



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE BIOLOGÍA  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

“COLMATACIÓN DE MEDIOS DE SOPORTE EN HUMEDALES ARTIFICIALES  
DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL QUE EMPLEAN *TYPHA DOMINGENSIS*”

# **T E S I S**

Para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**Presenta**

ING. NORMA ERIKA PÉREZ AMEZCUA

**Director de tesis:**

DR. EZEQUIEL GARCÍA RODRIGUEZ

**Co-director de tesis:**

DR. ROBERTO GARCÍA ACEVEDO

Morelia, Michoacán, diciembre de 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A DIOS:**

Por darme cada día la oportunidad de vivir y hacer de mí una persona crédula y llena de esperanza hacia la vida.

### **A MI ABUELO:**

Melitón Amezcua Zalapa por darme una madre maravillosa, por creer en mí, tus grandes consejos y el gran cariño que me tuviste hasta tu último suspiro. Te amo y extraño cada día de mi vida.

### **A MI MADRE:**

M.C. Adriana Amezcua Garibay por darme la vida, ser mi mayor ejemplo día a día, mi mejor amiga, mi gran amor y por haberme dado la oportunidad de realizarme. Te amo.

### **A MI ESPOSO:**

Ing. José Trinidad Ambriz López por ser la maravillosa persona que es, brindarme su apoyo incondicional, inspirarme e impulsarme a cumplir mis sueños. Te amo.

### **A MIS HERMANAS:**

Arq. Silvia Margarita P. Amezcua, Maries Selene Medina Amezcua y Alondra Vianey Caro Amezcua por apoyarme siempre en los momentos donde más las he necesitado.

### **A MIS ASESORES:**

Dr. Ezequiel García Rodríguez y Dr. Roberto García Acevedo por haber confiado en mí, haberme orientado y haber contado con ellos incondicionalmente como maestros, asesores y amigos. Son un gran ejemplo para mí, para toda la comunidad estudiantil y científica, los admiro por su sabiduría y conocimientos, y agradezco infinitamente no haberme dejado sola en este camino del saber.

### **A MIS MAESTROS**

Dr. Gabriel Martínez Herrera, Dr. Roberto Guerra González, Dr. Roberto Antonio Lindig Cisneros, Dr. Marco Antonio Martínez Cinco, Dra. Yvonne Herrerías Diego, Dr. José Jaime Madrigal Barrera, M. en C. Ricardo Ruiz Chávez, Dr. Hugo Luis Chávez García, Dr. Jesús Alberto Rodríguez Castro. Por enseñarme lo maravilloso de ésta carrera y lograr en mí una mejor persona. Los admiro.

### **A MI FAMILIA**

A toda mi familia Amezcua Garibay y Ambriz López, por hacer de mí una mejor persona.

### **A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS**

A mis compañeros y amigos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, por cada momento vivido dentro y fuera de las aulas, su valiosa y gran amistad brindada.

EN ESPECIAL A AL **U.M.S.N.H**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

## INDICE

### INDICE DE FIGURAS

### INDICE DE GRAFICAS

### INDICE DE TABLAS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	16
2.1 HUMEDALES ARTIFICIALES.....	16
2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	19
2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	20
2.1.3 VENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	25
2.2 <i>DESCRIPCIÓN Y CARACTERISTICAS DEL MODELO DE HUMEDALES ARTIFICIALES QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO DE INFORMACIÓN, ARTE Y CULTURA (CIAC) DE LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO (UMSNH)</i> .....	26
2.2.1 <i>TYPHA DOMINGENSIS</i> .....	27
2.2.2 TEZONTLE Y GRAVA TRITURADA.....	33
2.3 LA COLMATACIÓN .....	35
2.3.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COLMATACIÓN .....	37
2.3.2 FACTORES SEGÚN SU PROCEDENCIA .....	37
2.3.3 EVOLUCIÓN DE LA COLMATACIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES .....	38
2.4 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	38
2.5 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	39
2.5.1 LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN FASE SATURADA COMO HERRAMIENTA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO.....	41
2.6 NORMA DE CALIDAD DEL AGUA .....	43
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	44
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	47
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	47
5.1 OBJETIVO GENERAL .....	47

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	47
<b>6. HIPÓTESIS .....</b>	<b>48</b>
<b>7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>49</b>
<b>8. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>82</b>
<b>10. DOCUMENTOS CONSULTADOS .....</b>	<b>84</b>
<b>11. APÉNDICES .....</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Clasificación de los humedales artificiales de acuerdo al sistema de macrófitas empleado .....	21
<b>Figura 2.</b> Corte longitudinal de un humedal artificial de flujo superficial .....	22
<b>Figura 3.</b> Corte longitudinal de un humedal de flujo subsuperficial horizontal .....	24
<b>Figura 4.</b> Corte longitudinal de un humedal de flujo subsuperficial vertical.....	25
<b>Figura 5.</b> Humedales artificiales de flujo subsuperficial, que se encuentran en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).....	27
<b>Figura 6.</b> <i>Typha Domingensis</i> en humedales artificiales, para el proceso biológico en el tratamiento aguas residuales.....	33
<b>Figura 7.</b> Grava triturada.....	34
<b>Figura 8.</b> Tezontle.....	35
<b>Figura 9.</b> Comparación de un material de soporte colmatado (A) y otro en estado normal (B).....	36
<b>Figura 10.</b> Humedales artificiales de flujo subsuperficial, que se encuentran en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).....	49
<b>Figura 11.</b> Vaciado de lodos acumulados en el tanque elevado.....	50
<b>Figura 12.</b> Lavado del tanque elevado.....	51
<b>Figura 13.</b> Limpieza del pretratamiento del sistema de humedales .....	51
<b>Figura 14.</b> Limpieza y mantenimiento de la red en el modelo de humedales.....	52
<b>Figura 15.</b> Poda en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), sitio donde se encuentran los humedales artificiales.....	52
<b>Figura 16.</b> Colocación de malla al tanque elevado, para la retención de sólidos con para evitar taponamientos en la red.....	53
<b>Figura 17.</b> Poda de <i>Typha Domingensis</i> y vegetación ajena que se removió .....	54
<b>Figura 18.</b> Humedales en su etapa de estabilización.....	55

<b>Figura 19.</b> Muestras del influente y efluente de agua residual en los humedales del CIAC de la UMSNH para su análisis físico-químico .....	58
<b>Figura 20.</b> Muestras del influente y efluente de agua residual en los humedales del CIAC de la UMSNH para su análisis bacteriológico .....	59
<b>Figura 21.</b> Instrumentos de medición para determinar los parámetros de campo de las muestras de agua.....	60
<b>Figura 22.</b> Proceso de la obtención de los parámetros de campo: Conductividad electrolítica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), salinidad, temperatura, pH y oxígeno disuelto.....	60
<b>Figura 23.</b> Instalación de espacios para la colocación de la tubería.....	61
<b>Figura 24.</b> Ingreso de la tubería que permitirá la medición del gradiente.....	62
<b>Figura 25.</b> Tubería instalada en el modelo, para la medición del gradiente.....	62
<b>Figura 26.</b> Medición de niveles en cada punto instalado, en el modelo de humedales artificiales.....	63
<b>Figura 27.</b> Instalación del humedal artificial alternativo, con tezontle como material de soporte.....	64
<b>Figura 28.</b> Mediciones de las cotas piezométricas, para la determinación del gradiente hidráulico, para la obtención del coeficiente de conductividad hidráulica.....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Características típicas del medio de soporte en humedales de flujo subsuperficial .....	34
<b>Tabla 2</b> Caudal de diseño de los humedales, en cada uno de los medios de soporte.....	57
<b>Tabla 3</b> Muestreo 1. Parámetros de campo.....	65
<b>Tabla 4</b> Muestreo No. 1 en el caudal de agua residual, en los humedales ubicadas en el CIAC de la UMSNH .....	68
<b>Tabla 5</b> Muestreo 2. Parámetros de campo.....	69
<b>Tabla 6</b> Muestreo No. 2 en el caudal de agua residual, en los humedales ubicadas en el CIAC de la UMSNH .....	71
<b>Tabla 7</b> Muestreo 3. Parámetros de campo.....	72
<b>Tabla 8</b> Muestreo No. 3 en el caudal de agua residual, en los humedales ubicadas en el CIAC de la UMSNH .....	74
<b>Tabla 9</b> Coeficiente de conductividad hidráulica del Humedal-1 y Humedal-2.....	79
<b>Tabla 10.</b> Coeficiente de conductividad hidráulica de los humedales alternativos .....	79
<b>Tabla 11.</b> Porcentajes de conductividad hidráulica de los humedales No. 1 y No. 2.....	80

## ÍNDICE DE GRAFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Muestreo 1. Comparación de la temperatura de las muestras respecto a las NOM-001-SEMARNAT-1996.....	66
<b>Gráfica 2.</b> Muestreo 1. Comparación del PH de las muestras respecto a las NOM-001-SEMARNAT-1996.....	66
<b>Gráfica 3</b> Muestreo 1. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática .....	67
<b>Gráfica 4</b> Muestreo 2. Comparación de la temperatura de las muestras respecto a las NOM-001-SEMARNAT-1996.....	69
<b>Gráfica 5</b> Muestreo 2. Comparación del PH de las muestras respecto a las NOM-001-SEMARNAT-1996.....	70
<b>Gráfica 6</b> Muestreo 2. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática.....	70
<b>Gráfica 7</b> Muestreo 3. Comparación de la temperatura de las muestras respecto a las NOM-001-SEMARNAT-1996.....	72
<b>Gráfica 8</b> Muestreo 3. Comparación del PH de las muestras respecto a las NOM-001-SEMARNAT-1996.....	73
<b>Gráfica 9</b> Muestreo 3. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática.....	73
<b>Gráfica 10</b> Graficas de Gradiente hidráulico – distancia de muestreo.....	75

## RESUMEN

Una de las alternativas para tratamiento de aguas residuales han sido los humedales, tanto naturales como artificiales. Debido a su facilidad de operación y a sus bajos costos de construcción, convirtiéndose en uno de los sistemas más prometedores para el tratamiento de aguas residuales en zonas con baja densidad de población. Los humedales artificiales son áreas extensas, permanentemente inundadas, pobladas por plantas hidrófilas, y comprenden una variedad de hábitats microbianos de diferentes características y dan soporte a una diversidad de microorganismos (bacterias, algas, hongos), teniendo la función de degradar a los sustratos orgánicos e inorgánicos.

Los humedales artificiales se clasifican de acuerdo con su modo de operación, y se han usado con éxito en el tratamiento de aguas residuales domésticas, urbanas, escorrentía de autopistas y aguas grises, productos ácidos del drenado de minas, residuos agrícolas, efluentes industriales, lixiviados de vertederos, entre otros. Obteniendo así la reducción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y sólidos en suspensión, que ocurre gracias a la actividad microbiana, y la eliminación de fósforo y nitrógeno, gracias a los procesos de desnitrificación.

En el presente trabajo se estudia la colmatación de medios de soporte en humedales artificiales de flujo sub-superficial que emplean *Typha Domingensis*, en dos modelos de humedales artificiales construidos en los terrenos de la planta de tratamiento del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Se trata de humedales de flujo horizontal subsuperficial, en los que el medio poroso se mantiene saturado por el agua. En el primer caso se colocó como medio de soporte tezontle y en el segundo caso se colocó grava triturada. En ambos casos se sembró la especie de *Typha Domingensis* (planta emergente). Las aguas residuales aplicadas a este sistema se sujetan a pretratamiento, paso fundamental en cualquier tipo de tratamiento de aguas residuales.

El estudio de la colmatación es de gran importancia ya que nos permite determinar el tiempo y cantidad de saturación en el material de soporte y la capacidad de retención de los sólidos, es decir, el efecto del fenómeno físico mencionado en la vida útil de los humedales artificiales.

Se concluye que con la presente investigación se cumple el objetivo general ya que se logró comprobar, a través de la variación de la conductividad hidráulica, que la colmatación es mayor en el tezontle que en la grava triturada de humedales de flujo subsuperficial que emplean *Typha Domingensis*.

Se logró determinar la remoción de contaminantes, y en cuanto a su cumplimiento con la NOM-001-SEMARNAT-1996, se concluye que ambos humedales cumplen con la norma en temperatura, pH, DBO<sub>5</sub>, SST, y SSed, y que es mayor la remoción en el humedal con tezontle que en el de grava triturada, y ninguno de los humedales cumplen con la norma en cuanto a OD y Coliformes fecales, y en cuanto a su relación con la colmatación se concluye que ésta no es determinante pues en ambos casos cumplen con las normas, inclusive el tezontle que tiene mayor colmatación presenta también mayor remoción de contaminantes.

Con relación a la hipótesis se concluye que efectivamente el grado de colmatación afecta menos la remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial en los que se utiliza *Typha Domingensis*, cuando el medio de soporte está constituido por tezontle, que cuando está constituido por grava triturada, esto a pesar de que la colmatación es mayor en el tezontle que en la grava triturada.

Aunque el tezontle presenta mayor remoción, lo preocupante es que también se colmata más que la grava, así que se recomienda estudiar el caso del mantenimiento y la vida útil del tezontle respecto a la grava triturada para terminar de definir cuál de los materiales es el más conveniente para este tipo de humedales.

Palabras Clave: Humedal, Aguas residuales, Planta de tratamiento, Colmatación, TYPHA DOMINGENSIS

## SUMMARY

One of the alternatives for wastewater treatment has been wetlands, both natural and artificial. Due to its ease of operation and low construction costs, making it one of the most promising systems for wastewater treatment in areas with low population density. Artificial wetlands are extensive areas, permanently flooded, populated by hydrophilic plants, and comprise a variety of microbial habitats of different characteristics and support a diversity of microorganisms (bacteria, algae, fungi), having the function of degrading organic and inorganic substrates.

Artificial wetlands are classified according to their mode of operation and have been successfully used in the treatment of domestic, urban wastewater, highway runoff and gray water, acid products from mine drainage, agricultural waste, industrial effluents, leachate from landfills, among others. Therefore obtaining the reduction of Biochemical Oxygen Demand (BOD) and suspended solids, which occur thanks to microbial activity, and the elimination of phosphorus and nitrogen, thanks to the denitrification processes.

In the present work we study the filling of means of support in artificial wetlands of sub-surface flow that use *Typha Domingensis*, in two models of artificial wetlands built on the grounds of the treatment plant of the Center for Information, Art and Culture (CIAC) of the Michoacán University of San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). These are wetlands of subsurface horizontal flow, in which the porous environment remains saturated by water. In the first case it was placed as a means of support tezontle and in the second case crushed gravel was placed. In both cases the species of *Typha Domingensis* (emerging plant) was planted. The wastewater applied to this system is subject to pretreatment, a fundamental step in any type of wastewater treatment.

The study of clogging is of great importance since it allows us to determine the time and amount of saturation in the support material and the retention capacity of

the solids, that is, the effect of the physical phenomenon mentioned in the useful life of the artificial wetlands.

It is concluded that with the present research the general objective is fulfilled since it was possible to verify, through the variation of the hydraulic conductivity, that the clogging is greater in the tezontle than in the crushed gravel of wetlands of subsurface flow that use *Typha Domingensis*.

It was possible to determine the removal of contaminants, and in terms of compliance with NOM-001-SEMARNAT-1996, it is concluded that both wetlands comply with the standard in temperature, pH, DBO<sub>5</sub>, SST, and SSed, and that the removal in the wetland with tezontle is greater than in that of crushed gravel, and none of the wetlands comply with the standard in terms of OD and fecal coliforms, as for its relationship with the clogging it is concluded that this is not determining because in both cases they comply with the rules, even the tezontle that has greater clogging also presents greater removal of contaminants.

In relation to the hypothesis, it is concluded that indeed the degree of clogging affects less the removal of contaminants in artificial wetlands of sub-surface flow in which *Typha Domingensis* is used, when the support medium is constituted by tezontle, than when it is constituted by crushed gravel, this is even though the clogging is greater in the tezontle than in the crushed gravel.

Although the tezontle presents greater removal, the concern is that it is also clogging more than the gravel, therefore it is recommended to study the case of the maintenance and the useful life of the tezontle vs. crushed gravel to finish defining which of the materials is the most convenient for these types of wetlands.

