



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE BIOLOGÍA

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

# **T E S I S**

**“REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO TOTAL EN  
HUMEDALES EXPERIMENTALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL  
HORIZONTAL CON *TYPHA DOMINGENSIS*, CON TRES MEDIOS  
DE SOPORTE”**

Para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Presenta:**

**ING. ALONDRA CAMARGO ALMARAZ**

**Director de tesis:**

**DR. JESÚS ALBERTO RODRÍGUEZ CASTRO**

**Co-Director de tesis:**

**DR. ROBERTO GARCÍA ACEVEDO**



Morelia, Michoacán, septiembre 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de vivir y permitirme cumplir el sueño de estudiar una maestría relacionada con el medio ambiente, es un escalón más en mi vida profesional y confié plenamente en Dios de que todo va a salir bien y me va a guiar por el mejor camino.

A mi madre Rosa Velia Almaraz Solache por su apoyo incondicional y ser la luz que me guía en el camino, por siempre estar a mi lado y ser mi pilar para salir adelante, eres la flor más bella de mi vida, Te amo.

A mis hermanos Bryan David y Elian Camargo Almaraz por su apoyo en cada etapa de mi vida y por demostrarme su amor cada día.

A Rodrigo Tena por siempre apoyarme en todas mis decisiones y darme ánimos para seguir adelante en cualquier circunstancia, eres una maravillosa persona, gracias por estar en mi vida.

A mi tía Vero porque cada que me mira me hace saber lo orgullosa que esta de mí y de todo lo que he logrado.

Al Dr. Roberto García Acevedo por su apoyo incondicional y por la paciencia que me tuvo durante estos dos años de maestría, por todo el conocimiento que compartía conmigo para que cada día mejorara en la elaboración de esta tesis, le agradezco por nunca dejarme sola y siempre hacer un espacio en su día para atender todas mis dudas.

Al Dr. Jesús Alberto Rodríguez Castro por confiar en mi en el desarrollo de este gran proyecto, así como orientarme con sus conocimientos y enseñarme lo maravilloso de esta maestría.

Al M. C. Ricardo Ruiz Chávez y el Dr. Ezequiel García Rodríguez por su apoyo y por el tiempo que me dedicaron para ayudarme a realizar la experimentación de mi

tesis, gracias por las enseñanzas y el conocimiento que compartieron conmigo. Y al Dr. Hugo Luis Chávez García por su valioso apoyo.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías por el apoyo monetario que me brindaron durante estos dos años para seguir estudiando la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, en especial a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Civil de la que soy alumna egresada.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE ESQUEMAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE GRÁFICAS

RESUMEN: .....	1
PALABRAS CLAVES: .....	2
ABSTRACT: .....	2
KEYWORDS: .....	3
1. INTRODUCCIÓN .....	4
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 HUMEDALES ARTIFICIALES .....	7
2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	7
2.2 COLMATACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	10
2.3 PARTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	10
2.3.1 SUSTRATO .....	11
2.3.2 VEGETACIÓN .....	12
2.3.3 AGUA RESIDUAL .....	19
2.4 PARÁMETROS DE CAMPO .....	19
2.5 REMOCIÓN DE NUTRIENTES .....	21
2.5.1 NITRÓGENO .....	22
2.5.2 FÓSFORO .....	26
3. ANTECEDENTES .....	31
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	38
5. JUSTIFICACIÓN .....	39
6. HIPÓTESIS .....	40
7. OBJETIVOS .....	40
7.1 OBJETIVO GENERAL .....	40
7.2 OBJETIVOS PARTICULARES .....	40
8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	41

8.1	REVISIÓN Y ADECUACIÓN DE LOS TRES HUMEDALES ARTIFICIALES EXPERIMENTALES EXISTENTES. ....	45
8.2	MUESTREO Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO.....	51
8.3	DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL. ....	57
8.4	DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL. ....	64
9.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	71
10.	CONCLUSIONES.....	90
11.	RECOMENDACIONES .....	92
	REFERENCIAS.....	93

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Humedal artificial de flujo superficial. Fuente: Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento "Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales" (CONAGUA, 2015). .....	8
<b>Ilustración 2.</b> Humedal artificial de flujo subsuperficial. Fuente: Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento "Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales" (CONAGUA, 2015). .....	9
<b>Ilustración 3.</b> Partes de un humedal de flujo subsuperficial horizontal. ....	11
<b>Ilustración 4.</b> Morfología general del género <i>Typha</i> (Carhuancho, 2021). ....	15
<b>Ilustración 5.</b> A. Flor masculina, bractéolas masculinas, B. Flor femenina, bractéolas femeninas (Carhuancho, 2021). ....	17
<b>Ilustración 6.</b> Semillas de <i>T. domingensis</i> (Carhuancho, 2021). ....	18
<b>Ilustración 7.</b> Rizomas de <i>Typha</i> (Carhuancho, 2021). ....	18
<b>Ilustración 8.</b> Ciclo del nitrógeno en la planta <i>Typha Domingensis</i> . ....	26
<b>Ilustración 9.</b> Ciclo del fósforo en la planta <i>Typha Domingensis</i> . ....	30
<b>Ilustración 10.</b> Croquis de la PTAR del Centro de Información, Arte y Cultura de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Modificado de Ferreyra, 2020. ....	41
<b>Ilustración 11.</b> Zona de experimentación. Modificado de Ferreyra, 2020. ....	42
<b>Ilustración 12.</b> Grava triturada. Obtenida de Ferreyra, 2020. ....	43
<b>Ilustración 13.</b> Tezontle. ....	44
<b>Ilustración 14.</b> Grava-tezontle. Obtenida de Ferreyra, 2020. ....	45
<b>Ilustración 15.</b> Humedales artificiales experimentales de flujo subsuperficial. ....	45
<b>Ilustración 16.</b> Poda de la planta macrófita <i>Typha domingensis</i> . ....	46
<b>Ilustración 17.</b> Rizomas de la planta <i>Typha domingensis</i> en una etapa inicial del ciclo de vida. ....	47
<b>Ilustración 18.</b> Refuerzo de la tubería que conecta al tanque de abastecimiento. ....	48
<b>Ilustración 19.</b> Tubería del sistema de abastecimiento en cada humedal. ....	48
<b>Ilustración 20.</b> Lavado del tanque de abastecimiento. ....	49
<b>Ilustración 21.</b> Colador del tanque de abastecimiento. ....	50
<b>Ilustración 22.</b> Mantenimiento de la red de tubería de los humedales artificiales experimentales. ....	50
<b>Ilustración 23.</b> Toma de muestra a la entrada del humedal. ....	52
<b>Ilustración 24.</b> Muestra a la salida del humedal en los diferentes medios de soporte. ....	53
<b>Ilustración 25.</b> Obtención de los parámetros de campo de las cuatro muestras. ....	53
<b>Ilustración 26.</b> Primer muestreo en la etapa inicial de la <i>Typha domingensis</i> . ....	54
<b>Ilustración 27.</b> Floración de la planta <i>Typha domingensis</i> . ....	55
<b>Ilustración 28.</b> Altura de la <i>Typha domingensis</i> con floración en la etapa intermedia. ....	56

<b>Ilustración 29.</b> Altura de la <i>Typha domingensis</i> en su etapa final.....	57
<b>Ilustración 30.</b> Reactor de digestión DRB200. ....	59
<b>Ilustración 31.</b> Muestra simple en el área de trabajo. ....	60
<b>Ilustración 32.</b> Reactor de digestión DRB200 a temperatura de 120°C con las muestras.....	61
<b>Ilustración 33.</b> Recipientes de reacción a una temperatura ambiente. ....	62
<b>Ilustración 34.</b> Dosificación de la muestra digerida.....	63
<b>Ilustración 35.</b> Lecturas de las concentraciones del nitrógeno total en el espectrofotómetro DR5000. ....	64
<b>Ilustración 36.</b> Reactor de digestión DRB200 a una temperatura de 100°C. ....	66
<b>Ilustración 37.</b> Dosificación de la muestra simple. ....	67
<b>Ilustración 38.</b> Lado Estriado del DosiCap Zip A hacia arriba. ....	67
<b>Ilustración 39.</b> Reactor a temperatura de 100°C durante 60 minutos. ....	68
<b>Ilustración 40.</b> Dosificación de la solución B. ....	69
<b>Ilustración 41.</b> Lecturas del fósforo total con el espectrofotómetro DR5000. ....	70
<b>Ilustración 42.</b> Porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total. ....	86
<b>Ilustración 43.</b> Remoción en mg/l de nitrógeno y fósforo total. ....	89

## ÍNDICE DE ESQUEMAS

<b>Esquema 1.</b> Etapas del ciclo del nitrógeno.....	24
<b>Esquema 2.</b> Etapas del ciclo del fósforo.....	28

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales. .....	14
<b>Tabla 2.</b> Plan de muestreos para analizar el ciclo de vida de la planta. ....	51
<b>Tabla 3.</b> Parámetros de campo analizados en los muestreos. ....	51
<b>Tabla 4.</b> Lecturas de parámetros de campo y concentraciones de nitrógeno y fósforo total del primer muestreo en la etapa de desarrollo inicial del ciclo vida de la Typha domingensis.....	71
<b>Tabla 5.</b> Porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total, obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras recolectadas en el primer muestreo en los tres humedales durante el ciclo inicial de desarrollo de la Typha domingensis.....	74
<b>Tabla 6.</b> Resultados de las mediciones de los parámetros de campo y análisis de laboratorio efectuadas en el segundo muestreo, realizado el 8 de mayo de 2023, durante la etapa de desarrollo intermedio del ciclo vida de la Typha domingensis. .....	76
<b>Tabla 7.</b> Porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total, obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras recolectadas en el segundo muestreo en los tres humedales durante el ciclo intermedio de desarrollo de la Typha domingensis. ....	79
<b>Tabla 8.</b> Resultados de las mediciones de parámetros de campo y análisis de laboratorio efectuadas en el tercer muestreo, realizado el 5 de julio de 2023, durante la etapa final del ciclo de vida de la Typha domingensis. ....	81
<b>Tabla 9.</b> Porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total, obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras recolectadas en el tercer muestreo en los tres humedales durante el ciclo intermedio de desarrollo de la Typha domingensis. ....	83
<b>Tabla 10.</b> Límites permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	86
<b>Tabla 11.</b> Comparación de la concentración del nitrógeno total obtenidos en los tres muestreos con los límites permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	88
<b>Tabla 12.</b> Comparación de la concentración del fósforo total obtenidas en los tres muestreos con los límites permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	88

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Nitrógeno total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 1, realizado el 30 de marzo de 2023.....	72
<b>Gráfica 2.</b> Fósforo total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 1, realizado el 30 de marzo de 2023.....	73
<b>Gráfica 3.</b> Porcentaje de remoción de nitrógeno total en el primer muestreo realizado el 30 de marzo de 2023.....	75
<b>Gráfica 4.</b> Porcentaje de remoción de fósforo total observado durante en el primer muestreo, realizado el 30 de marzo de 2023.....	75
<b>Gráfica 5.</b> Nitrógeno total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 2, realizado del 8 de mayo de 2023.....	77
<b>Gráfica 6.</b> Fósforo total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 2, realizado del 8 de mayo de 2023.....	78
<b>Gráfica 7.</b> Porcentaje de remoción de nitrógeno total en el segundo muestreo realizado el 8 de mayo de 2023.....	79
<b>Gráfica 8.</b> Porcentaje de remoción de fósforo total en el segundo muestreo realizado el 8 de mayo de 2023.....	80
<b>Gráfica 9.</b> Nitrógeno total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 3, realizado el 5 de julio de 2023.....	82
<b>Gráfica 10.</b> Fósforo total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 3, realizado el 5 de julio de 2023.....	83
<b>Gráfica 11.</b> Porcentaje de remoción de nitrógeno total en el tercer muestreo realizado el 5 de julio de 2023.....	84
<b>Gráfica 12.</b> Porcentaje de remoción de nitrógeno total en el tercer muestreo realizado el 5 de julio de 2023.....	85

## RESUMEN:

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen por objeto el mejorar la calidad de las descargas de aguas residuales a través de procesos físicos, biológicos y químicos. Dentro de los procesos biológicos se encuentran los humedales artificiales, siendo eficaces en la remoción de nutrientes.

El fósforo y el nitrógeno son considerados como nutrientes que provienen, principalmente de las aguas residuales domésticas. En la remoción de los nutrientes participan bacterias, protozoos, y algunos hongos. Estos microorganismos, con la ayuda de las plantas macrófitas, son encargados de llevar a cabo los procesos de remoción de nutrientes en los humedales.

En este trabajo se evaluó la remoción del nitrógeno y fósforo en tres humedales experimentales que fueron construidos en el campus de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) con diferente medio de soporte, utilizando la planta macrófita “*Typha domingensis*”, como medio vegetal. Estos humedales reciben aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC).

En el humedal en el que se utilizó grava compacta como material de soporte, se observó un 77.28% de remoción de nitrógeno total y un 8.37% de fósforo total durante la etapa inicial de crecimiento de la *Typha*, y se obtuvo un 69.78% de nitrógeno total y un 20.99% de fósforo total en la etapa intermedia, así como un 77.37% de remoción de nitrógeno total y un 10.57% de fósforo total en la etapa adulta, en el caso del nitrógeno total cumple en todas las etapas de crecimiento con los límites permisibles de la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, respecto al fósforo total, no cumple con la norma.

Por otro lado, en el humedal con tezontle, como medio de soporte, se observó un 65.73% de remoción de nitrógeno total y 46.54% de fósforo total en la etapa inicial de la *Typha*, 40.62% de remoción de nitrógeno total y un 37.04% de fósforo total en la etapa intermedia y un 35.08% de remoción de nitrógeno total y un 40.00% de fósforo en la etapa adulta, también cumpliendo con la norma antes mencionada en

todas las etapas de crecimiento de la planta en el caso del fósforo total ya que en el caso del nitrógeno total no cumple con los límites establecidos en la norma.

En el humedal como medio de soporte grava y tezontle no cumple con los límites permisibles de la norma en el caso de la remoción de nitrógeno y en la remoción del fósforo si cumple con la norma, observando un 54.56% de remoción de nitrógeno total y un 34.81% de fósforo total durante la etapa inicial de crecimiento de la *Typha*, y se obtuvo un 40.30% de nitrógeno total y un 25.93% de fósforo total en la etapa intermedia, así como un 54.58% de remoción de nitrógeno total y un 20.33% de fósforo total en la etapa adulta.

## PALABRAS CLAVES:

Residual, macrófitas, nutrientes, límites, medio de soporte.

## ABSTRACT:

Wastewater treatment systems aim to improve the quality of wastewater discharges through physical, biological and chemical processes. Among the biological processes are artificial wetlands, which are very effective in the removal of nutrients.

Phosphorus and nitrogen are considered nutrients coming mainly from domestic wastewater. Bacteria, protozoa, and some fungi participate in the removal of nutrients in wetlands. These microorganisms along with macrophyte plants are in charge of carrying out the nutrient removal processes.

This work intends to evaluate the effectiveness in the removal of Nitrogen and Phosphorus of three experimental wetlands located in the campus of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) with different support media, using the macrophyte plant “*Typha domingensis*” as a medium. vegetable. These wetlands receive wastewater from the Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC).

In the wetland built which compact gravel was used as support material, 77.28% removal of total nitrogen and 8.37% of total phosphorus were observed during the initial growth stage of *Typha*, and 69.78% of nitrogen was obtained total and 20.99% of total phosphorus in the intermediate stage, as well as 77.37% removal of total nitrogen and 10.57% of total phosphorus in the adult stage, in the case of total nitrogen it meets the requirements in all growth stages. permissible limits of the official Mexican standard NOM-001-SEMARNAT-2021, regarding total phosphorus, does not comply with the standard.

In the other hand, in the wetland built with tezontle, as a support medium, a 65.73% removal of total nitrogen and 46.54% of total phosphorus were observed in the initial stage of *Typha*, 40.62% removal of total nitrogen and 37.04% of total phosphorus in the intermediate stage and a 35.08% removal of total nitrogen and 40.00% of phosphorus in the adult stage, also complying with the aforementioned standard in all stages of plant growth in the case of total phosphorus already which in the case of total nitrogen does not comply with the limits established in the standard.

In the wetland as a support medium gravel and tezontle does not comply with the permissible limits of the standard in the case of nitrogen removal and in the removal of phosphorus it does comply with the standard, observing a 54.56% removal of total nitrogen and a 34.81% of total phosphorus during the initial growth stage of *Typha*, and 40.30% of total nitrogen and 25.93% of total phosphorus were obtained in the intermediate stage, as well as 54.58% removal of total nitrogen and 20.33% of total phosphorus in the adult stage.

## KEYWORDS:

Residuals, macrophytes, nutrients, limits, support medium.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene como misión preservar las aguas nacionales y garantizar la seguridad hídrica.

Las aguas residuales son consecuencia de las actividades humanas que se desarrollan todos los días. Estas aguas al ser vertidas en cuerpos de agua naturales, sin ser tratadas pueden ocasionar graves daños al medio ambiente, a los ecosistemas acuáticos y a la salud pública, siendo un aspecto que se debe de resolver de forma efectiva para así mismo disminuir la contaminación.

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales diseñados y construidos para aprovechar los procesos naturales. Son considerados en zonas rurales o de poblaciones pequeñas por sus bajos costos de operación y mantenimiento.

Los sistemas de humedales artificiales superficiales se construyen en un área de terreno extensa e involucra el desarrollo de un cultivo de plantas macrófitas enraizadas en un medio de soporte en el cual descansa una geomembrana que tiene como finalidad evitar infiltraciones al subsuelo. Estos humedales son clasificados de acuerdo a su modo de operación en humedales de flujo subsuperficial y humedales de flujo superficial.

Los humedales artificiales se utilizan principalmente para la remoción de nitrógeno, fósforo y otros contaminantes. La remoción está relacionada con el crecimiento de las plantas macrófitas, como la denominada “*Typha domingensis*”.

La remoción de fósforo en los humedales es consecuencia de procesos de asimilación, precipitación y acumulación de materia orgánica, así como por la captación de las plantas.

La eliminación del nitrógeno durante el tratamiento por humedales artificiales presenta procesos como volatilización de amoníaco, nitrificación, desnitrificación, fijación de nitrógeno, absorción de plantas y microbios, mineralización, reducción de

nitrito a amonio, oxidación anaeróbica de amoníaco, fragmentación, adsorción, desorción, enterramiento, lixiviación, etcétera (Arteaga Cortez, Quevedo, Castro, Bravo, & Ramírez, 2020).

En humedales de flujo horizontal, la descomposición de materia orgánica es a través de procesos microbianos aeróbicos y anaeróbicos, así como por sedimentación y filtración de materia orgánica particulada; mientras que la eliminación del nitrógeno es por nitrificación, y las condiciones anóxicas y anaeróbicas son adecuadas para la desnitrificación; la eliminación del fósforo se da por adsorción y precipitación. (Arteaga Cortez, Quevedo, Castro, Bravo, & Ramírez, 2020).

Esta investigación estudia la remoción de nitrógeno y fósforo en diferentes medios de soporte utilizados en los modelos de humedales artificiales ubicados en los terrenos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH. Lo anterior con la finalidad de realizar una comparativa en los distintos medios de soporte con el ciclo de vida de la planta macrófita.

## 2. MARCO TEÓRICO

Las actividades humanas que realizamos día a día son las causas que generan gran parte del agua residual. Las principales fuentes son las aguas de origen doméstico, que procedentes de zonas residenciales, aunque también se generan en zonas comerciales, centros institucionales y centros recreativos; el agua residual industrial, infiltraciones y conexiones erradas son caudales extraños que ingresan en la red de alcantarillado, pero no son considerados parte formal de las aguas residuales domésticas. El tratamiento del agua puede definirse como el conjunto de procesos que tiene como objetivo alcanzar una calidad del agua residual que cumpla con las normas establecidas para el fin en lo que se vaya a utilizar y/o reutilizar el agua.

Existen tres tipos de procesos para tratar el agua residual físicos, químicos y biológicos, los cuales tienen como finalidad eliminar la mayor parte de contaminantes antes de su vertido.

Es importante mencionar que los tratamientos biológicos se caracterizan por su fácil operación y su económico mantenimiento, este tratamiento se utiliza principalmente en localidades rurales o de poblaciones pequeñas donde cuenten con un terreno extenso disponible, dentro de estos tratamientos se encuentran los humedales artificiales.

Los humedales artificiales se ubican en el sustrato constituido por materiales porosos y especies de plantas macrófitas, en las que de forma controlada se producen los procesos de eliminación de contaminantes.

Los humedales naturales, aparte de ser un gran ecosistema y un importante hábitat para muchos seres vivos intensivos, actúan como filtradores naturales de agua, esto se debe a que las plantas hidrófitas, que conforman al humedal, en sus tejidos almacenan y liberan agua, y de esta forma comienzan con el proceso de filtración (CONAGUA, 2015).

## 2.1 HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual del afluente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla, permitiendo la formación de nuevos organismos (CONAGUA, 2015).

La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permitiendo la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar (Lara, 1999).

