



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**FACULTAD DE BIOLOGÍA**

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

**“Medios de soporte alternativos para mejorar la eficiencia de los  
humedales artificiales de flujo subsuperficial, en el estado de Michoacán”**

**TESIS**

Para obtener grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Presenta:

**Ing. Jorge Luis Ferreyra Torres**

Director de Tesis:

**Dr. Ezequiel García Rodríguez**

Co-Director de Tesis

**Dr. Roberto García Acevedo**

**Morelia, Michoacán, Junio del 2020**

# Índice

Índice de Ilustraciones.....	III
Índice de tablas .....	IV
Índice de gráficas.....	V
Resumen .....	VII
Abstract.....	VIII
1. Introducción .....	1
2. Marco Teórico .....	3
2.1 Humedales Artificiales.....	4
2.2 Clasificación de los humedales artificiales.....	5
2.2.1 Humedales de flujo subsuperficial (HFSS) .....	5
2.2.2 Humedales de flujo superficial (HFS) .....	8
2.3 Componentes de los humedales de flujo subsuperficial .....	9
2.3.1 Hidrología .....	9
2.3.2 Sustrato .....	10
2.3.3. Medio de soporte .....	11
2.3.3.1 Colmatación del medio de soporte.....	13
2.3.4 Vegetación.....	14
2.3.5. Microorganismos.....	15
3. Antecedentes .....	16
4. Justificación .....	22
5. Objetivos .....	24
6. Hipótesis.....	24
7. Metodología.....	25
7.1. Solicitud de un espacio para el humedal experimental. ....	25
7.2. Distribución de los módulos de los humedales experimentales. ....	27
7.3. Selección de materiales para el sustrato. ....	28
7.4. Caracterización del medio de soporte. ....	30
7.4.1. Análisis granulométrico .....	30
7.4.2. Absorción.....	34
7.4.3. Densidad.....	36

7.4.4. Porosidad.....	37
7.5. Diseño del humedal experimental.....	38
7.6. Construcción del humedal experimental.....	43
7.7. Monitoreo del desarrollo y crecimiento de la vegetación. ....	51
7.8. Monitoreo de la eficiencia de remoción.....	53
7.8.1. Primer muestreo.....	53
7.8.1.1. Determinación de los parámetros de campo.....	54
7.8.1.2. Determinación de los sólidos en todas sus formas.....	56
7.8.1.3. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	59
7.8.1.4. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	60
7.8.1.5. Determinación de microorganismos coliformes fecales.....	62
7.8.2. Segundo muestreo. ....	63
7.8.2.1. Determinación de los parámetros de campo.....	63
7.8.2.2. Determinación de los sólidos en todas sus formas.....	65
7.8.2.3. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	67
7.8.2.4. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	68
7.8.2.5. Determinación de microorganismos coliformes fecales.....	69
7.8.3. Tercer muestreo. ....	70
7.8.3.1. Determinación de los parámetros de campo .....	70
7.8.3.2. Determinación de los sólidos en todas sus formas.....	72
7.8.3.3. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno .....	74
7.8.3.4. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno .....	75
7.8.3.5. Determinación de microorganismos coliformes fecales.....	76
7.9 Beneficios y aplicación de los humedales.....	77
8. Resultados y análisis de resultados .....	78
9. Conclusiones .....	87
10. Documentos consultados .....	89

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Humedal subsuperficial .....	5
Ilustración 2. Humedal subsuperficial de flujo horizontal .....	6
Ilustración 3. Humedal subsuperficial de flujo vertical .....	7
Ilustración 4. Humedal superficial .....	8
Ilustración 5. Tipos de hidrófita.....	14
Ilustración 6. PTAR UMSNH CIAC BICENTENARIO.....	25
Ilustración 7. Ubicación del prototipo del humedal artificial.....	25
Ilustración 8. Croquis de la PTAR UMSNH CIAC BICENTENARIO .....	26
Ilustración 9. Zona de experimentación .....	26
Ilustración 10. Gravilla-tezontle .....	28
Ilustración 11. Tezontle .....	28
Ilustración 12. Grava triturada .....	29
Ilustración 13. Prueba granulométrica del tezontle .....	30
Ilustración 14. Grava superficialmente seca.....	34
Ilustración 15. Secado del material pétreo.....	34
Ilustración 16. Determinación del volumen del material .....	36
Ilustración 17. Delimitación del humedal .....	43
Ilustración 18. Nivelación del terreno .....	43
Ilustración 19. Delimitación de los módulos de los humedales.....	44
Ilustración 20. Inicio de excavación .....	44
Ilustración 21. Pared de soporte del humedal .....	45
Ilustración 22. Colocación de la válvula.....	45
Ilustración 23. Tinaco para almacenamiento del agua residual.....	45
Ilustración 24. Tubería tinaco - humedales .....	46
Ilustración 25. Geomembrana de 1 mm de grosor.....	46
Ilustración 26. Geomembrana armada.....	47
Ilustración 27. Colocación de la tubería de salida .....	47
Ilustración 28. Cribado del medio de soporte .....	48
Ilustración 29. Colocación del medio de soporte .....	48
Ilustración 30. Trasplante de la vegetación .....	49
Ilustración 31. Colocación de la vegetación en el humedal.....	49
Ilustración 32. Tubería de ingreso al humedal .....	49
Ilustración 33. Aforo del influente.....	50
Ilustración 34. Desarrollo de la vegetación primer muestreo. ....	51
Ilustración 35. Desarrollo de la vegetación segundo muestreo.....	51
Ilustración 36. Desarrollo de la vegetación tercer muestreo.....	52
Ilustración 37. Muestreo en campo.....	53
Ilustración 38. Muestras para análisis físico-químico .....	53
Ilustración 39. Muestras para análisis bacteriológico.....	53
Ilustración 40. Muestreo 1. Medición de los sólidos sedimentables .....	56
Ilustración 41. Lectura de la DQO en el espectrofotómetro .....	59
Ilustración 42. Determinación del oxígeno disuelto para la prueba de DBO <sub>5</sub> .....	60

## Índice de tablas

Tabla 1. Características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial .....	11
Tabla 2. Parámetros relevantes de los medios de soporte utilizados en la experimentación. ....	17
Tabla 3. Granulometría tezontle .....	30
Tabla 4. Granulometría grava triturada.....	32
Tabla 5. Granulometría gravilla-tezontle.....	33
Tabla 6. Muestreo 1. Parámetros de campo .....	54
Tabla 7. Muestreo 1. Sólidos sedimentables .....	56
Tabla 8. Muestreo 1. Sólidos en todas sus formas .....	57
Tabla 9. Muestreo 1. Sólidos suspendidos totales .....	58
Tabla 10. Muestreo 1. Valores de DQO en las muestras .....	59
Tabla 11. Muestreo 1. Valores de DBO <sub>5</sub> .....	61
Tabla 12. Muestreo 1. Comparación de coliformes fecales en las muestras con la norma .....	62
Tabla 13. Muestreo 1. Porcentaje de remoción de coliformes fecales en los humedales .....	62
Tabla 14. Muestreo 2. Parámetros de campo .....	63
Tabla 15. Muestreo 2. Sólidos sedimentables .....	65
Tabla 16. Muestreo 2. Sólidos en todas sus formas .....	65
Tabla 17. Muestreo 2. Sólidos suspendidos totales.....	66
Tabla 18. Muestreo 2. Valores de DQO .....	67
Tabla 19. Muestreo 2. Valores de DBO <sub>5</sub> .....	68
Tabla 20. Muestreo 2. Comparación de coliformes fecales en las muestras con la norma .....	69
Tabla 21. Muestreo 2. Porcentaje de remoción de coliformes fecales.....	69
Tabla 22. Muestreo 3. Parámetros de campo .....	70
Tabla 23. Muestreo 3. Sólidos sedimentables .....	72
Tabla 24. Muestreo 3. Sólidos en todas sus formas .....	72
Tabla 25. Muestreo 3. Sólidos suspendidos totales.....	73
Tabla 26. Muestreo 3. Valores de DQO .....	74
Tabla 27. Muestreo 3. Valores de DBO <sub>5</sub> .....	75
Tabla 28. Muestreo 3. Comparación de coliformes fecales en las muestras con la norma .....	76
Tabla 29. Muestreo 3. Porcentaje de remoción de coliformes fecales.....	76
Tabla 30. Comparativa de la remoción de los coliformes fecales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle.....	86
Tabla 31. Comparativa de la remoción de los coliformes fecales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada. ....	86
Tabla 32. Comparativa de la remoción de los coliformes fecales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle .....	86