# 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de un planeta que se encuentra en el Antropoceno, se refiere a los cambios que la tierra ha tenido tras la crisis ambiental que se enfrenta hoy en día. Con el paso del tiempo, la tierra ha sufrido drásticas y notables afectaciones, donde el responsable es el ser humano. No es absolutamente necesidad que algún libro, artículo, revista o trabajo de investigación describa los cambios que se observan a simple vista. Uno de ellos es la adaptación y sobrevivencia al cambio climático de muchas especies, incluyendo al ser humano.

Lo anterior se debe principalmente al desarrollo al que la humanidad se ha aferrado, llevando a que las especies se adapten dentro de las posibilidades a su alcance. Refiriendo estas características de una manera muy distinta a las que se tenían hace 200 años, cuando comenzaba la revolución industrial y, con ello, de una manera muy directa el abuso en la explotación de los recursos naturales que se encontraban al alcance y, con el paso del tiempo, obligando a requerir una revolución ambiental en el planeta.

En las últimas décadas la creciente preocupación sobre el deterioro del medio ambiente ha llevado al estudio y desarrollo de nuevas alternativas para minimizar el impacto ambiental que dejan principalmente las actividades humanas, teniendo como foco principal uno de los recursos naturales más afectados, que es el vital para la vida: el agua. El agua es un recurso natural fundamental, ya que no solo es vital para el ser humano, sino para todo ser vivo. El crecimiento de la población ha tenido como consecuencia, el consumo excesivo de este recurso natural, debido al crecimiento de la demanda del mismo recurso, cada vez mayor, llevando a que en numerosas cuencas se declare la veda correspondiente.

La magnitud de los requerimientos hídricos, para cubrir los usos correspondientes, cada vez constituyen un reto más complejo de resolver, debido a que uno de los factores primordiales para seguir teniendo una calidad adecuada de este recurso natural es acondicionarlo mediante los tratamientos correspondientes. Existe la

necesidad de tratar el agua para después incorporarla a usos y servicios múltiples; este proceso de tratamiento puede llevarse a cabo con distintos métodos, de acuerdo a los usos que se le pretenda dar y los servicios a los que se incorpore. “La falta de recursos económicos limita la construcción, operación y mantenimiento de sistemas que utilizan energía eléctrica para su funcionamiento y requieren de equipos electromecánicos costosos” (Lahera, 2010; Rojas, 2012 citado por CONAGUA 2015).

Una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales son los humedales artificiales, estos se utilizan ya sea de manera individual o de manera combinada con otros procesos. De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento, “existen en México 2 337 plantas en operación, de las cuales 211 (11.08 por ciento del total) corresponden a humedales artificiales, lo que indica la importancia del desarrollo de esta alternativa de tratamiento de aguas residuales, tanto en áreas rurales como en ciudades con caudales hasta de 120 litros por segundo” (CONAGUA, 2015).

“Los menores costos de operación corresponden a los sistemas extensivos de tratamiento por sus mínimos requerimientos de energía eléctrica para su funcionamiento y por su operación simple” (Mena *et al.*, 2008 citado por CONAGUA 2015). En contraste, la principal desventaja de estos sistemas es que demandan áreas de terreno considerablemente mayores que los de los tratamientos con lodos activados, y su mantenimiento tiende a ser complejo si no se le da un seguimiento adecuado.

“En el medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos” (García y Corzo, 2008 citado por CONAGUA 2015). La vida útil de los humedales artificiales depende de su diseño y del mantenimiento que se les dé, pero el fenómeno de colmatación en los medios de soporte determina como y el tiempo en que se debe realizar el mantenimiento.

La colmatación es un fenómeno físico que se debe a la acumulación de partículas finas en el material filtrante, partículas que forman lodos, debido a las elevadas concentraciones de sólidos en suspensión, aceites y grasas en las aguas a tratar, haciendo deficiente el funcionamiento de las etapas del tratamiento. La colmatación se presenta gradualmente en los humedales, y es un proceso lento pero constante y determina la vida útil de los mismos, ya que afecta el desempeño del sistema. Por lo tanto, se nota la importancia del estudio de la colmatación, que determina el comportamiento de los fluidos en el medio poroso, el proceso de filtración y la vida útil de los humedales artificiales.

La finalidad del presente trabajo es estudiar la evolución de la colmatación en humedales artificiales de flujo sub-superficial, realizando el estudio de dos diferentes medios de soporte y su efecto en la remoción de contaminantes del agua, utilizando *Typha Domingensis* en ambos casos; lo anterior con la finalidad de realizar dos comparativas: la primera cuando el medio de soporte está constituido por tezontle y la segunda cuando el medio de soporte está constituido por grava triturada compacta; para determinar cuál alternativa es mejor para implementar en este tipo de sistemas.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales son áreas extensas de terrenos con sustrato constituido por materiales pétreos y especies de plantas principalmente *macrófitas*, en las que de forma controlada se producen los procesos de eliminación de contaminantes, de forma parecida o igual que en los humedales naturales. Los principales factores que influyen en los humedales artificiales son: el sustrato (medio de soporte), la vegetación y el agua a tratar.

El sustrato sirve de soporte a la vegetación y permite la filtración del agua a tratar, así como soporte de la vegetación, y la población microbiana forma una biopelícula que es la principal encargada de los procesos de eliminación de los contaminantes contenidos en las aguas residuales.

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales, son importantes por varias razones Delgadillo, *et al.*, (2010):

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es, a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes

reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999) citado por Delgadillo, *et al.*, (2010).

El medio es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular contiene 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 (Arias, 2004) citado por Delgadillo, *et al.*, (2010). Por lo contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelículas).

La vegetación está determinada fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004) citado por Delgadillo, *et al.*, (2010).

De acuerdo a Lara (1999), las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.

- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

El agua residual a tratar es la que circula o se hace circular a través de la vegetación y del medio de soporte, y proviene del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales, etc., son recogidas por una red de alcantarillado que las conduce hacia una planta de tratamiento de aguas residuales o hacia algún sistema de humedales. Según su uso precedente, estas aguas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación. Mendonça en Rolim, (2000) citado por Delgadillo, *et al.*, (2010).

En el trabajo de Lara (1999), denominado, “Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales” se menciona que los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento.

Con el paso del tiempo se han buscado alternativas para el tratamiento de aguas residuales aceptando que la Fitodepuración es una de las alternativas con mejores resultados, Delgadillo, *et al.*, (2010) hace mención a que:

La Fitodepuración, en este caso, se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean éstos naturales o artificiales. El término macrófitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos (Fernández *et al.*, 2004) citado por Delgadillo, *et al.*, (2010). Constituyen “fitosistemas”, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el tratamiento de las aguas.

#### 2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Para Delgadillo *et al.*, (2010) los humedales artificiales se pueden clasificar según el tipo de *macrófitas* que empleen en su funcionamiento: *macrófitas* fijas al sustrato (enraizadas) o *macrófitas* flotantes libres. Considerando la forma de vida de estas macrófitas, los humedales artificiales se pueden clasificar en:

*Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes:* principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*) son las especies más utilizadas para este sistema.

*Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas:* comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las

angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

*Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes:* se encuentran en suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos (Cricyt, 2007) citado por Delgadillo, *et al.*, (2010).

Los humedales basados en *macrófitas* enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee: 1) humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas, y 2) humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del sustrato del humedal.

Mencionado lo anterior, en la figura 1 se muestra un esquema donde se aprecia de manera gráfica la clasificación de los humedales artificiales.

#### 2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

En función de la forma en la que el agua a tratar circule a través de los humedales superficialmente (por encima del medio de soporte) o de forma subterránea (a través del medio de soporte), los humedales se clasifican en:

- Humedales artificiales de flujo superficial
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial

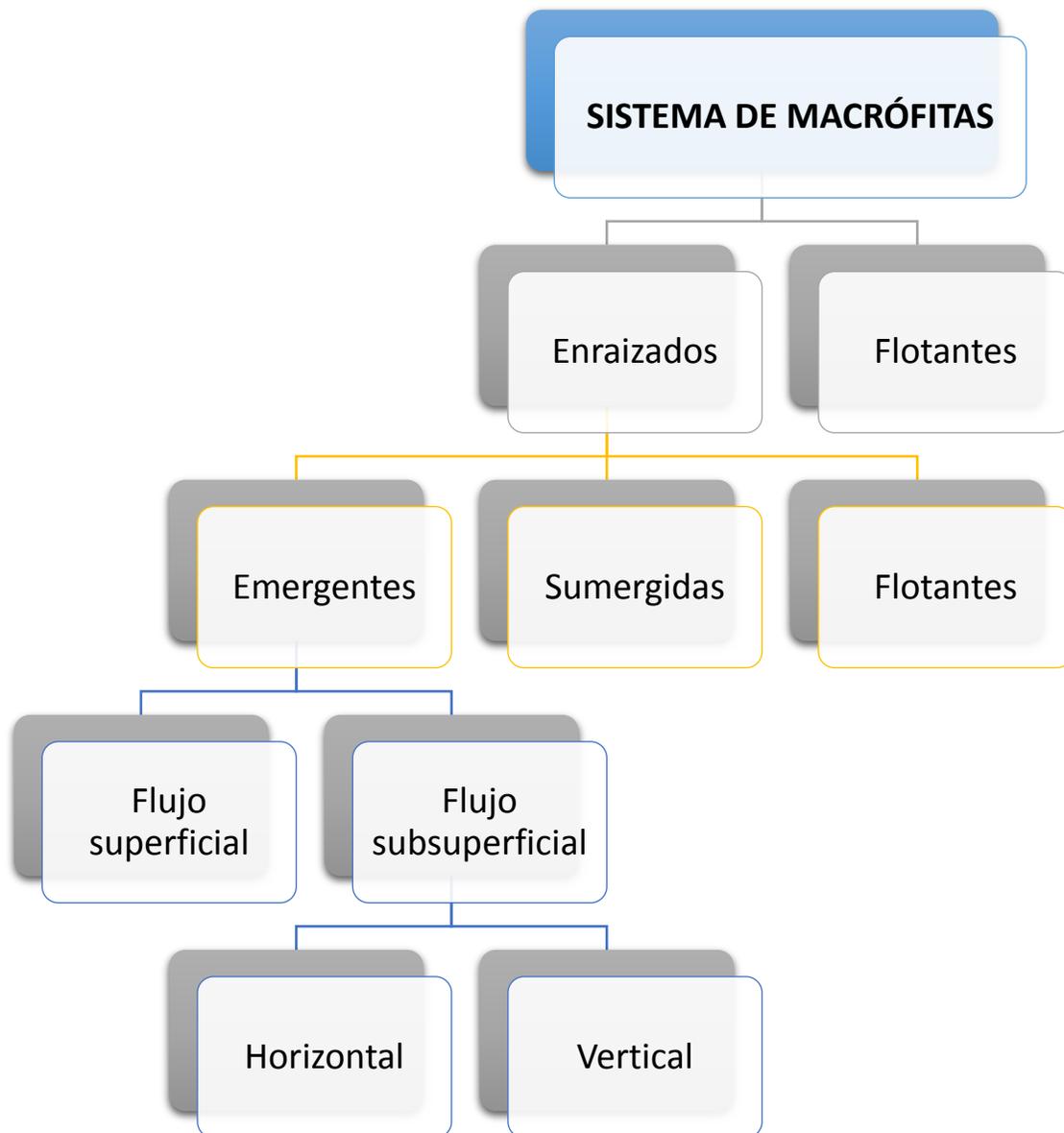


Figura1. Clasificación de los humedales artificiales de acuerdo al sistema de macrófitas empleado.

### Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)

En este tipo de humedales el agua se encuentra expuesta directamente a la atmosfera y circula preferentemente a través de los tallos de las plantas. Estos humedales pueden considerarse como una variedad de las lagunas clásicas, con la diferencia de que se operan con menores profundidades de la lámina de agua

(inferiores a 0.4m), y de que las balsas se encuentran colonizadas por plantas acuáticas emergentes (Figura 2).

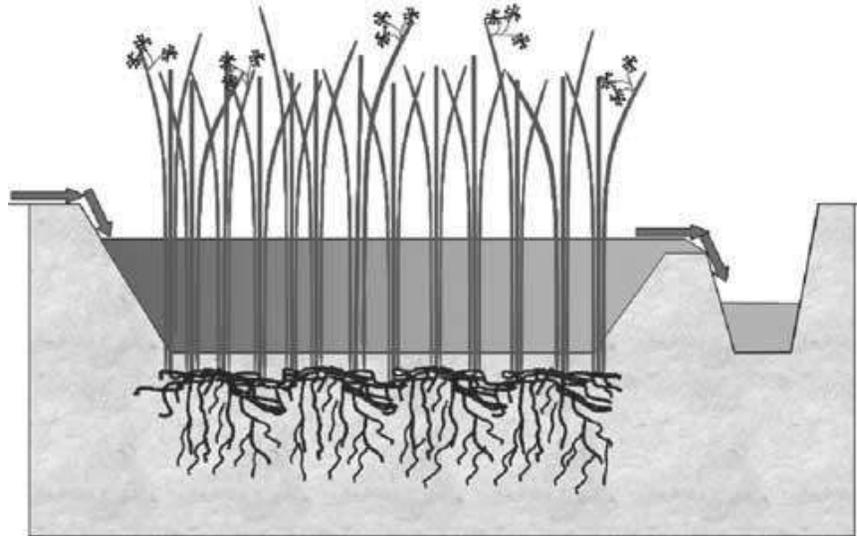


Figura 2. Corte longitudinal de un humedal artificial de flujo superficial. Fuente Delgadillo, *et al.*, (2010).

Los HAFS suelen ser instalaciones de varias hectáreas, que principalmente tratan efluentes procedentes de tratamientos secundarios y que también se emplean para crear y restaurar ecosistemas acuáticos. “En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen” Delgadillo, *et al.*, (2010).

“La alimentación a estos humedales se efectúa de forma continua y la depuración tiene lugar en el tránsito de las aguas a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente implantada. Tallos, raíces y hojas caídas sirven de soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del

agua dan sombra a la masa de agua, limitando el crecimiento de micro algas” (Salas, Pidre y Sánchez, 2006) citado por Delgadillo, *et al.*, (2010)

### Humedales artificiales de flujos subsuperficial (HAFSs)

En estos humedales el agua a tratar circula a través de un material granular (arena, gravilla, grava) de permeabilidad suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado, y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación.

“Los HAFSs son instalaciones generalmente de menor tamaño comparados con los HAFS, y que en la mayoría de los casos se emplean para el tratamiento de las aguas residuales generadas en núcleos de poblaciones de menos de 2000 habitantes” (Salas, Pidre y Sánchez, 2006) citado por Delgadillo, *et al.*, (2010).

Ventajas de los HAFSs:

- Menor área de terreno, en comparación a los HAFS.
- No hay problemas de aparición de olores.
- No hay presencia de mosquitos.
- Mejor respuesta ante los descensos de temperaturas ambientales.

Desventajas de los HAFSs:

- Mayores costos en su construcción al colocar el material de soporte.
- Mayores riesgos de colmatación en el material de soporte.

De acuerdo a la dirección en la que circulan las aguas a través del material de soporte, los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSs) se clasifican en horizontales y verticales.

Horizontales: 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 a través de un medio poroso.

La profundidad del lecho varía entre 0.45 m y 1 m, con pendiente de entre 0.5% y 1%. “Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento” Delgadillo, *et al.*, (2010).

El agua circula horizontalmente de un extremo a otro del sistema, al contrario de los sistemas verticales este tipo de humedales operan inundados permanentemente, por lo que el ambiente para la depuración es mucho más reductor que en los sistemas verticales (Figura 3).

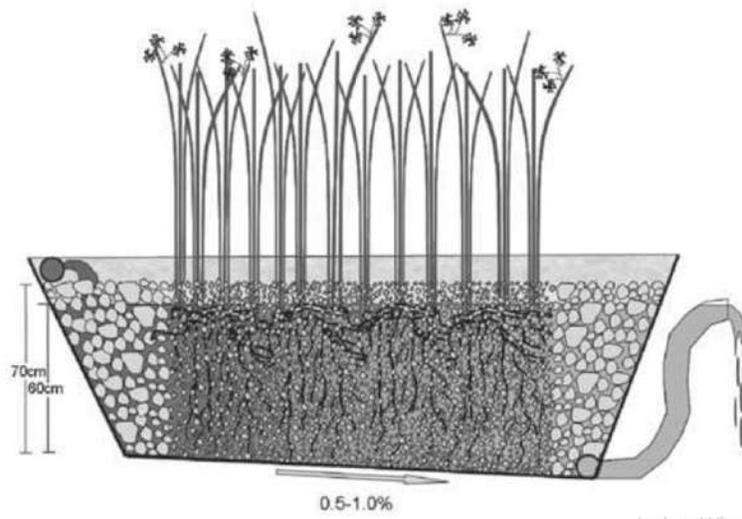


Figura 3. Corte longitudinal de un humedal de flujo subsuperficial horizontal.