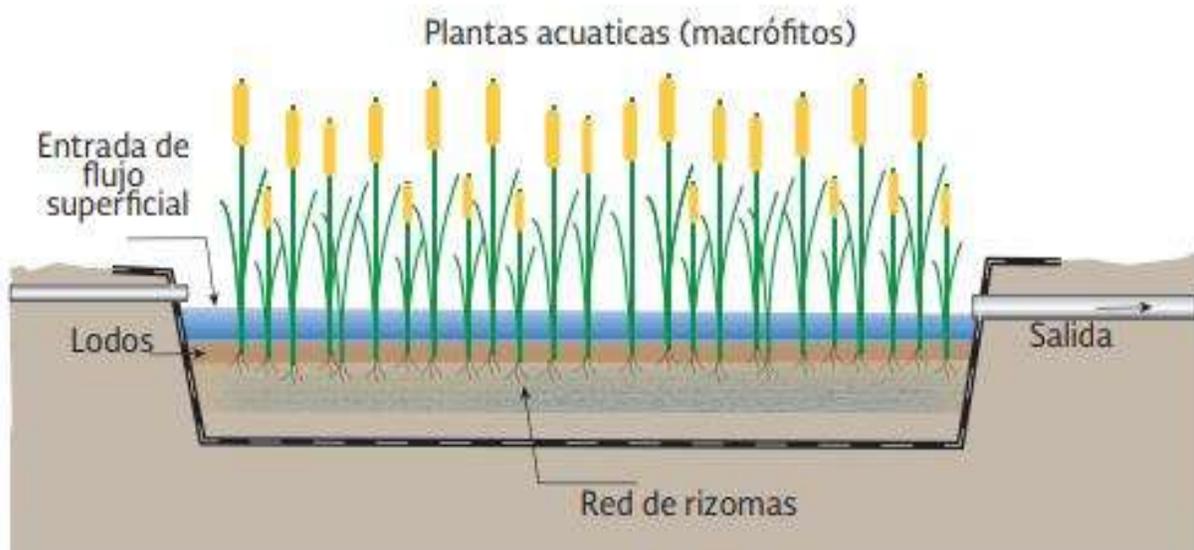
### 2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los Humedales artificiales se clasifican por el modo en que emplean en su funcionamiento, la planta macrófita ya sea en humedales de flujo superficial (HFS) y humedales de flujo subsuperficial (HFSS):

- Humedales de flujo superficial (Ilustración 1).

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera.

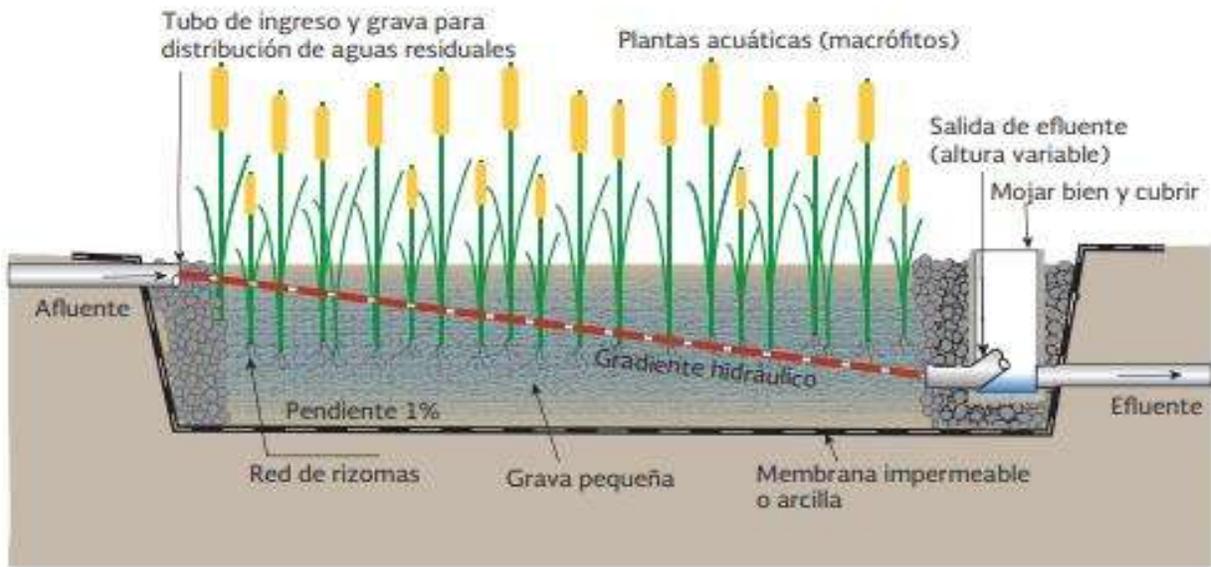
Este tipo de humedales son una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, que tienen una menor profundidad (no más de 0.6 m) y tienen plantas. Estos sistemas requieren más área que los de tipo subsuperficial y son una alternativa para cuando se requiere la remoción de nutrientes, en específico del fósforo (CONAGUA, 2015).



**Ilustración 1.** Humedal artificial de flujo superficial. Fuente: Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento "Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales" (CONAGUA, 2015).

- Humedales de flujo subsuperficial (Ilustración 2).

Los sistemas de flujo subsuperficial, se caracterizan por que la circulación del agua se realiza a través de un medio granular, con una profundidad que depende de las raíces de las plantas. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. En función de su configuración hidráulica, pueden ser de flujo horizontal o flujo vertical (CONAGUA, 2015).



**Ilustración 2.** Humedal artificial de flujo subsuperficial. Fuente: Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento "Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales" (CONAGUA, 2015).

Para el caso de los Humedales de flujo subsuperficiales (HFSS), Lara (1999) cita que debido al lecho filtrante existente se obtienen mayores tasas de reacción y por lo tanto se requiere de una menor área superficial que los humedales de flujo superficial (HFS); comenta además, que debido a que el agua fluye por debajo de la superficie del medio granular, se evitan posibles problemas de mosquitos, cosa que no sucede con los sistemas de flujo superficial, en donde estos insectos depositan sus huevecillos directamente sobre la superficie del agua. Igualmente se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa superficial no inundada constituye una mayor protección térmica (CONAGUA, 2015).

**Humedales subsuperficiales de flujo horizontal:** El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0.45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0.50 % a 1 %. El agua

residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

**Humedales subsuperficiales de flujo vertical:** Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Las aguas se infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

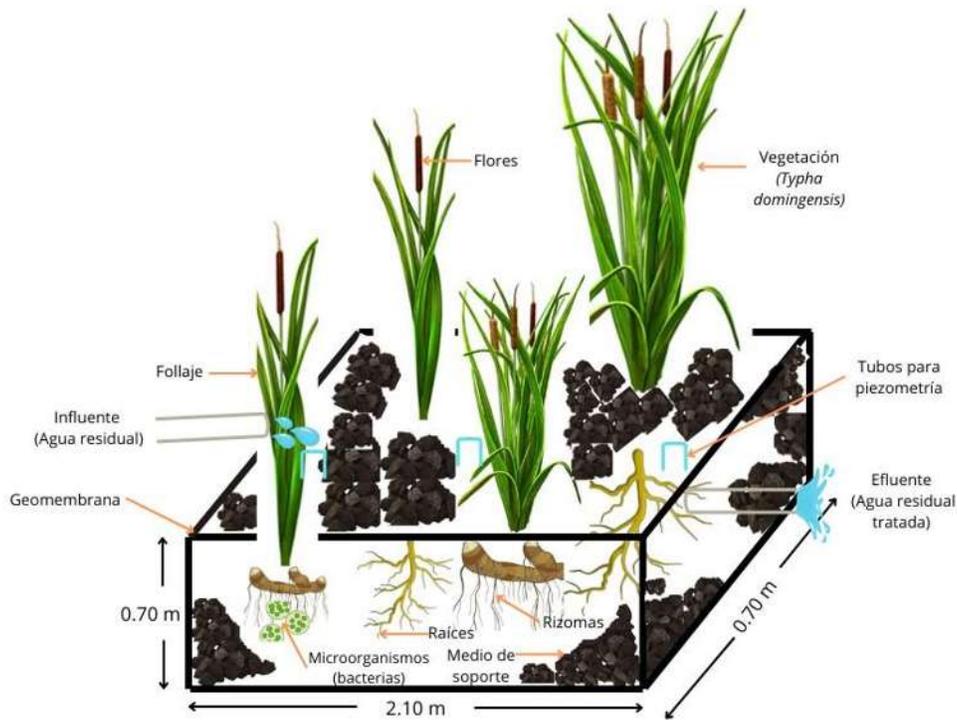
## 2.2 COLMATACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

La colmatación es la acumulación del material que se queda retenido en las raíces de las plantas macrófitas y en la zooglea.

El tratamiento previo del agua residual es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal. Es importante mencionar que los movimientos de las plantas como consecuencia del viento, mantiene abierta la superficie del medio, además el crecimiento de las raíces dentro del medio ayuda a disminuir la colmatación.

## 2.3 PARTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los componentes principales de los humedales artificiales son: el medio de soporte, la vegetación y el agua a tratar. En la siguiente Ilustración 3 se observan las partes de un humedal artificial.



**Ilustración 3.** Partes de un humedal de flujo subsuperficial horizontal.

### 2.3.1 SUSTRATO

El sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos, raíces, zooglea y restos de vegetación que con el paso del tiempo se acumulan en el humedal. Una de las principales características del sustrato es la permeabilidad que permite el paso del agua a través de él.

Según el MAPAS en el libro 30, Diseño de PTARM: Humedales artificiales (CONAGUA, 2015), se recomienda para el diseño de un humedal que el tipo sustrato tenga un diámetro entre 10 y 15 cm.

Se deben de utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende al caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

En la eliminación de contaminantes contribuye el medio granular porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y de los microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradación.

### 2.3.2 VEGETACIÓN

La vegetación propicia la formación de películas bacterianas, facilitando la filtración y la absorción de los constituyentes del agua residual, permitiendo la transferencia de oxígeno a la columna de agua y es capaz de controlar el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar. La función de la vegetación en la construcción de un humedal está basada principalmente en las raíces y en los rizomas.

La vegetación tiene la capacidad de estabilizar el sustrato, los tallos y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

En función de donde se desarrollen los humedales las plantas macrófitas se clasifican en (CONAGUA, 2015):

- Flotantes: Que son especies vegetales que viven en la superficie del agua, tales como *Eichornia crassipes* (“lirio acuático”) y *Lemna* sp (“Lenteja de agua”), entre las más usadas.
- Emergentes: Fijan sus raíces al fondo, pero crecen lo suficiente para que sus hojas aprovechen la luz fuera del agua, como la *Typha* sp (“tule”) y *Juncus*

sp (“junco”). Las macrófitas emergentes tienen la capacidad de crecer en un amplio intervalo de sustratos y en diferentes aguas residuales.

- Sumergidas: Se desarrollan exclusivamente dentro del agua como la elodea canadensis (“elodea”) y la potamogeton sp (“espiga de agua”, “pasto de agua” o “lila de agua”).

Según Lara en 1999, menciona que para la selección de macrófitas al utilizarse se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de humedal
- Profundidad de la instalación
- Utilizar especies locales
- Tolerancia a condiciones climáticas adversas
- Velocidad fotosintética alta
- Eficiente transporte de oxígeno
- Las especies deben tolerar y asimilar altas cargas de contaminantes
- Resistencia a insectos y enfermedades
- Facilidad de control

En la siguiente Tabla 1, se muestran las características de algunas especies de plantas macrófitas utilizadas en la construcción de los humedales.

La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el afluente de agua residual es depurado progresiva y lentamente.

En los humedales artificiales experimentales que estamos analizando están contruidos con la planta macrófita *Typha domingensis*, presentando una distribución robusta y una característica de fácil propagación por lo que se considera como una especie ideal para un humedal artificial.

**Tabla 1.** Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales.

Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	Carex sp.	-	14-32	-	-	5-7.5
	Eleocharis sp.	-	-	-	-	-
	Scirpus lacustris L. (*)	Junco de laguna	18-27		20	4-9
Gramíneas	Glyceria fluitans (L.) R. Br.	Hierba del maná	-	-	-	-
	Phragmites australis (Cav) Trin. Ex Steudel (*)	Carrizo	12-23	10-30	45	2-8
Iridáceas	Iris pseudacoris L.	Lirio amarillo, espadaña fina	-	-	-	-
Juncáceas	Juncus sp.	Juncos	16-26		20	5-7.5
Tifáceas	Typha sp (*).	Eneas, aneas, espadañas	10-30	12-24	30	4-10

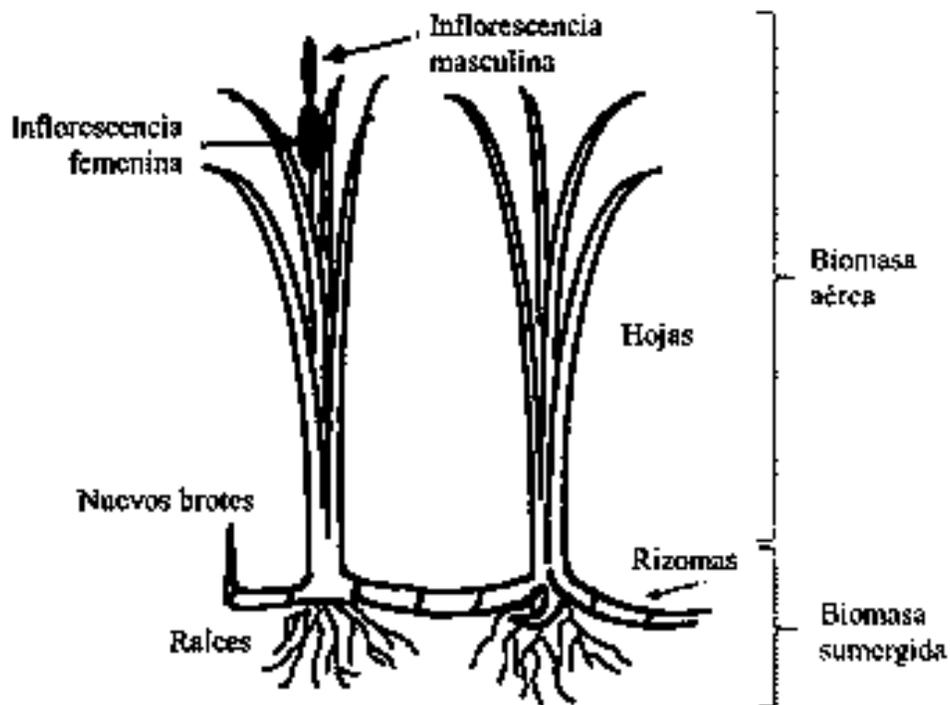
(\*) Especie más utilizada entre todas.

**Fuente:** *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales* (Lara, 1999)

### ***Typha domingensis***

Es una planta que pertenece a la familia Typhaceae, según Castroviejo, 2007 son plantas perennes, con la parte aérea herbácea. Su rizoma horizontal y grueso, sus tallos son herbáceos, simples, lisos, glabros. Se caracteriza por sus hojas con vaina largamente abrazadora, que suele nacer de la parte subterránea de la planta; las basales no sobrepasan la inflorescencia; las caulinares alternas, a veces sobrepasan la inflorescencia, dísticas; lámina con aerénquima, carnosos-esponjosa, linear, atenuada en el ápice, aguda, de sección transversal plano-convexa. Inflorescencia espiciforme, con dos partes cilíndricas, densas, dispuestas una tras otra en la parte superior del tallo, la superior masculina y la inferior femenina, a veces separadas una de otra por una distancia variable, protegidas por 1 o varias brácteas foliáceas, caedizas.

Las plantas del género *Typha* son herbáceas acuáticas emergentes y rizomatosas que poseen hojas verdes extremadamente largas, inflorescencia de tipo espiga compuesta y sistema de rizomas horizontales y subterráneos interconectados (Ilustración 4). Su estructura vegetativa emerge por encima de la lámina del agua y constituye su biomasa aérea, mientras que su sistema radicular arraigado en el fondo del humedal junto con los rizomas (tallos subterráneos o hipogeos) constituye la biomasa sumergida (Carhuancho, 2021).



**Ilustración 4.** Morfología general del género *Typha* (Carhuancho, 2021).

A esta planta se le conoce como espadaña, tule, masa de agua, cola de gato, petalzimicua, vela de sabana, su distribución se localiza en los siguientes estados: Aguascalientes, Campeche, Chiapas, Colima, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, entre otros.

Tomado en cuenta que la fitorremediación es el proceso por el cual se absorben, acumulan, metabolizan y estabilizan los contaminantes en el agua. Cada flor de la

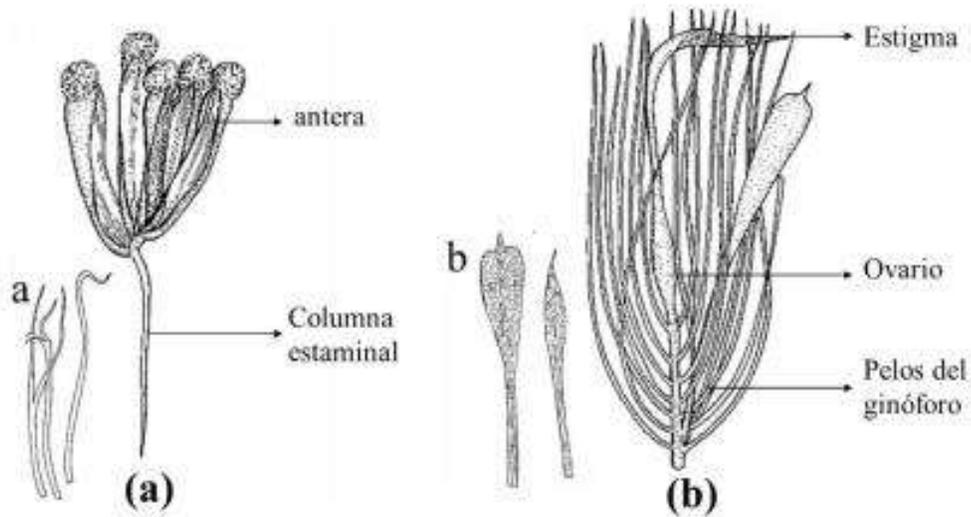
planta puede llegar a producir miles de semillas que se dispersan por el viento y caen germinando el suelo. Presenta una altura máxima de 2.5 m. Floreciendo en primavera y además fructifica hasta mediados de otoño, la edad máxima alcanzada es de 88 semanas, se reproducen por crecimiento vegetativo con la producción de rizomas conectados y/o través de semillas dispersadas por el viento (Pezeshki, DeLaune, Kludze, & Choi, 1996).

Esta especie de planta macrófita, tiene la capacidad de realizar fitorremediaciones en el tratamiento de aguas residuales, así como la capacidad de soportar la acumulación de altos grados de metales pesados como son: Cobre (Cu), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Cromo (Cr) y Hierro (Fe) (Pérez, 2021).

Según Pichardo (2009) extraído de CONABIO, la *Typha domingensis* tiene espigas masculinas hasta de 42 cm de largo y 1.5 cm de ancho y en general separadas de las femeninas por 0.7 a 5 cm, bractéolas de las flores masculinas filiformes a espatuladas, simples a ramificadas, algunas veces con incisiones que forman segmentos largos, frecuentemente coloreadas con puntos morenos en el ápice, de 2.5 a 3.5 mm largo, estambres de 2 a 4, total o parcialmente soldados, filamentos de 1 a 2.5 mm de largo, anteras de 2 a 3 mm de largo y 0.15 a 0.2 mm de ancho, conectivo generalmente obtuso y algunas veces con una punta corta y aguda, polen arreglado en mónadas; espigas femeninas hasta de 48 cm de largo y 2 cm de diámetro, flores femeninas con bractéolas largas y delgadas, acuminadas en el ápice, más largas que los pelos del ginóforo (estructura que levanta al ovario), de color moreno claro en el ápice, de 3 a 5 mm de largo, pelos del ginóforo ligeramente coloreados en la punta y más cortos que los estigmas, ovario fusiforme (con extremos que se alargan y la parte media ancha), estilo de 1 a 2 mm de largo, estigma largo y delgado, de 0.5 a 1.5 mm de largo.

Las flores masculinas se sitúan en la parte superior de la inflorescencia mientras que las femeninas se sitúan en el inferior. Las flores masculinas presentan numerosas bractéolas; estambres 1-5 filamentos total o parcialmente soldados, las anteras son oblongas, basifijas, con dehiscencia longitudinal; y tejido conectivo prolongado en un ápice obtuso o apiculado (Ilustración 5). El polen aparece en

mónadas o en tétradas. Las flores femeninas pueden presentar o no bractéolas filiformes ensanchadas en el ápice (Carhuancho, 2021).



**Ilustración 5.** A. Flor masculina, bractéolas masculinas, B. Flor femenina, bractéolas femeninas (Carhuancho, 2021).

Su reproducción biológica puede realizarse a través de semillas y de rizomas. Según Carhuancho, 2021 las semillas son liberadas de la inflorescencia y dispersadas por el viento (Baldwin y Cannon 2007), cuando las semillas se depositan en un cuerpo de agua, el éxito o fracaso de su establecimiento en su nuevo hábitat está estrechamente relacionado con su capacidad de germinación (Ilustración 6).

El rizoma es un tallo subterráneo importante para las especies de *Typha* (Ilustración 7), porque es el soporte estructural de las raíces y almacena carbohidratos ricos en energía y reservas de nutrientes para la formación de nuevos brotes. Los rizomas facilitan la rápida reproducción vegetativa y su expansión en un hábitat. El éxito de este tipo de reproducción depende de los factores como temperatura, luz, profundidad del agua y nutrientes en el sustrato o agua (Carhuancho, 2021).



