los valores obtenidos lograron cumplir con los estándares legales.

2.7.3.2.25 *Modificación 1 del pH humedal 1*

$$R = \frac{8,47 - 7,31}{8,47} * 100\%$$

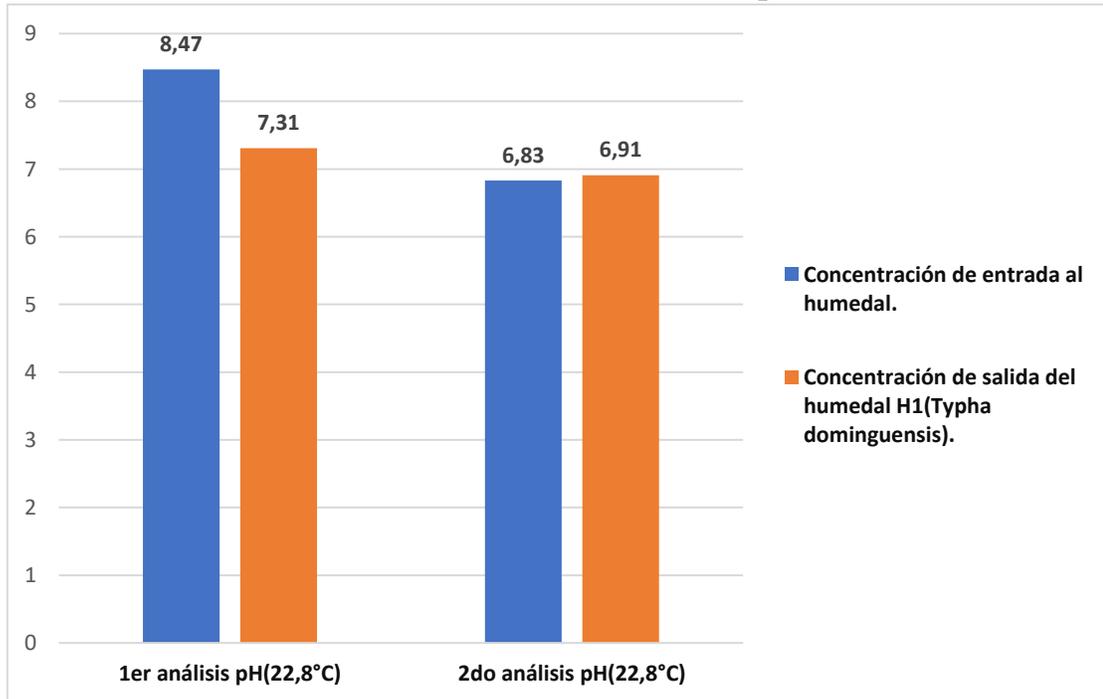
$$R = 13,69 \%$$

2.7.3.2.26 *Modificación 2 del pH humedal 1*

$$R = \frac{6,83 - 6,91}{6,83} * 100\%$$

$$R = -1,17 \%$$

Gráfico 20: Niveles de concentración de pH del humedal 1



Fuente: Elaboración propia

Durante la segunda etapa la concentración de entrada del humedal es diferente a la primera, debido a que esta es más ácida con un valor de 6,83 que aumento hasta 6,91, de igual manera se mantiene la tendencia hacia la neutralidad con una corrección del 1,17%.

Los límites aceptables para los valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos de agua, específicamente para aguas de clase "D", se sitúan en un rango de 6,0 a 9,0. Es relevante señalar que, al momento de ingresar a los humedales, el pH ya se encuentra dentro de este rango aceptable. No obstante, al salir de los humedales, se alcanza un pH más neutro.