Fuente Delgadillo, *et al.*, (2010).

Verticales: “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” Delgadillo, *et al.*, (2010). El agua circula verticalmente a través del material de soporte. El agua se distribuye superficial y uniformemente sobre la capa de arena mediante tuberías formando una red, y circula verticalmente por gravedad hasta el fondo, donde otra red de tuberías recoge el agua tratada (Figura 4).

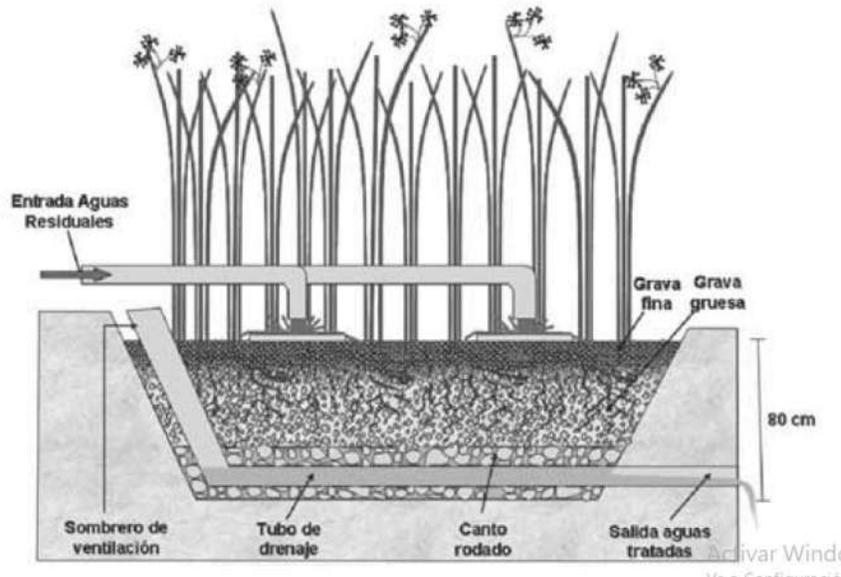


Figura 4. Corte longitudinal de un humedal de flujo subsuperficial vertical.

Fuente Delgadillo, *et al.*, (2010).

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. Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo” Delgadillo, *et al.*, (2010)

### 2.1.3 VENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales tienen las siguientes ventajas:

- La selección de un área es amplia donde se pueda llevar a cabo la colocación del sistema de humedales artificiales, y por ende los procedimientos adecuados para el tratamiento de aguas residuales.

- El sistema de humedales artificiales está delimitado por una membrana que tiene la función de impermeabilizar la zona del humedal artificial, evitando que las aguas residuales a tratar se infiltren al subsuelo.
- Se emplean medios de soporte diferentes al del terreno natural, pero factibles por su costo y adquisición. Estos medios de soporte se destinan al enraizamiento de las plantas a colocar en los humedales artificiales.
- Se seleccionan las plantas que van a colonizar los humedales, generalmente originarias del lugar.
- Se da la depuración de las aguas residuales, haciéndolas pasar por el sistema de humedales artificiales, en los que se llevan a cabo los procesos físicos, químicos y biológicos que dan como resultados efluentes finales depurados con resultados favorables.

*2.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE HUMEDALES ARTIFICIALES QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO DE INFORMACIÓN, ARTE Y CULTURA (CIAC) DE LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO (UMSNH).*

En la figura 5 se pueden observar los humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal empleando *Typha Domingensis*, con material de soporte constituido por tezontle y grava triturada, materiales de soporte que se utilizan en este trabajo.

“Los humedales artificiales variarán en el gasto a tratar para el caso de la grava triturada tratará un gasto de 58.79 l/d, a diferencia del tezontle, debido a que su porosidad es mayor tratará un gasto de 92.59, cada módulo tendrá unas dimensiones de 0.70 m de ancho, 2.10 m de largo y 0.70 m de profundidad” (Ferreyra, 2019).



Figura 5. Humedales artificiales de flujo subsuperficial, que se encuentran en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

#### 2.2.1 *TYPHA DOMINGENSIS*

La población se define como un grupo de individuos de la misma especie, y el espacio de esta está limitada a cierta área o territorio. La manera en que las poblaciones se mantienen estables o inestables es a través de la natalidad o deceso de cada especie. Por ello es de suma importancia el conocimiento del comportamiento de la *Typha Domingensis*, porque siendo la especie que realiza parte fundamental del proceso de tratamiento en el modelo de humedales, su desarrollo y dinámica determinará la durabilidad de los mismos humedales.

“Las poblaciones también muestran dinámicas: un patrón de cambio constante a través del tiempo que da como resultado del nacimiento, la muerte y el movimiento de los individuos” (Smith y Smith, 2007)

La historia, características físicas, químicas y biológicas de la *Typha Domingensis* determinan que es una especie que se puede aprovechar para obtener beneficios en el tratamiento de aguas residuales a través de humedales artificiales. Una característica en particular que podría limitar dicho aprovechamiento, es la alteración de su desarrollo poblacional, ya que si no se tiene el conocimiento suficiente que garantice su estabilidad para su desarrollo, la *Typha Domingensis* podría llegar a ser una especie invasiva, llegando a alterar las condiciones del hábitat de algunas otras especies.

En la antigüedad la *Typha Domingensis* era utilizada de forma farmacéutica ya que, en la tradición aborígen, existen crónicas de la época de la colonia, escritas principalmente por los misioneros jesuitas, en las que se encuentran referencias al empleo de este tipo de plantas para el cuidado de la salud. “A partir de conversaciones mantenidas con los nativos –aborígenes y criollos– de las regiones N y NE del chaco argentino, se realizó un inventario-encuesta de especies nativas hidrófitas y palustres de la flora chaqueña utilizadas en medicina vernácula, a fin de corroborar su uso e informar sobre los posibles efectos tóxicos o adversos” (Marinoff & Chifa, 2006). Entre las especies nativas de hidrófitas se encontraba la *Typha Domingensis Pers.* “tatora” (*Typhaceae*) a la cual se le daba el uso para la mejora de la orina y limpieza de los riñones.

*Typha Domingensis* pertenece a la familia de las *typhaceae*, también es conocida con nombres comunes, como son: espadaña, tule, masa de agua, cola de gato, tatora, enneas entre otras. Es una especie perenne originaria de Europa, Asia y América, su altura puede alcanzar más de tres metros, posee un color moreno claro, con una o más brácteas foliáceas caducas.

"*Typha Domingensis* se vale de anemofilia (polinización por viento) para polinizar sus flores dotadas de unidades reproductivas monoicas (flores hermafroditas)" (Pérez, 2013 citado por Alcívar, 2018).

Por otro lado, (Reyes 2014), plantea que "el género *Typha* tiene una distribución cosmopolita y una gran amplitud ecológica. Su área de origen es América, sin embargo, tienen una amplia distribución secundaria en Eurasia y África (FNA, 1982)". Con esto, se puede decir que la especie *Typha Domingensis* se encuentra con facilidad en una gran parte del mundo, por su facilidad de adaptación y sobrevivencia.

En cuanto a sus hojas, espigas y frutos/semillas, CONABIO (2009) escribe que:

Generalmente igualando o excediendo la altura de las espigas, parte superior de las vainas atenuada hacia la lámina, generalmente asimétricas, pero algunas veces simétricas, epidermis de la superficie ventral (hacia dentro) conteniendo gran cantidad de glándulas mucilaginosas de color oscuro, dispuestas en líneas longitudinales y comúnmente extendiéndose hacia la base de la lámina, láminas hasta de 1.5 m de largo y de 0.8 a 1.3 cm de ancho, envés ligeramente convexo cerca de la vaina y plano hacia el ápice, que es agudo.

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.

Frutos y semillas: Fruto fusiforme, de 1 a 1,5 mm de largo.

Por lo tanto, *Typha Domingensis* es una especie que se encuentra en medios amplios para su desarrollo y reproducción, por ello se le caracteriza como especie que crece en zonas amplias, pero al mismo tiempo limitadas por los cuerpos de agua, donde se lleva a cabo su desarrollo y reproducción.

Las necesidades de la *Typha Domingensis* en cuanto a hábitat, para un mejor desarrollo, es la preferencia de suelos con pH ácido para su crecimiento, neutro o alcalino, llegando a tolerar suelos salinos. “Resultados demuestran que es una especie que puede ser utilizada en wetlands construidos (humedales construidos) para tratamiento de efluentes con alta salinidad y pH, características comunes de muchos efluentes industriales” (Mufarrege, 2012).

*Typha Domingensis* se ha utilizado en espacios adaptados para el tratamiento de efluentes, diseñando así el hábitat adecuado para el desarrollo de la especie y para el proceso adecuado del tratamiento de los efluentes, ya sea industriales, particulares o de pequeñas poblaciones.

Se ha comprobado que esta especie 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)
- Hierro (Fe)

“Sus raíces crecen con vigor en soportes con textura arenosa, franca o arcillosa, pueden mantenerse empapados y sobrevivir en medios acuosos, en cuanto a sus necesidades de luz solo puede situarse en un lugar con exposición directa al sol y el rango de temperatura que soporta es entre 10°C a 23°C” (Pérez, 2013 citado por Alcívar, 2018).

El impacto de *Typha Domingensis* para el tratamiento de aguas residuales es muy favorable, ya que se logra la integración del agua tratada a los cuerpos de aguas naturales o a los usos agrícolas, con una calidad permisible de acuerdo con las normas establecidas. Pero la manipulación de la *Typha Domingensis* debe también ser considerado y adecuado, ya que podría llegar a haber impactos negativos. “Aunque la *tifa* es parte del hábitat natural, puede convertirse en invasiva en las comunidades acuáticas perturbadas” (Motivans & Apfelbaum, 1987 citado por Reyes, 2014).

Uno de sus factores negativos es que se trata de una sola especie con los mismos patrones y plantada en grandes extensiones, exponiendo al medio e incidiendo en la reducción de la existencia de otros tipos de especies de plantas en el mismo medio. Otro factor de impacto negativo es el escaso mantenimiento a la poda y cosecha de la *Typha Domingensis*, ya que en época de escasez de agua están expuestas sus hojas a los incendios. Así también se puede obtener la manipulación hidrológica de la superficie por el hecho de trabajar con áreas extensas.

Otros impactos que se consideran por Reyes, 2014 son:

Las plantas de *Typha* también puede causar una cantidad significativa de la pérdida de agua a través de la evapotranspiración” (Esquivel Vargas, 2013 citado por Reyes, 2014). La producción de monocultivos densos puede

reducir la oxigenación y la actividad microbiana en los humedales. Así también la mayoría de las aves acuáticas prefieren aguas abiertas intercaladas con la vegetación (Apfelbaum, 1985; Baldwin & Cannon, 2007). Muchos de los efectos perjudiciales son causados por la hojarasca, la cual entierra nutrientes y sustratos mineralizados que son necesarias para que otras plantas germinen. Debajo de la hojarasca, se presentan las condiciones adecuadas para un banco de semillas, pero no para la germinación éstas (Apfelbaum, 1985; Baldwin & Cannon, 2007). Por otra parte, la tifa libera componentes fenólicos que tienen efectos inhibidores sobre el crecimiento y la propagación de otras especies de plantas, y estos efectos perjudiciales no son reversibles mientras la tifa permanezca ahí (Gallardo *et al.*, 1999; Gallardo *et al.*, 1998; Trama *et al.*, 2009; Sojda *et al.*, 1993).

La población de la especie *Typha Domingensis* es manipulable, ya que su facilidad de adaptación y desarrollo es amigable con el medio, la distribución de la población permite una ubicación espacial en la mayoría de los continentes, al manipular la especie en áreas de grandes extensiones se corren algunos riesgos, por ello se debe tener el control y cuidado de su estabilidad para los fines que se requieran.

Hasta la fecha se ha observado que han sido más los beneficios que perjuicios de la especie para el planeta, poniendo en un lugar de gran importancia a *Typha Domingensis* para el desarrollo de nuevas alternativas para el tratamiento de aguas.

Una de las principales funciones de la *Typha Domingensis* es permitir la sedimentación y floculación. “Kadlec y Wallace (2009) y Vymazal y Kròpfelová (2005) propusieron que la eficiencia del humedal aumenta cuando el sistema raíz-rizoma de la vegetación llega a su madurez, lo cual ocurre entre 3 y 5 años” (Mufarrege, 2012).

La *Typha Domingensis* se clasifica como una planta anfibia (emergente), ya que una parte de la planta está sumergida y la otra se encuentra expuesta en el exterior y arraigadas al sustrato (figura 6).



Figura 6. *Typha Domingensis* en humedales artificiales, para el proceso biológico en el tratamiento aguas residuales.

#### 2.2.2 TEZONTLE Y GRAVA TRITURADA

El diseño de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, por lo general consiste en una cama o sustrato de soporte, ya sea de tierra o arena y grava, en la que se plantan *macrófitas* acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama se recubre con una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Kolb, 1998; citado por Ferreyra, 2019).

Tabla 1. Características típicas del medio de soporte en humedales de flujo subsuperficial (Reed *et al.*, 1995, citado por Ferreyra, 2019).

Tipo de medio	Tamaño efectivo $D_{10}$ (mm)*	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, $k_v$ (pie <sup>3</sup> /pie <sup>2</sup> /d)*
Arena gruesa	2	28 a 32	300 a 3,000
Arena con grava	8	30 a 35	1,600 a 16,000
Grava fina	16	35 a 38	3,000 a 32,000
Grava mediana	32	36 a 40	32,000 a 160,000
Roca triturada	128	38 a 45	$16 \times 10^4$ a $82 \times 10^4$

La grava triturada (Figura 7), es un material con alta disponibilidad en el Estado de Michoacán, además de que posee características distintas a otros materiales como son el tezontle y la gravilla-tezontle, ya que tiene una menor porosidad, una baja absorción y un mayor tamaño (Ferreyra, 2019).



Figura 7. Grava triturada.

Algunas de las características de la grava triturada, son las siguientes (Ferreyra, 2019):

- Coeficiente de uniformidad = 1.51
- Absorción = 1.65% (baja absorción)
- Densidad = 2.65 gr/cm<sup>3</sup>
- Porosidad = 0.40

El Tezontle (Figura 8) es un material con características físicas favorables para el desarrollo de los microorganismos, como es su alta porosidad y alto porcentaje de absorción de agua (Ferreyra, 2019).



Figura 8. Tezontle.

Algunas de las características del tezontle, son las siguientes (Ferreyra, 2019):

- Coeficiente de uniformidad = 1.40
- Absorción = 22.26% alta absorción
- Densidad =  $1.6 \text{ gr/cm}^3$
- Porosidad = 0.63

### 2.3 LA COLMATACIÓN

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial, una de las desventajas es el proceso de colmatación en los medios de soporte, fenómeno por el cual el medio filtrante del humedal va perdiendo progresivamente las características hidráulicas iniciales. Con el tiempo, la acumulación de sólidos de diversa naturaleza en los espacios intersticiales del medio filtrante, provoca la disminución de la conductividad hidráulica y la porosidad inicial de la grava, conduciendo a caminos

preferenciales y cortocircuitos en el curso del agua que convergen en la aparición de agua en la superficie (Figura 9).

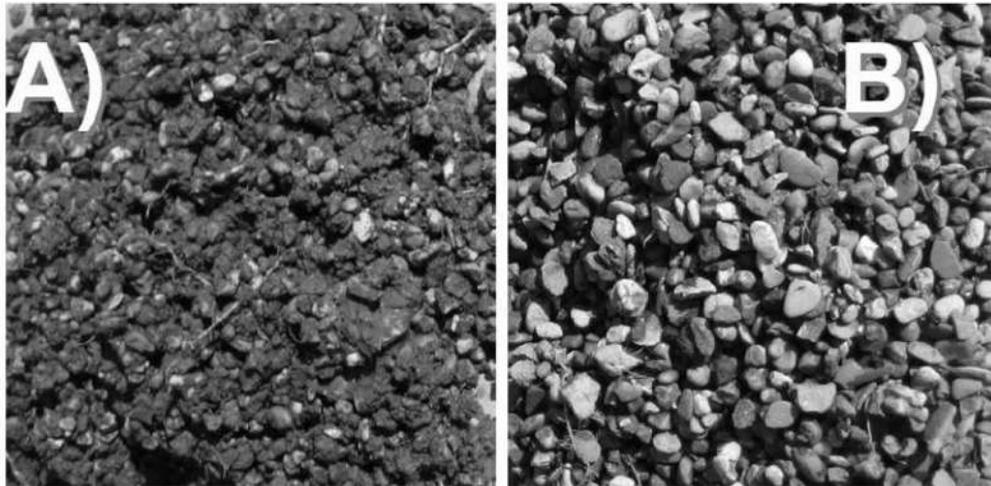


Figura 9. Comparación de un material de soporte colmatado (A) y otro en estado normal (B). (Ortiz, 2012).