## Índice de gráficas

Gráfica 1. Curva granulométrica tezontle.....	31
Gráfica 2. Curva granulométrica grava triturada .....	32
Gráfica 3. Curva granulométrica gravilla-tezontle .....	33
Gráfica 4. Muestreo 1. Comparación de la temperatura de las muestras con la norma .....	54
Gráfica 5. Muestreo 1. Comparación del pH de las muestras con la norma .....	55
Gráfica 6. Muestreo 1. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática .....	55
Gráfica 7. Muestreo 1. Comparación de los sólidos sedimentables en las muestras con la norma.....	56
Gráfica 8. Muestreo 1. Comparación de los SST en las muestras con la norma .....	58
Gráfica 9. Porcentaje de remoción de SST en los humedales.....	58
Gráfica 10. Muestreo 1. Valores de DQO en las muestras.....	59
Gráfica 11. Muestreo 1. Comparación de la DBO <sub>5</sub> en las muestras con la norma .....	61
Gráfica 12. Muestreo 1. Porcentaje de remoción de DBO <sub>5</sub> en los humedales.....	61
Gráfica 13. Muestreo 2. Comparación de la temperatura de las muestras con la norma .....	63
Gráfica 14. Muestreo 2. Comparación del pH de las muestras con la norma .....	64
Gráfica 15. Muestreo 2. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática .....	64
Gráfica 16. Muestreo 2. Comparación de los sólidos sedimentables en las muestras con la norma.....	65
Gráfica 17. Muestreo 2. Comparación de los SST en las muestras con la norma .....	66
Gráfica 18. Muestreo 2. Porcentaje de remoción de SST en los humedales .....	66
Gráfica 19. Muestreo 2. Valores de DQO en las muestras.....	67
Gráfica 20. Muestreo 2. Comparación de la DBO <sub>5</sub> en las muestras con la norma .....	68
Gráfica 21. Muestreo 2. Porcentaje de remoción de DBO <sub>5</sub> en los humedales.....	68
Gráfica 22. Muestreo 3. Comparación de la temperatura de las muestras con la norma .....	70
Gráfica 23. Muestreo 3. Comparación del pH de las muestras con la norma .....	71
Gráfica 24. Muestreo 3. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática .....	71
Gráfica 25. Muestreo 3. Comparación de los sólidos sedimentables en las muestras con la norma.....	72
Gráfica 26. Muestreo 3. Comparación de los SST en las muestras con la norma .....	73
Gráfica 27. Muestreo 3. Porcentaje de remoción de SST en los humedales .....	73
Gráfica 28. Muestreo 3. Valores de DQO en las muestras.....	74
Gráfica 29. Muestreo 3. Comparación de la DBO <sub>5</sub> en las muestras con la norma .....	75
Gráfica 30. Muestreo 3. Porcentaje de remoción de DBO <sub>5</sub> en los humedales.....	75
Gráfica 31. Comparativa de la concentración del oxígeno disuelto durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle.....	78
Gráfica 32. Comparativa de la concentración del oxígeno disuelto durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada. ....	78
Gráfica 33. Comparativa de la concentración del oxígeno disuelto durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle .....	79
Gráfica 34. Comparativa de la remoción de sólidos sedimentables durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada .....	80

Gráfica 35. Comparativa de la remoción de sólidos sedimentables durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle.....	80
Gráfica 36. Comparativa de la remoción de sólidos sedimentables durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle .....	81
Gráfica 37. Comparativa de la remoción de sólidos suspendidos totales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle .....	82
Gráfica 38. Comparativa de la remoción de sólidos suspendidos totales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada. ....	82
Gráfica 39. Comparativa de la remoción de sólidos suspendidos totales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle .....	83
Gráfica 40. Comparativa de la remoción de DBO <sub>5</sub> durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle .....	84
Gráfica 41. Comparativa de la remoción de DBO <sub>5</sub> durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada.....	84
Gráfica 42. Comparativa de la remoción de DBO <sub>5</sub> durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle.....	85

## **Resumen**

El costo y la disponibilidad del medio de soporte son de suma importancia en el diseño de humedales artificiales, puesto que estos sistemas están dirigidos a comunidades rurales de bajos recursos económicos, en donde se requieren sistemas de fácil operación y mantenimiento.

En el presente trabajo se evalúa el porcentaje de remoción de distintos contaminantes en aguas residuales, en un humedal artificial de flujo subsuperficial, en el cuál se utilizarán 3 materiales distintos como medio de soporte.

Con la variación del medio de soporte, se espera obtener un aumento en la remoción de contaminantes y, por consiguiente enfatizar la importancia que tiene el medio de soporte en la remoción de contaminantes.

## **Palabras Clave**

*Humedal, material, sustrato, tratamiento, agua.*



## **Abstract**

The cost and geographical availability of substrates are crucial for the design of constructed wetlands, considering this type of treatment systems are directed towards rural communities with low economic resources, where simple operations and maintenance systems are required.

In this study, two different material will be apply as main substrate in a subsurface flow constructed wetland for treating wastewater.

High removal of various types of pollutants (phosphorus, nitrogen, organic material, pathogenic microorganisms, etc.) are expected to obtain , enhancing the removal capacity of the CW system according to the analysis results, with the purpose of emphasize the importance of the support material on the removal of contaminants.

## **Key words**

*Wetland, material, substrate, treatment, water*

# 1. Introducción

El agua es uno de los recursos naturales que forma parte del desarrollo de cualquier país; es el compuesto químico más abundante del planeta y resulta indispensable para el desarrollo de la vida. Su disponibilidad es paulatinamente menor debido a su contaminación por diversos medios.

Se considera que el agua está contaminada cuando se ven alteradas ya sea sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, por lo que pierde su potabilidad para consumo diario o para su utilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas.

La disposición final de las aguas residuales producidas por las diferentes actividades humanas (principalmente usos domésticos e industriales) representa un problema cuya magnitud está en constante incremento y que se ve agravado con el transcurso del tiempo y el crecimiento demográfico

El tratamiento de las aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial, ya que es importante disponer de agua de calidad y en cantidad suficiente, lo que permitirá una mejora del ambiente, la salud y la calidad de vida.

Los humedales artificiales representan una opción alternativa para los problemas que encaran los países con economías emergentes, desde el punto de vista económico y tecnológico, pues son sistemas de tratamiento en los que, a través de procesos físicos, químicos y biológicos se logra la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales, pudiéndose utilizar una vez tratada para su uso agrícola o industrial. (Guido y Durán de Bazúa, 2008).

Los humedales artificiales son sistemas extensivos (i.e. degradan los contaminantes por medio de procesos naturales) que han alcanzado gran importancia alrededor del mundo en los últimos años, gracias a su gran capacidad de remoción de contaminantes y su viabilidad para la gestión de aguas rurales.

Esta investigación pretende incrementar la remoción de contaminantes en los humedales artificiales por medio de la variación del medio de soporte. Para ello, se construirán 3 prototipos, con 3 diferentes materiales, y se monitoreara los efectos del medio de soporte en el crecimiento de la vegetación. Al mismo tiempo se realizarán pruebas de calidad del efluente según las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), y se espera que el efluente cumpla con los parámetros de calidad establecidos.

## 2. Marco Teórico

La disposición final de las aguas residuales producidas por las diferentes actividades humanas (principalmente usos domésticos e industriales) representa un problema cuya magnitud está en constante incremento y que se ve agravado cuando se trata de grandes urbes. Encarar este problema plantea un dilema crucial, ya que por un lado, el agua residual se constituye en una fuente alternativa importante para el riego de los cultivos, pero por otro lado, su uso para este fin, sin un adecuado tratamiento, puede constituirse a su vez en un problema mayor, por todos los riesgos que esto supone. En efecto, se han registrado a nivel mundial, muchos casos de brotes de enfermedades, casos de intoxicaciones masivas y se ha propiciado la degradación de diversos cuerpos de agua. (Delgadillo *et al*, 2010).

En México, debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal capacitado, sólo 36 % de las aguas residuales generadas reciben tratamiento, lo cual crea la necesidad de desarrollar tecnologías para su depuración. (Romero-Aguilar, 2009).

Dentro de los procesos de tratamiento para aguas residuales, se encuentran los naturales que se caracterizan por no ser mecanizados. Estos procesos económicos y sencillos de operar son una opción viable para las comunidades rurales que carecen de sistemas para el tratamiento de aguas residuales.

Los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él. Los humedales se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre o cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas. (Ramsar, 2016)

## 2.1 Humedales Artificiales

Los humedales artificiales básicamente son zonas construidas por el hombre en las que se reproducen, de manera controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales.

Los humedales artificiales (HA) son sistemas de fitodepuración, el sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. (O. Delgadillo *et al*, 2010), que mediante la interacción de sus partes (vegetación, medio de soporte y microorganismos) permiten el tratamiento de un efluente. (EPA, 2000). Procesos tales como sedimentación, mineralización, filtración, adsorción físico-química, precipitación en el sedimento, asimilación de nutrientes y emisiones gaseosas, coexisten en estos sistemas. (Peñuela & Morató, 2013). Un humedal artificial permite remociones altas de DBO, DQO, sólidos suspendidos totales, nitrógeno, metales y patógenos (EPA, 1999).

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla. (Kolb, 1998).

La depuración de las aguas residuales en los humedales artificiales se lleva a cabo, fundamentalmente, por la presencia de una población microbiana adherida a la superficie de las plantas en contacto con el agua residual y en el caso de los humedales con flujo subsuperficial se adiciona además los microorganismos adheridos al medio soporte. Debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos la velocidad de remoción en los sistemas con flujo subsuperficial es mayor. (Wittgren and Maehlum, 1997)

## 2.2 Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales (HA) se clasifican en: humedales de flujo superficial (HFS) y humedales de flujo subsuperficial (HFSS).