**Ilustración 6.** Semillas de *T. domingensis* (Carhuancho, 2021).



**Ilustración 7.** Rizomas de *Typha* (Carhuancho, 2021).

### 2.3.3 AGUA RESIDUAL

Las aguas residuales provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales, etcétera. Son transportadas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia una planta de tratamiento del agua residual.

La mala calidad de las aguas residuales es consecuencia del deterioro causado por el aumento de población que genera una mayor producción de aguas residuales domésticas. También el sector agropecuario puede ser causa de tal deterioro. Dichas aguas si son vertidas sin ningún tratamiento pueden llegar a generar altas concentraciones de nutrientes como es el fósforo y el nitrógeno.

El fósforo y el nitrógeno como contaminantes en las aguas superficiales provienen del empleo de fertilizantes en la agricultura, de actividades como la ganadería o la industria, de procesos naturales y de los vertidos de aguas residuales urbanas.

## 2.4 PARÁMETROS DE CAMPO

Son parámetros que por su naturaleza son cambiantes y deben de ser medidos in situ, los cuales permiten realizar un pre-diagnóstico de la calidad del agua.

Los parámetros de campo (determinados in situ) son de gran importancia ya que sirven como base de referencia para la determinación de la mayoría de los parámetros de laboratorio y, en algunos casos son parte de los mismos. Las determinaciones en campo sirven también como parte de las condiciones iniciales para modelación de contaminantes y/o análisis estadísticos de la calidad del agua en sistemas recolección, tratamiento y cuerpos receptores de aguas residuales (ríos, lagos, embalses, etc.) (Aguilera J, García A, & Ruíz C, 2009).

En este trabajo, no se requirió de los parámetros de campo para la determinación de nitrógeno y fósforo, aunque se optó por dejarlos para complementar las características de la calidad del agua.

Los parámetros de campo se definen a continuación:

**Temperatura:** La temperatura del agua residual es mayor que la temperatura de agua para abastecimiento, como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial. Este parámetro es importante en el tratamiento de aguas residuales ya que muchos procesos biológicos dependen de la temperatura (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

La temperatura del agua es un parámetro importante por su efecto de la vida acuática, en las reacciones químicas y velocidades de reacción y en la aplicabilidad del agua a usos posteriores. A las industrias que utilizan aguas superficiales para sus procesos de enfriamiento, les interesa mucho la temperatura del agua. Las temperaturas elevadas pueden dar lugar a crecimientos indeseables de plantas acuáticas y hongos (Aguilera J, García A, & Ruíz C, 2009).

**pH.** Se refiere a la ionización del agua o concentración de iones de hidrógeno, el cual tiene una importancia directa en los diferentes tipos de descarga de agua residual. Para agua residual doméstica y comercial según la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 el promedio de variación de pH es 7 a 9; un rango fuera de este valor nos dará indicio de descargas de origen industrial (Aguilera J, García A, & Ruíz C, 2009).

Un pH menor de 7.0 indica una tendencia de acidez, mientras que un valor mayor de 7.0 muestra una tendencia de alcalinidad.

**Conductividad eléctrica.** Ésta sirve para conocer rápidamente las variaciones de las concentraciones de los minerales disueltos en las muestras de aguas crudas o de desechos. La conductividad tiene un comportamiento estable para aguas sin contaminar, generalmente las provenientes de manantiales, pozos, ríos, etc.; las cuales, comparadas con las variaciones de una descarga de aguas residuales,

serán inmensamente mayores debido a su alta concentración de partículas disueltas. Las aguas domésticas que contienen cantidades significativas de desechos pueden también evidenciar una considerable variación diaria. La cantidad de sólidos disueltos en una muestra de agua se estima con frecuencia multiplicando la conductancia específica por un factor empírico; este dependerá del tipo de aparato utilizado para su determinación (Aguilera J, García A, & Ruíz C, 2009)

**Sólidos disueltos totales.** En aguas potables, la mayoría de la materia está en forma disuelta y consiste principalmente en: sales inorgánicas, pequeñas cantidades de materia orgánica y gases disueltos. Las determinaciones de las cantidades de materia disuelta e insoluble se efectúan haciendo pruebas en las porciones de muestras filtradas y no filtradas.

Una rápida estimación del contenido de sólidos disueltos de un abastecimiento de agua puede ser obtenida midiendo la conductividad eléctrica. Tal medida indica la capacidad de una muestra para conducir la corriente eléctrica, la cual a su vez está relacionada con la concentración de las sustancias ionizadas en el agua. Aunque su medida se ve afectada por la naturaleza de los diversos iones y sus concentraciones relativas, tal medida puede dar una estimación práctica de las variaciones en el contenido mineral disuelto de un abastecimiento de agua dado (Aguilera J, García A, & Ruíz C, 2009).

**Salinidad:** Es una medida de la cantidad de sales disueltas en el agua y tiene relación con los sólidos disueltos totales, ya que una parte de ellos son sales.

## 2.5 REMOCIÓN DE NUTRIENTES

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Evidentemente, un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos tienen lugar. Por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

En la remoción de los nutrientes en humedales participan las bacterias, protozoos, y algunos hongos, estos microorganismos son encargados de llevar los procesos de remoción de contaminantes.

El fósforo y el nitrógeno como contaminante en las aguas superficiales provienen del empleo de fertilizantes en la agricultura, de actividades como la ganadería o la industria, de procesos naturales y de los vertidos de aguas residuales urbanas. Este tipo de nutrientes son los principales elementos responsables del crecimiento de la maleza acuática y pueden dispersarse por el aire, agua y suelo.

### 2.5.1 NITRÓGENO

El nitrógeno en aguas residuales está compuesto por nitrógeno orgánico y este a su vez está constituido por las formas correspondientes como son el nitrato, nitrito y amoníaco. El amoníaco es uno de los componentes transitorios del agua ya que es parte del ciclo del nitrógeno y se ve influido por la actividad biológica.

El contenido en nitrógeno orgánico se determina con el método Kjeldahl. Este consiste en hervir la muestra acuosa con el objetivo de eliminar el amoníaco, para dar paso al proceso de digestión en el que el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco. El nitrógeno en forma de nitrito, cuya determinación se realiza colorimétricamente, es relativamente inestable y fácilmente oxidable a la forma de nitrato. Es un indicador de contaminación anterior al proceso de estabilización. El nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en las aguas residuales. La concentración de nitratos también suele determinarse vía métodos colorimétricos.

Al momento que ingresa el agua residual al humedal, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, que

ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y desnitrificación (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Según Lara en 1999, menciona que la remoción de nitrógeno en sistemas de humedales artificiales varía entre un 25% y un 85%.

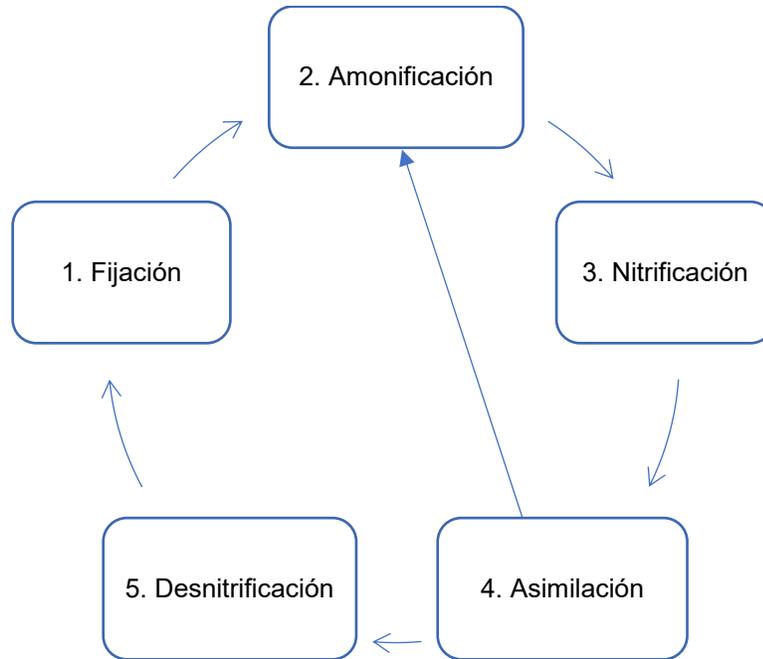
La remoción de nitrógeno puede ser muy efectiva en los sistemas de humedales artificiales y los principales mecanismos de eliminación son similares para los dos casos. Aunque ocurre la asimilación de nitrógeno por parte de las plantas, solo una pequeña fracción del nitrógeno total puede ser eliminada por esta vía. Algunas experiencias en Norteamérica demuestran que solamente entre el 10 y 15% del nitrógeno eliminado se retira del sistema usando la poda de las plantas.

Aunque en el MAPAS (CONAGUA, 2015) se comenta que en humedales de flujo subsuperficial se espera una remoción máxima de entre 20 y 30 por ciento dependiendo del diseño y operación.

El mecanismo de remoción de nitrógeno en los humedales es la nitrificación-desnitrificación. El oxígeno requerido para la nitrificación se obtiene a partir de la atmósfera y a través de la transferencia de los rizomas. Por tanto, la concentración de oxígeno disuelto es el factor limitante para llevar a cabo la nitrificación dentro del humedal.

### **Ciclo del nitrógeno**

El nitrógeno ( $N_2$ ) es el elemento que se encuentra en forma libre (estado gaseoso) y en mayor abundancia en la atmósfera (78%). Los seres vivos cuentan con una gran proporción de nitrógeno en su composición química (CICEANA, 2020). El ciclo del nitrógeno es un proceso a través del cual el nitrógeno se mueve de la atmósfera a la tierra, liberándose nuevamente a la atmósfera. Consta de cinco procesos los cuales se presentan en el siguiente Esquema 1:

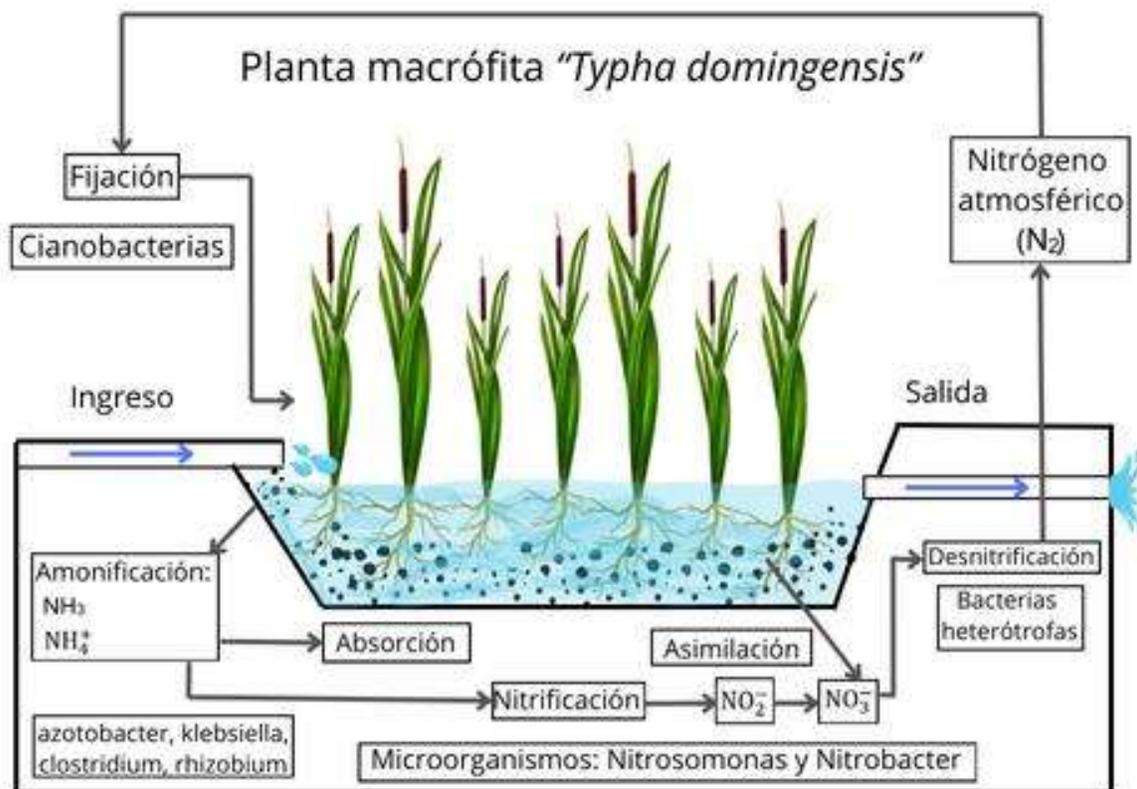


**Esquema 1.** Etapas del ciclo del nitrógeno.

- **Fijación:** Se realiza mediante microorganismos fijadores principalmente bacterias (Cianobacterias) y fenómenos meteorológicos que incluyen descargas eléctricas.
- **Amonificación:** Se realiza a través de bacterias (azotobacter, klebsiella, clostridium, rhizobium) y hongos. Los seres vivos (plantas y animales) comienzan a descomponerse con el tiempo cuando mueren, liberando materia orgánica que contiene nitrógeno y las bacterias al alimentarse de restos del nitrógeno lo transforman en forma de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) o amonio ( $\text{NH}_4^+$ ).
- **Nitrificación:** El nitrógeno en forma de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) o amonio ( $\text{NH}_4$ ) es transformado en nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) por bacterias nitrosomonas oxidando en amoniaco y a su vez las bacterias nitrobacter oxidan los nitritos a nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).

- **Asimilación:** Las plantas pueden asimilar nitratos y amonios a través de sus raíces. Las células vegetales sintetizan aminoácidos que contienen una porción de nitrógeno. Los animales consumen plantas, asimilando el nitrógeno y cuando estos animales mueren se descomponen y por lo tanto se recircula a la etapa de amonificación realizando un ciclo interno. Es importante señalar que la urea y desechos de animales también contienen nitrógeno y son descompuestos por las bacterias en el suelo y agua convirtiéndolos en amonio.
- **Desnitrificación:** Una parte del nitrógeno no está presente en las plantas y animales siguen presente en el suelo o agua y su descomposición es llevada a cabo por las bacterias desnitrificantes (*Pseudomonas*) revirtiendo la acción de fijadoras de nitrógeno regresándolo a la atmósfera en forma gaseosa.

El ciclo del nitrógeno con la planta *Typha Domingensis* (Ilustración 8), consiste en la fijación a través del nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) y del agua residual doméstica que es introducida en el humedal experimental, los microorganismos fijadores del nitrógeno capturan el nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) pasando por la etapa de amonificación, transformando el nitrógeno (N) y liberándolo en forma de amoniaco ( $NH_3$ ) o amonio ( $NH_4^+$ ), parte de estos compuestos son absorbidos por las plantas en su etapa de crecimiento y el resto pasa por el proceso de nitrificación, las bacterias nitrosomonas lo oxidan y lo transforman en nitritos ( $NO_2^-$ ), posteriormente las bacterias nitrobacter oxidan el nitrito en nitrato ( $NO_3^-$ ), las plantas son capaces de asimilar los nitratos a través de sus raíces y posteriormente pasar por el proceso de desnitrificación, parte del nitrógeno es asimilado por las bacterias heterótrofas desnitrificantes (*Pseudomonas*), su función es descomponer el nitrato liberándolo en forma de nitrógeno gaseoso incorporándose en la atmósfera en nitrógeno atmosférico y comenzando un nuevo ciclo de nitrógeno.



**Ilustración 8.** Ciclo del nitrógeno en la planta Typha Domingensis.

## 2.5.2 FÓSFORO

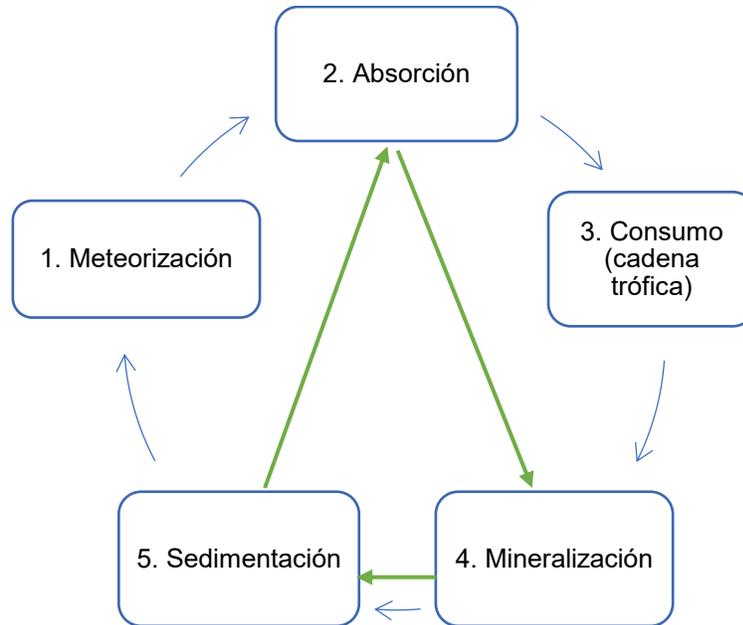
Según Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, (2010) el fósforo está presente en los sistemas de recolección de aguas residuales (alcantarillado) en tres distintas formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. Cerca del 25% del fósforo total fijado en la alcantarilla está presente como ortofosfatos tales como:  $PO_4^{3-}$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4$ ,  $H_3PO_4$ , que son disponibles para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, en la planta de tratamiento lo que importa es la concentración de fosfato orgánico antes que la concentración de fósforo total. Los mecanismos principales para la remoción de fósforo son la captación por parte de las plantas y la retención en el terreno (Lara, 1999).

La remoción de fósforo en los humedales es consecuencia de procesos como asimilación, formación de complejos, precipitación y por acumulación de materia orgánica. Los humedales de flujo superficial generalmente son diseñados para la remoción de contaminantes (CONAGUA, 2015).

### **Ciclo del fósforo**

El fósforo (P) es un elemento esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos, en las aguas superficiales existen proliferaciones incontroladas de algas por causa de las descargas de aguas residuales domésticas, industriales y por escorrentías naturales (Ibáñez, 2009).

El ciclo del fósforo (Esquema 2) es considerado de gran importancia ya que describe el movimiento y transformación del fósforo dentro de algunas etapas de los ecosistemas. El fósforo se encuentra de manera abundante en sistemas rocosos en forma de fósforo inorgánico y en los seres vivos en fósforo orgánico. Se caracteriza por ser un ciclo lento. Sus etapas principales son la liberación de fósforo a través de la meteorización, encontrándose en la intemperie, por efectos de lluvia, erosión, minería, fertilizantes, etc.; absorción de las plantas; consumo por los organismos esto se realiza mediante la cadena trófica; descomposición y mineralización, sedimentación y liberación (Bordino, 2023).



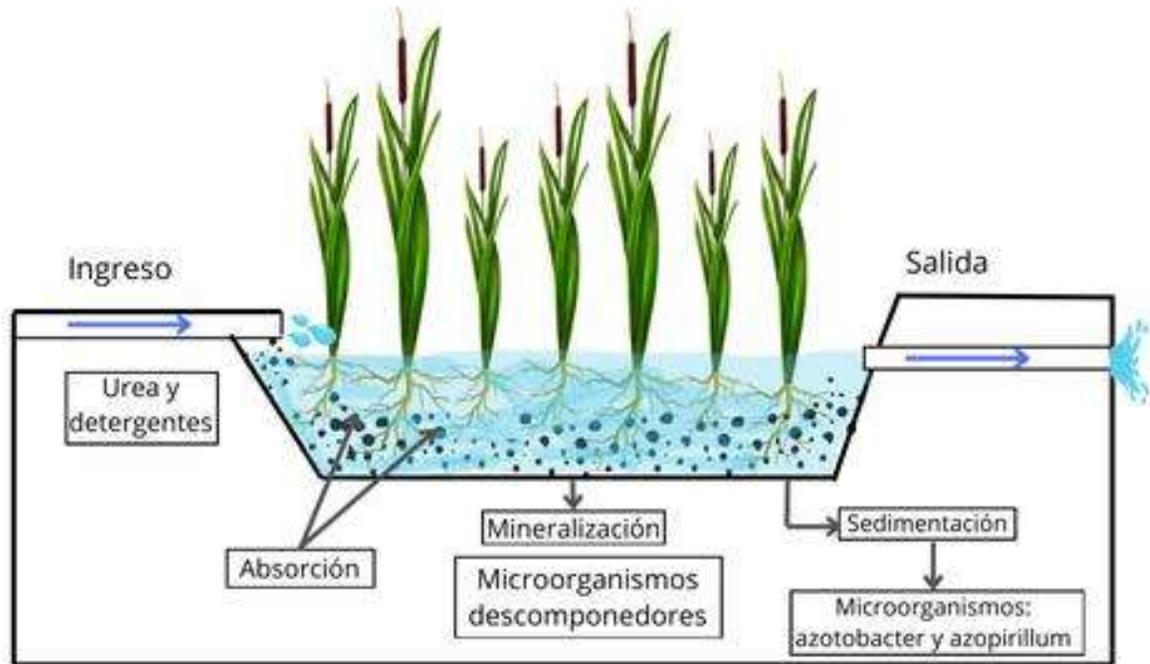
**Esquema 2.** Etapas del ciclo del fósforo.