2.7.3.2.27 Modificación 1 del pH humedal 2

$$R = \frac{8,47 - 7,41}{8,47} * 100\%$$

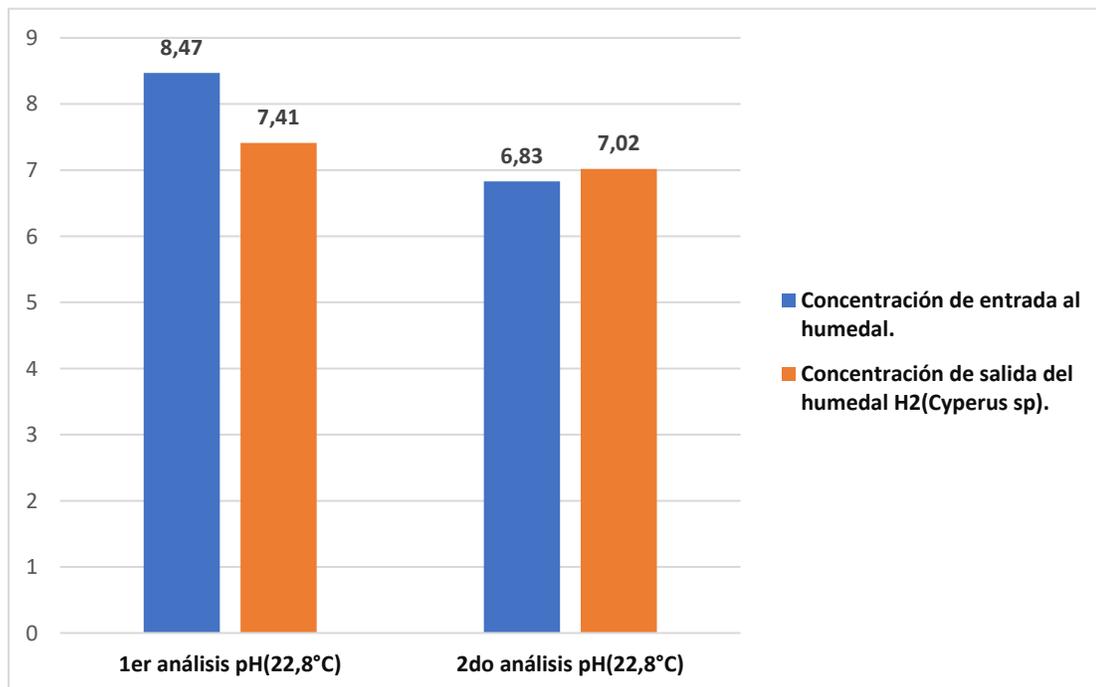
$$R = 12,51 \%$$

2.7.3.2.28 Modificación 2 del pH humedal 2

$$R = \frac{6,83 - 7,02}{6,83} * 100\%$$

$$R = -2,78\%$$

Gráfico 21: Niveles De Concentración De pH Del Humedal 2



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 21 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se puede apreciar que durante la primera etapa se logró una tendencia del pH a la neutralidad, reduciéndose de 8,47 a 7,41 en los 7 d de tiempo de retención, lográndose una reducción del 12,51% con tendencia a la neutralidad.

Durante la segunda etapa la concentración de entrada del humedal es diferente a la primera, debido a que esta es más ácida con un valor de 6,83 que aumentó hasta 7,02, de igual manera se mantiene la tendencia hacia la neutralidad con una corrección del 2,78%.

Al momento de ingresar a los humedales, el pH ya se encuentra dentro de este rango aceptable. No obstante, al salir de los humedales, se alcanza un pH más neutro.