### 2.2.1 Humedales de flujo subsuperficial (HFSS)

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

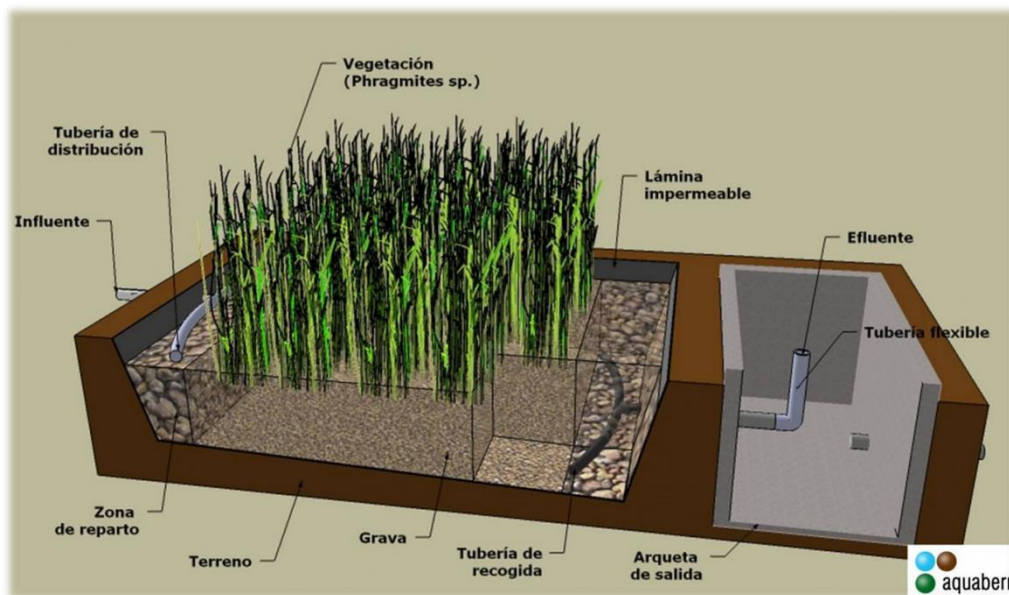


Ilustración 1. Humedal subsuperficial

Fuente: (Aquaberri, S.L., 2013)

### 2.2.1.1 Humedales subsuperficiales de flujo horizontal (HSS-H)

El diseño de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal (Ilustración 2) por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Kolb, 1998).

El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso. La profundidad del lecho varía entre 0.45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0.5 % a 1 % (Delgadillo *et al*, 2010).

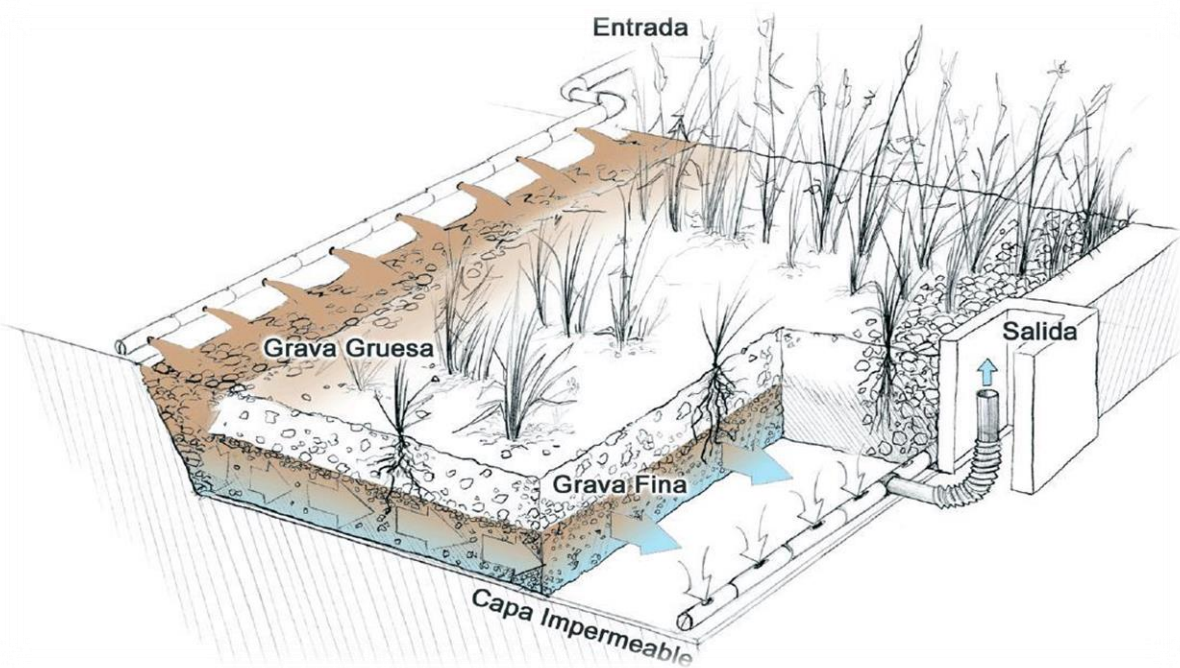


Ilustración 2. Humedal subsuperficial de flujo horizontal

Fuente: Instituto Tecnológico de Canarias, 2011

### 2.2.1.2 Humedales subsuperficiales de flujo vertical (HSS-V)

Los humedales subsuperficiales de flujo vertical (Ilustración 3) 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. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera, y los resultados que se han obtenido son promisorios (Kolb, 1998).

En este tipo de sistema las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arena, grava) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular. (Delgadillo *et al*, 2010)

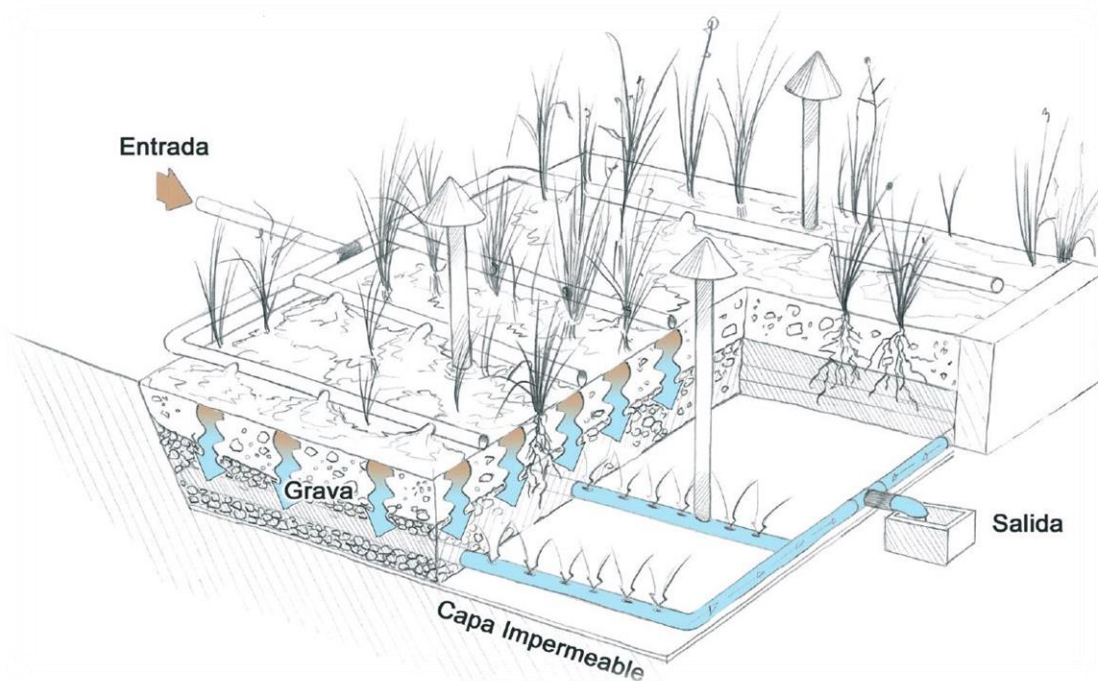


Ilustración 3. Humedal subsuperficial de flujo vertical

Fuente: Instituto Tecnológico de Canarias, 2011



### 2.2.2 Humedales de flujo superficial (HFS)

Los humedales artificiales de flujo superficial (Ilustración 4) son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera.

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

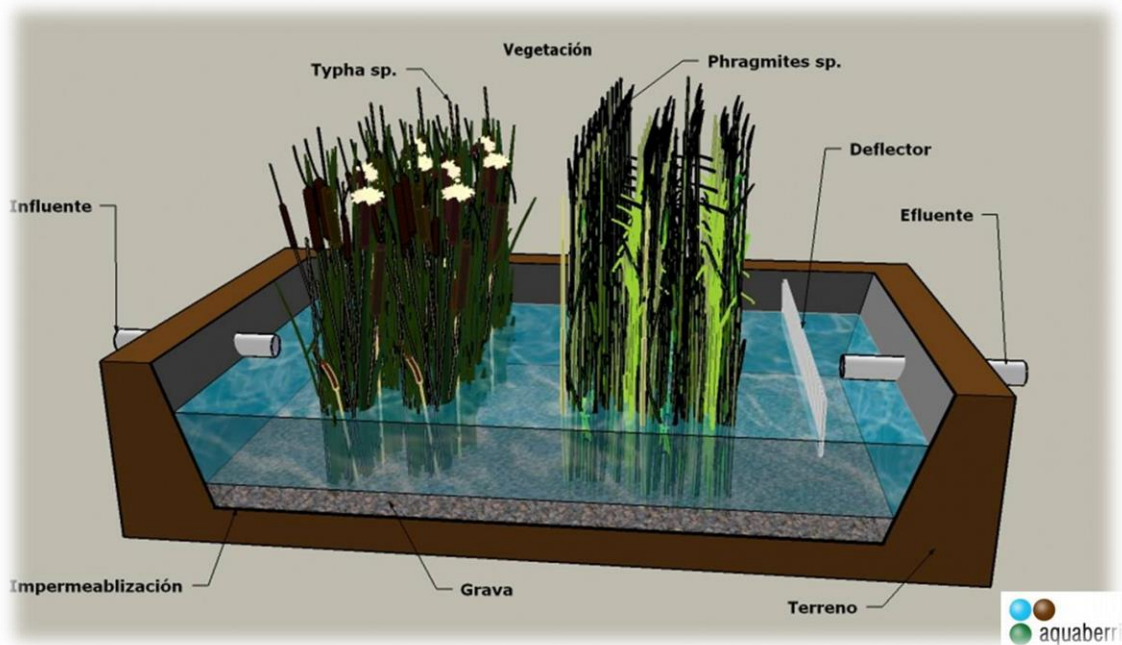


Ilustración 4. Humedal superficial

Fuente: Aquaberrí, S.L., 2013

## **2.3 Componentes de los humedales de flujo subsuperficial**

Los humedales construidos consisten en el diseño correcto de un espacio que contiene agua, sustrato, y la mayoría normalmente, plantas emergentes. Otros componentes importantes de los humedales, como las comunidades de microorganismos y los invertebrados acuáticos, se desarrollan naturalmente. (Lara, 1999).