Cuando la colmatación es muy severa, el lecho no permite al agua infiltrarse, por lo que se puede llegar a producir un encharcamiento, debido a esto el sistema de humedales reduce su capacidad de depuración, por lo que la colmatación es el factor más importante en la vida útil de los humedales.

La colmatación “conlleva la disminución de los valores de parámetros hidrogeológicos como la porosidad efectiva y la permeabilidad de las formaciones receptoras” (Baveye *et al.*, 1998; Bouwer, 2002; Custodio, 1986; Frycklund, 1992; Olsthoorn, 1982; citados por Ortiz, 2012). Este hecho implica, además, la reducción de las tasas de infiltración del agua de recarga, procesos que son conocidos con el nombre de colmatación, ya sea física, química o biológica.

La colmatación constituye la principal causa de pérdida de eficiencia en las instalaciones de recarga (Baveye *et al.*, 1998; Bouwer *et al.*, 2001; Bouwer y Rice,

2001; citados por Ortiz, 2012) No obstante, se trata de un fenómeno genérico que no sólo afecta a estos dispositivos (Goodrich *et al.*, 1990; Rinck-Pfeiffer *et al.*, 2000 citados por Ortiz, 2012) sino que también ejerce su influencia sobre otros sistemas como los embalses de flujo vertical u horizontal (Langergraber *et al.*, 2003 citados por Ortiz, 2012).

Por lo tanto, la colmatación es un fenómeno físico natural que se da a partir de varias variables implicadas en los sistemas de tratamientos de aguas residuales utilizando humedales artificiales. Es determinante la calidad de agua de recarga, en otras palabras, es de suma importancia el pretratamiento que se le da al fluido para prolongar el tiempo de colmatación.

### 2.3.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COLMATACIÓN

Los sólidos orgánicos e inorgánicos son retenidos en el lecho del humedal, debido a la filtración, dada la inercia del flujo en el medio, la adhesión a la grava, la presencia de la parte subterráneas de las plantas y la sedimentación.

### 2.3.2 FACTORES SEGÚN SU PROCEDENCIA

Se distinguen dos tipos básicos según su procedencia: los de contribución externa y los de contribución interna.

Contribución externa: corresponde a los aportes del afluente, dicho de otra manera, las características del agua a tratar.

La entrada de los agentes de procedencia externa, es la entrada de aguas residuales a tratar; aguas que contienen sólidos fundamentalmente orgánicos e inorgánicos. “cuanto más biodegradables sean los sólidos en suspensión del afluente, más fácilmente se podrán eliminar del lecho” (Ortiz, 2012). Por lo tanto, mientras mayor sea la carga orgánica del afluente hay más probabilidad de que ocurra el fenómeno de colmatación con mayor rapidez.

Por lo tanto, el humedal artificial debe estar correctamente diseñado para limitar la entrada de sólidos en suspensión, de modo que sea mayor el tiempo de colmatación de los humedales artificiales y, por lo tanto, puedan eliminar sin problemas, durante un mayor tiempo, la carga contaminante del afluente.

Contribución interna: Es producto de los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar dentro del humedal.

### 2.3.3 EVOLUCIÓN DE LA COLMATACIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES

La colmatación es un proceso continuo que no se produce de la misma forma en todos los humedales. En humedales de flujo horizontal se produce de forma diferencial, comenzando la colmatación cerca del conducto de entrada, ya que allí es donde se van reteniendo los sólidos en suspensión de mayor tamaño en suspensión, antes de que pase todo el afluente por el resto del humedal.

Al estar la zona de entrada totalmente colmatada, el agua busca otros caminos y es cuando puede emerger a la superficie y volverse a infiltrar en el lecho una vez que supera la zona colmatada. De esta forma se produce una colmatación diferencial que va desde el conducto de entrada del afluente hasta la salida. “La colmatación va a depender de la cantidad de sólidos acumulados, así como de la porosidad.

### 2.4 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Para el estudio de la colmatación es importante obtener las características y propiedades del fluido que pasa por los humedales, proveniente del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Dichas características y propiedades, una vez conocidas, se podrán utilizar adecuadamente en la aplicación de leyes que describen el comportamiento del fluido.

Se sabe que la materia se presenta en tres estados de acuerdo al aspecto físico que podemos percibir en la naturaleza: sólido, líquido y gaseoso, de los cuales a

los dos últimos se conocen como fluidos. Los fluidos poseen una propiedad característica de resistencia a la rapidez de deformación, a la que se le denomina viscosidad.

“Los esfuerzos tangenciales que se producen en un fluido no dependen de las deformaciones que experimenta, sino de la rapidez con que estas se producen. La ley de variación entre los esfuerzos tangenciales y la rapidez con la que ocurren las deformaciones es distinta según el tipo de fluido que se trate: newtonianos y no newtonianos” (Sotelo, 2006)

## 2.5 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La conductividad hidráulica ( $k$ ) es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la que los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua, la conductividad está en su máxima expresión y es representada como ( $K_s$ )

Los parámetros que definen a la conductividad hidráulica son: tamaño, orientación, distribución, continuidad de los poros y número, es por ello que existe una relación cuantitativa entre la conductividad hidráulica y volumen de agua en un suelo.

Una manera de medir la conductividad hidráulica en el laboratorio, es utilizando aparatos llamados permeámetros, tanto de carga constante como de carga variable.

La conductividad hidráulica es una propiedad cuantitativa del movimiento del agua muy importante, en especial del agua subterránea que se filtra a través de medios porosos, así como también de irrigación, drenaje, recarga, conservación de suelos, y flujo a través de presas y de vasos de embalses, entre otros. Donde el flujo pasa a través de los espacios porosos, esta trayectoria del flujo es complicada ya que la geometría de estos espacios es muy irregular. La trayectoria que suele tomar el flujo es descendente, por que va desde un punto alto a un

punto bajo. Para determinar la colmatación se requiere saber cómo se comporta el fluido por medio de la conductividad hidráulica.

Para determinar la conductividad hidráulica se utiliza la ecuación 1:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k} \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$q = Q/\text{sección}$  (caudal que circula por  $\text{m}^2$  de sección)

$\frac{\Delta h}{\Delta L}$  = Gradiente hidráulico, expresado en incrementos infinitesimales.

$-\mathbf{k}$  = conductividad hidráulica. El signo negativo se debe a que el caudal es una magnitud vectorial cuya dirección es hacia los  $\Delta h$  decrecientes.

Despejando  $k$

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{q}}{\text{El gradiente hidraulico}} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

$k = \left[\frac{L}{T}\right]$ , unidades. La conductividad hidráulica es la propiedad del medio poroso (del tipo de roca que está compuesto el humedal)

Conociendo el valor de  $k$  se puede calcular el caudal o aplicando la Ley de Darcy se puede calcular la  $k$ .

Por otro lado, la conductividad hidráulica ( $k$ ) y la permeabilidad ( $K$ ) están relacionadas. La permeabilidad del medio poroso y las propiedades del fluido.

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

$K$  = Permeabilidad (propiedad del material poroso).

$k$  = Conductividad hidráulica.

$\rho$  = Densidad del fluido.

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$\mu$  = Viscosidad del fluido.

$\frac{\rho g}{\mu}$  = propiedad del fluido

“La conductividad hidráulica es un parámetro esencial en la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo para la solución de problemas relacionados con irrigación, drenaje, recarga, conservación del suelo, y flujo a través de presas y de vasos de embalses, entre otros” (Romaña, 2014).

#### 2.5.1 LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN FASE SATURADA COMO HERRAMIENTA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

La conductividad hidráulica en fase saturada (CHFS) de un suelo describe la funcionalidad de su sistema poroso, englobando propiedades tales como: cantidad, tamaño, morfología, continuidad y orientación de los poros. Debido a que la conductividad hidráulica en fase saturada (CHFS) depende en gran medida de la forma y continuidad del sistema poroso, varía fuertemente de un sitio a otro, y difiere también para las distintas orientaciones del suelo.

La conductividad hidráulica en fase saturada (CHFS) es más dependiente de la estructura que de la textura del suelo, porque es más afectada por el sistema poroso secundario que por el primario. Incluso, debido al importante efecto del tamaño de los poros, la variabilidad de ella en sitios cercanos puede alcanzar cifras de gran magnitud.

Al incrementar el grado de agregación de un suelo la distribución de la conductividad hidráulica en fase saturada suele ser cada vez más asimétrica. El efecto de la estructura, y en especial el de los poros gruesos, hacen posible que

un suelo arcilloso puede exhibir valores de conductividad hidráulica en fase saturada CHFS similares a los de uno de suelo arenoso (Hartge y Horn, 1991).

A pesar de la controversia existente sobre la representatividad de la conductividad hidráulica en fase saturada (CHFS), ésta es una herramienta útil y práctica. En investigaciones sobre suelos de origen volcánico se ha destacado la eficiencia de este valor para caracterizar la estructura de los mismos. También existen indicios acerca de su potencial para evaluar la estabilidad de los agregados al agua. Se ha comprobado que, al tratar una muestra de suelo con un flujo prolongado y continuo de agua, la conductividad hidráulica en fase saturada (CHFS) se modifica más cuando la matriz porosa no es estable o rígida (Ellies *et al.*, 1996).

Con los distintos usos y manejos del suelo se modifica la estructura (Ellies *et al.*, 1990). Paralelo a ello, debería cambiar también la conductividad hidráulica en fase saturada (CHFS). La magnitud de estos cambios estructurales ocasionales por el manejo, dependen de la oportunidad y frecuencia de las operaciones de labranza superficiales y subsuperficiales del suelo y, también, del efecto compactante producido por el tráfico y tránsito de la maquinaria agrícola o de animales (Hartge y Ellies, 1990). Además, la morfología, orientación y tamaño de los sistemas radicales de los vegetales pueden afectar a la conductividad hidráulica en fase saturada (CHFS) Ellies *et al.*, (1992).

## 2.6 NORMA DE CALIDAD DEL AGUA

### NOM-001-SEMARNAT-1996

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objetivo de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales. SEMARNAT (1997).

### 3. ANTECEDENTES

El estudio de la colmatación como fenómeno físico en los humedales es escaso, ya que la atención se ha centrado en el funcionamiento de los humedales más que en su vida útil y mantenimiento.

De acuerdo con Rodríguez (2003):

El estudio de los humedales artificiales es relativamente nuevo, sin embargo, el concepto es antiguo, pues se tiene conocimiento de que culturas como la China y la Egiptia utilizaban los humedales naturales para la disposición de sus aguas residuales. El primer reporte científico en el que se señalan las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales pertenece a la Dra. Kathe Seidel del Instituto Max Planck, de Alemania.

En el informe de sus investigaciones, la Dra. Kathe Seidel plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) es posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como la eliminación de bacterias (coliformes, Salmonella y Enterococos) presentes en las aguas residuales. Posteriormente, ya en los años setenta, la Dra. Seidel llevó los resultados obtenidos a escala de laboratorio, a sistemas experimentales de mayor escala en los que analizó el efecto de las plantas sobre una serie de tipos diferentes de aguas residuales, tanto domésticas como industriales. Los resultados de todos sus estudios le permitieron desarrollar un sistema conocido como Proceso del Instituto Max Planck, cuyo diseño tenía varias etapas en las que se combinaban humedales con flujo vertical y humedales con flujo horizontal. Por otra parte, tomando como base los trabajos desarrollados en Alemania por la Dra. Seidel, en Holanda en el año 1967 se comenzó a desarrollar un sistema a gran escala, pero de flujo libre.

También en Alemania, pero en la década de los años setenta, el Dr. Kichuth desarrolló un sistema que llamó Método de zona de raíces, el cual consistía en el diseño de estanques rectangulares con un lecho de suelo específico, en los que se sembraba *Phragmites australis* y el flujo del agua residual era subsuperficial horizontal. Al suelo en ocasiones se le adicionaba con calcio y hierro o aluminio para provocar la precipitación del fósforo.

En el caso de los Estados Unidos el desarrollo de los humedales construidos se basó en los resultados obtenidos en los humedales naturales y en los trabajos realizados en Europa. En un principio se utilizaron los humedales naturales como una vía para el tratamiento de las aguas residuales; sin embargo, se observó que ocurrían cambios en la composición de las especies comunes de estos sitios por lo que se decidió comenzar a diseñar humedales construidos para tratar las aguas residuales, los cuales demostraron su eficacia para estos fines. El desarrollo de esta tecnología fue también de interés para la NASA, la que desarrolló su propio sistema, al que llamó sistema de tratamiento híbrido pues utilizaba microorganismos anaerobios y plantas emergentes (*Phragmites communis*).

Posteriormente los estudios fueron continuados por Gersberg y sus colaboradores demostrando las altas eficiencias logradas en la remoción de sólidos suspendidos, DBO, nitrógeno y coliformes, utilizando las plantas emergentes en humedales construidos. Como resultado de todas esas investigaciones, tanto a nivel de planta piloto como a gran escala, en los Estados Unidos se desarrollaron diferentes conceptos para el diseño de humedales construidos.

Salas (2017) presentó el trabajo denominado “Humedales artificiales: exploración y eliminación de contaminantes emergentes”, donde destaco que para evitar la colmatación se deben tomar en cuenta los siguientes puntos.

- Selección rigurosa del material filtrante
- Correcta explotación y mantenimiento de todas las etapas.
- Control del reparto homogéneo de la alimentación sobre toda la superficie filtrante
- Cumplimiento riguroso de una Ordenanza de Vertido a Colectores Municipales.

Con la finalidad de determinar el grado de colmatación del sustrato o medio de soporte de los humedales artificiales, en este trabajo se realizará lo siguiente:

- a) La determinación de la caída de presión en función del tiempo, en varios puntos situados a lo largo de cada modelo. Se colocaron piezómetros en tres puntos para medir los niveles de agua, con ello observar si los niveles bajan con forme pasa el tiempo.
- b) La determinación, de manera directa, obteniendo muestras del sustrato en función del tiempo, comparando la granulometría previa respecto a la posterior, teniendo en cuenta la materia orgánica contenida en la muestra.

Por lo tanto, una de las propuestas para la obtención del grado de la colmatación es: que se obtenga a partir de conductividad hidráulica, tanto saturada como no saturada, así se puede predecir el comportamiento del flujo de las aguas residuales a través del suelo

## 4. JUSTIFICACIÓN

En el estudio que se ha hecho a través del tiempo de los humedales tanto en el Estado de Michoacán como en México, no se encuentra suficiente información sobre la colmatación de los humedales artificiales de flujo subsuperficial. Cabe mencionar que, en el caso de la colmatación del medio de soporte, el tipo de flujo y la vegetación son elementos a estudiar en este fenómeno.

El estudio de la colmatación es importante porque con ello se podría determinar el tiempo en el que los humedales artificiales requieren de un mantenimiento adecuado, o la sustitución de medio de soporte. Por lo antes mencionado se realizará el presente trabajo de investigación, utilizando materiales de soporte y vegetación común en la región.

## 5. OBJETIVOS

### 5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar, en forma comparativa, la colmatación en el tezontle y en la grava triturada de humedales de flujo sub-superficial que emplean *Typha Domingensis* como vegetación de remoción.

### 5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar los parámetros relacionados con el proceso de colmatación en los medios de soporte.
2. Determinar de manera comparativa el grado de colmatación en los medios de soporte utilizados
3. Determinar la remoción de contaminantes y su cumplimiento con normas oficiales, y su posible relación con el grado de colmatación.

## 6. HIPÓTESIS

El grado de colmatación afecta menos la remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo sub-superficial en los que se utiliza *Typha Domingensis*, cuando el medio de soporte está constituido por tezontle, que cuando está constituido por grava triturada.