2.7.3.2.29 Modificación 1 del pH humedal 3

$$R = \frac{8,47 - 7,35}{8,47} * 100\%$$

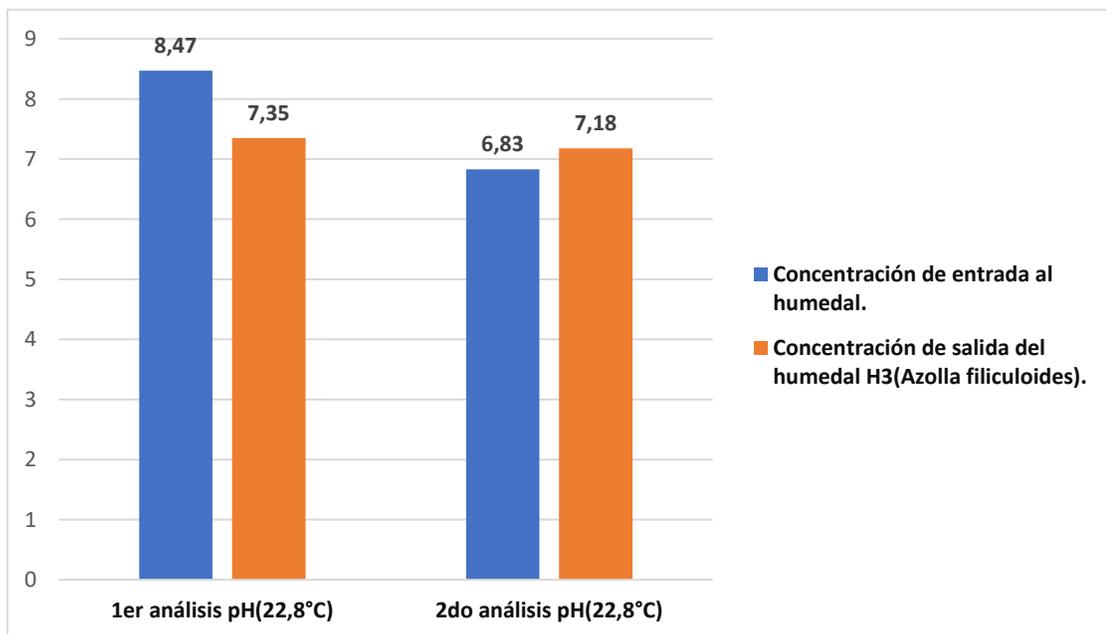
$$R = 13,22 \%$$

2.7.3.2.30 Modificación 2 del pH humedal 3

$$R = \frac{6,83 - 7,18}{6,83} * 100\%$$

$$R = -5,12 \%$$

Gráfico 22: Niveles De Concentración De pH Del Humedal 3



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 22 elaborado con los datos obtenidos en laboratorio, se puede apreciar que durante la primera etapa se logró una tendencia del pH a la neutralidad, reduciéndose de 8,47 a 7,35 en los 7 d. de tiempo de retención, lográndose una reducción del 13,22% con tendencia a la neutralidad.

Durante la segunda etapa la concentración de entrada del humedal es diferente a la primera debido a que esta es más ácida con un valor de 6,83 que aumentó hasta 7,18,

de igual manera se mantiene la tendencia hacia la neutralidad con una corrección del 5,12%.

Los límites aceptables para los Valores Máximos Admisibles de Parámetros en Cuerpos de Agua, específicamente para aguas de clase "D", se sitúan en un rango de 6,0 a 9,0. Es relevante señalar que, al momento de ingresar a los humedales, el pH ya se encuentra dentro de este rango aceptable. No obstante, al salir de los humedales, se alcanza un pH más neutro.