### **2.3.1 Hidrología**

La hidrología es un factor de suma importante en el diseño de un humedal artificial porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario decisivo en su éxito o fracaso, por los siguientes motivos.

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación del suelo y transpiración de las plantas).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de raíces y rizomas y bloqueando la exposición al viento y al sol. (Lara, 1999)

### **2.3.2 Sustrato**

En los humedales, el sustrato está formado por el medio de soporte, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él.

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- 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)

### 2.3.3. Medio de soporte

El medio de soporte 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 está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Arias, 2004).

Tabla 1. Características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial

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	1,800 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 $82 \times 10^4$

Fuente: Reed et al., 1995

La ley de Darcy describe el régimen de flujo en un medio poroso y es aceptada para ser utilizada en el diseño de los humedales con flujo subsuperficial que utilizan como medio de soporte ya sea suelo o grava. Dicha ecuación es la siguiente:

$$Q = k_s * A_c * S$$

Dónde:

Q: Flujo promedio a través del humedal(m<sup>3</sup>/d)

K<sub>s</sub>: Conductividad hidráulica del humedal perpendicular a la dirección del flujo (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. d).

A<sub>c</sub>: Area de la sección transversal perpendicular al flujo (m<sup>2</sup>)

S: Gradiente hidráulico o pendiente del lecho

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal deben ser diseñados para que la velocidad del flujo definida por el producto (k<sub>s</sub>\*S) no sea mayor de 6,8 m<sup>3</sup>/d para minimizar el arrastre de la película biológica. (Metcalf & Eddy, 1995)

Los materiales con un diámetro menor proporcionan una mayor área superficial para el crecimiento biológico, sin embargo los huecos entre partículas tienden a taparse con más facilidad y limitar el paso de líquido y aire. (Hammer & Hammer, 2012)

### **2.3.3.1 Colmatación del medio de soporte**

La colmatación del medio de soporte es debido en gran parte a la deposición de las partículas en suspensión del agua residual vertida.

El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal. (O. Delgadillo *et al*, 2010).

Principales causas de la colmatación en el medio de soporte:

- Presencia excesiva de finos en el medio de soporte.
- Mal funcionamiento en la tubería de entrada del humedal.
- Deficiente funcionamiento de las etapas de pretratamiento y/o tratamiento primario.
- Presencia de elevadas concentraciones de sólidos en suspensión, grasas y aceites en las aguas a tratar.

Ante situaciones de colmatación del medio de soporte, en el caso de los Humedales de Flujo Horizontal se aconseja proceder a bajar la tubería de salida. Esto permite el secado de la mayor parte del medio de soporte, recuperando parte de la porosidad perdida. Tras este período de recuperación, que puede durar 2-3 semanas, se vuelve a colocar la tubería de salida a su nivel habitual, con lo que volverá a inundarse el humedal.

### 2.3.4 Vegetación

Las especies vegetales que crecen en los humedales naturales son usualmente denominadas macrófitas, la presencia o ausencia de las macrófitas en los humedales es uno de los aspectos importantes en la definición de los humedales, por lo que son un componente indispensable en estos ecosistemas. Las macrófitas, tal y como ocurre en otros organismos fotoautótrofos, usan la energía solar para asimilar el carbono inorgánico de la atmósfera para producir materia orgánica, lo cual subsecuentemente es la fuente de energía para los heterótrofos. (CONAGUA, 2015)

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas como organismos fotoautótrofos, recogen la 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).

Dependiendo del lugar donde se desarrollen dentro del cuerpo de agua, las hidrófitas se clasifican en:

- Flotantes: Que son especies vegetales que viven en la superficie del agua.
- Emergentes: Fijan sus raíces al fondo pero crecen lo suficiente para que sus hojas aprovechen la luz fuera del agua
- Sumergidas: Se desarrollan exclusivamente dentro del agua

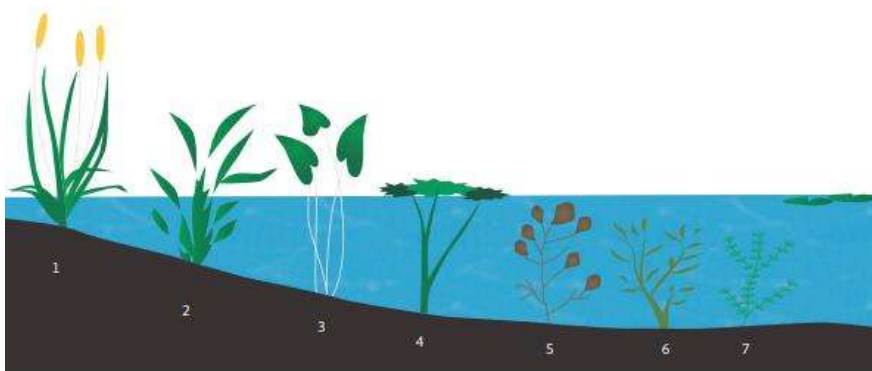


Ilustración 5. Tipos de hidrófita

### **2.3.5. Microorganismos**

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004).



### 3. Antecedentes

Los primeros experimentos sobre el uso de plantas en humedales artificiales para tratar las aguas residuales, se llevaron a cabo a principios de la década de 1950 por la Dra. Kathe Seidel en Alemania, y los primeros sistemas a gran escala se pusieron en funcionamiento a fines de la década de 1960 (Vymazal, J. 2011).

Los humedales artificiales inicialmente fueron utilizados para la depuración de descargas con baja concentración de materiales orgánicos, o bien para el tratamiento de aguas grises, sin embargo, a partir de los años ochenta comenzaron a utilizarse en sistemas de mayor capacidad, es decir para mayores caudales. Durante los años noventa fueron diseñados para una diversidad de aplicaciones entre las que se incluyen el tratamiento de las aguas residuales municipales, aguas de retorno agrícola y las relacionadas con algunas industrias generadoras de aguas residuales de tipo orgánico. Para el año 2000 se habían formado un sin número de agrupaciones científicas involucradas con el desarrollo y mejoramiento de la tecnología, con importantes avances en el conocimiento de los mecanismos físicos, químicos, biológicos e hidráulicos (Vymazal, J., & Kröpfelová, L. 2008).

Actualmente, en México se han construido humedales de flujo subsuperficial y se ha reportado una alta remoción de sólidos suspendidos (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno (N) y patógenos. No obstante el desarrollo importante de la tecnología y de la acumulación de nuevo conocimiento se tienen aún grandes vacíos de los fenómenos que intervienen en la depuración del agua mediante estos sistemas, de tal manera que se presenta la enorme oportunidad para realizar nuevos estudios que permitan obtener mejores y más eficientes diseños (Kadlec y Wallace, 2009).

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones que confieren al medio de soporte gran importancia en la remoción de contaminantes en los humedales artificiales. De entre diversos materiales se encontró que la zeolita, como medio de soporte, genera un aumento en la remoción de los residuos de antibióticos que afectan a la salud humana (Chen *et al.*, 2016), también se ha encontrado que la caliza de moleano triturada aumenta

la remoción de fósforo un 61%, y es considerada una buena opción en lugares donde se encuentra disponible (Mateus *et al*, 2012).

En la facultad de química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se llevó a cabo un estudio, el cual se enfocó en la evaluación de materiales de agregados minerales a los cuáles se denominó CAS, PIECA y EVOL, como sustitutos del medio de soporte usado convencionalmente en humedales artificiales. Los materiales CAS y PIECA presentaban una mezcla de minerales tales como carbonato de calcio, óxidos de fierro y aluminio; mientras el EVOL contenía concentraciones apreciables de fierro.

Tabla 2. Parámetros relevantes de los medios de soporte utilizados en la experimentación.