## 7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### I. REVISIÓN Y ADECUACIÓN DE DOS MODELOS DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL, UNO CON TEZONTLE Y EL OTRO CON GRAVA TRITURADA COMO MEDIO DE SOPORTE.

Se llevó a cabo la revisión del sistema de humedales (figura 10), ya que los modelos fueron utilizados para trabajos anteriores, así que la adecuación del sistema es de suma importancia para dar inicio a los estudios de este trabajo. En esta etapa del proyecto se realizó una evaluación de las necesidades de los modelos para arrancar con una operación eficaz.



Figura 10. Humedales artificiales de flujo subsuperficial, que se encuentran en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

## II. MANTENIMIENTO DE LOS HUMEDALES. LIMPIEZA DEL PRETRATAMIENTO, DEL SITIO Y DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES HACIA LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.

Se realizó el mantenimiento necesario, tanto del lugar como del sistema de humedales, con la finalidad de lograr que el sistema opere adecuadamente y que durante el estudio de la colmatación no haya inconvenientes respecto a la operación del sistema en el modelo de humedales.

En las figuras 11 a 15 se muestran las actividades de mantenimiento y limpieza del lugar y en el sistema del modelo de humedales. En el sistema de alimentación (tuberías) se observó que el exceso de lodos, tanto en el depósito elevado como en la línea de conducción del agua, no permiten el paso constante del flujo, puesto que algunas tuberías se tapan, y en el fondo del tanque elevado se encontró una cantidad considerable de lodos.



Figura 11. Vaciado de lodos acumulados en el tanque elevado.



Figura 12. Lavado del tanque elevado



Figura 13. Limpieza del pretratamiento del sistema de humedales



Figura 14. Limpieza y mantenimiento de la red en el modelo de humedales



Figura 15. Poda en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH, sitio donde se encuentran los modelos de humedales artificiales).

### III. ACONDICIONAMIENTO DEL SISTEMA (INSTALACIÓN DE MALLA EN EL DEPÓSITO, PARA GARANTIZAR UN MEJOR PRETRATAMIENTO)

En el punto de descarga de la tubería que alimenta el tanque elevado, se colocó una malla cuya función es retener los sólidos de mayor diámetro que son la causa de que la red se tape y, en consecuencia, se modifique el paso del flujo hacia el tanque (Figura 16)



Figura 16. Colocación de malla al tanque elevado, para la retención de sólidos con para evitar taponamientos en la red.

#### IV. MANTENIMIENTO DE LA VEGETACIÓN EN LOS MODELOS DE HUMEDAL (PODA DE LA PLANTA *TYPHA DOMINGENSIS* EN LOS HUMEDALES).

Es necesario dar mantenimiento a la vegetación de los humedales, mediante la poda correspondiente, así como retirar la vegetación ajena que crece en los mismos humedales, para propiciar un mejor crecimiento de la vegetación del tratamiento y, por lo tanto, un mejor funcionamiento del modelo (Figura 17).



Figura 17. Poda de *Typha Domingensis* y vegetación ajena que se removió.

## V. DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CONSTANTES EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES Y ESTABILIZACIÓN DEL MODELO.

La descarga contante de aguas residuales son determinantes para la eficiencia del modelo y la experimentación en el trabajo de investigación. Por ello se deben realizar durante todo el periodo de investigación, de manera que el modelo de humedales se estabilice, lo que permite obtener los resultados esperados (Figura 18).



Figura 18. Humedales en su etapa de estabilización.

## VI. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE LA COLMATACIÓN COMO FENÓMENO FÍSICO NATURAL EN LA VIDA ÚTIL DE LOS HUMEDALES.

En el apartado 2.3 se investigó, estudio y analizó el fenómeno de la colmatación, con la finalidad de entender de mejor manera el comportamiento de este.

## VII. PRUEBAS DE MEDICIÓN DE LOS GASTOS INICIAL Y FINAL.

Para aplicar la ley de Darcy es importante obtener los gastos iniciales y finales del modelo de humedales artificiales, ya que este resultado determina el comportamiento que el flujo está teniendo durante la experimentación, así como la estabilidad del sistema.

Teniendo las siguientes características de diseño:

### DATOS DE DISEÑO

<b>L=</b>	2.10 m
<b>A=</b>	0.70 m
<b>As=</b>	1.47 m <sup>2</sup>
<b>T=</b>	7 °C
<b>DBO<sub>inf</sub>=</b>	220 mg/l *
<b>SST<sub>inf</sub>=</b>	220 mg/l *

\* “Los datos de diseño para los valores de DBO y SST del influente se tomaron de recomendaciones del libro Metcalf & Eddy” (Ferreya, 2019).

El gasto se obtiene con el siguiente método de aforo:

Se conoce como aforo al método empleado para estimar el caudal que pasa en un curso de agua que tiene una determinada sección transversal. “Existe una serie de aparatos y dispositivos para la medición de las características de un flujo, como

presión, velocidad, gasto, etcétera, cuyas mediciones se interpretan con base en las ecuaciones fundamentales” (Sotelo, 2006)

Existen diferentes métodos para efectuar un aforo. Uno de ellos es el aforo volumétrico: este método se aplica en pequeñas corrientes ya que es un método exacto y factible de usar para este tipo de cursos de agua. El método consiste en medir el tiempo que requiere el afluente de agua para llenar el volumen de un depósito impermeable, luego se obtendrá el caudal utilizando la relación volumen/tiempo.

En la medición de los caudales de entrada y salida de los humedales se utilizó el aforo volumétrico, dichos caudales deben coincidir con el caudal de diseño de los humedales, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Caudal de diseño de los humedales, en cada uno de los medios de soporte

CAUDAL DE DISEÑO DE LOS HUMEDALES DEL CIAC	
MEDIO DE SOPORTE	CAUDAL
TEZONTLE	$Q = 0.09259 \text{ m}^3/\text{d} = 92.59 \text{ l/d}$
GRAVA TRITURADA	$Q = 0.05879 \text{ m}^3/\text{d} = 58.79 \text{ l/d}$

#### VIII. OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA, TANTO EN EL SITIO COMO EN EL LABORATORIO.

Con la finalidad de conocer las características del agua a la entrada y salida de los humedales, en cada muestreo se tomaron 3 muestras de 2 litros cada una para su respectivo análisis físico-químico: Una correspondiente al influente (entrada) de los humedales y dos de éstas en el efluente (salida) de los diferentes humedales, una vez que el agua ha sido tratada a su paso por el humedal (Figura 19).

También se tomarán tres muestras de 125 ml en bolsas estériles con cierre hermético para realizar los análisis bacteriológicos, o mediante frascos de farmacia estériles de 100 ml (Figura 20).



Figura 19. Muestras del influente y efluente de agua residual en los humedales del CIAC de la UMSNH para su análisis físico-químico



Figura 20. Muestras del influente y efluente de agua residual en los humedales del CIAC de la UMSNH para su análisis bacteriológico.

Dentro de los análisis se contemplan:

- a) Parámetros de campo (Figura 21 y 22).
- b) Determinación de los sólidos en todas sus formas, mediante métodos gravimétricos.
- c) Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5).
- d) Determinación de microorganismos coliformes fecales.

Los muestreos se realizan en tres fechas:

- 20 de abril del 2021
- 11 de mayo del 2021
- 8 de junio del 2021

Las muestras fueron analizadas por el personal del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Apéndice II).



Figura 21. Instrumentos de medición para determinar los parámetros de campo de las muestras de agua.



Figura 22. Proceso de la obtención de los parámetros de campo: Conductividad electrolítica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), salinidad, temperatura, pH y oxígeno disuelto.

## IX. PRUEBAS DE LA MEDICIÓN DE LA COLMATACIÓN:

Para la medición de la colmatación se determinó la caída de presión en función del tiempo: Se prepararon los modelos de humedales instalando en ellos tuberías (Figura 23 y 24), situando estas en tres puntos diferentes a lo largo de cada humedal (Figura 25), los cuales permitieron la medición de niveles para con ello obtener los gradientes.



Figura 23. Instalación de espacios para la colocación de la tubería.



Figura 24. Ingreso de la tubería que permitirá la medición del gradiente



Figura 25. Tubería instalada en el modelo para la medición del gradiente.

Después de la instalación de tubos en el modelo de humedales se midieron los niveles del agua en cada uno de los tubos colocados (Figura 26), con la finalidad de determinar los gradientes hidráulicos. La colmatación se determinó mediante la comparación del comportamiento del flujo en el humedal que ha estado tratando el agua, con un humedal con el mismo tipo de material, pero limpio de sedimentos, para ello se instaló un humedal complementario al del modelo en estudio, para cada tipo de soporte (Figura 27).



Figura 26. Medición de niveles en cada punto instalado, en el modelo de humedales artificiales.



Figura 27. Instalación del humedal artificial alternativo, con tezontle como material de soporte.

Finalmente, y analizando los resultados obtenidos se determina el porcentaje de colmatación en función de la conductividad hidráulica.

## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La comparación de los resultados del estudio de calidad de agua con la normatividad correspondiente y con los estudios realizados se muestran en las tablas y gráficas siguientes:

### PARÁMETROS DE CAMPO PARA EL MUESTREO NO. 1

Se determinaron los parámetros de campo tales como temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y salinidad, valores que sirven de referencia para conocer las condiciones del agua tanto en el influente como en el efluente, además de servir de base y confirmación para algunos de los análisis de laboratorio.

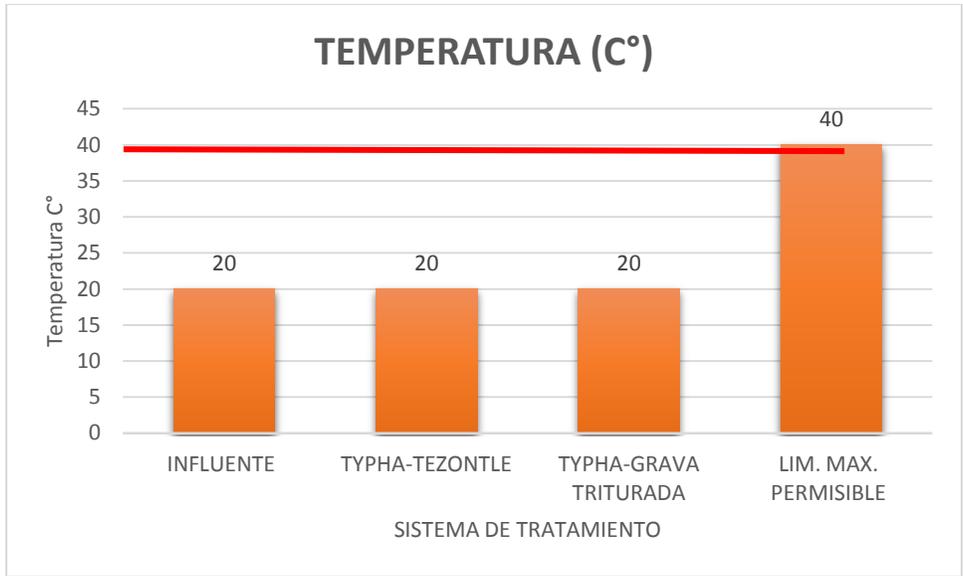
### MUESTREO NO.1 – FECHA DE MUESTREO 20 DE ABRIL DEL 2021

Tabla 3. Muestreo 1. Parámetros de campo

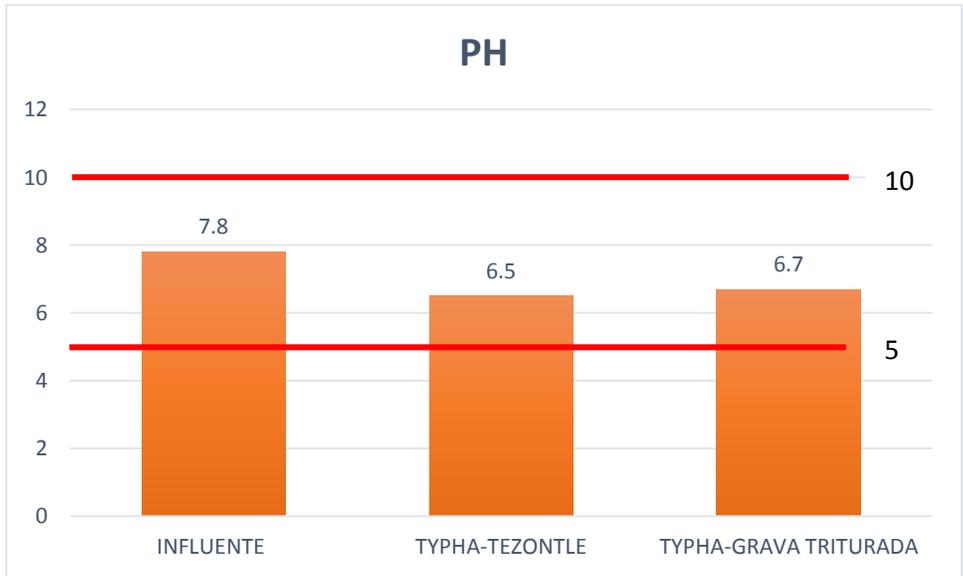
Parámetro	Influente	<i>Typha</i> Tezontle	<i>Typha</i> Grava Triturada	Límite máximo permisible
Conductividad electrolítica ( $\mu$ S/cm)	1083	1124	1124	_____
Salinidad (ppt)	0.5	0.6	0.6	_____
Temperatura (°C)	18.0	18.3	18.0	40 *
pH	8.0	6.6	6.6	5 – 10 *
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.64	1.2	1.1	>5 **

\*NOM-001-SEMARNAT-1996

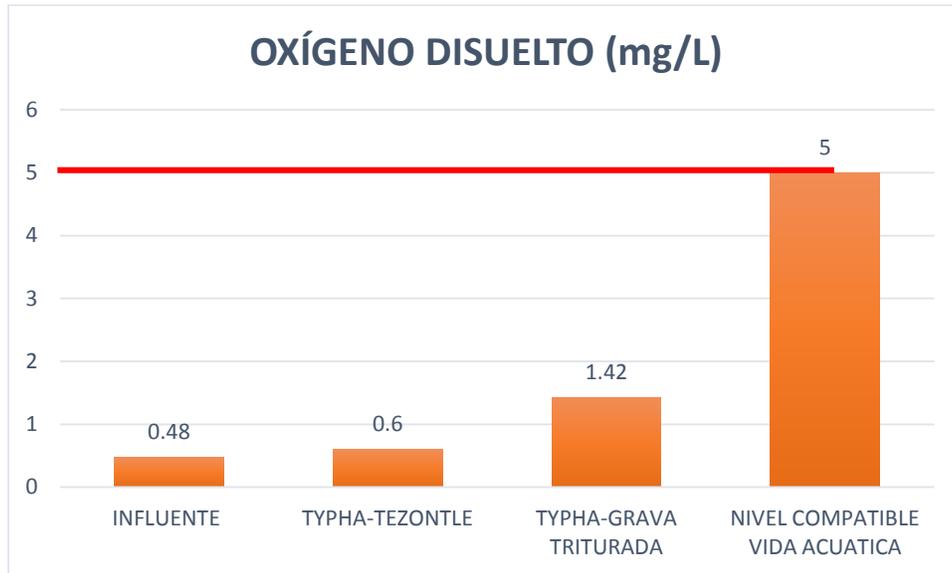
\*\* Niveles compatibles con la vida de los peces. Colas R.,1972.



Gráfica 1. Muestreo 1. Comparación de la temperatura de las muestras respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996.



Gráfica 2. Muestreo 1. Comparación del PH de las muestras respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996.



Gráfica 3. Muestreo 1. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática

Como puede observarse en los resultados del primer muestreo, el pH y la temperatura cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y en ambos humedales se tienen prácticamente los mismos valores, sin embargo, el oxígeno disuelto (OD) no cumple con recomendaciones de literatura en cuanto al nivel compatible para vida acuática, y además se observa que el humedal de grava presenta mayor cantidad de OD que el humedal con tezontle.

Tabla 4. Muestreo No. 1 en el caudal de agua residual, en los humedales ubicadas en el CIAC de la UMSNH.