CAPITULO III
RESULTADOS Y DISCUSIONES

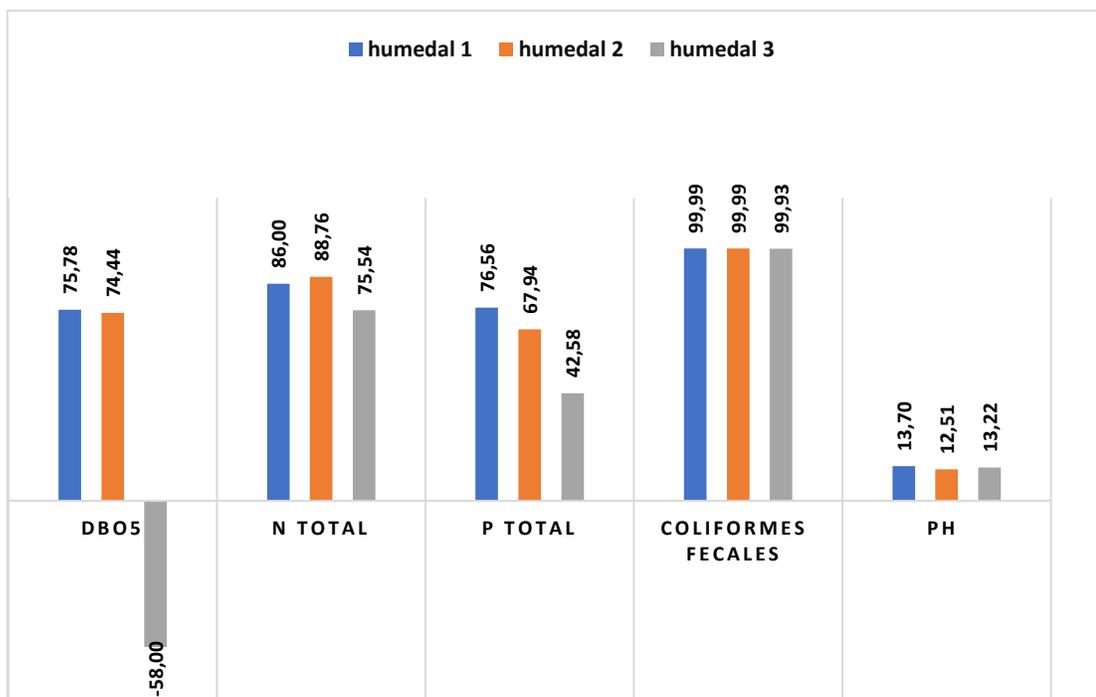
3.1 Análisis de las remociones logradas de los humedales

tabla 11: Análisis de las remociones (%) logradas de los humedales durante primera etapa

Parámetro	humedal 1	humedal 2	humedal 3
DBO ₅	75,78	74,44	-58,00
N total	86,00	88,76	75,54
P total	76,56	67,94	42,58
coliformes fecales	99,99	99,99	99,93
pH	13,70	12,51	13,22

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 23: Remociones Alcanzadas Primera Etapa



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 23 elaborado a partir de los datos de la tabla 11, se puede notar, que en el parámetro de DBO₅ las remociones del humedal 1 son un 1,35% superior en relación al humedal 2. Estas son muy similares entre sí y adecuadas para este tipo de humedal.

Por otro lado, el humedal 3 presenta un valor negativo es decir que en lugar de lograr una remoción se aumentó la concentración de DBO₅. En el humedal 3 se puede notar como aumentó el DBO₅ en un 58%, a causa de la proliferación de algas las cuales consumieron el oxígeno presente en el agua.

En el parámetro de Nitrógeno Total, el valor de remoción en el humedal 2 es superior en un 2,78% respecto al humedal 1, y un 13,24% más que el humedal 3.

En el parámetro de Fósforo Total, el humedal 1 es superior en un 8,61% más que el humedal 2 y un 33,97% más eficiente en la remoción lograda en el humedal 3, siendo el humedal 3 el que presenta una mayor diferencia respecto a los otros dos.