- **Meteorización (liberación del fósforo).** Las rocas y minerales fosfatados se descomponen con la acción de agentes erosivos como el agua, temperatura y viento liberando fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) liberando el fósforo hacia el suelo.
- **Absorción de las plantas:** Los fosfatos están presentes en el suelo y las plantas lo absorben a través de sus raíces.
- **Consumo por los organismos:** Se realiza mediante la cadena trófica (productor, consumidor primario, consumidor secundario, consumidor terciario y descomponedores), algunos animales se alimentan de estas plantas o de otros animales que lo hayan obtenido y contengan fosfatos en sus tejidos.
- **Descomposición y mineralización:** Los microorganismos descomponedores actúan cuando mueren las plantas y los animales. Liberándose fosfatos de nuevo al suelo o al agua.

- **Sedimentación y liberación:** Se realiza una formación de rocas fosfatadas debido a los fosfatos disueltos en el agua que pueden acumularse en los sedimentos de fondo de los cuerpos de agua, los sedimentos pueden comprimirse o solidificarse con el paso del tiempo formando rocas. Con el movimiento de las placas tectónicas pueden ser empujadas al interior de la tierra liberándose nuevamente durante alguna actividad volcánica en forma de gases o cenizas volcánicas.

El ciclo del fósforo con la planta *Typha Domingensis* (Ilustración 9), consiste en la introducción del agua residual con concentraciones de fósforo en el humedal, los microorganismos lo liberan en forma de fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ), a través de sus raíces es absorbida por las plantas estimulando su crecimiento, posteriormente surge la mineralización con los microorganismos descomponedores (rihizobium, bacilus, enterobacter) liberando compuestos fosfatados nuevamente al suelo y al agua esto se debe a la senescencia de la planta y la muerte de los tejidos vegetales, finalmente se genera la sedimentación e inmovilización por los microorganismos azotobacter y azopirillum, formando deposiciones en los sedimentos generando una inmovilización, los fosfatos pueden llegar a acumularse hasta lograr rocas fosfatadas.

### Planta macrófita “*Typha domingensis*”



**Ilustración 9.** Ciclo del fósforo en la planta *Typha Domingensis*.

### 3. ANTECEDENTES

En el año 2007 se realizó un estudio de la relación entre el crecimiento de la macrófita *Typha domingensis* y la remoción de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en un humedal construido por A. Vera, en el cual menciona lo siguiente:

“La mayor eficiencia de remoción reportada fue de 75.56% y 68.66% para nitrógeno y materia orgánica respectivamente (humedal superficial y una fosa control), los cuales se encuentran dentro del rango establecido de 75-95% para nitrógeno total y de 70-90% para DQO en sistemas similares de humedales construidos. En cuanto a la remoción de fósforo se puede observar que la misma se presentó sólo en las tres primeras semanas reportando un máximo de 22.05%, a partir del cual se presentó un aumento de la concentración de fósforo en el efluente. La poca eficiencia de remoción de este parámetro se debe a las limitadas oportunidades de contacto entre el agua residual y el terreno, ya que los mecanismos principales para la remoción de fósforo son la captación por parte de las plantas y la retención en el terreno.”

Pareja (2015), presentó una evaluación de la eficiencia de la remoción de nutrientes del efluente de la PTAR de la empresa esmeralda corp. S.A.C. mediante el uso de humedales artificiales, empleando *Typha domingensis* Pers. (Totora), concluyendo lo siguiente:

“El monitoreo se realizó durante ocho meses, determinándose que la puesta en marcha del humedal de flujo subsuperficial fue más rápida que el humedal de flujo superficial, de un mes y de dos a tres meses respectivamente. Así mismo, se determinó que las eficiencias de remoción de nitrógeno fueron altas, de 86% a 98% para el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) y de 95% a 98% para nitrógeno inorgánico total. Para el caso de la remoción de fosfato, se obtuvieron eficiencias entre 32% a 71%, cabe resaltar que las eficiencias en la remoción de nitrógeno y fósforo se vieron afectadas por los diferentes de

caudales hidráulicos recibidos. Además, se observó que el humedal de flujo superficial removió más nitrógeno inorgánico mientras que el humedal de flujo subsuperficial removió igual o más fosfato que el humedal de flujo superficial. Finalmente, se determinó que la remoción de nitrógeno amoniacal y de nitrito fue suficiente para reutilizar el agua en un sistema acuícola, sin causar daño a los peces.

El humedal de flujo subsuperficial empleando la totora (*Typha domingensis*) ha sido eficiente para la remoción de nitrógeno en términos de nitrógeno total (Nt), nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) y de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), luego de un período de funcionamiento de 9 meses. Así, se presentan como los mayores valores de remoción: 87.8%, para el Nt; 90% para el  $\text{NH}_4^+$ ; y 99.6% para el  $\text{NO}_3^-$ .

En relación a la remoción de fósforo, se puede mencionar que el HAFSS empleando la totora (*Typha domingensis*) ha sido eficiente en función del fósforo total (Pt), ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y anhídrido fosfórico ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Presentándose como mayores valores de rendimiento: 94.5%, para el Pt; 99.4%, para el  $\text{PO}_4^{3-}$  y 94%, para el  $\text{P}_2\text{O}_5$ .”

Solís Silvan, R., López Ocaña, G., Bautista Margulis, R. G., Hernández Barajas, J. R., & Romellón Cerino, M. J. (2015), realizaron un estudio sobre la “Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita”, implementando lo siguiente:

“Humedales artificiales de flujo libre con *Typha domingensis* (espadaña) y *Eichhornia crassipie* (jacinto de agua); y humedales de flujo subsuperficial empleando *Paspalum paniclatam* (camalote) y *Cyperus articulatus* (chintul). Los humedales que presentaron mayor eficiencia de remoción de nutrientes en el agua residual fue el humedal del flujo libre con *Typha domingensis* con una remoción de un 97.20% de Nitrógeno total y un 91.10% de Fósforo total y en el humedal de flujo subsuperficial empleando la planta *Paspalum paniculatum* se obtuvieron remociones de un 92.70% de Nitrógeno total y un

52.20% de Fósforo total. Los humedales de flujo libre empleando *Eichhornia crassipes* y de flujo subsuperficial en el que se utilizó *Cyperus articulatus* presentaron menores eficiencias de remoción de contaminantes.”

De acuerdo con Arias Martínez & Beta (2018), realizaron un estudio sobre la fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas y los resultados de la experimentación fueron los siguientes:

“Los porcentajes de remoción de contaminantes obtenidos en el sistema de tratamiento por humedales para el tratamiento de las aguas residuales de la unidad productiva de cerdos del Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada, Colombia, indican que el nitrógeno orgánico que entra en el humedal está típicamente asociado con la materia orgánica del agua residual y con algas. La remoción inicial de estos materiales como sólidos suspendidos es rápida, gran parte del nitrógeno orgánico sufre descomposición o mineralización y se convierte en nitrógeno amoniacal en el agua. Por lo tanto, la remoción del nitrógeno se encuentra asociada con la remoción de sólidos suspendidos totales siendo de 50%, el nitrógeno del 59% y el fósforo presentó una remoción del 90%. De este total el 75% se fijó en el medio de soporte filtrante y el resto fue asimilado por las plantas.”

Flores Landeo & Huamán Soto, (2018) realizaron una tesis sobre el “Sistema de depuración de aguas residuales mediante humedal artificial de flujo subsuperficial en la comunidad campesina de Ocopa - Distrito Lircay”:

En esta investigación analizaron 6 muestras a la entrada y salida del humedal tomadas en 3 periodos. El primer período se realizó un mes después de la implantación de la planta *Typha*, el segundo periodo al transcurrir dos meses de su implantación y por último el tercer periodo al pasar tres meses, obteniendo como resultado un promedio de 37.72% de remoción de nitrógeno total y un 34.47% de fósforo total en los tres períodos analizados.

Schierano & Allegrini en el año 2018, analizaron la aplicación de humedales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de efluentes de predios lecheros en

Argentina con la finalidad de comparar los porcentajes de remoción de contaminantes con dos plantas macrófitas, implementando lo siguiente:.

Construyeron dos humedales en serie con la planta *Typha domingensis* con lo que obtuvieron más del 92% de remoción de fósforo total y un 76% de nitrógeno total kjeldhal. Asimismo se construyeron dos humedales en serie con la planta *Phragmites australis* obteniendo una remoción de un 73% de nitrógeno total kjeldhal y un 83% de fósforo total.

Pérez & Domínguez (2019), analizaron la industria textil debido a que esta industria ha presentado notables problemas medioambientales vinculados principalmente con el uso y la gestión del agua, concluyendo que:

“Las aguas residuales de la industria textil han llegado a ser un problema igual o mucho más grande que las domésticas. Esta industria debido a su demanda de producción ha aumentado la cantidad de aguas residuales proporcionalmente, por lo que hoy es uno de los mayores problemas de contaminación. El uso de humedales artificiales para depurar las aguas provenientes de esta industria es una opción de tratamiento reconocida y recomendada. Los mismos han demostrado ser efectivos en la remoción de materia orgánica, nutrientes, metales pesados y otras sustancias tóxicas que de otra manera serían vertidas sin tratamiento alguno al medio ambiente.”

López (2019) investigó, sobre el “Desempeño de humedales construidos a escala piloto para el tratamiento de agua residual urbana utilizando *Cyperus Giganteus* Vahl y *Typha domingensis* Pers”, concluyendo lo siguiente:

“El objetivo de su presente trabajo fue describir el desempeño y la eficiencia de dos macrófitas en humedales del tipo flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales urbanas en la ciudad de San Lorenzo, Paraguay. Como tratamiento primario se utilizó un tanque séptico, seguido de dos humedales, una con *Cyperus Giganteus* (CG), y otra con *Typha domingensis* (TD). Los resultados de los análisis de las aguas muestran que ambos humedales construidos a escala piloto resultaron ser efectivas para el

tratamiento empleado, observando una reducción considerable en cada parámetro estudiado, con respecto a la entrada al sistema. El porcentaje de remoción de nitrógeno amoniacal fue de 42% (*Cyperus Giganteus*) y 65% (*Typha domingensis*). Para fósforo total fue de 45% (*Cyperus Giganteus*) y 58% (*Typha domingensis*). La demanda bioquímica de oxígeno 64% (*Cyperus Giganteus*) y 81% (*Typha domingensis*), mientras que para la demanda química de oxígeno la eficiencia fue de 40% (*Cyperus Giganteus*) y 61% (*Typha domingensis*) respectivamente.”

Castro (2019), realizó una investigación acerca de la “Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas”:

“Su objetivo principal de esta investigación fue el de utilizar plantas macrófitas emergentes de la especie *Heliconia pssitacorum*, analizando en dos humedales para determinar su eficiencia en la remoción de fósforo y nitrógeno. La composición del primer humedal consistió en un medio de soporte a base de grava de 10 cm, bambú cortado en trozos de 10 cm y arena fina, removiendo un 73% de nitrógeno total y un 82% de fósforo total y el segundo humedal está construido con capas de 0.15 m de altura de arena fina y 0.15 m de grava de 5 cm removiendo un 62% de nitrógeno total y un 81% de fósforo total.”

Gómez Rodríguez, A. C. en el año 2019 presentó una investigación sobre el “Tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales con *Acrostichum danaeifolium* y *Typha domingensis*”, en la cual menciona que en ambos humedales utilizaron como medio de soporte grava, sembrando una combinación de las dos plantas macrófitas. Finalmente, obteniendo los siguientes resultados:

“Una remoción en el humedal de flujo libre de 66.77% de nitrógeno total y en el humedal de flujo subsuperficial de 98.21% de nitrógeno total; en el caso del fósforo total se obtuvieron los siguientes porcentajes, en el humedal de

flujo libre se removió un 65.12% y en el humedal de flujo subsuperficial un 96.55%.”

De acuerdo con Arteaga Cortez, Quevedo, Castro, Bravo, & Ramírez (2020):

“La eliminación del nitrógeno con el tratamiento de humedales artificiales involucra procesos tales como volatilización de amoníaco, nitrificación, desnitrificación, fijación de nitrógeno, absorción de plantas y microbios, mineralización, reducción de nitrato a amonio, oxidación anaeróbica de amoníaco, fragmentación, adsorción, desorción, enterramiento, lixiviación, entre otros.

Los autores exponen que en humedales de flujo horizontal, la descomposición de materia orgánica es a través de procesos microbianos aeróbicos y anaeróbicos, así como por sedimentación y filtración de materia orgánica particulada; mientras que la eliminación del nitrógeno es por nitrificación, y que además, las condiciones anóxicas y anaeróbicas son adecuadas para la desnitrificación. Asimismo, la eliminación del fósforo se da por adsorción y precipitación.

También argumentan que la efectividad de remoción en los humedales artificiales es del 96% para Sólidos Suspendidos Totales; 96% para Demanda Bioquímica de Oxígeno; 87% para Demanda Química de Oxígeno, y 30% para fósforo total.”

López, (2020) realizó una investigación sobre la “Evaluación de la eficiencia de la remoción de plomo en aguas residuales del río Tarma usando *Hydrocotyle bonariensis* Lam. y *Typha latifolia* L. en humedales artificiales en Lima, Perú”, teniendo como objetivo lo siguiente:

“Evaluar la eficiencia de humedales artificiales en la disminución de metales pesados y nutrientes. Sus resultados indicaron que el tratamiento con el humedal artificial que contenía plantas de la especie *T. latifolia*, fue la que mostró los valores más altos de reducción de la conductividad eléctrica (50

%), nitrógeno total (90.7 %), fósforo total (80 %), DBO<sub>5</sub> (78.24 %) y plomo (83.12 %) evaluada a las 30 horas y con un pH promedio de 5.8. En esta investigación se demuestra la viabilidad, a nivel de laboratorio para la remoción del plomo y otros parámetros presentes en el agua residual utilizando un humedal artificial de tipo subsuperficial.”

Morocco & Paye (2021), investigaron en Arequipa, Perú la remoción de nutrientes en los humedales en la planta de tratamiento de aguas residuales Omo-Moquegua utilizando dos plantas macrófitas llamadas *Typha angustifolia* L. conocida como totora y la planta *Phragmites australis*, comúnmente se le denomina carrizo. La investigación concluyó que:

“La especie *Typha angustifolia* L. (totora) fue la que más removió fósforo total con un 47.97%, mientras que la especie *Phragmites australis* (carrizo) solo removió un 20.81% de fósforo total. En cuanto al nitrógeno total la especie *Phragmites australis* (carrizo) fue la que más remoción tuvo con un 36.89%, en comparación con la especie *Typha angustifolia* L. (totora) que solo tuvo un 31.64%.”

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En México más del 50 % de los cuerpos de agua se encuentran contaminados presentando una concentración elevada de materia orgánica, nutrientes, sólidos suspendidos entre otros (CONAGUA, 2015). El reúso de estas aguas, como el riego agrícola, genera consecuencias afectando a la salud de la población, afectando al suelo y a los medios acuáticos ocasionando eutroficación y en consecuencia proliferación de maleza acuática. Otro problema en los tratamientos convencionales, es el uso de la energía eléctrica para el funcionamiento de sus equipos, ocupando personal especializado para su operación, lo que los hace muy costosos para su funcionamiento y mantenimiento. Por esta razón, los humedales artificiales son un alternativa de solución a dicha problemática más viable debido a su bajo costo de mantenimiento ya que el trabajo lo realizan las plantas y el medio de soporte sin necesidad de ocupar energía eléctrica. En la UMSNH se están llevando a cabo trabajos para lograr un mejor entendimiento del funcionamiento de los humedales, bajo diferentes alternativas de medios de soporte en combinación con la planta *Typha domingensis*, nativa de esta región. Actualmente se cuenta con humedales experimentales desarrollados por investigadores y alumnos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental en el que se han estudiado las condiciones viables con mayor influencia para el funcionamiento eficiente de los humedales.

## 5. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años se ha observado un crecimiento demográfico que ha generado dificultades para dotar de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a las poblaciones.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen por objeto el mejorar la calidad de las descargas de aguas residuales a través de procesos físicos, biológicos y químicos. Una ventaja de los humedales es que no ocupan energía eléctrica para su funcionamiento siendo económicos en su operación.

El vertido de aguas residuales de origen doméstico, comercial e industrial sin un previo tratamiento en un cuerpo de agua natural y suelo, constituye un problema para el medio ambiente y en consecuencia para las poblaciones en general. Algunas de sus consecuencias son las concentraciones elevadas de materia orgánica que puede llegar a causar severos daños a la salud de la población y posible destrucción de ecosistemas naturales.

Por lo tanto, el propósito de este trabajo es demostrar la capacidad que tienen los humedales artificiales de remover nutrientes como el nitrógeno y fósforo del agua residual, sin la necesidad de invertir económicamente en material o equipos grandes costos ya que los humedales requieren de relativamente poco mantenimiento el cual consiste básicamente en la poda de la vegetación y remoción de maleza. El abastecimiento del agua residual se lleva a cabo mediante sistemas de tuberías simples que conducen el agua residual de su lugar de generación al sitio.

La ubicación de los humedales artificiales experimentales se encuentra a un costado de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo (UMSNH). Una ventaja de estos humedales experimentales artificiales es que pueden ser utilizados para otros estudios en los que se investiguen diferentes alternativas de medios de soporte.

## 6. HIPÓTESIS

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal son capaces de remover diversos contaminantes entre ellos el nitrógeno y el fósforo. Al utilizar la planta macrófita *Typha domingensis* en relación con su ciclo de vida y con un medio de soporte adecuado, se espera una mayor remoción de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales.

## 7. OBJETIVOS

### 7.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la factibilidad y eficiencia de utilizar la planta nativa *Typha domingensis* para remover nitrógeno y fósforo en humedales de flujo subsuperficial con diferentes medios de soporte.

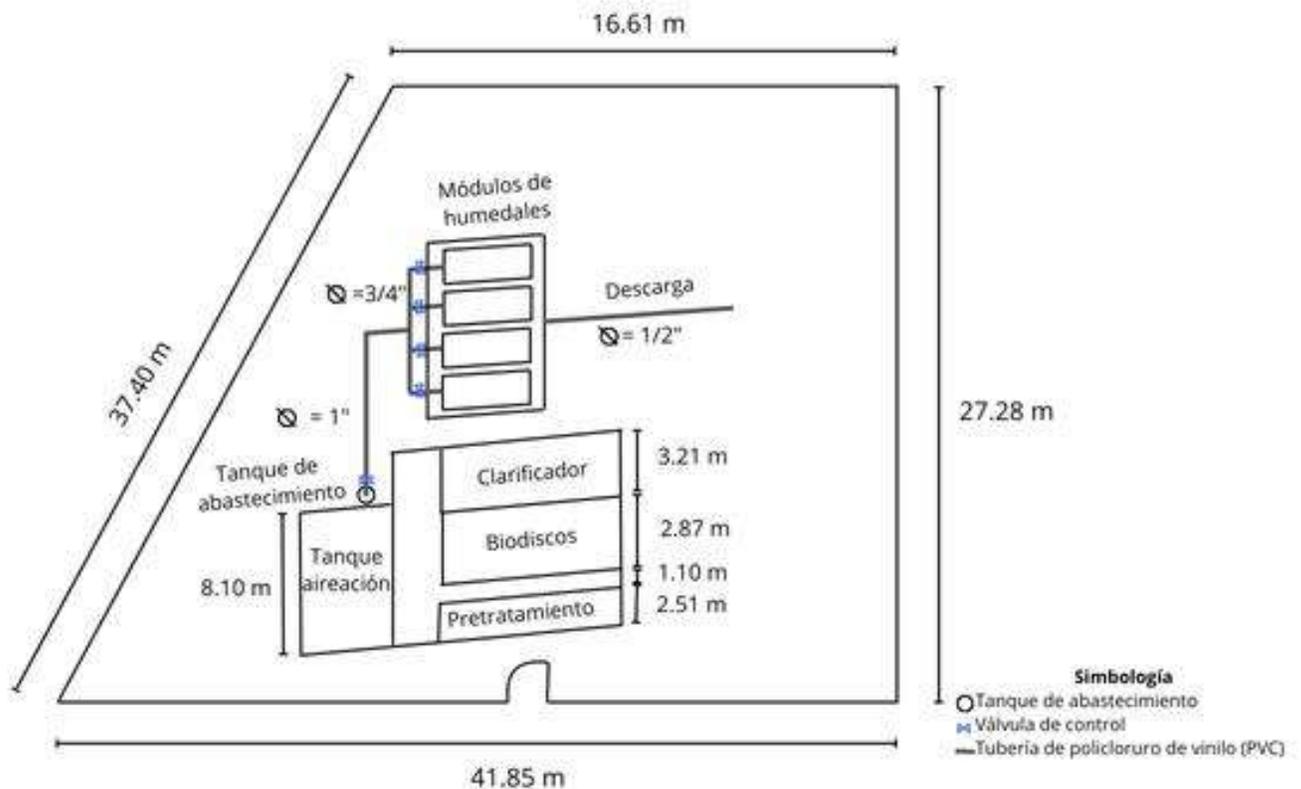
### 7.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar los parámetros de campo en tres estadios del ciclo de vida de la *Typha domingensis*.
- Evaluar la remoción de nitrógeno y fósforo con diferentes medios de soporte tales como: grava, tezontle y combinado (grava-tezontle).
- Verificar el cumplimiento con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021.

## 8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de este trabajo se utilizarán tres humedales artificiales experimentales existentes ubicados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

Estos humedales fueron construidos a un costado del clarificador de la planta anteriormente mencionada, como parte central de la investigación de tesis de maestría de M.C. Daniel Quezada Villanueva y M.C. Jorge Luis Ferreyra Torres. En los tres humedales se plantaron los rizomas de la planta macrófita *Typha domingensis* ya que es una planta nativa y es considerada de fácil obtención (Ilustración 10).