Muestreo	Fecha	Contaminante / Parámetro	Influente	Humedal No. 1 Tezontle y <i>Typha Domingensis</i>	Humedal No. 2 Grava compacta triturada y <i>Typha Domingensis</i>	NOM-001-SEMARNAT-1996 (Límites permisibles-Protecc. de vida acuática-PD)
Muestreo No. 1	20/04/2021	SST (mg/L)	305	253	288	60
		DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	123.75	5	31.25	No aplica
		DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	64.05	3.53	9.48	60
		SSed (ml/L)	0.5	0.15	0.25	2
		C.Fec. (NMP/100 ml)	>2.4x10 <sup>7</sup>	3x10 <sup>4</sup>	1.1x10 <sup>5</sup>	2000

Como puede observarse los sólidos suspendidos totales (SST) no cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996, lo rescatable en este caso es que a pesar de que no cumple, si existe remoción tanto en el humedal de tezontle como en el de grava triturada, además de que se puede observar que es mayor la remoción con tezontle que con grava triturada.

En el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y de los sólidos sedimentables (SSed), si cumplen ambos humedales con la norma y nuevamente se observa mayor remoción en el tezontle que en la grava triturada.

Finalmente, para los coliformes fecales se tiene que no cumplen la norma. Nuevamente a pesar de que no cumple, si existe remoción tanto en el humedal de tezontle como en el de grava triturada, además de que se puede observar que es mayor la remoción con tezontle que con grava triturada.

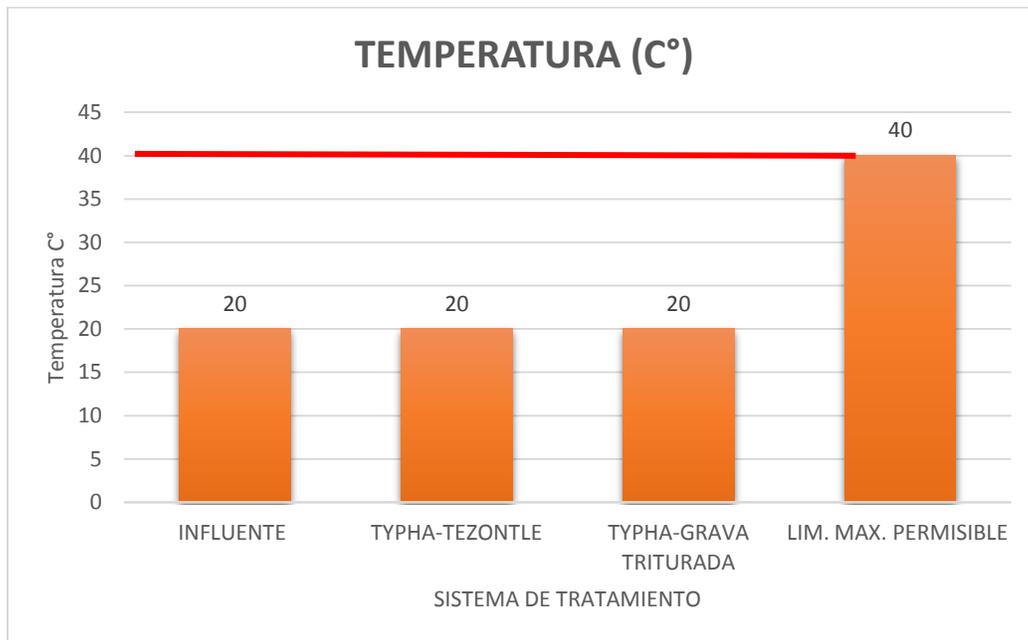
MUESTREO NO.2 – FECHA DE MUESTREO: 11 DE MAYO DEL 2021

Tabla 5. Muestreo 2. Parámetros de campo

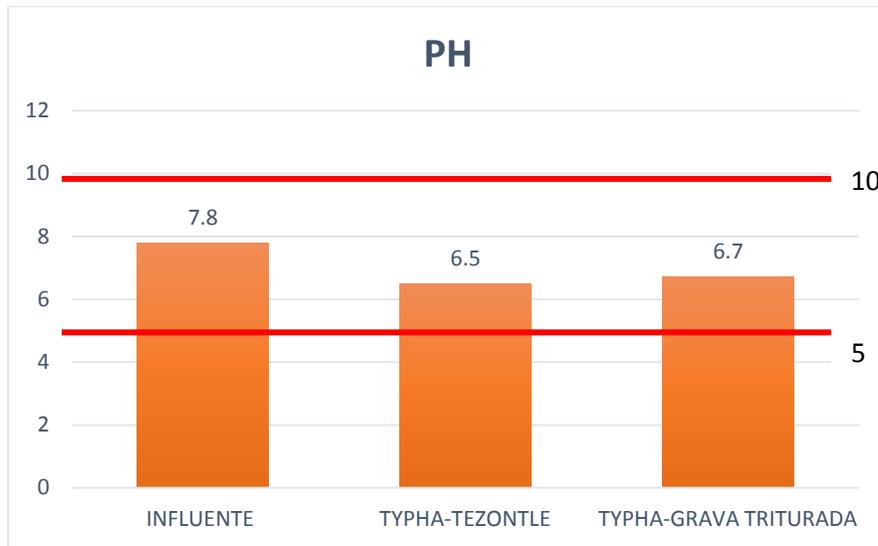
Parámetro	Influente	<i>Typha</i> Tezontle	<i>Typha</i> Grava Triturada	Límite máximo permisible
Conductividad electrolítica (μS/cm)	851	1192	1129	_____
Salinidad (ppt)	0.4	0.6	0.6	_____
Temperatura (°C)	21.0	20.5	20.2	40 *
pH	8.0	6.5	6.7	5 – 10 *
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.75	0.79	1.07	>5 **

\*NOM-001-SEMARNAT-1996

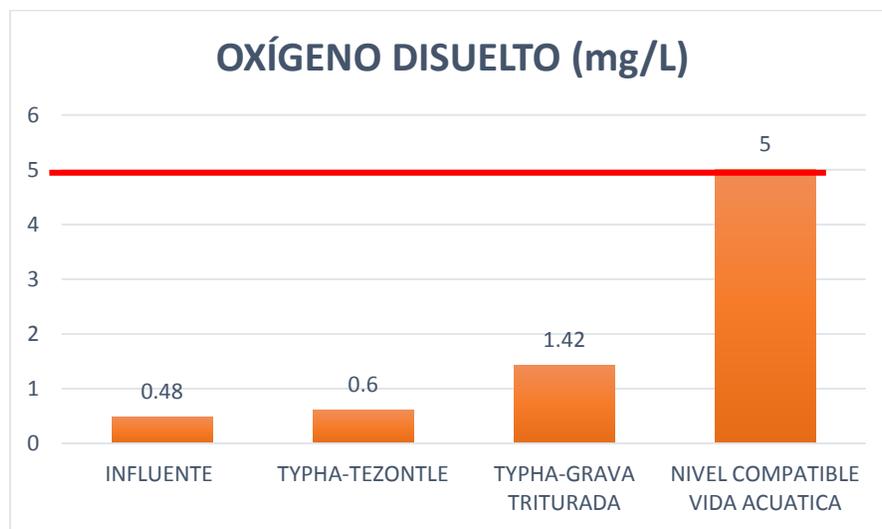
\*\* Niveles compatibles con la vida de los peces. Colas R.,1972.



Gráfica 4. Muestreo 2. Comparación de la temperatura de las muestras respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996.



Gráfica 5. Muestreo 2. Comparación del PH de las muestras respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996.



Gráfica 6. Muestreo 2. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática

Como puede observarse en los resultados del segundo muestreo, el pH y la temperatura cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y en ambos humedales se tienen prácticamente los mismos valores, sin embargo, el oxígeno disuelto (OD) no cumple con recomendaciones de literatura en cuanto al nivel compatible para vida acuática, y además se observa que el humedal de grava presenta ligeramente mayor cantidad de OD que el humedal con tezontle.

Tabla 6. Muestreo No. 2 en el caudal de agua residual, en los humedales ubicadas en el CIAC de la UMSNH

Muestreo	Fecha	Contaminante / Parámetro	Influente	Humedal No. 1 Tezontle y <i>Typha Domingensis</i>	Humedal No. 2 Grava compacta triturada y <i>Typha Domingensis</i>	NOM-001-SEMARNAT-1996 (Límites permisibles-Protecc. de vida acuática-PD)
Muestreo No. 2	11/05/2021	SST (mg/L)	23	86	36	60
		DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	155	70	122	No aplica
		DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	82.5	27.8	36.3	60
		SSed (ml/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	2
		C.Fec. (NMP/100 ml)	2.40E+08	4.50E+06	4.60E+06	2000

Como puede observarse los sólidos suspendidos totales (SST) no cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996 en el caso de tezontle, mientras que el humedal de grava triturada si cumple con la norma. El caso del humedal de tezontle se debió a una falla en la tubería de llenado detectada posteriormente al muestreo.

En el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y de los sólidos sedimentables (SSed), si cumplen ambos humedales con la norma y nuevamente se observa, al menos para la DBO<sub>5</sub>, una mayor remoción en el tezontle que en la grava triturada.

Finalmente, para los coliformes fecales no cumplen la norma, nuevamente a pesar de que no cumple, si existe remoción tanto en el humedal de tezontle como en el de grava triturada, además de que se puede observar que es mayor la remoción con tezontle que con grava triturada.

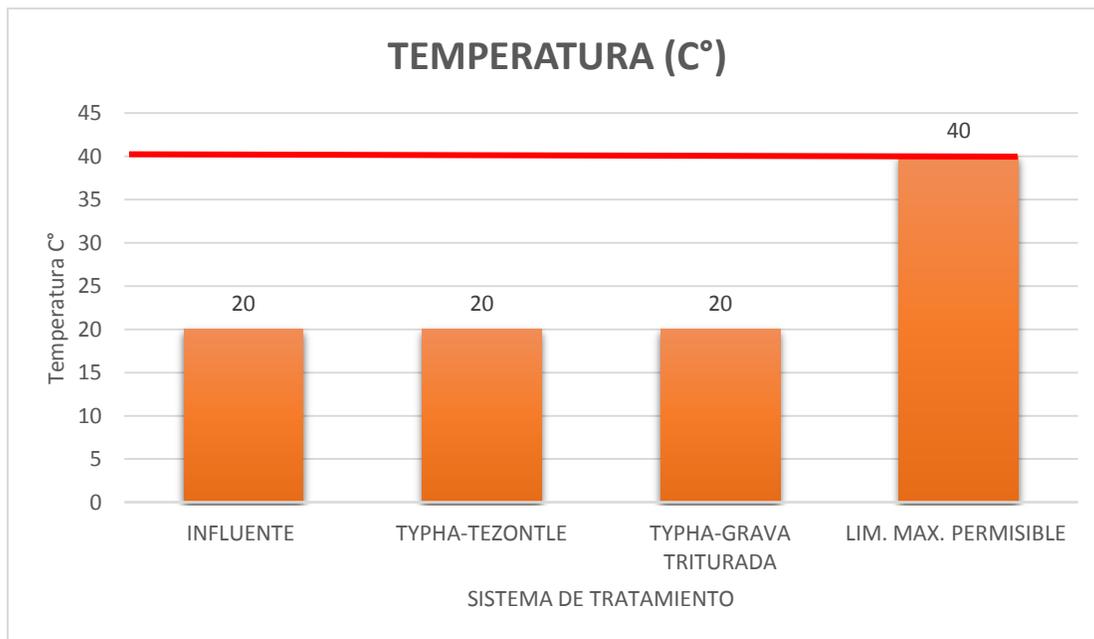
MUESTREO NO.3 – FECHA DE MUESTREO: 08 DE JUNIO DEL 2021

Tabla 7. Muestreo 3. Parámetros de campo

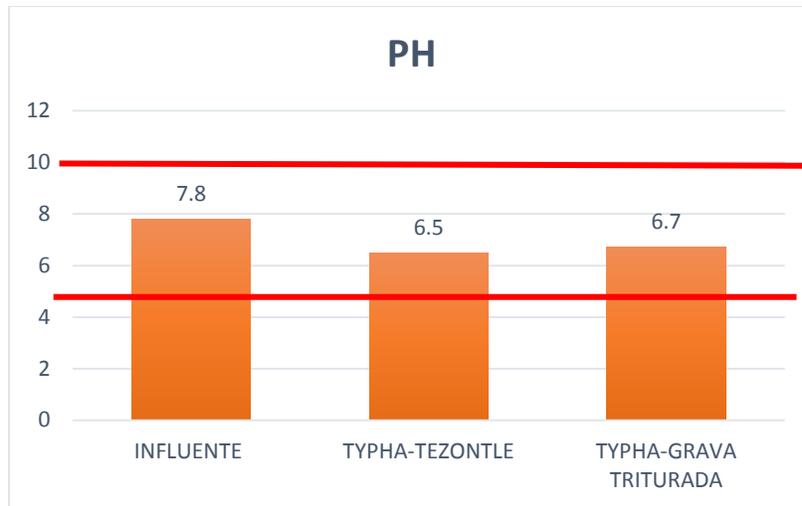
Parámetro	Influente	<i>Typha</i> Tezontle	<i>Typha</i> Grava Triturada	Límite máximo permisible
Conductividad electrolítica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	887	1196	1353	_____
Salinidad (ppt)	0.4	0.6	0.7	_____
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	20	20	20	40 *
pH	7.8	6.5	6.7	5 – 10 *
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.48	0.6	1.42	>5 **

\*NOM-001-SEMARNAT-1996

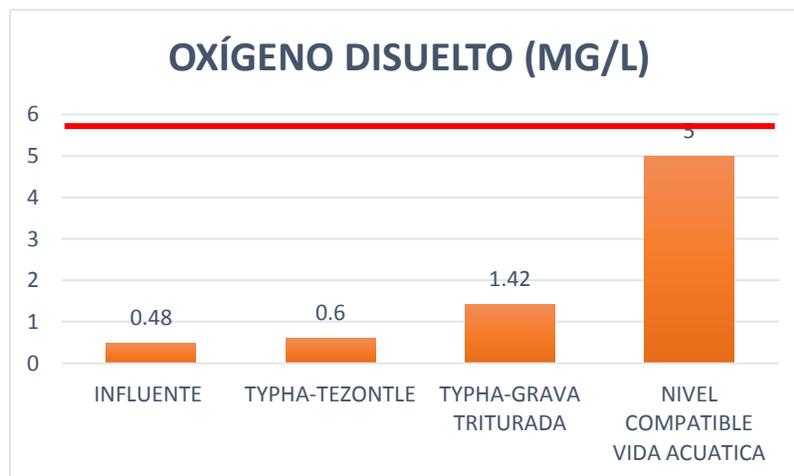
\*\* Niveles compatibles con la vida de los peces. Colas R. (1972).



Gráfica 7. Muestreo 3. Comparación de la temperatura de las muestras respecto a las NOM-001-SEMARNAT-1996.



Gráfica 8. Muestreo 3. Comparación del PH de las muestras respecto a las NOM-001-SEMARNAT-1996.



Gráfica 9. Muestreo 3. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática.

En los resultados del tercer muestreo se observa que el pH y la temperatura cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y en ambos humedales se tienen prácticamente los mismos valores, sin embargo, el oxígeno disuelto (OD) no cumple con recomendaciones de literatura en cuanto al nivel compatible para vida acuática, y además se observa que el humedal de grava presenta mayor cantidad de OD que el humedal con tezontle.

Tabla 8. Muestreo No. 3 en el caudal de agua residual, en los humedales ubicadas en el CIAC de la UMSNH

Muestreo	Fecha	Contaminante / Parámetro	Influente	Humedal No. 1 Tezontle y <i>Typha Domingensis</i>	Humedal No. 2 Grava compacta triturada y <i>Typha Domingensis</i>	NOM-001-SEMARNAT-1996 (Límites permisibles-Protecc. de vida acuática-PD)
Muestreo No. 3	08/06/2021	SST (mg/L)	35	53	47	60
		DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	151	107	101	No aplica
		DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	62.85	64.65	63.6	60
		SSed (ml/L)	0.4	< 0.1	< 0.1	2
		C.Fec. (NMP/100 ml)	1.10E+09	7.50E+06	1.50E+06	2000

Se observa que los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos sedimentables (SSed), si cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996 en ambos humedales.

En el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y los coliformes fecales (C.Fec.) no cumplen ambos humedales con la norma.

En este muestreo debido al percance con la tubería de alimentación del humedal de tezontle, existe en general menor remoción que en el humedal con grava triturada, sin embargo, ya en los muestreos anteriores se había confirmado siempre mayor remoción en el humedal de tezontle que en el de grava triturada.