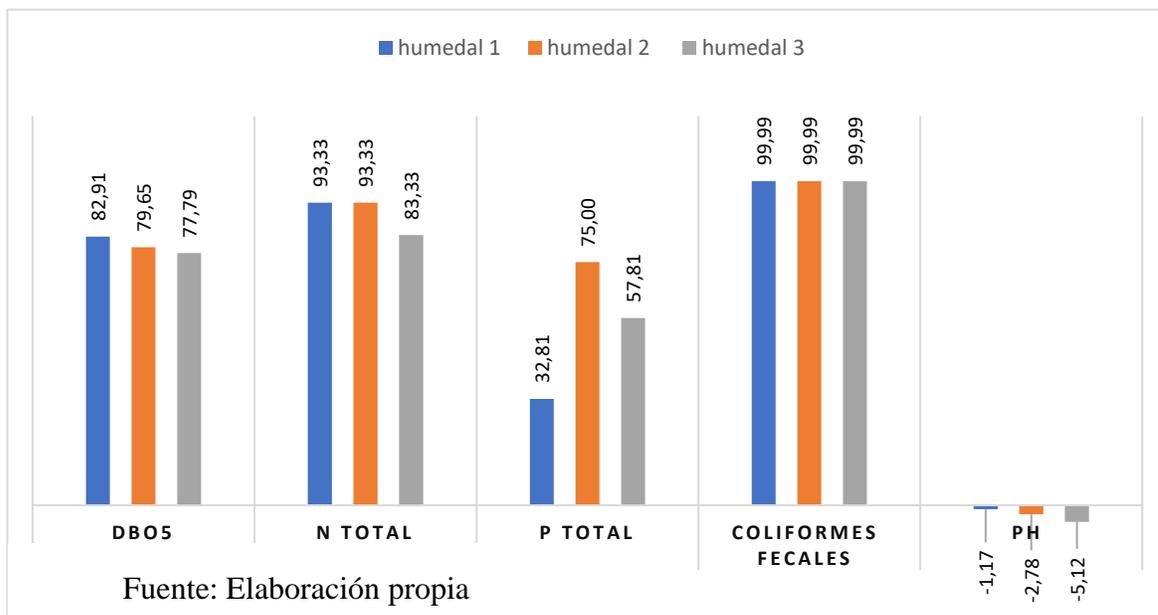
En el parámetro de Coliformes Fecales los tres tipos de humedales lograron una remoción por encima del 99,9 %. por ello se considera que no existe una diferencia significativa por tener diferencia de solamente decimales, menor al 1%

En el parámetro de pH de igual manera se obtuvieron resultados muy similares. en los tres humedales en un rango del 13% de tendencia del pH hacia la neutralidad, siendo la diferencia menor al 1% por lo cual no se tomará en consideración.

tabla 12: Análisis de las remociones (%) logradas de los humedales durante la segunda etapa

Parámetro	humedal 1	humedal 2	humedal 3
DBO ₅	82,91	79,65	77,79
N total	93,33	93,33	83,33
P total	32,81	75,00	57,81
coliformes fecales	99,99	99,99	99,99
pH	-1,17	-2,78	-5,12

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 24: Remociones Alcanzadas En La Segunda Etapa

En el gráfico 24 elaborado a partir de los datos de la tabla 12, se puede notar, que en el parámetro de DBO_5 las remociones del humedal 1, humedal 2 y el humedal 3 son similares. Siendo un 3,25 % superior el humedal uno al dos, el humedal 1 es 5,12 % más eficiente que el humedal 3.

En relación al parámetro de Nitrógeno Total, es importante destacar que la eficiencia de remoción en los humedales 1 y 2 es idéntica. No obstante, el humedal 3 exhibe una ligera disminución del 10% en eficiencia en comparación con los otros dos. Este dato sugiere una uniformidad notoria entre los humedales 1 y 2, mientras que el humedal 3 presenta una variación moderada.

En cuanto al parámetro de Fósforo Total, se destaca que el Humedal 2 muestra un rendimiento significativamente superior en comparación con los otros dos humedales. De manera específica, se observa que supera al Humedal 1 en un notable 42,19%, lo cual representa una diferencia considerable en términos de eficacia en la remoción de fósforo. Además, el Humedal 2 demuestra ser un 17,19% más eficiente en la remoción en comparación con el Humedal 3.

En el parámetro de Coliformes Fecales los tres tipos de humedales lograron una remoción por encima del 99,9 %. por ello se considera que no existe una diferencia significativa por tener diferencia de solamente decimales, menor al 1%.

En el parámetro de pH el que mayor corrección logró fue el humedal 3 con un -5,12 %, los otros dos humedales presentaron datos similares, en todos de igual manera hubo una tendencia hacia la neutralidad.

Realizando un análisis de todos los datos, es claramente notorio que durante la segunda etapa se lograron aumentar las remociones en los parámetros de DBO₅, Nitrógeno Total. Sin embargo, en el Fósforo Total el humedal 1 no superó a la remoción alcanzada en la etapa 1, en lo que respecta a Coliformes Fecales los valores se encuentra similares entre la primera y la segunda etapa, la corrección de pH se visualizó una reducción en la segunda etapa, siendo en la primera de básico a neutro y en la segunda de ácido a neutro.