<b>Material</b>	<b>pH (unidades)</b>	<b>Alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>P (mg/g)</b>	<b>Fe (mg/g)</b>	<b>Ca (mg/g)</b>	<b>Al (mg/g)</b>	<b>Conductividad eléctrica (µS/cm)</b>
<b>PIECA</b>	<b>10.98</b>	<b>334.41</b>	<b>&lt; 0.01</b>	<b>2.11</b>	<b>324</b>	<b>2.23</b>	<b>2826</b>
<b>CAS</b>	<b>9.12</b>	<b>282.23</b>	<b>&lt; 0.01</b>	<b>7.18</b>	<b>233</b>	<b>19.23</b>	<b>2150</b>
<b>EVOL</b>	<b>5.20</b>	<b>11.12</b>	<b>&lt; 0.01</b>	<b>43.56</b>	<b>0.82</b>	<b>2.57</b>	<b>3180</b>
<b>Gravilla</b>	<b>7.69</b>	<b>24.28</b>	<b>&lt; 0.01</b>	<b>2.89</b>	<b>13.50</b>	<b>45.23</b>	<b>1612</b>

Los experimentos se realizaron empleando cuatro columnas de policloruro de vinilo (PVC), tres empacadas con cada uno de los medios de soportes substitutos y la cuarta con gravilla, como material de referencia; ya que la gravilla es el material que comúnmente se usa como medio de soporte en la construcción de un humedal artificial. El agua experimental fue esterilizada previamente y enriquecida con KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (fosfato de potasio monobásico), con objeto de minimizar la presencia de microorganismos y para incrementar su contenido de ortofosfatos hasta 22 mg/L, respectivamente. Durante las seis semanas de experimentación, los materiales CAS y PIECA alcanzaron y mantuvieron una remoción alta de ortofosfatos (92 %). Para el material EVOL, la máxima remoción lograda fue de 60 %, disminuyendo hasta 48 % al final de la prueba. Con relación a la gravilla, la capacidad de remoción lograda a través de la experimentación fue de 42 %. En consecuencia, los materiales que resultaron más prometedores para ser

usados como medio de soporte para un humedal artificial, fueron CAS y PIECA, los que pueden remover 119 % más de ortofosfato que el material de referencia. (Luna Pabello, V., & Ramírez Carrillo, H. 2004)

Machado *et al* (2017) llevaron a cabo una revisión de los estudios desarrollados sobre humedales artificiales implementados en Brasil, para eliminar contaminantes de aguas residuales.

De los estudios revisados, la grava es el medio de soporte más aplicado en humedales artificiales seguido de la arena. Otros medios de soporte utilizados comúnmente son la mezcla de grava con arena, gravilla y escoria de acero.

Los humedales artificiales que aplicaron grava como medio de soporte lograron buenos resultados para la eliminación de los contaminantes revisados, pero en particular son más eficaces para DQO y DBO<sub>5</sub>. Al comparar los diferentes estudios de humedales artificiales que usaron grava como medio de soporte, el trabajo de Matos *et al.* (2012) que estudio el rendimiento de un humedal subsuperficial de flujo horizontal para tratar aguas residuales industriales logró la combinación más alta de eficiencias de eliminación de DQO y DBO<sub>5</sub>, con 95.5 y 93.2% respectivamente. Sin embargo, solo para DQO la mezcla de grava y arena fue la que obtuvo el mayor valor (99%), fue alcanzada por el trabajo de Kafer *et al.* (2015) que utilizó un humedal subsuperficial de flujo vertical sembrado con zizaniopsis bonarienses.

En lo referente a eliminación de nutrientes, la combinación de grava y arena como medio de soporte también obtuvo excelentes resultados, el estudio llevado a cabo por Trein *et al.* (2015) en el cual utilizó un humedal subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas residuales, mostraron resultados de remoción con respecto al nitrógeno (N) del 94% y de fósforo (P) 93%.

Los estudios revisados que utilizaron solamente arena como medio de soporte lograron resultados moderados de eliminación de contaminantes. Los mejores resultados se encontraron en el trabajo de Pelissari *et al.* (2014), donde se estudió la remoción de compuestos nitrogenados en un sistema híbrido compuesto de un humedal subsuperficial de flujo horizontal y un humedal subsuperficial de flujo vertical trabajando en paralelo, para tratar aguas residuales provenientes de actividades ganaderas, alcanzó un 74% de DQO eliminado y con referente a las diferentes fracciones de nitrógeno lograron los siguientes valores:

- Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) 59.4%.
- Amonio ( $\text{NH}_4$ ) 58.2%.
- Nitratos ( $\text{NO}_3$ ) 40%.

El uso de gravilla como material de soporte en Brasil solo fue estudiado en los trabajos de Rossmann *et al.* (2012, 2013), mostrando buenos porcentajes de remoción. Los resultados que se obtuvieron fueron para DQO 87.9 % y  $\text{DBO}_5$  84.4%, y con respecto a remoción de nutrientes se consiguió un 45.3 para nitrógeno y un 54.3 % para fósforo.

En España, Blanco *et al.* (2016) estudió el potencial de la escoria de acero para su uso en humedales artificiales y encontró resultados prometedores en la eliminación del fósforo, logrando eficiencias entre el 84% y 99%.

Brooks *et al* (2000) utilizó wollastonita el cuál es un metasilicato de calcio como medio de soporte, y llegó a la conclusión de que su utilización es ideal en humedales artificiales con el objetivo de remover el fósforo soluble del agua residual. Ya que de los 11 prototipos construidos en 9 se alcanzaron remociones superiores al 80% del fósforo soluble. También se observó que el tiempo de residencia es claramente un factor significativo en la optimización de la eliminación del fósforo, ya que los mayores porcentajes de remoción se obtuvieron con tiempos de residencia mayores a 40 horas.

Wirasnita *et al.* (2018) investigó los efectos del carbón activado como medio de soporte en humedales artificiales para la eliminación de cuatro sustancias disruptoras endocrinas emergentes: bisfenol A, bisfenol F, bisfenol S y 4-terc-butilfenol. Para esto se construyó 2 humedales artificiales, ambos plantados con caña común, uno utilizaba como medio de soporte piedra pómez y otro utilizó carbón activado.

El agua residual fue contaminada con los disruptores endócrinos (5 mg/l de cada una de las 4 sustancias), esta agua residual fue tratada por ambos humedales durante 8 semanas. El humedal que utilizó carbón activado eliminó casi por completo y de manera sostenible los cuatro disruptores endócrinos (98-100%). Los rendimientos de eliminación de todos los disruptores endócrinos en el humedal que utilizó carbón activado fueron significativamente más altos que en el humedal donde se utilizó piedra pómez. Además, las poblaciones bacterianas en el humedal que utilizó carbón activado fueron entre 2 y 3 más grandes que las del humedal en el cuál se usó piedra pómez.

Por otro lado en China se analizó la capacidad de adsorción de los caparzones de ostras triturados, ladrillos triturados, piedra volcánica y zeolita como medio de soporte, y se demostró que todos los materiales con excepción de la piedra volcánica son efectivos para el desarrollo de los microorganismos y el crecimiento adecuado de las plantas. (Wang *et al.*, 2013)

El medio de soporte es de vital importancia para el desarrollo de distintas bacterias y microorganismos que degradan los contaminantes en los humedales artificiales y la remoción de nitrógeno (Liu *et al.*, 2014). Asimismo se encontró que incluso la paja de arroz y arcilla como medio de soporte son efectivos para la remoción de Nitrógeno. (Cao *et al.*, 2016).

Se han realizado bastantes estudios relativos al medio de soporte pero varios de estos utilizan materiales ya sea con cierta dificultad de conseguir, o no tan viables en el aspecto económico tales como zeolita, wollastonita, caparzones de ostras triturados, combinación de minerales, paja de arroz, carbón activado, entre otros. Ya que si bien a escala en el laboratorio se obtienen excelentes resultados, llevarlos a la práctica

probablemente no sería tan conveniente, ya que la extensión de un humedal artificial puede llegar a abarcar miles de metros cuadrados, por tanto utilizar los materiales antes mencionados podría encarecer bastante la construcción del humedal.

También varios de estos estudios se han enfocado en aumentar la remoción de nutrientes, debido al bajo porcentaje de remoción de fósforo y nitrógeno que se tiene en los humedales.

Dónde se han llevado a cabo estudios utilizando materiales más accesibles como arena, grava y arcilla ha sido en Brasil obteniendo resultados bastante buenos.

## 4. Justificación

En México la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la encargada de regular las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes, en México hay 2,477 plantas de tratamiento distribuidas a lo largo del territorio nacional, y de acuerdo con la revisión hidráulica de la infraestructura hídrica en el Estado de Michoacán llevada a cabo por la Comisión Estatal del agua y Gestión de Cuencas (CEAC) , de los 113 municipios sólo 79 de ellos cuentan con plantas de tratamiento, de las cuales 40 no se encuentran en operación. (CONAGUA & SEMARNAT, 2015)

Actualmente en el campus de Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) cuenta solamente con una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual se encuentra sin funcionar, lo mínimo recomendable para el campus principal de la UMSNH serían 2 plantas de tratamiento, una que tratase las aguas residuales provenientes de los laboratorios, y otra que tratase la del resto de los edificios; debido a los reactivos que se utilizan en los laboratorios el agua residual proveniente de estos no se debería descargar directamente al alcantarillado sin antes tener un tratamiento previo, ya que debido a las características de esta agua residual pudiese dañar el alcantarillado urbano.

Con el presente trabajo de investigación se podrá ver la viabilidad de utilizar un humedal artificial, como una opción alternativa a la planta de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la UMSNH, actualmente esta planta de tratamiento cuenta con un sistema de biodiscos, que entre sus principales desventajas comparado con un humedal artificial, sería el costo de la energía eléctrica para su funcionamiento, el mantenimiento ya que al ser un método mecanizado y más complejo se necesita estar dándole mantenimiento cada cierto período de tiempo, la compra de insumos necesarios como los empaques de plástico de los filtros, así como también la necesidad de cloro para llevar a cabo la desinfección.