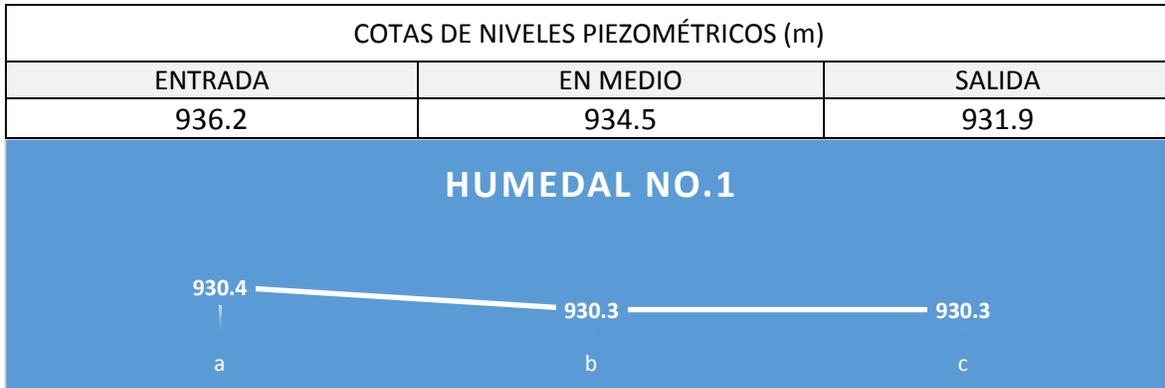
## CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Para la obtención de la conductividad hidráulica primero se midieron las cotas piezométricas de acuerdo a la secuencia que se muestra a continuación.

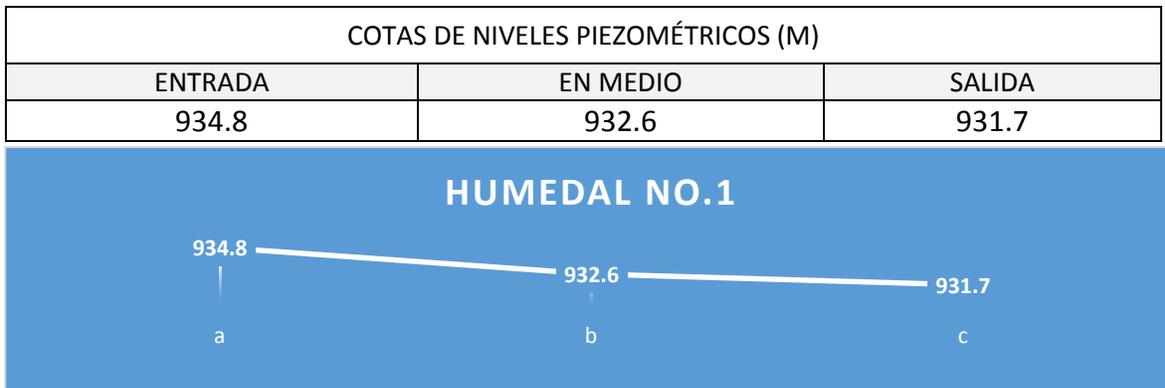
### COTAS DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS POR HUMEDAL-FECHA

#### **HUMEDAL No.1 Tezontle – *Typha Domingensis***

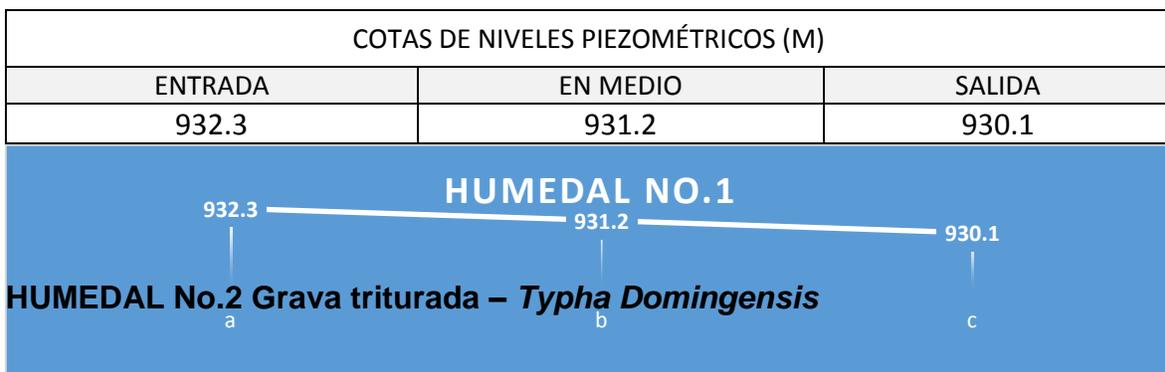
Fecha: 20/04/2021



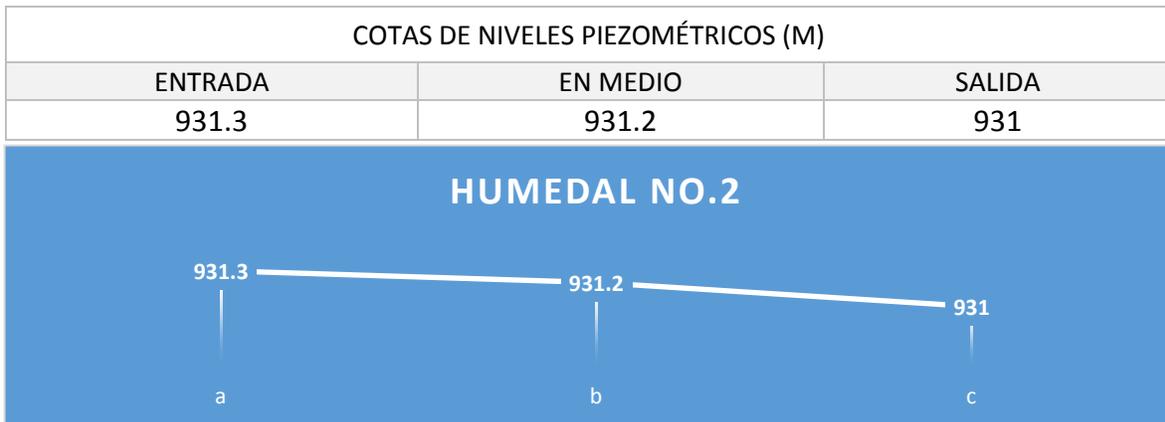
Fecha: 11/05/2021



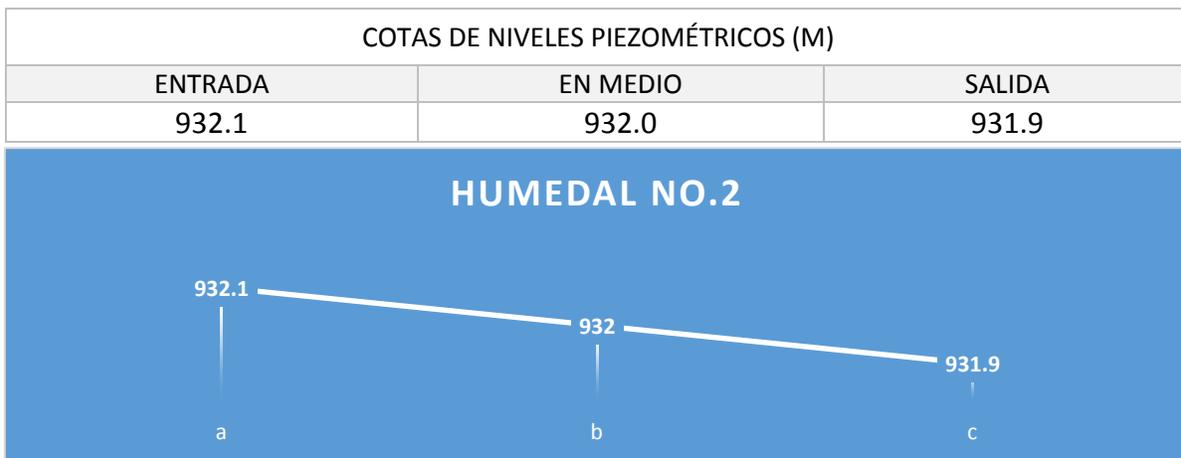
Fecha: 08/06/2021



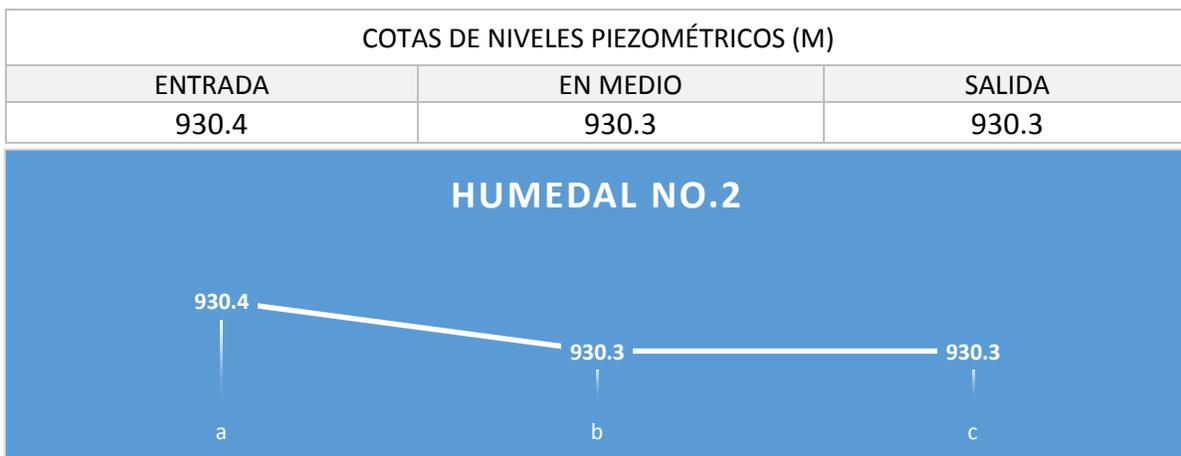
Fecha: 20/04/2021



Fecha: 11/05/2021



Fecha: 08/06/2021



Gráfica 10. Graficas de Gradiente hidráulico – distancia de muestreo

En las cotas piezométricas se observa si los humedales cumplen o no con una diferencia de potencial lógico, que va descendiendo ligeramente debido a las pérdidas de energía ocasionadas por la resistencia presentada por el medio de soporte y el sustrato, en el caso de los humedales 1 y 2 se observa que cumplen con dicha lógica de la diferencia de potencial descendente.

Las mediciones de las cotas piezométricas se realizaron a partir de un nivel de referencia previamente establecido en un punto fijo de la cerca perimetral de la Planta de tratamiento del CIAC, y a partir de estos se determinaron las diferencias de potencial ( $dh$ ) como lo muestra la Figura 28.



Figura 28. Mediciones de las cotas piezométricas, para la determinación del gradiente hidráulico, para la obtención del coeficiente de conductividad hidráulica.

Posteriormente se determinaron las diferencias de potencial (dh) correspondientes a los 3 muestreos y para cada uno de los 3 humedales, con la finalidad de asociarlas al grado de colmatación del medio de soporte en el desarrollo longitudinal de cada uno de los humedales experimentales de tratamiento (humedales 1 y 2), así como para un humedal 3 con material nuevo tanto de tezontle como de grava compacta triturada, este último se midió con el propósito de determinar el porcentaje de conductividad hidráulica que varía en cada humedal con respecto al humedal alternativo o complementario de material nuevo y asociarlo con el grado de colmatación.

Para determinar la conductividad hidráulica se utilizó la ecuación 4:

$$K = \frac{Q(dh)}{A(dL)} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica, en m/día

Q = Caudal, en m<sup>3</sup>/s

A = Área, en m<sup>2</sup>

dh = gradiente piezométrico o diferencia de potencial, en m

dL = distancia entre los puntos de la diferencia de potencial, en m

**Para el Humedal No. 1 Tezontle y *Typha Domingensis*:**

$$K = \frac{0.09259(0.043)}{0.455(2.1)} = 9.94 \text{ m/día}$$

$$K = \frac{0.09259(0.031)}{0.455(2.1)} = 13.79 \text{ m/día}$$

$$K = \frac{0.09259(0.022)}{0.455(2.1)} = 19.42 \text{ m/día}$$

Los demás resultados de los cálculos para los otros humedales se presentan de manera resumida en las tablas 9 y 10 que a continuación se muestran.

Tabla 9. Coeficiente de conductividad hidráulica del Humedal-1 y Humedal-2.

Humedales experimentales	Medición /Fecha	COTAS DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS (m)			dh (m)	dL (m)	Q (m <sup>3</sup> /día)	A (m <sup>2</sup> )	Conductividad hidráulica K (m/día)
		ENTRADA	EN MEDIO	SALIDA					
Humedal No. 1 Tezontle y <i>Typha Domingensis</i>	1 (20/04/21)	936.2	931.5	931.9	0.043	2.1	0.09259	0.455	9.94
	2 (11/05/21)	934.8	933.9	931.7	0.031				13.79
	3 (08/06/21)	932.3	930.5	930.1	0.022				19.42
Humedal No. 2 Grava compacta triturada y <i>Typha Domingensis</i>	1 (20/04/21)	931.3	931.4	931	0.003	2.1	0.05879	0.455	90.45
	2 (11/05/21)	932.1	931.4	931.9	0.002				135.67
	3 (08/06/21)	930.4	931.0	930.3	0.001				271.34

En la tabla 10 se calcula el coeficiente de conductividad hidráulica del Humedal alternativo No. 3 con tezontle nuevo y del Humedal alternativo No. 3 con grava compacta triturada nueva, mismos que sirvieron de base para el cálculo de los porcentajes de conductividad hidráulica de los humedales No. 1 y No. 2.

Tabla 10. Coeficiente de conductividad hidráulica de los humedales alternativos

Humedales experimentales	Medición /Fecha	COTAS DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS (m)			dh (m)	dL (m)	Q (m <sup>3</sup> /día)	A (m <sup>2</sup> )	Conductividad hidráulica K (m/día)
		ENTRADA	EN MEDIO	SALIDA					
Humedal alternativo No. 3 Tezontle nuevo	1 (20/04/21)	936.1	930.9	925.7	0.104	2.1	0.09259	0.455	395.00
	2 (11/05/21)	926.5	926.4	926.3	0.002				213.57
	3 (08/06/21)	926.0	925.9	925.9	0.003				142.45
Humedal alternativo No. 3 Grava compacta triturada nueva	1 (04/10/21)	929.0	928.9	928.9	0.0009	2.1	0.05879	0.455	301.49

Con los resultados de la tabla 10 se obtienen los porcentajes de conductividad hidráulica (Tabla 11), dividiendo la conductividad hidráulica del humedal con material de soporte de los modelos estudiados entre el humedal alternativo con material de soporte nuevo de cada material.

Tabla 11. Porcentajes de conductividad hidráulica de los humedales No. 1 y No. 2.

Humedales experimentales	Mediciones	Conductividad hidráulica K (m/día)	% Conductividad hidráulica K (m/día)	Grado de Colmatación
Humedal No. 1 Tezontle y <i>Typha Domingensis</i>	1	9.94	2.52	Se observa que la colmatación es mayor con tezontle, ya que tiene valores menores de conductividad hidráulica.
	2	13.79	6.45	
	3	19.42	13.64	
Humedal No. 2 Grava compacta triturada y <i>Typha Domingensis</i>	1	90.45	30.00	La colmatación en grava compacta triturada es menor ya que tiene valores mayores en la conductividad hidráulica.
	2	135.67	45.00	
	3	271.34	90.00	

Como puede observarse la estabilización de los procesos de tratamiento al interior de los humedales lleva tiempos determinados en función de la constancia en la carga de contaminantes proveniente de las aguas residuales del CIAC, por diferentes periodos de tiempo durante la pandemia hubo variaciones significativas en la calidad y cantidad de las aguas residuales, razón por la cual con frecuencia se reiniciaba el proceso debido también a periodos donde no hubo agua residual y se tuvo la necesidad de suministrar agua limpia con el fin de mantener la vegetación de los humedales, por ello es que se observa que aún falta tiempo para la estabilización donde se pueda observar la disminución de la conductividad hidráulica.

También se puede observar que la conductividad hidráulica es un indicador que varía con el efecto de la dinámica que genera la colmatación, dicha dinámica constituye un fenómeno complejo donde intervienen: los sólidos presentes en el agua residual, el ingreso de agua de lluvia, el medio de soporte, su porosidad, su relación de vacíos y su posible estratificación, el sustrato y su posible intervención

en la creación de fisuras y agujeros en el medio de soporte, la zona radicular, los rizomas y el ciclo de vida de la vegetación.