Al considerar las disparidades, es evidente que el humedal 2 y el humedal 1 comparten similitudes marcadas, salvo en la eliminación de fósforo en la segunda etapa. Aquí, el humedal 2 exhibió una reducción significativa, destacándose como el de mejor rendimiento en este aspecto.

3.2 Comparación de disminución de Coliformes, Fósforo Total, Nitrógeno Total vs crecimiento de tallo

Tabla 13: comparación de disminución de coliformes, fósforo total, nitrógeno total vs crecimiento de tallo

	humedal	disminución N total (%)	Disminución coliformes fecales (%)	tamaño del tallo (cm)
PRIMER MUESTREO	H1	86	99,99	5
	H2	88	99,99	1,58
SEGUNDO MUESTREO	H1	93,33	99,99	17,9
	H2	93,33	99,99	2,86

Fuente: Elaboración propia

Al analizar la tabla 13, se observa que a medida que el tallo de las macrófitas crece en ambos humedales (humedal 1 y humedal 2), la cantidad de Nitrógeno Total disminuye. Esto indica una efectiva remoción de este nutriente soluble, ya que las plantas lo asimilan y utilizan en su desarrollo sobre todo en el crecimiento del tallo. La reducción de Coliformes Fecales es consistente en ambos humedales, lo que sugiere que no depende de la especie de planta, sino del tiempo de retención empleado en los humedales artificiales.

3.3 Comparaciones con otros estudios realizados

Según los resultados obtenidos en la Cuenca-Ecuador del país mencionado se pudo interpretar lo siguiente:

La Totora presentó una mayor facilidad de siembra con respecto a la Grama ya que esta tenía raíces más desarrolladas y presentaba mayores facilidades de manipulación.

Las Totoras presentaron una adaptación más rápida a los distintos tiempos de alimentación; mientras que la Grama requirió un mayor tiempo de adaptación, de manera particular al iniciar los tiempos de descanso.

Los humedales presentaron un porcentaje de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) entre el 30 y 70% y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del 30%, lo que representa un buen porcentaje de efectividad. (Davila Moscoso & Lopez Piña, 2020)

Realizando una comparación con los resultados obtenidos en el desarrollo en la presente tesis de investigación se obtuvieron resultados similares en las facilidades de manipulación y siembra, aunque las diferencias se percibieron en la adaptación debido a que en el trabajo desarrollado, en el humedal 1 en un inicio no se adaptaron adecuadamente, aunque al comparar las remociones alcanzadas de DBO₅ estas fueron superiores en la presente investigación llegando la máxima remoción a un 82%, mientras que el DQO no fue considerado en el trabajo.

En otro trabajo de investigación realizada en Perú- Trujillo, se estudió la remoción de nitritos y fosfatos por plantas acuáticas, *Typha angustifolia* (Totora), *Eichhornia*

crassipes (Jacinto de agua) y *Cyperus rotundus* (Cebollin) y remoción de nitritos y fosfatos en aguas de humedales artificiales, en la cual se concluye lo siguiente:

La presente investigación en humedal artificial se determinó que la planta *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) presenta mayor eficiencia en la remoción de nitritos y fosfatos alcanzando un 69,34% y 62,71% respectivamente; en comparación con los humedales artificiales de *Typha angustifolia* (Totora) con un 55.49% y 41,67% y *Cyperus rotundus* (Cebollin) con un 41.67% y 28.71% respectivamente.

El resultado de la presente investigación nos permite recomendar usar humedales para la remoción de nitritos y fosfatos de las aguas residuales antes de ser vertidas al mar (Alfaro Pereda & Arellano Zapata, Remoción De Nitritos Y Fosfatos En Humedales Artificiales Empleando Tres Tipos de Plantas Acuáticas A Nivel De Laboratorio, 2018).

En la presente tesis de investigación, se realizó el análisis de nitrógeno total y fósforo total, a diferencia de la investigación realizada en el Perú, donde se analizó en nitratos y fosfatos, en el caso de la remoción de totora en fósforo y nitrógeno fue superior con un 37,8% y en la remoción de fósforo un 34,9%, a la lograda en Trujillo Perú.