**Ilustración 10.** Croquis de la PTAR del Centro de Información, Arte y Cultura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Modificado de Ferreyra, 2020.

Según Ferreyra, en el año 2020 en su investigación el gasto de diseño para los humedales experimentales se determina en función de las características del material de soporte y de la carga orgánica presente en la descarga. Para esto se implementó un sistema de abastecimiento para garantizar que dicho caudal permaneciera constante durante toda la experimentación. El gasto de cada humedal varía dependiendo del medio de soporte. Para el humedal con medio de soporte a base de tezontle se requirió un gasto de 92.59 l/d, mientras que en el humedal en el que se utilizó grava triturada se aplicó un gasto a tratar de 58.79 l/d. Esto debido a que su estructura del tezontle es más porosa en comparación con la grava triturada. En el tercer humedal, con un medio de soporte combinado de gravilla y tezontle su gasto a tratar es de 72.01 l/d. Es importante mencionar que cada módulo tiene dimensiones de 0.70 m de ancho, 2.10 m de largo y 0.70 m de profundidad (Ilustración 11). Para la construcción de las líneas de conducción se utilizó un diámetro de 1” de tubería de policloruro de vinilo (PVC) que conduce el agua residual del tanque de abastecimiento a los humedales, cada entrada cuenta con una válvula del mismo diámetro que la tubería PVC de ¾” que tiene como función controlar el gasto de la entrada de cada humedal.

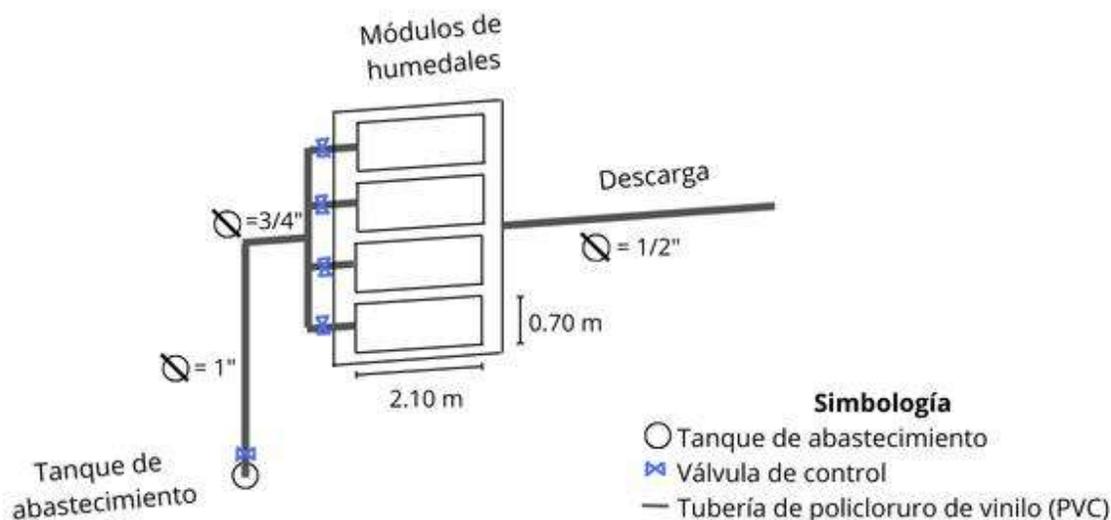


Ilustración 11. Zona de experimentación. Modificado de Ferreyra, 2020.

La selección del material de soporte se realizó tomando en cuenta las características físicas y la facilidad de obtención del material en la Ciudad de Morelia. Según Quezada (2019):

“Se seleccionó grava y tezontle con un diámetro efectivo de 3/4”, la grava fue seleccionada ya que en trabajos realizados y humedales funcionales en plantas de tratamiento para poblaciones se han tenido buenos resultados con su utilización. El tezontle se seleccionó por ser un material de fácil obtención en la ciudad y de un precio accesible, así como la poca información existente relacionada a su utilización como material de soporte en humedales artificiales.”

Se seleccionó la grava triturada (Ilustración 12) ya que es un material con alta disponibilidad en el estado de Michoacán, además de que posee características distintas a los materiales anteriores como una menor porosidad, una baja absorción y un mayor tamaño (Ferreyra, 2020).

Las características de la grava triturada son las siguientes (Ferreyra, 2020):

- Coeficiente de uniformidad: 1.51
- Absorción: 1.65% (Tipo de porcentaje de absorción baja)
- Densidad: 2.65 g/cm<sup>3</sup>
- Porosidad: 0.40



**Ilustración 12.** Grava triturada. Obtenida de Ferreyra, 2020.

Se seleccionó el tezontle (Ilustración 13) porque es un material con características físicas favorables para el desarrollo de los microorganismos, ya que posee una alta porosidad y un alto porcentaje de absorción de agua (Ferreyra, 2020).

Las características del tezontle son las siguientes (Ferreyra, 2020):

- Coeficiente de uniformidad: 1.40
- Absorción: 22.26% (Tipo de porcentaje de absorción alta)
- Densidad: 1.60 g/cm<sup>3</sup>
- Porosidad: 0.63



**Ilustración 13.** Tezontle.

Se optó por diseñar un humedal con una combinación de grava y tezontle como medio de soporte (Ilustración 14). Con la finalidad de analizar su eficiencia en la remoción de contaminantes, tomando en cuenta que este humedal se caracteriza por la combinación de ambos materiales presentando características físicas diferentes (Ferreyra, 2020).



**Ilustración 14.** Grava-tezontle. Obtenida de Ferreyra, 2020.

## 8.1 REVISIÓN Y ADECUACIÓN DE LOS TRES HUMEDALES ARTIFICIALES EXPERIMENTALES EXISTENTES.

Se realizó una revisión del sitio (Ilustración 15), observando las necesidades que presentaba los humedales para poder iniciar la experimentación de una manera eficaz. Se observó que la zona aledaña a los humedales se encontraba muy descuidada con maleza creciente lo cual complicaba el acceso al sitio.



**Ilustración 15.** Humedales artificiales experimentales de flujo subsuperficial.

Por lo tanto, se realizó una limpieza del sitio donde se ubican los tres humedales, se quitó la maleza que se encontraba alrededor del sitio y finalmente se comenzó con la poda de la planta macrófita para dar inicio al ciclo de vida de la *Typha domingensis* (Ilustración 16).



**Ilustración 16.** Poda de la planta macrófita *Typha domingensis*.

Se podó toda la vegetación de los humedales dejando solamente los rizomas y algunos brotes nuevos de la planta macrófita, midiendo la altura de la planta macrófita en el inicio del ciclo de vida (Ilustración 17).



**Ilustración 17.** Rizomas de la planta *Typha domingensis* en una etapa inicial del ciclo de vida.

Posteriormente, se procedió al llenado del tanque de abastecimiento para abastecer el humedal continuamente todos los días con aguas residuales provenientes del pretratamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual del CIAC. Esto se realiza para que la planta se mantenga, comenzando a desarrollar su ciclo de vida y así poder comenzar los muestreos necesarios para analizar la remoción de nitrógeno y fósforo total.

También se realizó mantenimiento a la tubería que se encuentra en la etapa del pretratamiento que conecta con el tanque de abastecimiento, fijándola con alambre galvanizado para que no se moviera al bombear el agua del pretratamiento al tanque de abastecimiento, lo cual podría causar fugas de agua en su recorrido por la tubería (Ilustración 18).



**Ilustración 18.** Refuerzo de la tubería que conecta al tanque de abastecimiento.

Es importante mencionar que durante todo el período de estudio siempre se mantuvo constante el suministro de agua residual al humedal, la cual provenía del tanque de abastecimiento, como se muestra en la Ilustración 19.



**Ilustración 19.** Tubería del sistema de abastecimiento en cada humedal.

Una vez concluida la poda de vegetación en los humedales experimentales, se procedió a realizar un lavado profundo del tanque de abastecimiento (Ilustración 20), quitando el exceso de lodo o material que se había adherido en las paredes del tanque de abastecimiento.



**Ilustración 20.** Lavado del tanque de abastecimiento.

Asimismo, se optó por reemplazar el colador, ya que se encontraba deteriorado (Ilustración 21). También, se realizó la limpieza de una malla que se ubica dentro del tanque de abastecimiento y cuya función principal es de retener los sólidos de mayor diámetro que pudieran llegar a ser succionado por la bomba cuando se está llenando el tanque de abastecimiento y en consecuencia pudiesen ocasionar obstrucción en la red de abastecimiento.

Una vez concluido el lavado del tanque de abastecimiento, se procedió a llenarlo con el agua residual proveniente de la etapa del pretratamiento de la Planta del CIAC.



**Ilustración 21.** Colador del tanque de abastecimiento.

Debido a que parte del sistema de distribución de agua residual se encontraba deteriorado, se optó por realizar el reemplazamiento de las tres tuberías de alimentación a los humedales y de la válvula para controlar el abastecimiento del agua residual (Ilustración 22).



**Ilustración 22.** Mantenimiento de la red de tubería de los humedales artificiales experimentales.

## 8.2 MUESTREO Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO.

Con el objeto de determinar la eficiencia de los diferentes humedales artificiales se diseñó el siguiente plan de muestreo (Tabla 2).

**Tabla 2.** Plan de muestreos para analizar el ciclo de vida de la planta.

Muestreo	Fecha	Altura (m)	Etapas de crecimiento
1	30-marzo-2023	2	Inicial
2	08-mayo-2023	2.60	Intermedia
3	05-julio-2023	3.55	Adulta

Asimismo, en cada muestreo se midieron los siguientes parámetros de campo para conocer la calidad del agua del influente y efluente de los humedales experimentales (Tabla 3).

**Tabla 3.** Parámetros de campo analizados en los muestreos.

Parámetros de campo	Equipo de medición
Potencial de Hidrógeno (pH)	Potenciómetro de HACH
Conductividad eléctrica (CE)	Conductímetro de HACH
Sólidos disueltos totales (SDT)	Conductímetro de HACH
Salinidad	Conductímetro de HACH
Temperatura de la muestra (T)	Termómetro
Temperatura del ambiente (T)	Termómetro
Oxígeno disuelto (OD)	Oxímetro de HACH

Además del equipo que se mencionó anteriormente se utilizó para el muestreo cuatro envases de plástico con capacidad de un litro es importante mencionar que cada envase se encontraba etiquetado con la fecha, hora y sitio de muestreo, además una hielera para transportar las muestras al laboratorio, una piseta de agua

destilada y un termómetro.

Como media de sanidad se utilizaron guantes de látex, cubrebocas y bata durante los muestreos, esto con el fin de evitar enfermedades que se pueden generar con el contacto del agua residual.

El procedimiento realizado durante los muestreos, consistió en lo siguiente:

1. Se tomó una muestra en la entrada del humedal (Ilustración 23), utilizando guantes de látex y frascos de plásticos estériles.



**Ilustración 23.** Toma de muestra a la entrada del humedal.

2. Se tomó una muestra en la salida de cada humedal en donde se encuentran los tres medios de soporte: tezontle, grava compacta y combinado tezontle con grava (Ilustración 24), etiquetando el frasco con su respectiva identificación.



**Ilustración 24.** Muestra a la salida del humedal en los diferentes medios de soporte.

3. La medición de los parámetros de campo se realizó en la entrada y en las salidas de los tres humedales artificiales experimentales (Ilustración 25).



**Ilustración 25.** Obtención de los parámetros de campo de las cuatro muestras.

## MUESTREO EN LA ETAPA DE DESARROLLO INICIAL DE LA PLANTA MACRÓFITA “*TYPHA DOMINGENSIS*”.

El primer muestreo se realizó el día 30 de marzo del año 2023 cuando la planta *Typha domingensis* presentaba una altura de 2.00 metros (Ilustración 26).



**Ilustración 26.** Primer muestreo en la etapa inicial de la *Typha domingensis*.

Con el objeto de regar el humedal se llenó el tanque de almacenamiento. Se quitó la maleza que se encontraba dentro del humedal y se tomó una muestra a la entrada y a la salida de los humedales en un contenedor de un litro. El procedimiento consistió en enjuagar dos veces el recipiente para después proceder a llenarlo cuidadosamente y así muestrear de una manera adecuada.

Cuando la planta *Typha domingensis* aún no presentaba floración, se tomaron las

lecturas de los parámetros de campo en las cuatro muestras. Una correspondiente al influente (entrada) y las otras tres de estas al efluente (salida) con el equipo adecuado.

Las muestras recolectadas se llevaron al laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental para determinar las concentraciones del nitrógeno y fósforo total.

### **MUESTREO EN LA ETAPA DE DESARROLLO INTERMEDIO DE LA PLANTA MACRÓFITA “*TYPHA DOMINGENSIS*”.**

El segundo muestreo se realizó el día 08 de mayo del año 2023 cuando la planta *Typha domingensis* comenzaba a presentar floración (Ilustración 27).



**Ilustración 27.** Floración de la planta *Typha domingensis*.

La planta *Typha domingensis* presentaba una altura de 2.60 metros (Ilustración 28) cuando se llevó a cabo el muestreo, a la entrada y salida de los tres humedales

artificiales experimentales.



**Ilustración 28.** Altura de la *Typha domingensis* con floración en la etapa intermedia.

Para evitar riesgos de infecciones se utilizaron guantes de látex y se quitó la maleza que se encontraba alrededor.

Posteriormente se midieron los mismos parámetros de campo del primer muestreo. Una vez terminadas las mediciones se limpió el equipo con agua destilada y se guardó en su caja de almacenamiento. Además, las muestras obtenidas se llevaron al laboratorio para su análisis.

### **MUESTREO EN LA ETAPA DE DESARROLLO ADULTA DE LA PLANTA MACRÓFITA “*TYPHA DOMINGENSIS*”.**

El último muestreo se realizó el día 05 de julio del 2023, la planta *Typha domingensis* se encontraba en su etapa final del ciclo de vida y presentaba una altura de 3.55

metros (Ilustración 29). De igual forma que en los muestreos previos, se tomaron las muestras a la entrada y salida de los tres humedales artificiales experimentales y se determinaron los parámetros de campo mencionados anteriormente.



**Ilustración 29.** Altura de la *Typha domingensis* en su etapa final.

### 8.3 DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL.

La determinación de las concentraciones del nitrógeno total se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil. Para esto se utilizó el método HACH TNT 827, el cual consiste en un procedimiento de digestión de persulfato alcalino, se analizó las muestras obtenidas en campo en un reactor de digestión DR200, así mismo se tomaron las lecturas con una franja visible a una longitud de onda de 345 nm en un espectrofotómetro DRB5000 de luz UV, su función principal es iluminar la muestra y analizar la intensidad de la luz que refleja una longitud de onda con la finalidad de obtener como resultado la concentración de nitrógeno total.

La determinación de nitrógeno total está basada en los Métodos Estándar para los análisis del agua y aguas residuales, que son métodos para analizar el agua residual en el cual se utilizan tests aprobados por la Agencia de Protección Ambiental de los E.E.U.U. (EPA) sobre las propiedades y calidad del agua.

El test TNT 827, con número de método 10208, es un método de digestión de persulfato HR (5 a 40 mg/l N) y en el manual de métodos estándar se identifica como nitrógeno 4500-N el cual expresa lo siguiente:

“El nitrógeno total se puede determinar mediante la digestión oxidativa de todas las formas de nitrógeno digeribles en nitrato, seguida de la cuantificación del nitrato. Se presentan dos procedimientos, uno que utiliza digestión con persulfato/UV en línea (4500-NB) y el otro que utiliza digestión con persulfato (4500-NC). Los procedimientos dan resultados precisos para el nitrógeno total, compuesto de N orgánico (incluidos algunos compuestos aromáticos que contienen nitrógeno), amoníaco, nitrito y nitrato. El nitrógeno molecular no se determina y la recuperación de algunos compuestos industriales que contienen nitrógeno es baja, pero reproducible (Rodger B. Baird, 4500-N NITROGEN, 2018).”

Para determinar el nitrógeno total se requiere el siguiente material:

- Espectrofotómetro DR5000 de la marca HACH
- Reactor de digestión DRB200 de la marca HACH (termoreactor)
- Pipetas
- Bombilla de succión
- Gradillas
- Muestra simple
- Recipiente de reacción
- Reactivo TNT 827 de la marca HACH

El procedimiento para la obtención de las concentraciones de Nitrógeno total, es el siguiente:

1. Se adecuó una mesa de trabajo limpia en la que se coloca el reactor DRB200 de HACH. Esto con la finalidad de precalentarlo hasta lograr una temperatura de 120 °C para posteriormente hacer la digestión de la muestra (Ilustración 30).



**Ilustración 30.** Reactor de digestión DRB200.

2. Se colocaron las muestras simples obtenidas a la entrada y salida de los tres humedales en su respectiva área de trabajo para posteriormente añadir 0.50 ml de la muestra en un recipiente de reacción de diámetro de 20 mm con tapones de rosca color rojo, los cuales se etiquetaron con la finalidad de identificarlos (Ilustración 31). Después al recipiente de reacción se le agregaron 2 ml de solución A y una tableta de reactivo B. Es importante

mencionar que los reactivos que son agregados a la muestra analizada son los que determinan el tests TNT 827 de la marca HACH.



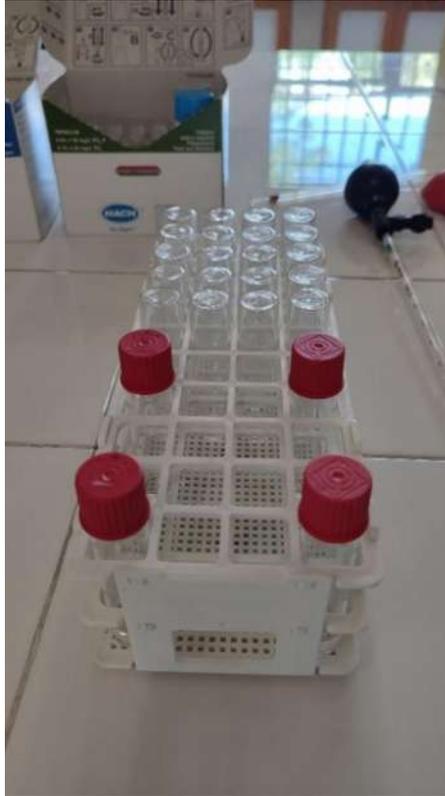
**Ilustración 31.** Muestra simple en el área de trabajo.

3. Se ingresaron los recipientes de reacción en el reactor de digestión DRB200, el cual ya se encontraba precalentado a una temperatura de 120°C. Los recipientes permanecieron en el termoreactor durante un periodo de tiempo de treinta minutos (Ilustración 32).



**Ilustración 32.** Reactor de digestión DRB200 a temperatura de 120°C con las muestras.

4. Después de cumplir el periodo de tiempo determinado, se sacaron los recipientes de reacción y se colocan en una gradilla para dejarlos enfriar a temperatura ambiente (Ilustración 33). Posteriormente se agitan cuidadosamente los recipientes de reacción de 2 a 3 veces.



**Ilustración 33.** Recipientes de reacción a una temperatura ambiente.

5. Se destaparon los recipientes de reacción dosificando 0.50 ml de la muestra analizada en un recipiente de tapa azul del test TNT 827. Posteriormente se agregan 0.20 ml de la solución D agitando cada recipiente de 2 a 3 veces. Después se espera un periodo de tiempo de quince minutos para finalmente continuar con el proceso de obtención de la concentración de nitrógeno total.



**Ilustración 34.** Dosificación de la muestra digerida.

6. Se limpió cada recipiente de tapa azul y se introdujo en el espectrofotómetro DR5000, el cual toma la lectura con el código de barras de cada recipiente, y es identificado en el espectrofotómetro, así mismo determina el parámetro a medir que en este caso es el nitrógeno total en mg/l (Ilustración 35).



**Ilustración 35.** Lecturas de las concentraciones del nitrógeno total en el espectrofotómetro DR5000.

#### 8.4 DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL.

Se siguió el método HACH TNT 843 para la determinación del fósforo total, analizando las muestras en el reactor de digestión DR200 y posteriormente se tomó las lecturas con el espectrofotómetro DR5000 con una longitud de onda de 850 nm.

Este método está basado en los Métodos Estándar para los análisis del agua y aguas residuales, que son métodos para analizar el agua residual en el cual se utilizan tests aprobados por la EPA sobre las propiedades y calidad del agua.

El test TNT 843 con número de método 10209, es un método de ácido ascórbico y se utiliza la espectroscopia (colorimetría), en el manual de métodos estándar se identifica como fósforo 4500-PE, el cual expresa lo siguiente:

“El fósforo se encuentra en las aguas naturales y en las aguas residuales casi exclusivamente como fosfatos. Estos se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados (piro, meta y otros polifosfatos) y fosfatos unidos orgánicamente. Se encuentran en solución, en partículas o detritos, o en los cuerpos de organismos acuáticos. Los fosfatos también se encuentran en los sedimentos del fondo y en los lodos biológicos, tanto en forma inorgánica precipitada como incorporados en compuestos orgánicos.

El método consiste en que el molibdato de amonio y el tartrato de antimonio de potasio reaccionan en medio ácido con ortofosfato para formar un heteropoliácido (ácido fosfomolibdico) que se reduce a un color azul de molibdeno intenso mediante el ácido ascórbico, este método es el más adecuado para medir fósforo en agua (NEMI, National Environmental Methods Index).”