Por lo antes mencionado para fines prácticos y por sentido común se puede decir que la colmatación aumenta a medida que el efecto de dicha dinámica hace disminuir a la conductividad hidráulica. Sin embargo, en el presente trabajo no se logró visualizar la variación de la conductividad antes mencionada debido a que no se logró mantener estabilizados los humedales durante todo el tiempo de la experimentación, como ya se mencionó, esto fue debido a que no hubo flujo continuo en la descarga de aguas residuales por la poca afluencia de personas en el CIAC durante la pandemia.

## 9. CONCLUSIONES

Se concluye que con la presente investigación se cumple el objetivo general ya que se logró comprobar, a través de la variación de la conductividad hidráulica, que la colmatación es mayor en el tezontle que en la grava triturada de humedales de flujo subsuperficial que emplean *Typha Domingensis*.

No se pudieron medir todos los parámetros relacionados con el proceso de colmatación, si se logró determinar que la conductividad hidráulica es un indicador que varía con el efecto de la dinámica de factores que originan la colmatación, y que está directamente relacionado con ésta.

Aunque no se realizaron mediciones de dichos parámetros, también se identificaron como factores de la dinámica de la colmatación a: los sólidos presentes en el agua residual, el ingreso de agua de lluvia, el medio de soporte, su porosidad, su relación de vacíos y su posible estratificación, el sustrato y su posible intervención en la creación de fisuras y agujeros en el medio de soporte a través de la actividad de la zooglea, la zona radicular, los rizomas y el ciclo de vida de la vegetación.

Se logró determinar de manera comparativa el grado de colmatación en el tezontle y en la grava triturada, a través de la variación de conductividad hidráulica, por lo que se concluye que existe mayor colmatación en el tezontle que en la grava triturada.

Se logró determinar la remoción de contaminantes, y en cuanto a su cumplimiento con la NOM-001-SEMARNAT-1996, se concluye que ambos humedales cumplen con la norma en temperatura, pH, DBO<sub>5</sub>, SST, y SSed, y que es mayor la remoción en el humedal con tezontle que en el de grava triturada, y ninguno de los humedales cumplen con la norma en cuanto a OD y Coliformes fecales, y en cuanto a su relación con la colmatación se concluye que ésta no es determinante

pues en ambos casos cumplen con las normas, inclusive el tezontle que tiene mayor colmatación presenta también mayor remoción de contaminantes.

Con relación a la hipótesis se concluye que efectivamente el grado de colmatación afecta menos la remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo sub-superficial en los que se utiliza *Typha Domingensis*, cuando el medio de soporte está constituido por tezontle, que cuando está constituido por grava triturada, esto a pesar de que la colmatación es mayor en el tezontle que en la grava triturada.

Aunque el tezontle presenta mayor remoción, lo preocupante es que también se colmata más que la grava, así que se recomienda estudiar el caso del mantenimiento y la vida útil del tezontle respecto a la grava triturada para terminar de definir cuál de los materiales es el más conveniente para este tipo de humedales.

## 10. DOCUMENTOS CONSULTADOS

- Alcívar, D. (2018) Propuesta de remoción de plomo en piscinas de relaves mineros utilizando la especie *Typha Domingensis pers.* en Camilo Ponce Enríquez, Ecuador.
- Colas R. (1972). La pollution des eaux Que sais-je?, Presses Universitaires de France, 4a. ed. 128 pp., Francia
- CONABIO (2009) Mondragón, P. J. (2004) y Vibrans, H. (2009) Obtenido de: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.htm>
- CONAGUA (2015) Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. México: CONAGUA.
- Delgadillo, O. Camacho, A. F. Pérez, L. Andrade, M. (2010) Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Serie técnica del Proyecto GOV-AGUA, Programa ALFA de la Unión Europea.
- Ferreira, T.J.L. (2019) Medios de soporte alternativos para mejorar la eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, en el estado de Michoacán.
- Lara B., J.A. 1999 Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña -Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona.
- Marinoff, M. a, & Chifa, C. (2006). Especies *hidrófitas* y palustres utilizadas como medicinales por los habitantes del norte y nordeste de la provincia del Chaco *Hydrophytas* and marshy species used as medicines by the population in the North and NorthEast of Chaco. 22(1), 15–19.
- Moreno, V. Ramírez, M. Oliva, C. Moreno, E. Biografía de Henry Darcy 2019. URL: <https://www.buscabiografias.com/biografia/verDetalle/10271/Henry%20Darcy>  
Publicación: 2018/12/30
- Mufarrege, M. (2012) Propuesta de remoción de plomo en piscinas de relaves mineros utilizando la especie *Typha Domingensis pers.* en camilo Ponce Enríquez, Ecuador.
- Ortiz, V. G. (2012) Colmatación en las operaciones de recarga artificial de acuíferos mediante balsas de infiltración y pozos de inyección.
- Reyes, L. (2014) Efecto del control mecánico para vegetación invasiva (*Typha Domingensis pers.*) en las características edáficas del humedal palo verde, Costa Rica.
- Rodríguez, P. de A. C. (2003) Humedales construidos. Estado del arte.
- Rojas, D.L.M, Rojas, P.H, Menjívar, F.J.C (2008) Estimación de la conductividad hidráulica Saturada in situ en un suelo tratado con vinaza.
- Romaña, J.F. (2014) Los límites de la ley de Darcy. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil.
- Salas, R.J.J. (2017) Humedales Artificiales: exploración y eliminación de contaminantes emergentes.
- Sánchez, F. J. (2017) Hidrología Superficial y Subterránea. Createspace Independent Pub., 414 pp

- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 1996. NORMA OFICIAL MEXICANA-001-SEMARNAT. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
- Sotelo A. G. (2006) Hidráulica General, Fundamentos Vol. 1 Editorial LIMUSA S.A de C.V. Grupo noriega editores.
- Smith, T. y Smith, R. (2007) Ecología. 6<sup>a</sup> edición Pearson Educación, S.A, Madrid, 2007.

## 11. APÉNDICES

### Apéndice I.

Variación de la conductividad hidráulica con el fluido

Aplicando la fórmula (11) a dos fluidos de viscosidades cinemáticas  $v_1$  y  $v_2$  respectivamente, y dividiendo miembro a miembro, obtenemos:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Siendo:

$K_1$  = conductividad hidráulica circulando el fluido de viscosidad  $v_1$

$K_2$  = conductividad hidráulica circulando el fluido de viscosidad  $v_2$

Si en ambos casos el fluido es el agua, la viscosidad varía con la temperatura, de modo que los valores de pueden obtenerse de la tabla siguiente:

temp (°C)	Densidad (10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad dinámica (10 <sup>-3</sup> .Kg/(m.s))	Viscosidad cinemática (centistokes =10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)	temp (°C)	Densidad (10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad dinámica (10 <sup>-3</sup> .Kg/(m.s))	Viscosidad cinemática (centistokes =10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)
0	0,99982	1,792	1,792	20	0,99829	1,003	1,005
1	0,99989	1,731	1,731	21	0,99808	0,979	0,981
2	0,99994	1,674	1,674	22	0,99786	0,955	0,957
3	0,99998	1,620	1,620	23	0,99762	0,933	0,935
4	1,00000	1,569	1,569	24	0,99738	0,911	0,913
5	1,00000	1,520	1,520	25	0,99713	0,891	0,894
6	0,99999	1,473	1,473	26	0,99686	0,871	0,874
7	0,99996	1,429	1,429	27	0,99659	0,852	0,855
8	0,99991	1,386	1,386	28	0,99631	0,833	0,836
9	0,99985	1,346	1,346	29	0,99602	0,815	0,818
10	0,99977	1,308	1,308	30	0,99571	0,798	0,801
11	0,99968	1,271	1,271	31	0,99541	0,781	0,785
12	0,99958	1,236	1,237	32	0,99509	0,765	0,769
13	0,99946	1,202	1,203	33	0,99476	0,749	0,753
14	0,99933	1,170	1,171	34	0,99443	0,734	0,738
15	0,99919	1,139	1,140	35	0,99408	0,720	0,724
16	0,99903	1,109	1,110	36	0,99373	0,705	0,709
17	0,99886	1,081	1,082	37	0,99337	0,692	0,697
18	0,99868	1,054	1,055	38	0,99300	0,678	0,683
19	0,99849	1,028	1,030	39	0,99263	0,666	0,671

Por ejemplo: Para 19 °C: viscosidad dinámica =  $1,028 \cdot 10^{-3}$  Kg/ (m.s); viscosidad cinemática =  $1,030 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s

EJEMPLO:

Ejemplo: Hemos medido la K de unas arenas circulando agua a 24°C = 13.8 m/día. Calcular la K con agua a 5°C.

$$\frac{K_{5^{\circ}}}{K_{24^{\circ}}} = \frac{v_{24^{\circ}}}{v_{5^{\circ}}}; K_{5^{\circ}} = 13.8 \frac{m}{dia} * \frac{0.913}{1.520} = 8.29 \frac{m}{dia}$$

Lógicamente, los caudales calculados al aplicar la Ley de Darcy variarán en la misma proporción en que varía la K.

## Apéndice II.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**LABORATORIO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**



Asunto: Reporte de análisis de calidad de agua  
 Hoja 2 de 5

**-Datos generales etiquetados:**

Sitio de muestreo: ENTRADA (Humedal C.U.), Morelia, Michoacán, México.

Origen: Residual

Tipo de agua: Residual típica

Número de muestra: 1/4

Tipo de muestreo: simple

Fecha de muestreo: 11 de mayo de 2021

Hora de muestreo: 09:00 horas

Fecha de recepción en laboratorio: 11 de mayo de 2021

Hora de recepción: 10:40 horas

Periodo de análisis: 11-20 de mayo 2021

**- Resultados de laboratorio:**

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO	METODO de ANALISIS
Temperatura de análisis	°C	19.0	NMX-AA-007-SCFI-2000
Sólidos Totales (ST)	mg/l	489.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	466.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Totales (SST)	mg/l	23.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Fijos (SDF)	mg/l	447.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	mg/l	19.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Fijos (STF)	mg/l	452.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/l	37.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Fijos (SSF)	mg/l	5.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Volátiles (SSV)	mg/l	18.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Sedimentables (SSed)	ml/l	<0.1	NMX-AA-004-SCFI-2013
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO <sub>2</sub> /l	155	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mgO <sub>2</sub> /l	82.5	NMX-AA-028-SCFI-2001
Bacterias Coliformes Fecales – E.Coli	NMP/100 ml	>=2.4X10 <sup>6</sup>	NMX-AA-042-SCFI-2015

Morelia, Michoacán, a 26 de mayo de 2021.



-Datos generales etiquetados:

Sitio de muestreo: HUMEDAL #1, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

Origen: Residual

Tipo de agua: Residual típica en tratamiento

Número de muestra: 2/4

Tipo de muestreo: simple

Fecha de muestreo: 11 de mayo de 2021

Hora de muestreo: 09:30 horas

Fecha de recepción en laboratorio: 11 de mayo de 2021

Hora de recepción: 10:40 horas

Periodo de análisis: 11-20 de mayo de 2021

- Resultados de laboratorio:

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO	METODO de ANALISIS
Temperatura de análisis	°C	20.0	NMX-AA-007-SCFI-2000
Sólidos Totales (ST)	mg/l	703.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	617.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Totales (SST)	mg/l	86.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Fijos (SDF)	mg/l	603.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	mg/l	14.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Fijos (STF)	mg/l	657.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/l	46.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Fijos (SSF)	mg/l	54.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Volátiles (SSV)	mg/l	32.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Sedimentables (SSed)	ml/l	<0.1	NMX-AA-004-SCFI-2013
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO <sub>2</sub> /l	70.0	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mgO <sub>2</sub> /l	27.8	NMX-AA-028-SCFI-2001
Bacterias Coliformes Fecales – E. Coli	NMP/100 ml	4.6X10 <sup>6</sup>	NMX-AA-042-SCFI-2015

Morelia, Michoacán, a 26 de mayo de 2021.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**LABORATORIO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**



Asunto: Reporte de análisis de calidad de agua  
 Hoja 3 de 5

-Datos generales etiquetados:

Sitio de muestreo: HUMEDAL #1, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

Origen: Residual

Tipo de agua: Residual típica en tratamiento

Número de muestra: 2/4

Tipo de muestreo: simple

Fecha de muestreo: 11 de mayo de 2021

Hora de muestreo: 09:30 horas

Fecha de recepción en laboratorio: 11 de mayo de 2021

Hora de recepción: 10:40 horas

Periodo de análisis: 11-20 de mayo 2021

- Resultados de laboratorio:

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO	METODO de ANALISIS
Temperatura de análisis	°C	20.0	NMX-AA-007-SCFI-2000
Sólidos Totales (ST)	mg/l	703.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	617.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Totales (SST)	mg/l	86.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Fijos (SDF)	mg/l	603.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	mg/l	14.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Fijos (STF)	mg/l	657.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/l	46.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Fijos (SSF)	mg/l	54.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Volátiles (SSV)	mg/l	32.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Sedimentables (SSed)	ml/l	<0.1	NMX-AA-004-SCFI-2013
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO <sub>2</sub> /l	70.0	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mgO <sub>2</sub> /l	27.8	NMX-AA-028-SCFI-2001
Bacterias Coliformes Fecales – E.Coli	NMP/100 ml	4.6X10 <sup>6</sup>	NMX-AA-042-SCFI-2015

Morelia, Michoacán, a 26 de mayo de 2021.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**LABORATORIO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**



Asunto: Reporte de análisis de calidad de agua  
 Hoja 4 de 5

-Datos generales etiquetados:

Sitio de muestreo: HUMEDAL #2, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

Origen: Residual

Tipo de agua: Residual típica en tratamiento

Número de muestra: 3/4

Tipo de muestreo: simple

Fecha de muestreo: 11 de mayo de 2021

Hora de muestreo: 09:55 horas

Fecha de recepción en laboratorio: 11 de mayo de 2021

Hora de recepción: 10:40 horas

Periodo de análisis: 11-20 de mayo 2021

- Resultados de laboratorio:

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO	METODO de ANALISIS
Temperatura de análisis	°C	17.0	NMX-AA-007-SCFI-2000
Sólidos Totales (ST)	mg/l	633.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	597.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Totales (SST)	mg/l	36.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Fijos (SDF)	mg/l	571.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	mg/l	26.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Fijos (STF)	mg/l	598.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/l	35.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Fijos (SSF)	mg/l	27.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Volátiles (SSV)	mg/l	9.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Sedimentables (SSed)	ml/l	<0.1	NMX-AA-004-SCFI-2013
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO <sub>2</sub> /l	122.0	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mgO <sub>2</sub> /l	36.3	NMX-AA-028-SCFI-2001
Bacterias Coliformes Fecales – E.Coli	NMP/100 ml	4.6X10 <sup>6</sup>	NMX-AA-042-SCFI-2015

Morelia, Michoacán. a 26 de mayo de 2021.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**LABORATORIO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**



Asunto: Reporte de análisis de calidad de agua  
 Hoja 5 de 5

-Datos generales etiquetados:

Sitio de muestreo: HUMEDAL #3, ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

Origen: Residual

Tipo de agua: Residual típica en tratamiento

Número de muestra: 4/4

Tipo de muestreo: simple

Fecha de muestreo: 11 de mayo de 2021

Hora de muestreo: 10:05 horas

Fecha de recepción en laboratorio: 11 de mayo de 2021

Hora de recepción: 10:40 horas

Periodo de análisis: 11-20 de mayo de 2021

- Resultados de laboratorio:

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO	METODO de ANALISIS
Temperatura de análisis	°C	17.5	NMX-AA-007-SCFI-2000
Sólidos Totales (ST)	mg/l	654.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	596.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Totales (SST)	mg/l	58.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Fijos (SDF)	mg/l	577.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	mg/l	19.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Fijos (STF)	mg/l	605.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/l	49.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Fijos (SSF)	mg/l	28.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspensivos Volátiles (SSV)	mg/l	30.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Sedimentables (SSed)	ml/l	>0.1	NMX-AA-004-SCFI-2013
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO <sub>2</sub> /l	81.0	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mgO <sub>2</sub> /l	22.8	NMX-AA-028-SCFI-2001
Bacterias Coliformes Fecales – E.Coli	NMP/100 ml	1.1X10 <sup>7</sup>	NMX-AA-042-SCFI-2015

Morelia, Michoacán, a 26 de mayo de 2021.