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, de igual manera la selección inadecuada de sistemas de

tratamiento que no se adaptan a las condiciones del sitio, además de un diseño hidráulico inadecuado, originan el abandono de gran parte de las plantas de tratamiento existentes.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, los sistemas naturales como los humedales artificiales tienen un gran potencial, y representan una solución a la falta de tratamiento de agua, gracias a que sus costos son bajos en comparación a otros sistemas, y requieren de una operación sencilla y poco mantenimiento, son estéticos y ayudan a preservar los ecosistemas, siendo una excelente opción para comunidades rurales donde la disponibilidad de terreno no se considera un inconveniente. Los humedales artificiales a su vez pueden ser combinados con otros procesos, siendo una excelente alternativa para reformar y reactivar las plantas de tratamiento de aguas residuales que no operan actualmente.

En diversas investigaciones realizadas en los últimos años se ha demostrado que el material de soporte empleado en la construcción de los humedales artificiales, está directamente relacionado con su capacidad de remoción. Sin embargo, en México las normas y reglamentos no establecen lineamientos ni especificaciones detalladas sobre las características del medio de soporte.



## **5. Objetivos**

### **Objetivo General**

Identificar diversos materiales de la región al alcance de los constructores, que permitan el desarrollo integral de la vegetación y la optimización del funcionamiento de los humedales artificiales para así lograr un aumento en su capacidad de remoción.

### **Objetivos Específicos**

- I. Identificar las características del medio de soporte que permitan un incremento en la remoción de contaminantes en humedales artificiales y sus efectos.
- II. Establecer parámetros para la selección adecuada del medio de soporte en humedales artificiales.
- III. Determinar la importancia del medio de soporte en los humedales artificiales de flujo subsuperficial como principal agente en la remoción de contaminantes.
- IV. Proponer materiales de la región a utilizar como medio de soporte.
- V. Cumplir con los niveles de calidad de agua que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

## **6. Hipótesis**

En el Estado de Michoacán se cuenta con materiales con características que favorezcan la interacción entre la planta y los microorganismos, lo cual conlleve a una alta eficiencia en la remoción de contaminantes en los humedales artificiales.

## 7. Metodología

### 7.1. Solicitud de un espacio para el humedal experimental.

Para la realización de la investigación se solicitó a Servicios Generales de la UMSNH y a Patrimonio Universitario, un espacio en la planta de tratamiento de aguas residuales UMSNH CIAC BICENTENARIO (Ilustración 1), para construir un prototipo a escala de un humedal de flujo subsuperficial (HFSS). El lugar seleccionado para realizar el humedal artificial como puede observarse en la Ilustración 2 fue a un costado del clarificador.



Ilustración 6. PTAR UMSNH CIAC BICENTENARIO



Ilustración 7. Ubicación del prototipo del humedal artificial

En la figura 6 se ve la distribución y ubicación de los componentes con los que actualmente cuenta la PTAR UMSNH CIAC BICENTENARIO, así como también la localización del área de experimentación de los módulos de los humedales.

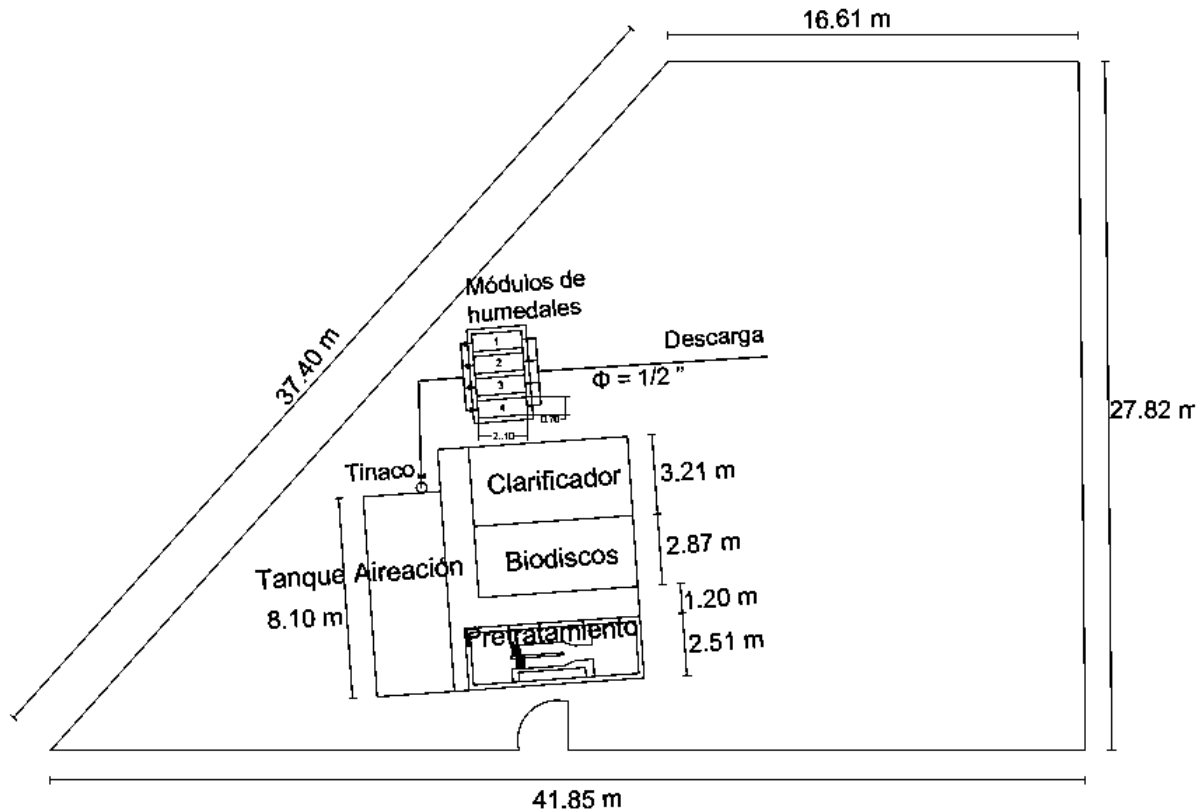


Ilustración 8. Croquis de la PTAR UMSNH CIAC BICENTENARIO

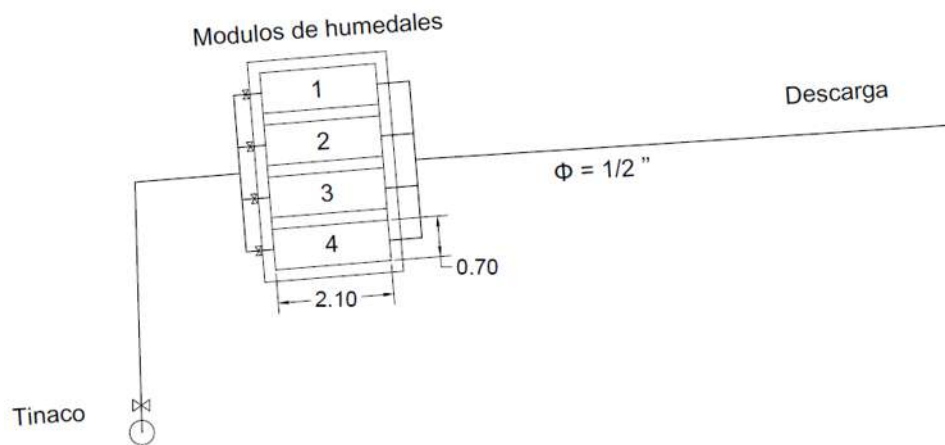


Ilustración 9. Zona de experimentación

## **7.2. Distribución de los módulos de los humedales experimentales.**

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 l/d, cada módulo tendrán unas dimensiones de 0.70 m de ancho, 2.10 m de largo y 0.70 m de profundidad. En cada módulo se plantará una combinación diferente de medio de soporte con hidrófita como se describe a continuación:

1. Hidrófita: *Typha*      Medio de soporte: Tezontle
2. Hidrófita: *Typha*      Medio de soporte: Grava triturada
3. Hidrófita: *Typha*      Medio de soporte: Gravilla-tezontle

### 7.3. Selección de materiales para el sustrato.

Se seleccionaron materiales accesibles, los cuales fuesen adecuados como soporte para la vegetación y microorganismos.

Cómo se observa en la ilustración 3 se seleccionó gravilla con tezontle, ya que es un material que se utiliza usualmente en los humedales artificiales, de fácil disponibilidad, además que en remociones de DBO y DQO se han conseguido buenos resultados.



Ilustración 10. Gravilla-tezontle

Tal como se muestra en la ilustración 4., también se seleccionó el tezontle ya que es un material con características físicas favorables para el desarrollo de los microorganismos, cómo una alta porosidad y un alto porcentaje de absorción de agua.



Ilustración 11. Tezontle

Finalmente se seleccionó grava triturada (Ilustración 5) ya que es un material con alta disponibilidad en nuestro estado además de que posee características distintas a los materiales anteriores como una menor porosidad, una baja absorción y un mayor tamaño.



Ilustración 12. Grava triturada

## 7.4. Caracterización del medio de soporte.

### 7.4.1. Análisis granulométrico

La prueba se realizó con base en la norma mexicana NMX-C-077-1997-ONNCCE. Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Prueba.

El análisis granulométrico nos sirve para conocer la distribución del tamaño de las partículas de los materiales.