Para determinar el fósforo total se requiere el siguiente material:

- Espectrofotómetro DR5000 de la marca HACH
- Reactor de digestión DRB200 de la marca HACH (termoreactor)
- Pipetas
- Bombilla de succión
- Gradillas
- Muestra simple
- Reactivo TNT 843 de la marca HACH

El procedimiento para la obtención de las concentraciones de fósforo total, es el siguiente:

#### FÓSFORO TOTAL (Método Hach 843)

1. Se adecuó una mesa de trabajo limpia, en la cual se ubica el reactor de digestión DRB200 de HACH. Esto con el objetivo de precalentarlo a una temperatura de 100 °C (Ilustración 36).



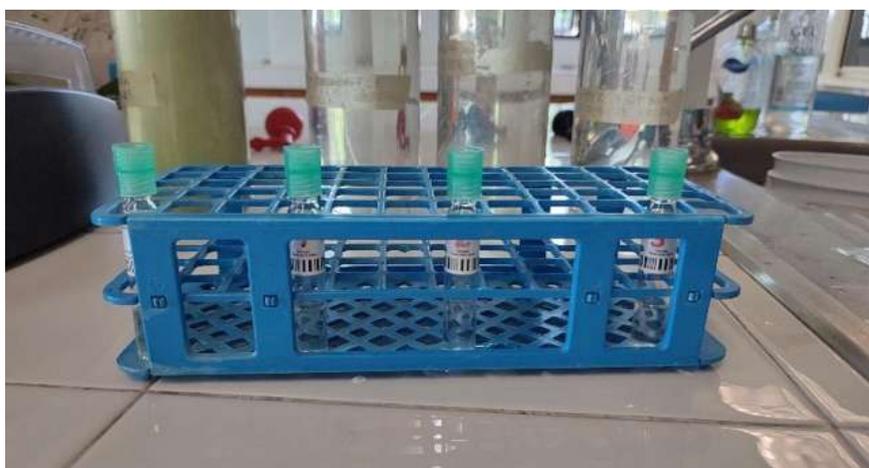
**Ilustración 36.** Reactor de digestión DRB200 a una temperatura de 100°C.

2. Se colocó el material que se va a utilizar sobre el área asignada de trabajo. Posteriormente se desenroscó el DosiCap Zip A que se caracteriza por ser un reactivo del método TNT 843, se etiquetó cada tubo como influente y efluente de los tres humedales y finalmente se dosificó con pipeta 2.0 ml de muestra simple obtenida en campo en cada tubo (Ilustración 37).



**Ilustración 37.** Dosificación de la muestra simple.

3. Se retiró el papel del aluminio del DosiCap Zip A de cada tubo anteriormente mencionado e inmediatamente se tapa para que el lado estriado quede hacia arriba como se observa en la Ilustración 38 y posteriormente se agitan cada tubo de 2 a 3 veces.



**Ilustración 38.** Lado Estriado del DosiCap Zip A hacia arriba.

4. Se ingresaron los tubos de las muestras en el reactor de digestión DRB200 el cual ya se encuentra precalentado a una temperatura de 100°C durante un lapso de tiempo de sesenta minutos (Ilustración 39).



**Ilustración 39.** Reactor a temperatura de 100°C durante 60 minutos.

5. Después de cumplir con el lapso de tiempo determinado, cada recipiente se deja enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente se agitan cada tubo de 2 a 3 veces cuidadosamente, y se agregó 0.20 ml de la solución B del test TNT 843 (Ilustración 40).



**Ilustración 40.** Dosificación de la solución B.

6. Se cerró cada tubo con un DosiCap Zip C del test TNT 843 y se invirtieron varias veces hasta lograr que la muestra del tubo toque la tapa. Posteriormente se esperó un periodo de tiempo de diez minutos y finalmente se limpia cada tubo y se introduce en el espectrofotómetro DR5000 con la finalidad de tomar la lectura de la concentración de fósforo total (Ilustración 41).



**Ilustración 41.** Lecturas del fósforo total con el espectrofotómetro DR5000.

## 9. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se describen los resultados del análisis en laboratorio de las muestras tomadas en los meses de marzo a julio del 2023.

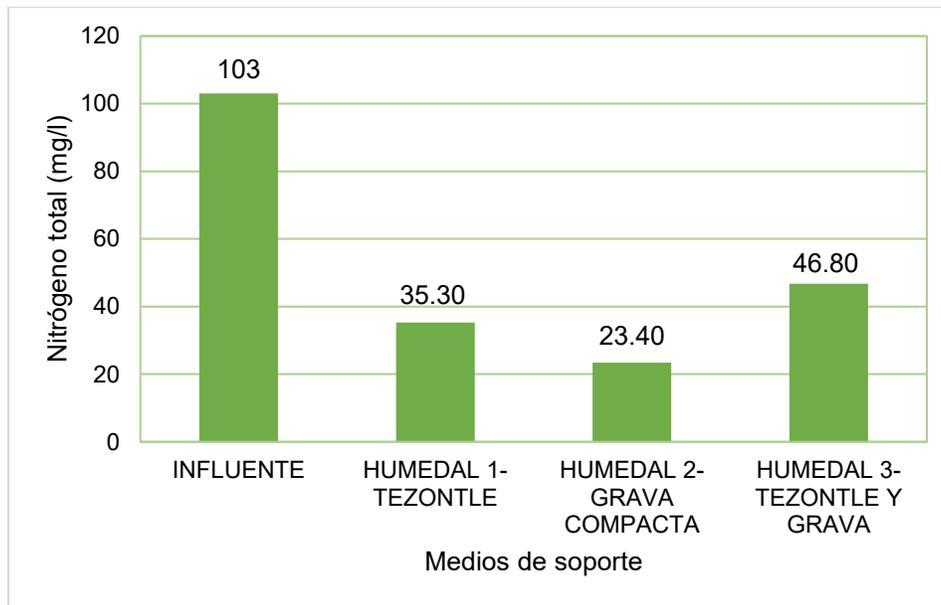
En cada uno de los muestreos se midieron los parámetros de campo mencionados en la entrada y salida de los tres humedales, posteriormente se obtuvieron las concentraciones de nitrógeno y fósforo total en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

El primer muestreo se realizó el 30 de marzo del 2023 cuando la planta *Typha domingensis* se encontraba en la etapa inicial de su ciclo de vida y presentaba una altura de 2.00 m. En la Tabla 4 se muestran los resultados de las mediciones de los parámetros de campo y las concentraciones de nitrógeno y fósforo total en el influente y efluente de los tres humedales.

**Tabla 4.** Lecturas de parámetros de campo y concentraciones de nitrógeno y fósforo total del primer muestreo en la etapa de desarrollo inicial del ciclo vida de la *Typha domingensis*.

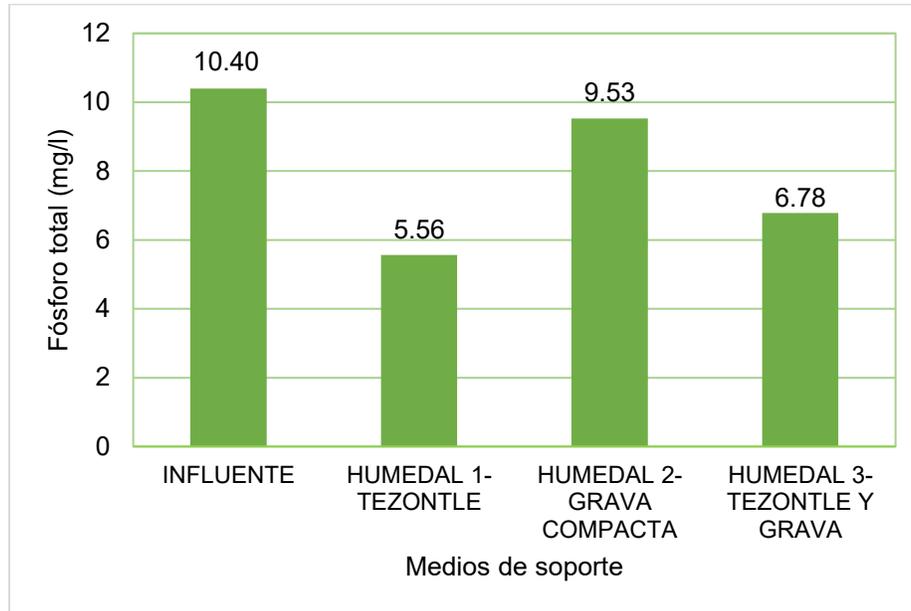
Parámetros de campo y análisis de laboratorio	Influente	Efluente		
		Humedal 1-tezontle	Humedal 2-grava compacta	Humedal 3-tezontle y grava
pH	7.80	7.20	7.20	7.20
Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1540	1148	1210	1212
Sólidos disueltos totales (mg/l)	766	566	597	598
Salinidad (%)	0.80	0.60	0.60	0.60
Temperatura de la muestra ( $^{\circ}\text{C}$ )	22	20	20	20
Temperatura del ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )	24.6	24.6	24.60	24.60
Oxígeno disuelto (mg/l)	2.20	0.10	0.10	0.10
Nitrógeno total (mg/l)	103	35.3	23.40	46.80
Fósforo total (mg/l)	10.40	5.56	9.53	6.78

En la Gráfica 1 se muestra una comparación de las concentraciones de nitrógeno en el influente y efluente en cada humedal, obtenidas en el laboratorio. En esta gráfica se observa que el agua residual entra al humedal con una concentración de 103 mg/l y sale de éstos con una concentración mucho menor, especialmente en el humedal 2 (23.40 mg/l).



**Gráfica 1.** Nitrógeno total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 1, realizado el 30 de marzo de 2023.

Los resultados del análisis del laboratorio para determinar las concentraciones de fósforo total en las muestras tomadas en el influente y efluente de los tres humedales, el 30 de marzo de 2023, se muestran en la Gráfica 2. En este caso se obtuvo un valor de la concentración de fósforo total de 10.40 mg/l en el influente y el efluente que presentó menor concentración fue el humedal 1 (5.56 mg/l).



**Gráfica 2.** Fósforo total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 1, realizado el 30 de marzo de 2023.

Los porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total para cada humedal se muestran en la Tabla 5. Se observa que el humedal con mayor porcentaje de remoción de nitrógeno total es el humedal 2, que tiene como medio de soporte grava compacta obteniéndose una remoción del 77.28% y el humedal que remueve mayor porcentaje de fósforo total es el humedal 3, que utiliza como medio de soporte el tezontle removiendo un 46.54%.

En el caso del nitrógeno total el humedal 2 construido con grava es el que presenta mayor porcentaje de remoción debido a que requiere de este nutriente para el crecimiento del follaje. En comparación con el humedal 1 construido con tezontle, siendo el que remueve mayor porcentaje de fósforo total, ya que tiene características favorables para el crecimiento radicular y crecimiento de rizomas.

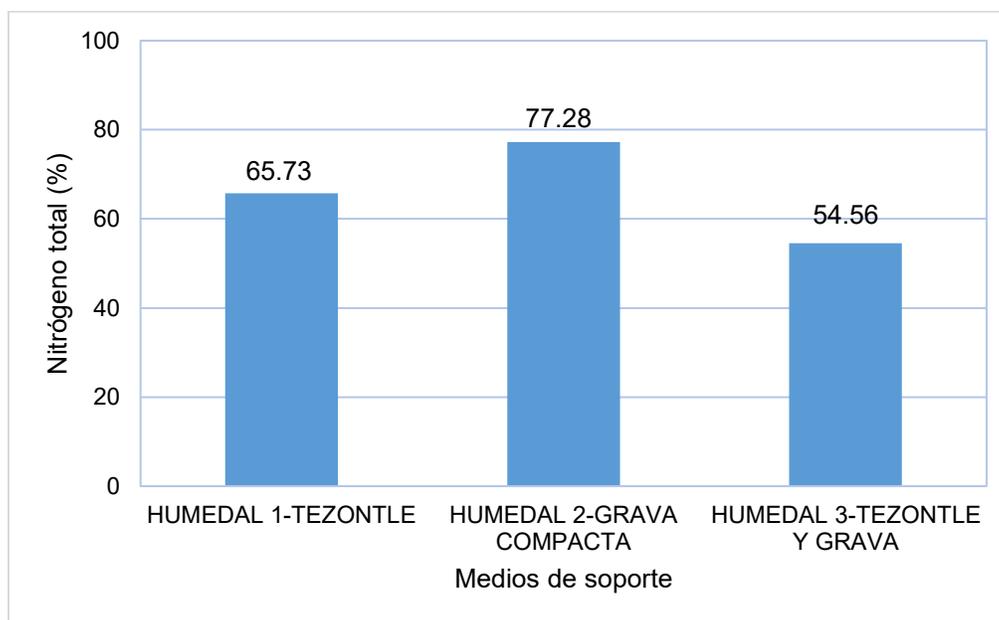
“Remoción de nitrógeno y fósforo total en humedales experimentales de flujo subsuperficial horizontal con *Typha domingensis*, con tres medios de soporte”

**Tabla 5.** Porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total, obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras recolectadas en el primer muestreo en los tres humedales durante el ciclo inicial de desarrollo de la *Typha domingensis*.

Análisis de laboratorio	Influente	Efluente		
		Humedal 1-tezontle	Humedal 2-grava compacta	Humedal 3-tezontle y grava
Porcentaje de remoción de nitrógeno total (%)	100	65.73	77.28	54.56
Porcentaje de remoción de fósforo total (%)	100	46.54	8.37	34.81

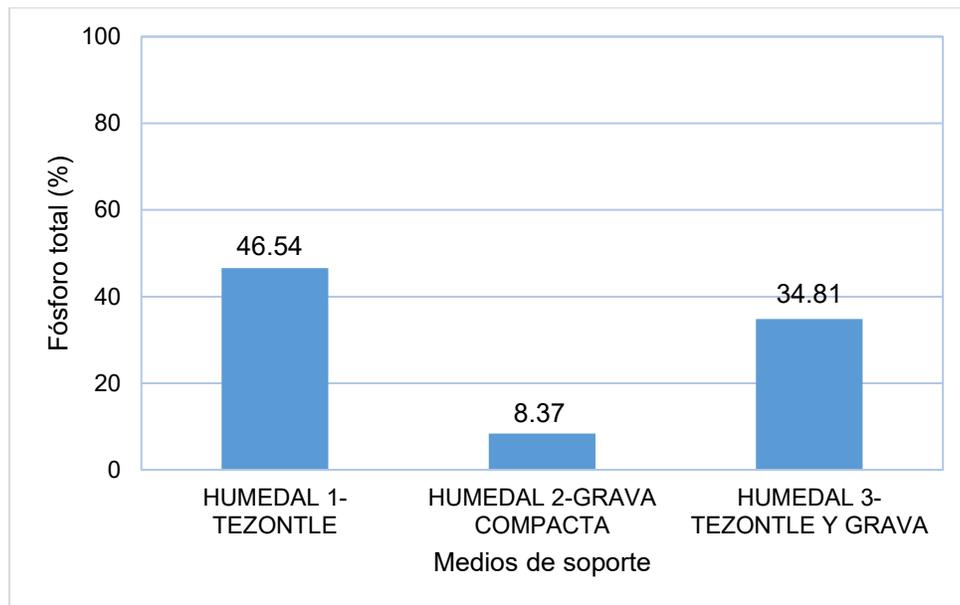
En la

Gráfica 3 se muestran los porcentajes de remoción de nitrógeno total derivado del análisis de laboratorio realizada el día 30 de marzo de 2023. Se observa que el humedal que remueve más porcentaje de concentración de nitrógeno total es el que tiene como medio de soporte la grava compacta, que presentó una capacidad de remoción de 77.28%. Sin embargo, los tres humedales experimentales mostraron una capacidad del 50%, lo cual se puede considerar como un buen funcionamiento.



**Gráfica 3.** Porcentaje de remoción de nitrógeno total en el primer muestreo realizado el 30 de marzo de 2023.

En la Gráfica 4 se muestran los porcentajes de remoción de fósforo total obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras tomadas en el influente y en el efluente de los tres humedales el 30 de marzo de 2023. Se observa que los humedales 1 y 3 remueven más de 30% de fósforo total y el segundo humedal solo se logró una remoción de 8.37%.



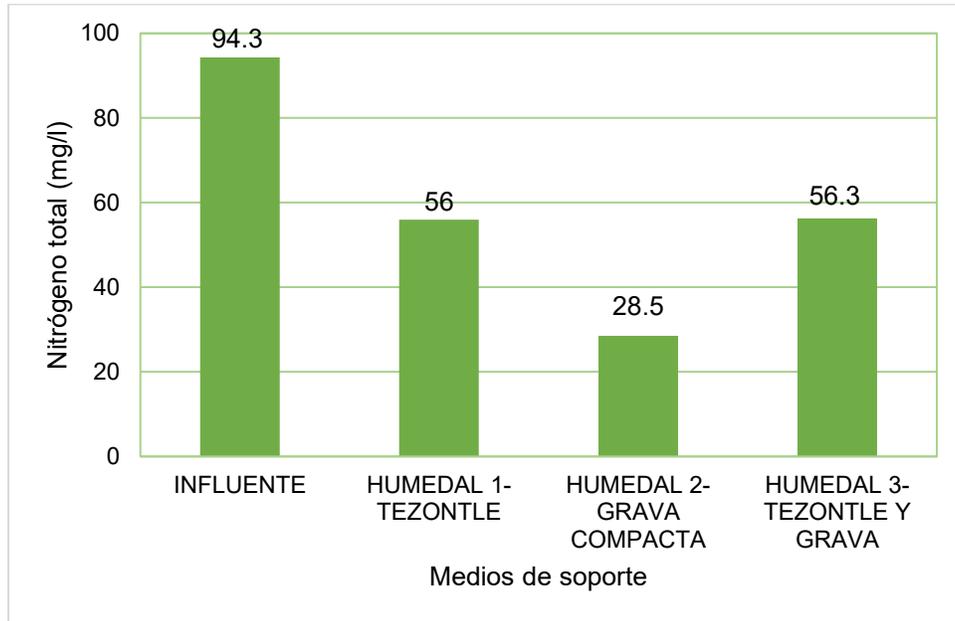
**Gráfica 4.** Porcentaje de remoción de fósforo total observado durante en el primer muestreo, realizado el 30 de marzo de 2023.

El segundo muestreo se realizó el 8 de mayo de 2023 cuando la planta *Typha domingensis* se encontraba en la etapa intermedia de su ciclo de vida y presentaba una altura de 2.60 metros. Las mediciones de los parámetros de campo y análisis de laboratorio se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resultados de las mediciones de los parámetros de campo y análisis de laboratorio efectuadas en el segundo muestreo, realizado el 8 de mayo de 2023, durante la etapa de desarrollo intermedio del ciclo vida de la *Typha domingensis*.

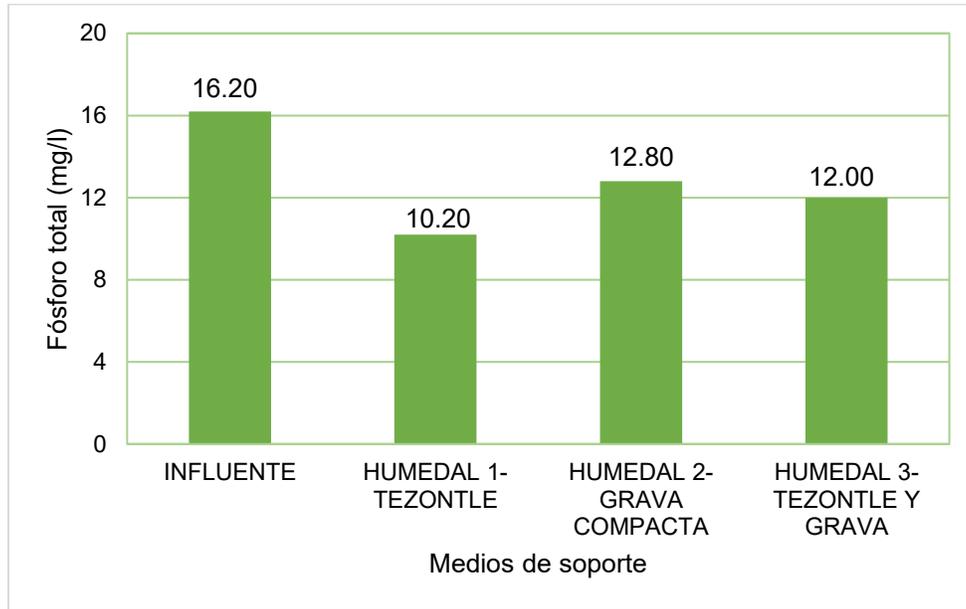
Parámetros de campo y análisis de laboratorio	Influente	Efluente		
		Humedal 1-tezontle	Humedal 2-grava compacta	Humedal 3-tezontle y grava
pH	7.20	6.50	6.30	6.40
Conductividad eléctrica (μS/cm)	1817	1882	2.01mS/cm	2.19 mS/cm
Sólidos disueltos totales (mg/l)	909	943	1009	1103
Salinidad (%)	0.90	1.0	1.0	1.10
Temperatura de la muestra (°C)	21.5	20.50	21	22
Temperatura del ambiente (°C)	21	21	21	21
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.20	0.10	0.10	0.10
Nitrógeno total (mg/l)	94.30	56	28.50	56.30
Fósforo total (mg/l)	16.20	10.20	12.80	12.00

En la Gráfica 5 se observan las concentraciones de nitrógeno total en mg/l, obtenidas del análisis de laboratorio que se realizó con las muestras tomadas el día 08 de mayo de 2023, en el influente y en el efluente de los tres humedales. Los resultados de este análisis muestran una concentración de nitrógeno total en el influente de 94.30 mg/l y el humedal 2 el que mostró una menor concentración (28.50 mg/l) en el efluente.