Otra investigación realizada en Cajamarca Perú obtuvo los siguientes resultados:

El análisis de los resultados demostró que existen diferencias significativas en la eficiencia de ambas plantas, para los parámetros fisicoquímicos (Turbidez, SST, SDT, NA, NT, aluminio, bario, DBO₅ y Demanda Química de Oxígeno (DQO) se demuestra que la *Scirpus californicus* (Totora) tiene mayor eficiencia para la absorción y remoción de nutrientes en el tratamiento de agua residual doméstica, los cuales obtuvieron eficiencias del 94.5% de Turbidez, 97.2% de SST, 95.4% NA, 95.99% NT, 98.98% Aluminio, 51.06% de Bario, 93.39% de DBO₅ y DQO, mientras que en los análisis para los parámetros microbiológicos (Coliformes totales y termotolerantes, *E-Coli*) se demuestra que *Phragmites australis* (Carrizo) tiene mayor capacidad depuradora; es decir, tiene mayor eficiencia con el 92% C-de Total, 95% de C-Term y 95.2% de *E-coli* (Chugden Romero & Verastegui Ortiz, 2020).

Entre ambos trabajos se encontraron algunas similitudes en cuanto a las principales cantidades de remoción de Nitrógeno Total la cual es superior en Cajamarca-Perú en un 9 % más que en el presente trabajo. La remoción de DBO_5 también es superior en un 9% aproximadamente. En el parámetro de Coliformes Fecales, los resultados obtenidos en esta investigación alcanzaron un nivel de eficacia del 99% para todas las especies seleccionadas. Este alto porcentaje nos indica una notable capacidad del sistema o método aplicado para reducir o eliminar Coliformes Fecales en todas las muestras a evaluarse.

Según investigaciones en La Paz - Bolivia se obtuvieron las siguientes conclusiones:

De los resultados encontrados en este trabajo se concluye que se demuestra que el establecimiento del uso de la totora En Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales ayuda a la remoción de la carga orgánica, bacteriológica y de metales pesados presentes en las aguas de sus efluentes después de su uso y de nutrimentos del agua residual, los microorganismos son la parte fundamental del mecanismo con que la plantas macrófitas contribuyen a la remoción de los contaminantes; los compuestos orgánicos, nitrogenados y fosforados son transformados a formas más simples y, por lo tanto, más fáciles de ser asimilados por las propias plantas (Mamani Coarite, 2018)

De estos resultados, se puede constatar que de igual manera se logró una gran remoción de carga orgánica, de compuestos nitrogenados y fosforados, siendo la reducción de la carga bacteriológica la más grande y notoria, alcanzada en los humedales artificiales.

Reducir la carga microbiológica en las aguas residuales es fundamental para proteger la salud pública, preservar el medio ambiente, cumplir con las regulaciones, promover la reutilización segura del agua, asegurar la eficiencia de los sistemas de tratamiento y mejorar la seguridad laboral del personal.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- En los análisis de laboratorio realizados en las dos etapas, se determinaron las concentraciones de nutrientes solubles al inicio y al final de las aguas residuales provenientes de los reactores UASB de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Se observaron notables mejoras en la calidad del agua. En la primera etapa, se evidenció una significativa reducción de los contaminantes después de 7 d. de retención en todos los humedales. En particular, el humedal 1 (*Typha dominguensis*) y el humedal 2 (*Cyperus sp*) demostraron una eficiente reducción de Nitrógeno Total, Fósforo Total, DBO₅ Y Coliformes Fecales. Sin embargo, el humedal 3 (*Azolla filiculoides*) presentó un rendimiento menos destacado en la eliminación de DBO₅ y Coliformes Fecales. En la segunda etapa, se mantuvo la tendencia positiva en la reducción de contaminantes. Nuevamente, el humedal 1 (*Typha dominguensis*) y el humedal 2 (*Cyperus sp*) destacaron en la disminución de Nitrógeno Total, Fósforo Total y DBO₅. Aunque el humedal 3 (*Azolla filiculoides*) mejoró su rendimiento en la remoción de DBO₅ y Coliformes Fecales en comparación con la primera etapa, aún mostró resultados menos eficientes que los otros dos humedales.
- Se logró con éxito la implementación de tres humedales a escala piloto para tratar aguas residuales domésticas de los reactores UASB. El proceso incluyó la instalación de sistemas y la siembra de macrófitas, completándose sin problemas en agosto de 2022 en la comunidad de Cabildo. El sistema operó en modo cerrado discontinuo con un tiempo de retención de 7 d.
- Se observó el crecimiento y desarrollo de las tres macrofitas en los humedales, donde se registró parámetros como el tamaño del tallo, hojas, brotes, área ocupada raíces, identificando cambios notables en su desarrollo. La totora, al principio con tallos de 58 cm, redujo su tamaño a 19,4 cm al final, con hojas que crecieron de 86 cm a 181,6 cm. Experimentó eventos como sequedad y resquebrajamiento en agosto, daños por heladas en septiembre, seguidos de