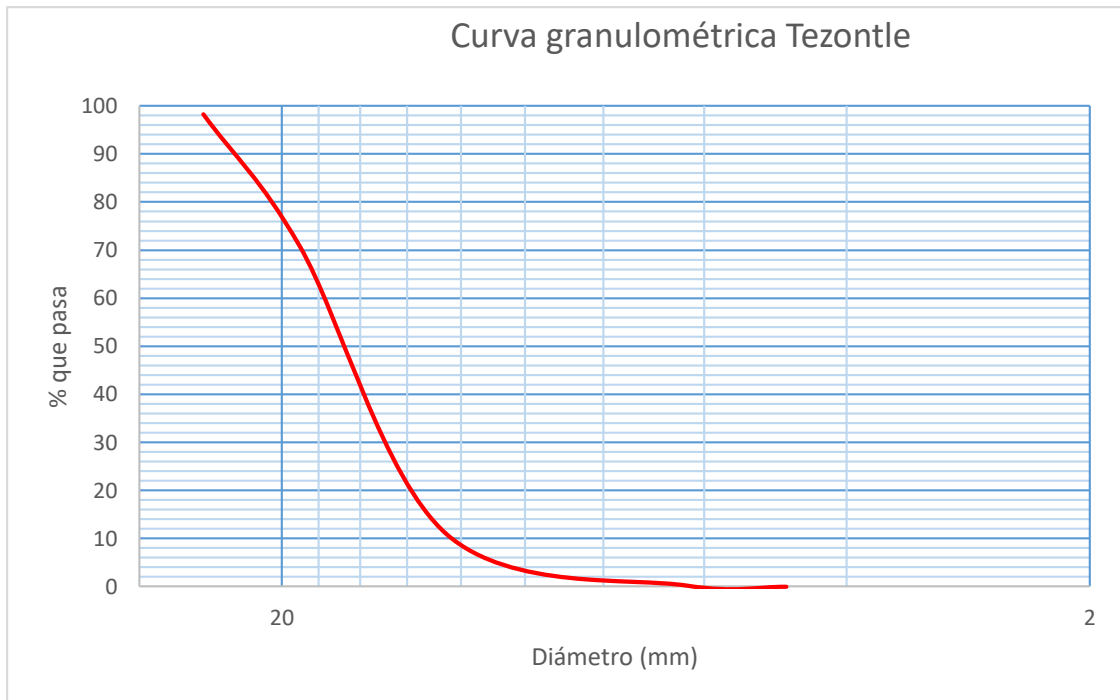
#### Tezontle

Tabla 3. Granulometría tezontle

Malla	Masa retenida (g)	Por ciento retenido (%)	Por ciento acumulativo parcial (%)	Por ciento que pasa (%)
2"	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	0	0.00	0.00	100.00
1"	230	1.74	1.74	98.26
3/4"	3615	27.41	29.15	70.85
1/2"	7905	59.93	89.08	10.92
1/4"	1410	10.69	99.77	0.23
No. 4	30	0.23	100.00	0.00
Pasa No.4	0	0.00	100.00	0
Total	13190	100.00	100	



Ilustración 13. Prueba granulométrica del tezontle



Gráfica 1. Curva granulométrica tezontle

Diámetros característicos

$D_{10} = 12.30 \text{ mm}$      $D_{60} = 17.35 \text{ mm}$

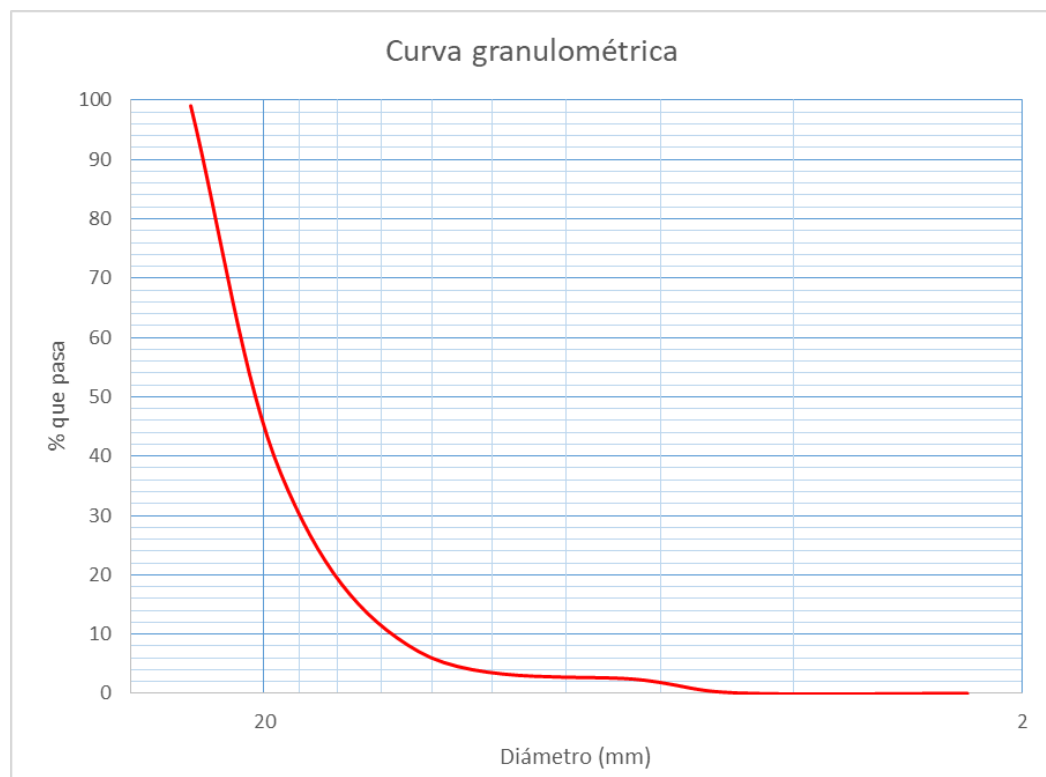
Coeficiente de uniformidad = 1.40



## Grava triturada

Tabla 4. Granulometría grava triturada

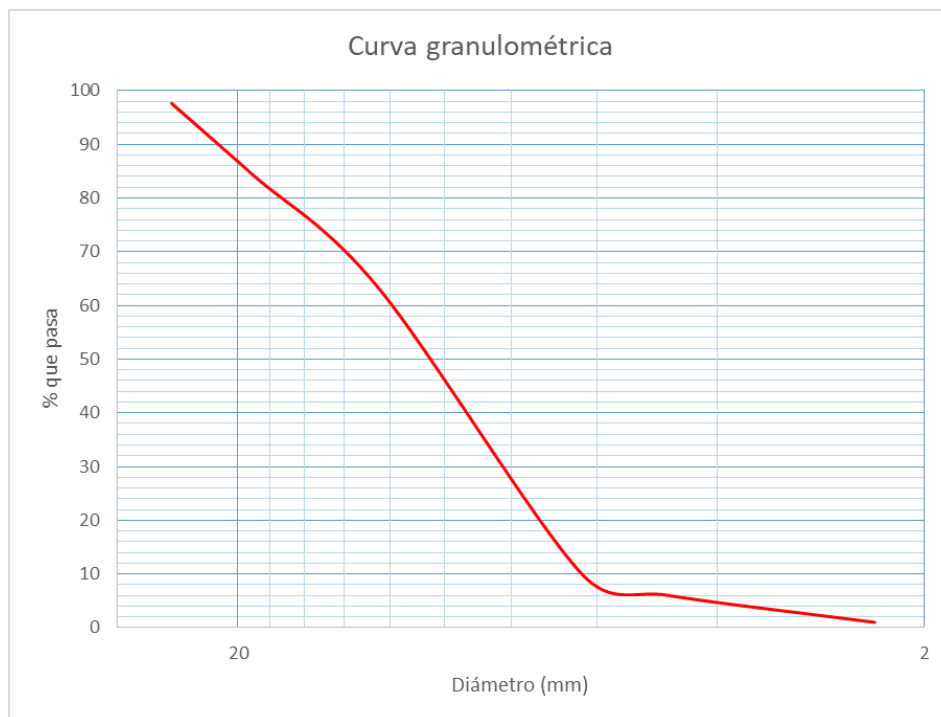
Malla	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje acumulativo parcial (%)	Porcentaje que pasa (%)
2"	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	0	0.00	0.00	100.00
1"	102	0.93	0.93	99.07
3/4"	6825	62.05	62.98	37.02
1/2"	3295	29.96	92.94	7.06
1/4"	531	4.83	97.76	2.24
No. 4	235	2.14	99.90	0.10
Pasa No.4	11	0.10	100.00	0
Total	10999	100.00	100	



## Gravilla-tezontle

Tabla 5. Granulometría gravilla-tezontle

Malla	Masa retenida (g)	Por ciento retenido (%)	Por ciento acumulativo parcial (%)	Por ciento que pasa (%)
2"	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	0	0.00	0.00	100.00
1"	277	2.37	2.37	97.63
3/4"	1565	13.38	15.75	84.25
1/2"	2445	20.90	36.65	63.35
1/4"	6250	53.43	90.08	9.92
No. 4	450	3.85	93.93	6.07
Pasa No.4	710	6.07	100.00	0.00
Total	11697	100.00	100	



Gráfica 3. Curva granulométrica gravilla-tezontle

Diámetros característicos:  $D_{10} = 6.30 \text{ mm}$   $D_{60} = 12.30 \text{ mm}$

Coeficiente de uniformidad = 1.95

### 7.4.2. Absorción

La prueba se realizó con base en la norma mexicana NMX-C-166-ONNCCE-2018. Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de Agua por Secado - Método de Prueba

Cálculo del porcentaje de absorción

$$\% \text{ Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Dónde:

Mh = Masa saturada y superficialmente seca en gramos

Ms = Masa seca en gramos

Tipo de absorción	% de absorción
Baja	Menos del 2%
Media	Entre 2% y 4%
Alta	Más del 4%



Ilustración 14. Grava superficialmente seca



Ilustración 15. Secado del material pétreo

### **Tezontle**

Mh = 313 gr                      Ms = 256 gr

$$\% \text{ Absorción} = \frac{313-256}{256} * 100 = 22.26 \% \quad \rightarrow \text{Alta absorción}$$

### **Grava triturada**

Mh = 454 gr                      Ms = 446.5 gr

$$\% \text{ Absorción} = \frac{454-446.5}{446.5} * 100 = 1.65 \% \quad \rightarrow \text{Baja absorción}$$

### **Gravilla-tezontle**

Mh = 482.5 gr                      Ms = 436 gr

$$\% \text{ Absorción} = \frac{482.5-436}{436} * 100 = 10.67 \% \quad \rightarrow \text{Alta absorción}$$

### 7.4.3. Densidad

La prueba se realizó con base en la norma mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso.