**Gráfica 5.** Nitrógeno total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 2, realizado del 8 de mayo de 2023.

En la Gráfica 6 se muestran las concentraciones del fósforo total en mg/l obtenidas del análisis de laboratorio realizado en las muestras de agua residual tomadas el día 08 de mayo de 2023. Se observa una concentración de 16.20 mg/l en el influente y la menor concentración de 10.20 mg/l en el efluente del humedal 1, en comparación con los otros dos humedales.



**Gráfica 6.** Fósforo total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 2, realizado del 8 de mayo de 2023.

Los porcentajes de remoción del nitrógeno y fósforo total se muestran en la Tabla 7. Se observa que el humedal que remueve mayor porcentaje de nitrógeno total es el humedal 2 mostrando una remoción de 69.78% y el humedal que remueve mayor porcentaje de fósforo total es el humedal 1 con un 37.04%.

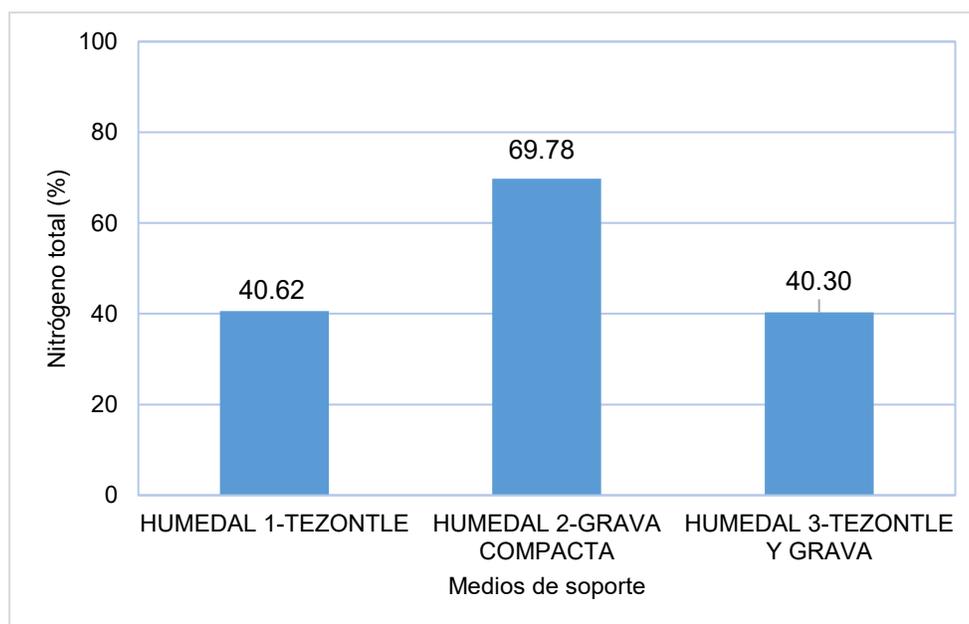
En el caso del nitrógeno total el humedal 2 construido con grava es el que presenta mayor porcentaje de remoción, ya que este nutriente le ayuda al crecimiento del follaje. Mientras que el humedal 1 remueve mayor porcentaje de fósforo total, esto debido a que requiere de este nutriente para su crecimiento radicular y dicho humedal está construido con tezontle teniendo características favorables para este desarrollo, presentando un alto porcentaje de absorción y porosidad.

“Remoción de nitrógeno y fósforo total en humedales experimentales de flujo subsuperficial horizontal con *Typha domingensis*, con tres medios de soporte”

**Tabla 7.** Porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total, obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras recolectadas en el segundo muestreo en los tres humedales durante el ciclo intermedio de desarrollo de la *Typha domingensis*.

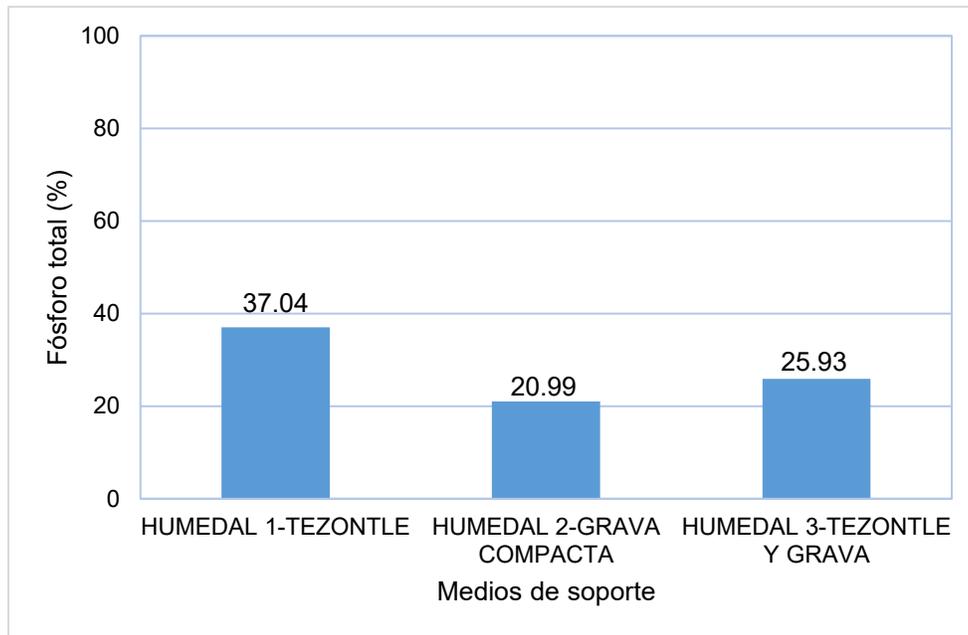
Análisis de laboratorio	Influente	Efluente		
		Humedal 1-tezontle	Humedal 2-grava compacta	Humedal 3-tezontle y grava
Porcentaje de remoción de nitrógeno total (%)	100	40.62	69.78	40.30
Porcentaje de remoción de fósforo total (%)	100	37.04	20.99	25.93

En la Gráfica 7 se muestran los porcentajes de remoción de nitrógeno total obtenidos de los resultados del análisis de laboratorio realizado a las muestras de agua residual obtenidas el día 08 de mayo de 2023, en el influente y en el efluente de los tres humedales. Se observa que, con los tres diferentes medios de soporte, se obtiene un porcentaje de remoción de más del 40%, sin embargo, el humedal 2 excede este porcentaje considerablemente (69.78%).



**Gráfica 7.** Porcentaje de remoción de nitrógeno total en el segundo muestreo realizado el 8 de mayo de 2023.

En la Gráfica 8 se presentan los porcentajes de remoción de fósforo total del análisis de laboratorio realizada el día 08 de mayo de 2023, en el influente y en el efluente de los tres humedales experimentales. Se observa que los tres humedales tienen la capacidad de remover más del 20% de fósforo total. Sin embargo, el humedal 1 presenta un 37.04% de remoción, siendo el que remueve más porcentaje de este nutriente en esta etapa de crecimiento de la planta.



**Gráfica 8.** Porcentaje de remoción de fósforo total en el segundo muestreo realizado el 8 de mayo de 2023.

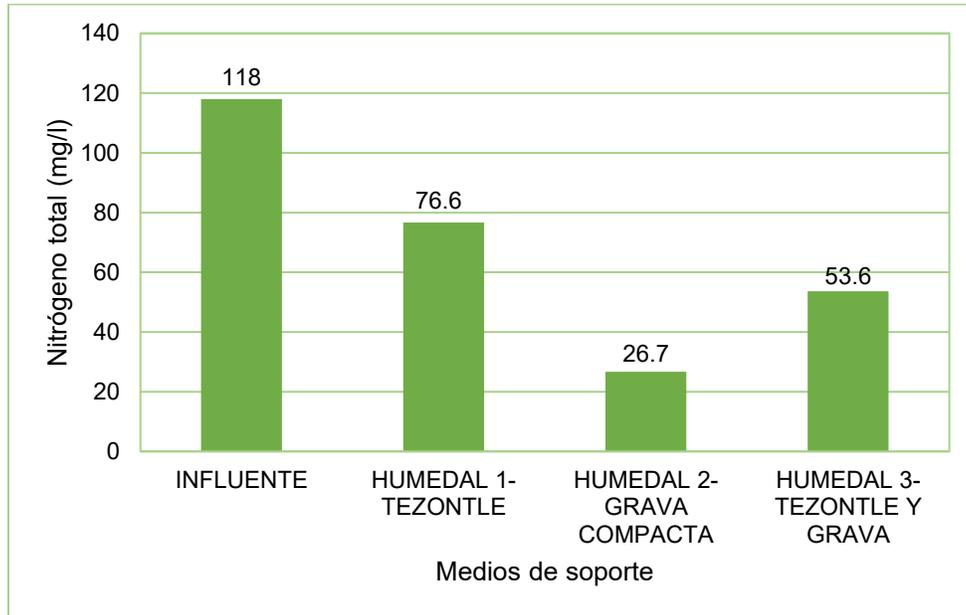
El tercer muestreo se realizó en el 5 de julio de 2023 cuando la planta *Typha domingensis* se encontraba en la etapa final de su ciclo de vida con una altura de 3.55 m. Los parámetros de campo y análisis de laboratorio se muestran en la Tabla 8.

“Remoción de nitrógeno y fósforo total en humedales experimentales de flujo subsuperficial horizontal con *Typha domingensis*, con tres medios de soporte”

**Tabla 8.** Resultados de las mediciones de parámetros de campo y análisis de laboratorio efectuadas en el tercer muestreo, realizado el 5 de julio de 2023, durante la etapa final del ciclo de vida de la *Typha domingensis*.

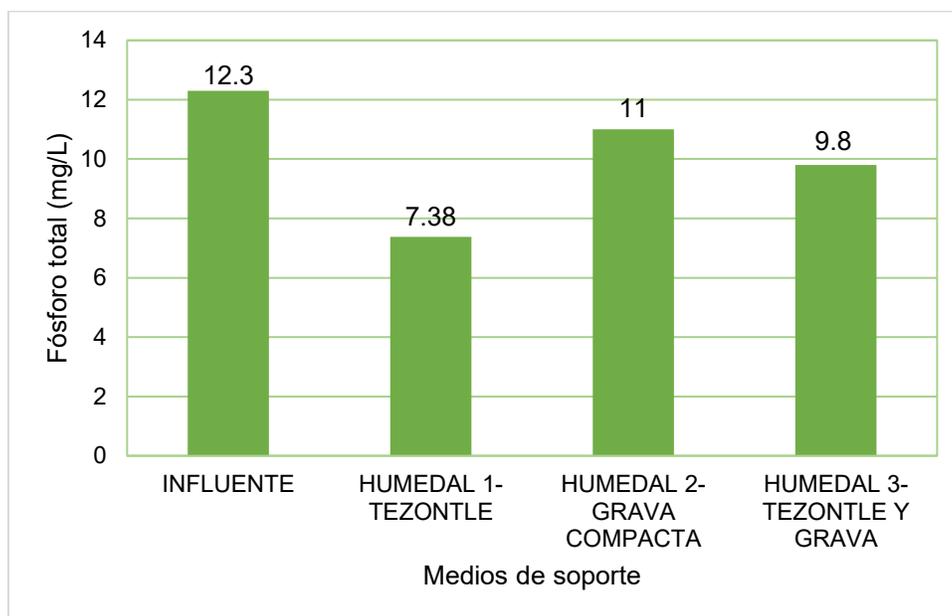
Parámetros de campo y análisis de laboratorio	Influente	Efluente		
		Humedal 1-tezontle	Humedal 2-grava compacta	Humedal 3-tezontle y grava
pH	8.30	7.30	7.20	7.30
Conductividad eléctrica (μS/cm)	1865	2.94mS/cm	4.35mS/cm	2.43mS/cm
Sólidos disueltos totales (mg/l)	934	1503	2.27g/L	1233
Salinidad (%)	0.90	1.50	2.30	1.20
Temperatura de la muestra (°C)	23	23	22	23
Temperatura del ambiente (°C)	27.50	27.50	27.50	27.50
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.20	0.20	0.20	0.30
Nitrógeno total (mg/l)	118.00	76.60	26.70	53.60
Fósforo total (mg/l)	12.30	7.38	11.00	9.80

En la Gráfica 9 se describe la remoción de nitrógeno total en mg/l del análisis del laboratorio realizada el día 05 de julio de 2023, con una concentración en el influente de 118 mg/l y en el efluente una concentración de 26.70 mg/l en el humedal 2, se observa que presenta una remoción de nitrógeno total más alta en comparación con los otros dos humedales existentes.



**Gráfica 9.** Nitrógeno total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 3, realizado el 5 de julio de 2023.

En la Gráfica 10 se muestra la remoción de fósforo total en mg/l del análisis de laboratorio del muestreo 3 tomadas el día 5 de julio de 2023. Se observa una concentración en el influente de 12.30 mg/l. Los tres humedales presentan una concentración mayor a 7.00 mg/l en el efluente. El humedal que tiene la capacidad de remover una mayor concentración es el humedal 1 con una concentración de 7.38 m/l.



**Gráfica 10.** Fósforo total (mg/l) en el influente y efluente de los tres humedales durante el muestreo 3, realizado el 5 de julio de 2023.

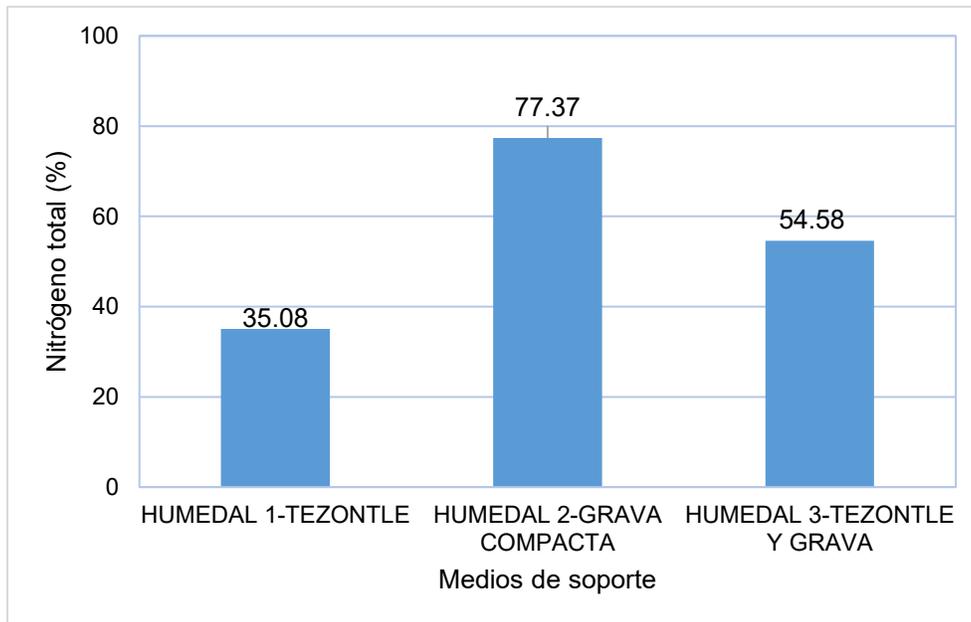
Los porcentajes de remoción de los nutrientes se muestran en la Tabla 9. Se observa que, el humedal 2 es el que remueve mayor porcentaje de nitrógeno total, removiendo un 77.37% y que el humedal 3 remueve mayor porcentaje de fósforo total con un 40.00% de remoción.

Sucede lo mismo que en los dos muestreos anteriores, el humedal 2 se caracteriza por presentar mejores condiciones para la remoción de nitrógeno total y en el caso del fósforo total el humedal 1 construido con tezontle es el mejor medio de soporte presentando mayor porcentaje de remoción de este nutriente en comparación con los otros dos humedales.

**Tabla 9.** Porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total, obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras recolectadas en el tercer muestreo en los tres humedales durante el ciclo intermedio de desarrollo de la *Typha domingensis*.

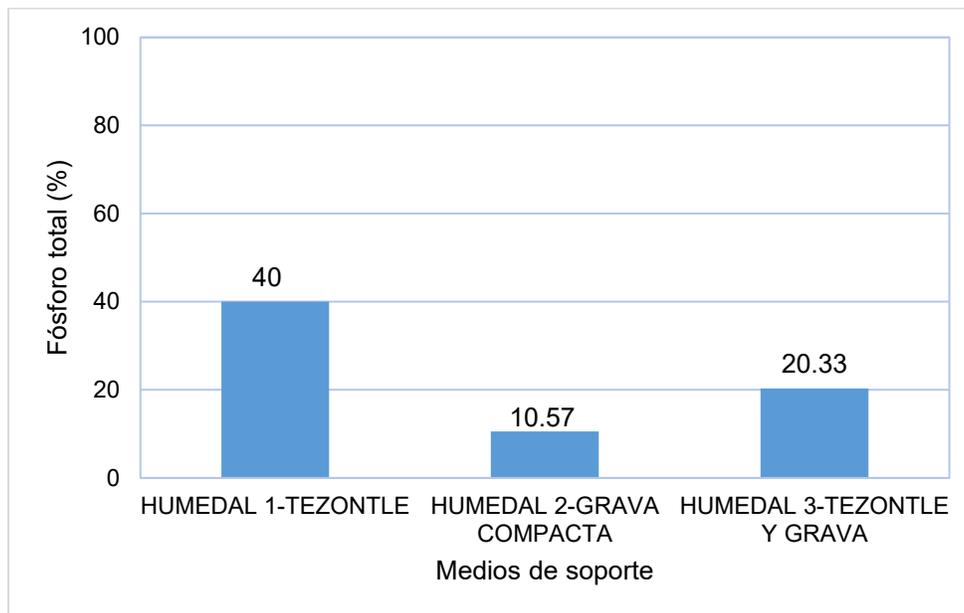
Análisis de laboratorio	Influente	Efluente		
		Humedal 1-tezontle	Humedal 2-grava compacta	Humedal 3-tezontle y grava
Porcentaje de remoción de nitrógeno total (%)	100	35.08	77.37	54.58
Porcentaje de remoción de fósforo total (%)	100	40.00	10.57	20.33

En la Gráfica 11 se muestran los porcentajes de remoción de nitrógeno total resultado del análisis de laboratorio realizada el día 05 de julio de 2023. En el influente y en el efluente de los tres humedales existentes, se observa que en el humedal 2 se tiene un mayor porcentaje de remoción de nitrógeno total (77.37%). Es importante mencionar que los tres humedales experimentales tienen la capacidad de remover más del 35% del nitrógeno total.



**Gráfica 11.** Porcentaje de remoción de nitrógeno total en el tercer muestreo realizado el 5 de julio de 2023.

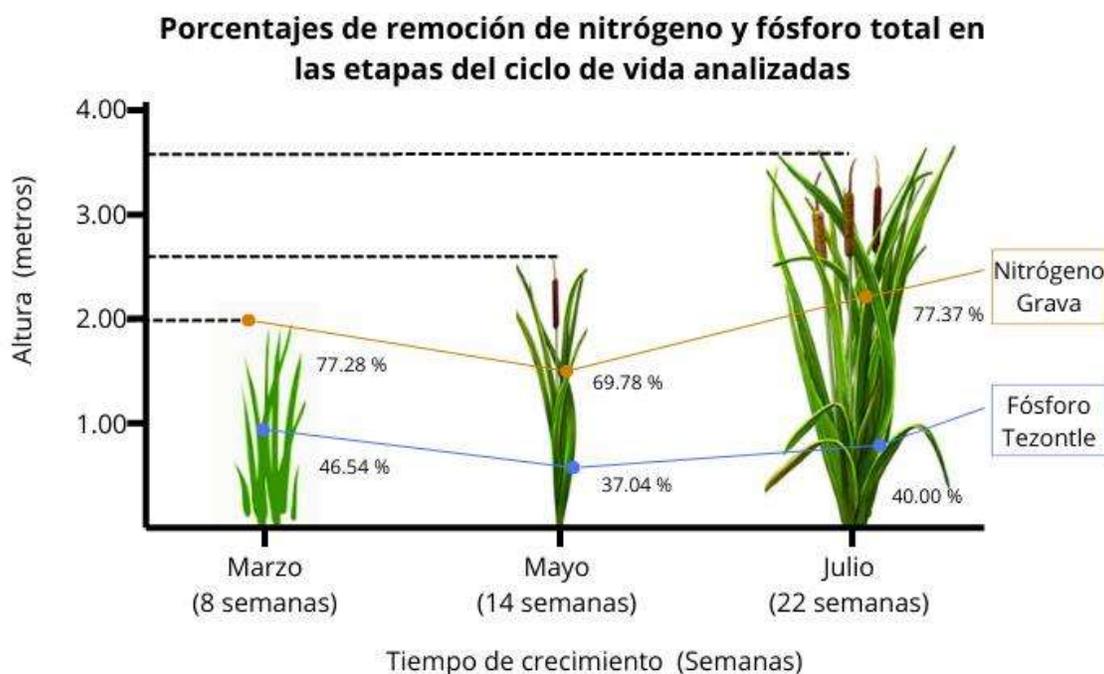
En la Gráfica 12 se presentan los porcentajes de remoción de fósforo total derivados del análisis de laboratorio, en el influente y en el efluente de los tres humedales experimentales. Se observa que los tres humedales remueven más del 10% y que el humedal 1 obtuvo la mayor capacidad de remover fósforo total (40%).