poda y recuperación, floreciendo en mayo de 2023. El pasto inició con tallos de 1,2 cm, creciendo a 2,9 cm al final, con hojas que aumentaron de 13,1 cm a 79,3 cm. Resistió heladas, posteriormente las hojas que en un inicio parecían secas recuperaron su tonalidad (verde), habiendo florecido en abril. La azola se caracterizó por cambios en el área ocupada y la longitud de las raíces. Experimentó repoblación rápida y cambios en la coloración de las plantas, de verde a rojiza y luego a verde nuevamente. Se enfrentó a desafíos como la aparición esporádica de algas y desarrollo de organismos acuáticos.

- Se realizaron comparaciones de las eficiencias de remoción entre los tres humedales, arrojando los siguientes resultados:

En la primera etapa, Humedal 1 (*Typha dominguensis*) y Humedal 2 (*Cyperus sp*) exhiben eficiencias bastante similares, pero en la segunda etapa, Humedal 2 destaca, especialmente en la remoción de Fósforo Total. Humedal 3 (*Azolla filiculoides*) muestra eficiencias ligeramente menores en ambas etapas en comparación con los otros dos humedales. Estos resultados sugieren que la elección de las especies de macrófitas y las etapas de tratamiento puede influir significativamente en la eficiencia y eficacia global de remoción de contaminantes. Es evidente que *Cyperus sp* presenta características más óptimas para este entorno en cuanto a los valores de remoción.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda a las empresas operadoras de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) considerar la posibilidad de cambiar la especie de planta utilizada por (*Cyperus sp.*) ya que ha demostrado una eficiencia de remoción similar a la totora. El pasto ofrece mayor tolerancia al clima y adaptabilidad, con raíces que no obstruyen los tubos de drenaje, lo cual mejora la eficacia y evita posibles obstrucciones.
- Recomendamos realizar investigaciones adicionales, explorando otras especies de plantas, analizando diferentes parámetros y evaluando condiciones diversas. Así también investigar el uso de hipoclorito de calcio para eliminar microorganismos patógenos en el tratamiento secundario y profundizar en el estudio de microorganismos que contribuyen a la degradación de nitrógeno y fósforo, especialmente en entornos de baja densidad poblacional.
- Instamos a las autoridades de las PTAR a realizar la siembra de totora en meses de lluvia o en periodos con temperaturas no excesivamente bajas. También se sugiere el corte de la parte aérea durante la siembra para asegurar su posición debajo del sustrato.
- Se destaca la importancia de encontrar un propósito para las plantas después de la poda, como compostaje o forraje, para maximizar el uso de recursos, promoviendo la sostenibilidad y la gestión eficiente de los materiales resultantes.
- Se recomienda la aplicación de sistemas cerrados y discontinuos para una reducción natural de microorganismos, especialmente efectivos para coliformes fecales, con un tiempo de retención de 7 días.
- En futuras investigaciones, se aconseja un monitoreo continuo del nitrógeno total y el fósforo total a lo largo de las etapas de tratamiento primario, secundario y terciario para verificar variaciones y su relación con el tipo de PTAR.