**Gráfica 12.** Porcentaje de remoción de nitrógeno total en el tercer muestreo realizado el 5 de julio de 2023.

En la Ilustración 42, se representa el crecimiento de la planta *Typha domingensis* durante un periodo de tiempo de 22 semanas dentro de las cuales se analizó la capacidad que tiene para remover los nutrientes tales como nitrógeno y fósforo total en diferentes medios de soporte, obteniendo como resultado que el humedal con grava compacta remueve mayor porcentaje de nitrógeno total y el humedal construido con tezontle remueve con mayor facilidad el fósforo total. Esto se debe a que la planta absorbe el nitrógeno para su crecimiento de follaje, en cambio el fósforo total es absorbido para su crecimiento radicular y desarrollo de rizomas.

La primera parte del ciclo de vida de la planta se presenta un gran porcentaje de remoción en ambos nutrientes (nitrógeno y fósforo), teniendo la capacidad de seguir removiendo durante su crecimiento. Es importante mencionar que en la etapa adulta la planta presenta un porcentaje mayor de remoción de nitrógeno total en comparación con la etapa inicial, aunque no es muy variable su porcentaje de remoción en ambas etapas.



**Ilustración 42.** Porcentajes de remoción de nitrógeno y fósforo total.

En la

Tabla 10 se muestran los valores de concentración para nitrógeno y fósforo total, así como temperatura y pH de la norma oficial mexicana para descargas de aguas residuales municipales (NOM-001-SEMARNAT-2021), con los límites permisibles para embalses, lagos y lagunas utilizando el valor instantáneo.

**Tabla 10.** Límites permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Parámetros	Ríos, arroyos, canales, drenes	Embalses, lagos y lagunas	Zonas marinas mexicanas	Suelos		
				Riego de áreas verdes	Infiltración y otros riegos	Cárstico
Valor instantáneo (V.I.) a partir de un muestreo simple						
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35
Nitrógeno total (mg/l)	35	30	35	NA	NA	30
Fósforo total (mg/l)	21	15	21	NA	NA	15
pH (UpH)	6-9					

**NA= No aplica**

**UpH= Unidades de pH**

Fuente: NOM-001-SEMARNAT-2021

En las Tabla 11 y Tabla 12 se compararon las concentraciones del nitrógeno y fósforo total de los tres humedales y se especificó cual cumple con los límites permisibles de la Norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021.

“Remoción de nitrógeno y fósforo total en humedales experimentales de flujo subsuperficial horizontal con *Typha domingensis*, con tres medios de soporte”

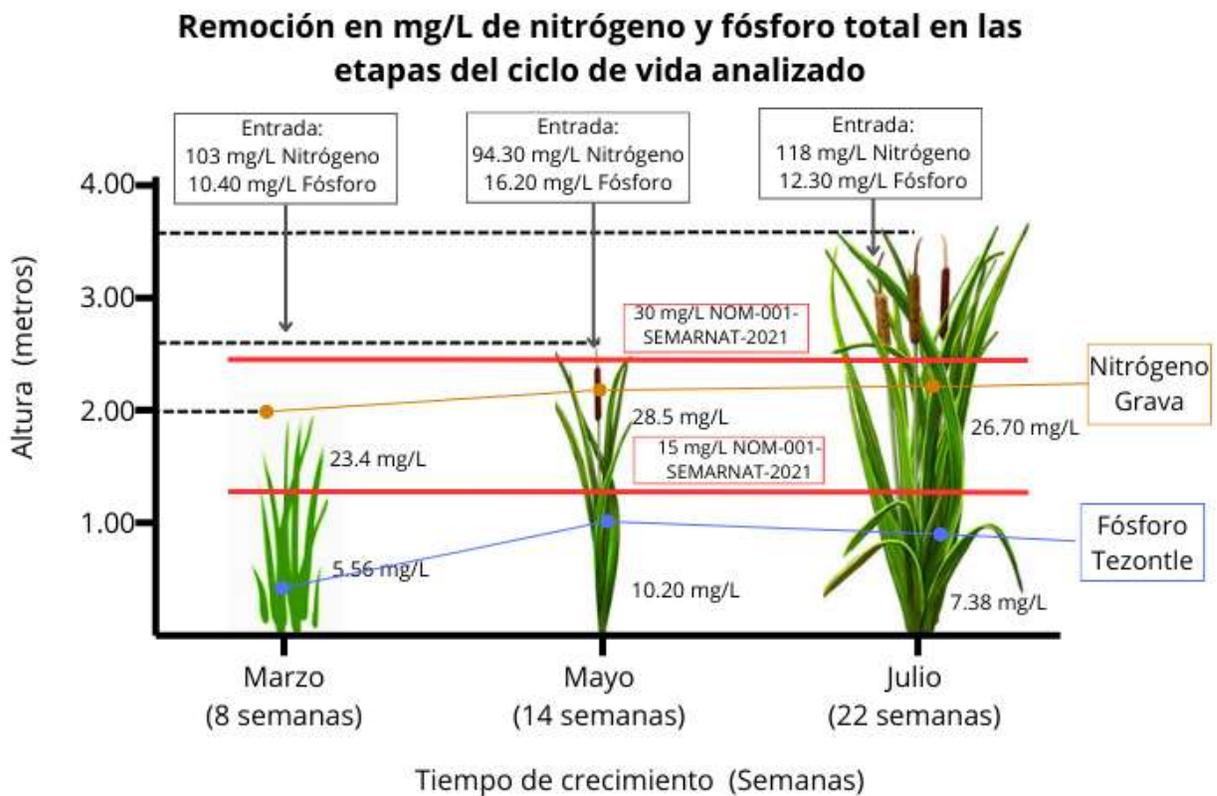
**Tabla 11.** Comparación de la concentración del nitrógeno total obtenidos en los tres muestreos con los límites permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Muestreo/ fecha	Etapa de crecimiento de la <i>Typha domingensis</i>	Nitrógeno total en el influyente (mg/l)	NOM-001- SEMARNAT- 2021 (límites permisibles del nitrógeno total) (mg/l)	Nitrógeno total en el efluente (mg/l)					
				Humedal 1-tezontle	Límites permisibles	Humedal 2-grava compacta	Límites permisibles	Humedal 3-tezontle y grava	Límites permisibles
1 (30-mar-23)	Inicial	103	30	35.3	No cumple	23.4	Si cumple	46.8	No cumple
2 (08-may-23)	Intermedia	94.3	30	56	No cumple	28.5	Si cumple	56.3	No cumple
3 (05-jul-23)	Adulta	118	30	76.6	No cumple	26.7	Si cumple	53.6	No cumple

**Tabla 12.** Comparación de la concentración del fósforo total obtenidas en los tres muestreos con los límites permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Muestreo/ fecha	Etapa de crecimiento de la <i>Typha domingensis</i>	Fósforo total e el influyente (mg/l)	NOM-001- SEMARNAT- 2021 (límites permisibles del fósforo total) (mg/l)	Fósforo total en el efluente (mg/l)					
				Humedal 1-tezontle	Límites permisibles	Humedal 2-grava compacta	Límites permisibles	Humedal 3-tezontle y grava	Límites permisibles
1 (30-mar-23)	Inicial	10.20	15	5.56	Si cumple	9.53	Si cumple	6.78	Si cumple
2 (08-may-23)	Intermedia	16.2	15	10.2	Si cumple	12.8	Si cumple	12	Si cumple
3 (05-jul-23)	Adulta	12.3	15	7.38	Si cumple	11	Si cumple	9.8	Si cumple

En Ilustración 43 se observan las tres etapas de crecimiento evaluadas con el humedal construido con medio de soporte grava compacta, ya que es el material que cumple con el límite de 30 mg/l de nitrógeno total establecido por la norma mencionada, presentando un rango de concentración de nitrógeno total de 23 a 29 mg/l. En el caso del límite permisible de fósforo total los tres humedales cumplen con la norma obteniendo una concentración menor de 15 mg/l. Se tomó la decisión de escoger el humedal que removi6 la mayor concentración de este nutriente optando por el humedal construido con tezontle ya que es el que presenta las concentraciones m6s bajas a la salida en las diferentes etapas de crecimiento.



**Ilustraci6n 43.** Remoci6n en mg/l de nitr6geno y f6sforo total.

## 10. CONCLUSIONES

Con relación a la hipótesis y al objetivo general, en el presente trabajo se evaluó la factibilidad y eficiencia de utilizar la planta macrófita *Typha domingensis* para la remoción de nitrógeno y fósforo total en los humedales de flujo subsuperficial horizontal, contruidos con diferente medio de soporte tales como tezontle, grava compacta y combinado (tezontle y grava), comprobando que en la etapa adulta la planta remueve mayor porcentaje de nitrógeno total. Sin embargo, en el caso del fósforo total, es en la etapa inicial donde se remueve mayor porcentaje debido a que ocupa el nutriente para el desarrollo de los rizomas y de su crecimiento radicular.

De acuerdo con los objetivos particulares y los resultados obtenidos de los tres muestreos realizados en las diferentes etapas de crecimiento de la *Typha domingensis* con diferentes medios de soporte, se concluye que la planta es capaz de remover nitrógeno total utilizando la grava compacta como medio de soporte y en el caso del fósforo total se tiene una mayor eficiencia de remoción utilizando el tezontle como medio de soporte, cumpliendo en ambos casos con los límites permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 para embalses, lagos y lagunas utilizando el valor instantáneo en las diferentes etapas de crecimiento de la *Typha domingensis*.

Con base en los resultados obtenidos se tiene que el mejor medio de soporte para la remoción de nitrógeno total es la grava compacta ya que tiene la eficacia de remover un mayor porcentaje en comparación con los otros dos humedales. En el caso del fósforo total el medio de soporte que tiene la mayor eficiencia de remoción es el tezontle, ya que en el primer muestreo que se realizó en la etapa inicial cuando la planta presentaba una altura de 2.00 metros removió un 77.28% de nitrógeno total en el humedal construido con grava compacta y un 46.54% de remoción de fósforo total en el humedal que utiliza tezontle como medio de soporte. En el segundo muestreo la planta tenía una altura de 2.60 metros removienddo un 69.78% de nitrógeno total con el humedal de grava compacta y un 37.04% de remoción de fósforo total con el humedal de tezontle. Finalmente, el tercer muestreo se realizó

“Remoción de nitrógeno y fósforo total en humedales experimentales de flujo subsuperficial horizontal con *Typha domingensis*, con tres medios de soporte”

---

cuando la planta tenía una altura de 3.55 metros removiendo un 77.37% de nitrógeno total en el humedal que utiliza grava compacta y un 40% de remoción de fósforo total en el humedal de tezontle.

## 11. RECOMENDACIONES

- Realizar muestreos durante el ciclo de vida completo (88 semanas) de la *Typha domingensis* tomando en cuenta que se caracteriza por ser una planta perenne.
- Tomar mayor cantidad de muestreos para que los resultados no representen un valor instantáneo. Extendiéndose el análisis experimental a promedio diario o mensualmente con la finalidad de conocer su comportamiento en el tratamiento de aguas residuales y generar un resultado más representativo de la realidad.
- Analizar biológicamente el comportamiento que tiene la planta al interactuar el agua residual con las raíces y follaje.
- Construir un humedal donde la mitad del largo sea del material tezontle y la otra mitad con grava compacta, y así analizar su comportamiento y eficiencia al remover nitrógeno y fósforo.
- Construir un humedal combinando dos plantas macrófitas para analizar su remoción de nutrientes en específico de nitrógeno y fósforo total.
- Es importante mencionar que en México no se cuenta con la información específica de la remoción de nitrógeno y fósforo total para un ciclo de vida completo de 88 semanas utilizando la planta macrófita *Typha domingensis* y como medio de soporte el tezontle, grava compacta y una combinación de ambos materiales, relacionados con el ciclo de vida de la planta macrófita *Typha domingensis*, por lo que es necesario continuar investigando al respecto.

## REFERENCIAS

- A. Vera, M. N. (2007). Estudio de la relación entre el crecimiento de la macrófita *Typha dominguensis* y la remoción de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en un humedal construido. *SciELO*, 5.
- Aguilera J, S., García A, R., & Ruíz C, R. (2009). *Manual de Prácticas Plantas de Tratamiento de Aguas*. Morelia, Michoacán: UMSNH.
- Arias Martínez, S. A., & Beta, F. M. (2018). *Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. Colombia.
- Arteaga Cortez, V., Quevedo, A., Castro, M., Bravo, Á., & Ramírez, J. (15 de Febrero de 2020). *Tecnología y ciencias del agua*. Obtenido de Tecnología y ciencias del agua: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222019000500319#B22](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222019000500319#B22)
- Barceló Quintal, I. D. (2019). Remoción de fósforo mediante un humedal de subsuperficial de flujo horizontal. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*. Recuperado el 2022, de [http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/7818/Remocion\\_de\\_fosforo\\_2019.pdf?sequence=1](http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/7818/Remocion_de_fosforo_2019.pdf?sequence=1)
- Bordino, J. (2023). *GEOenciclopedia "Ciclo del fósforo: qué es, etapas e importancia"*. Obtenido de <https://www.geoenciclopedia.com/ciclo-del-fosforo-que-es-etapas-e-importancia-683.html>
- Carhuancho, F. M. (2021). *Estudio de biomasa de distintas poblaciones de la especie *Typha domingensis* Pers. cultivadas en flotación*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Castro, A. B. (2019). *Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas*. Honduras.

Recuperado el 2024, de <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/67b581c2-1a93-4285-ac16-e95b40548146/content>

Castroviejo, S. (2007). *Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares* (Vol. XVIII). (M. L. S. Castroviejo (Madrid), Ed.) Madrid: Real Jardín Botánico, CSIC.

CCH, P. A. (2020). *Ciclo del fósforo*. Obtenido de <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/biologia2/estructura-procesos-ecosistema/ciclo-fosforo#:~:text=El%20ciclo%20del%20f%C3%B3sforo%20es,los%20incorporan%20a%20sus%20mol%C3%A9culas>.

CICEANA. (2020). *Ciclo del Nitrógeno*. Obtenido de Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A. C. (CICEANA): <http://www.ciceana.org.mx>

CONAGUA. (2015). *Libro 25. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales* (Vol. 25). México, D.F.: SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 2022

CONAGUA. (2015). *Libro 30. Diseño de PTARM: Humedales Artificiales* (Vol. 30). México, D.F.: SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 2022, de CONAGUA.

CONAGUA. (2015). *Libro 46. Operación y mantenimiento de PTARM: Pretratamiento y tratamiento primario*. (Vol. 46). México, D.F.: SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 2023

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochamba, Bolivia.

Ferreyra, J. L. (2020). *Medios de soporte alternativos para mejorar la eficiencia de los humedales artificiales de fluo subsuperficial, en el estado de Michoacán*.

Morelia. Recuperado el 2023, de [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB\\_UMI/CH/4638/FIC-M-2020-0500.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMI/CH/4638/FIC-M-2020-0500.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Flores Landeo, R., & Huamán Soto, M. A. (2018). *Sistema de depuración de aguas residuales mediante humedal artificial de flujo subsuperficial en la comunidad campesina de Ocopa-Distrito Lircay*. Perú: Universidad Nacional de Huancavelica. Recuperado el Mayo de 2024, de <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/4c2dfd4b-eb1c-474a-a515-4ba499ad1a37/content>

Gómez Rodríguez, A. C. (2019). *Tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales con *Acrostichum danaeifolium* y *Typha domingensis**. Tabasco: UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS.

HACH. (1933). *Prueba en cubeta TNTplus para fósforo (reactivo y total), LR (0,15 - 4,50 mg/L PO<sub>4</sub>), 25 pruebas*. Obtenido de Hach LATAM : <https://latam.hach.com/prueba-en-cubeta-tntplus-para-fosforo-reactivo-y-total-lr-0-15-4-50-mg-l-po-25-pruebas/product?id=54617177265>

HACH. (1933). *Pruebas en cubeta TNTplus para nitrógeno (total), HR (5 - 40 mg/L N), 25 pruebas*. Obtenido de Hach LATAM: <https://latam.hach.com/pruebas-en-cubeta-tntplus-para-nitrogeno-total-hr-5-40-mg-l-n-25-pruebas/product-details?id=54617158883>

Hall, S. J. (20 de Marzo de 2009). Cultural Disturbances and Local Ecological Knowledge Mediate Cattail (*Typha domingensis*) Invasion in Lake Pátzcuaro, México. *Springer*. Obtenido de Springer: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10745-009-9228-3>

Heynes-Silerio, S. A. (2017). Vegetación de humedales del municipio de Durango, Durango México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. Obtenido de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii>

- Ibáñez, J. J. (2009). *Ciclo del fósforo en agroecosistemas y reacción de los fertilizantes fosfatados en el suelo*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid.
- Karla Tapia Fierro, B. E. (2022). *Inecol, INSTITUTO DE ECOLOGÍA A. C.* . Obtenido de <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1693-nuestro-fosforo-de-cada-dia>
- Lara, J. A. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña-Instituto Catalán de Tecnología*. Barcelona.
- Library, S. E. (2019). Tecnología y ciencias del agua. *Scientific Electronic Library Online*.
- López, E. J. (2020). *Evaluación de la eficiencia de la remoción de plomo en aguas residuales del río Tarma usando *Hydrocotyle bonariensis* Lam. y *Typha latifolia* L. en humedales artificiales*. Lima, Perú. Obtenido de <https://repositorio.ucss.edu.pe/handle/20.500.14095/831>
- López, T. D. (2019). Desempeño de humedales construidos a escala piloto para el tratamiento de agua residual urbana utilizando *Cyperus giganteus* Vahl y *Typha domingensis* Pers. *Steviana*, 11(1). Recuperado el 2023, de <https://revistascientificas.una.py/index.php/stevia/article/view/1016>
- Morocco, S., & Paye, K. M. (2021). *Efecto de *Typha angustifolia* L. (*Totora*) y *Phragmites australis* (carrizo) en la remoción de nutrientes en la planta de tratamiento de agua residual Omo - Moquegua, 2021*. Arequipa, Perú: Universidad Continental. Recuperado el 2024, de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11535>
- NEMI, National Environmental Methods Index. (s.f.). *NEMI browse methods*. Obtenido de [https://www.nemi.gov/methods/method\\_summary/7436/](https://www.nemi.gov/methods/method_summary/7436/)

- Pareja, A. d. (2015). *Evaluación de la eficiencia de la remoción de nutrientes del efluente de la PTAR de la empresa esmeralda corp S.A.C. Mediante el uso de humedales artificiales, empleando Typha Domingensis P.Ers. (Totora)*. Lima, Perú.
- Pérez, M., & Domínguez, L. (2019). Evaluación de la remoción de colorantes mediante Humedales Subsuperficiales. *Revista Cubana de Química*.
- Pérez, N. E. (2021). *Colmatación de medios de soporte en humedales artificiales de flujo sub-superficial que emplean Typha Domingensis*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Obtenido de [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/6380](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/6380)
- Pezeshki, R., DeLaune, R., Kludze, H., & Choi, H. (1996). Photosynthetic and growth responses of cattail (*Typha domingensis*) and sawgrass (*Cladium jamaicense*) to soil redox conditions. *Aquatic Botany*.
- Pichardo, J. M. (13 de agosto de 2009). CONABIO. Obtenido de CONABIO: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.htm>
- Quezada, D. V. (2019). *Eficiencia de remoción de contaminantes en el agua, por medio de vegetación hidrófita disponible en el estado de Michoacán (Typha domingensis y Eleocharis densa)*. Recuperado el 2023, de [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB\\_UMICH/4635/FIC-R-M-2019-1653.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/4635/FIC-R-M-2019-1653.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ramalho, R. S. (1990). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Ríos, Y. N. (2017). *Estudio para mejorar la eliminación de Fósforo en Humedales Artificiales empleando fangos generados en la potabilización del agua, mediante procesos de adsorción*. Valencia, España.
- Rodger B. Baird, A. D. (2018). 4500-N NITROGEN. En A. D. Rodger B. Baird, *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater* (24th ed.).



NOMBRE DEL TRABAJO

**Remoción de nitrógeno y fósforo total en humedales experimentales de flujo superficial horizontal**

AUTOR

**Alondra Camargo Almaraz**

RECUENTO DE PALABRAS

**21893 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**123885 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**106 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**3.6MB**

FECHA DE ENTREGA

**Sep 24, 2024 7:42 AM CST**

FECHA DEL INFORME

**Sep 24, 2024 7:44 AM CST**

● **43% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 43% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 17% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
<b>Programa educativo</b>	Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental	
<b>Título del trabajo</b>	"REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO TOTAL EN HUMEDALES EXPERIMENTALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL CON <i>TYPHA DOMINGENSIS</i> , CON TRES MEDIOS DE SOPORTE"	
	<b>Nombre</b>	<b>Correo electrónico</b>
<b>Autor/es</b>	Alondra Camargo Almaraz	1175636j@umich.mx
<b>Director</b>	Jesús Alberto Rodríguez Castro	jesus.rodriguez@umich.mx
<b>Codirector</b>	Roberto García Acevedo	roberto.garcia@umich.mx
<b>Coordinador del programa</b>	Hugo Luis Chávez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	 Alondra Camargo Almaraz
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 26 de septiembre de 2024