Cálculo de la densidad

$$D = \frac{M}{V}$$

Dónde:

D = Densidad en  $\text{g/cm}^3$

M = Masa de la grava en gr

V = Volumen de la grava en  $\text{cm}^3$

#### Tezontle

$$D = \frac{344 \text{ gr}}{215 \text{ cm}^3} = 1.6 \text{ gr/cm}^3$$

#### Grava triturada

$$D = \frac{323 \text{ gr}}{122 \text{ cm}^3} = 2.65 \text{ gr/cm}^3$$

#### Gravilla-tezontle

$$D = \frac{493.9 \text{ gr}}{224 \text{ cm}^3} = 2.2 \text{ gr/cm}^3$$



Ilustración 16. Determinación del volumen del material

#### 7.4.4. Porosidad

La prueba se realizó con base en la norma mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso.

La porosidad es importante en el diseño del humedal ya que está afecta directamente al gasto que ingresará al humedal.

$$\text{Porosidad} = 1 - \left( \frac{\text{Vol}_{\text{real}}}{\text{Vol}_{\text{aparente}}} \right) \quad \text{Vol}_{\text{real}} = \frac{\text{Masa}}{\text{Densidad}}$$

##### Tezontle

$$\text{Porosidad} = 1 - \left( \frac{183.94 \text{ cm}^3}{500 \text{ cm}^3} \right) = 0.63$$

##### Grava triturada

$$\text{Porosidad} = 1 - \left( \frac{300.83 \text{ cm}^3}{500 \text{ cm}^3} \right) = 0.40$$

##### Gravilla-tezontle

$$\text{Porosidad} = 1 - \left( \frac{258.77 \text{ cm}^3}{500 \text{ cm}^3} \right) = 0.49$$

## 7.5. Diseño del humedal experimental.

Para el diseño del humedal subsuperficial de flujo horizontal se partió de un espacio disponible para la construcción del modelo de 0.70 metros de ancho y 2.10 metros de largo, lo que resulta en un área de 1.47 metros cuadrados por módulo.

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

Los datos de diseño para los valores de DBO y SST del influente se tomaron de recomendaciones del libro Metcalf & Eddy.

Se aplica la ecuación de Arrhenius considerando el mes más frío en el cuál la temperatura media es de 7 °C

$$Kt = K_{20} 1.06^{T-20}$$

$$Kt = (1.104) 1.06^{7-20}$$

$$Kt = 0.5176 d^{-1}$$

Ahora se calculara la DBO en el efluente para así poder calcular el porcentaje de remoción del humedal.

$$DBO_{ef} = DBO_{inf} e^{(-kt)}$$

Dónde:

DBO<sub>ef</sub> = DBO en el efluente

DBO<sub>inf</sub> = DBO en el influente

Kt = Constante cinética

t = tiempo de retención hidráulico

$$DBO_{ef} = 220 \text{ mg/l} * e^{(-.5176 \text{ d}^{-1} * 7\text{d})}$$

$$DBO_{ef} = 5.87 \text{ mg/l}$$

$$\text{Eficiencia de remoción de la DBO} = \frac{DBO_{inf} - DBO_{ef}}{DBO_{inf}} = \frac{220 \text{ mg/l} - 5.87 \text{ mg/l}}{220 \text{ mg/l}} * 100$$

$$\text{Eficiencia de remoción de la DBO} = 97.33 \%$$

Debido a que las anteriores ecuaciones no se toman en cuenta las características del medio de soporte para el cálculo de la remoción de DBO se considerará una eficiencia de remoción del 97.33 % para cada uno de los 3 humedales

Ahora se procederá a calcular el gasto, así como el porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales en cada uno de los 3 diferentes humedales, en este caso debido a que el gasto a tratar depende de la porosidad del material, y a su vez la remoción de los sólidos suspendidos totales dependen del gasto, se realizó el cálculo para cada uno de los 3 humedales. El coeficiente de porosidad del material, que se utilizó en el cálculo de cada módulo fue el que se obtuvo en el subcapítulo anterior.

Ecuación 1. Cálculo del gasto a tratar.

$$Q = \frac{As Kt d n}{[\ln(DBO_{inf}) - \ln(DBO_{ef})]}$$

Dónde:

Q = Gasto

As = Área superficial

kt = Constante cinética

d = Profundidad del humedal

n = Coeficiente de porosidad del material

DBO<sub>inf</sub> = DBO en el influente

DBO<sub>ef</sub> = DBO en el efluente



Ecuación 2. Cálculo de los sólidos suspendidos totales en el efluente

$$SST_{ef} = SST_{inf} \left( 0.1058 + 0.0011 \frac{100 Q}{As} \right)$$

Ecuación 3

$$\text{Eficiencia de remoción de los SST} = \frac{SST_{inf} - SST_{ef}}{SST_{inf}} * 100$$

**Tezontle**

$$Q = \frac{1.47 m^2 * 0.5176 d^{-1} * 0.70 m * 0.63}{[\ln(220 mg/l) - \ln(5.87 mg/l)]}$$

$$Q = 0.09259 m^3/d$$

$$Q = 92.59 l/d$$

$$SST_{ef} = 220 mg/l \left( 0.1058 + 0.0011 \frac{(100 * 0.09259 \frac{m^3}{día})}{1.47 m^2} \right)$$

$$SST_{ef} = 24.80 mg/l$$

$$\text{Eficiencia de remoción de los SST} = \frac{220 mg/l - 24.80 mg/l}{220 mg/l} * 100$$

Eficiencia de remoción de los SST = 88.72 %

### Grava triturada

$$Q = \frac{1.47 \text{ m}^2 * 0.5176 \text{ d}^{-1} * 0.70 \text{ m} * 0.40}{[\ln(220 \text{ mg/l}) - \ln(5.87 \text{ mg/l})]}$$

$$Q = 0.05879 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q = 58.79 \text{ l/d}$$

$$SST_{ef} = 220 \text{ mg/l} \left( 0.1058 + 0.0011 \frac{(100 * 0.06026 \frac{\text{m}^3}{\text{día}})}{1.47 \text{ m}^2} \right)$$

$$SST_{ef} = 24.27 \text{ mg/l}$$

$$\text{Eficiencia de remoción de los SST} = \frac{220 \text{ mg/l} - 24.27 \text{ mg/l}}{220 \text{ mg/l}} * 100$$

$$\text{Eficiencia de remoción de los SST} = 88.96 \%$$

## Gravilla-tezontle

$$Q = \frac{1.47 \text{ m}^2 * 0.5176 \text{ d}^{-1} * 0.70 \text{ m} * 0.49}{[\ln(220 \text{ mg/l}) - \ln(5.87 \text{ mg/l})]}$$

$$Q = 0.07201 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q = 72.01 \text{ l/d}$$

$$SST_{ef} = 220 \text{ mg/l} \left( 0.1058 + 0.0011 \frac{(100 * 0.07495 \frac{\text{m}^3}{\text{día}})}{1.47 \text{ m}^2} \right)$$

$$SST_{ef} = 24.51 \text{ mg/l}$$

$$\text{Eficiencia de remoción de los SST} = \frac{220 \text{ mg/l} - 24.51 \text{ mg/l}}{220 \text{ mg/l}} * 100$$

$$\text{Eficiencia de remoción de los SST} = 88.86 \%$$

## 7.6. Construcción del humedal experimental

Primeramente se delimitó con hilo y cal el área dónde se instalarían los 4 módulos de los humedales artificiales.



Ilustración 17. Delimitación del humedal

Debido a la irregularidad del terreno, primeramente se tuvo que quitar las irregularidades del terreno para que este quedase completamente plano.



Ilustración 18. Nivelación del terreno

Una vez nivelado el terreno se delimitó de nuevo los módulos de los humedales para empezar con la excavación. Se dejó una separación de 20 centímetros entre cada uno de los 4 módulos, debido a que en cada uno se usará una combinación de vegetación con medio de soporte distinta.



Ilustración 19. Delimitación de los módulos de los humedales

La excavación se realizó a una distancia aproximada de 1.5 metros del clarificador de la planta de tratamiento, ya que contiguo al clarificador se encuentra una depresión la cual se inunda con suma facilidad, también se dejó una distancia de 1 metro de la reja que separa la planta de tratamiento con el auditorio de usos múltiples para tener espacio suficiente para la instalación de la geomembrana, así como para acceder con facilidad cuándo se tenga que hacer algún muestreo del efluente.



Ilustración 20. Inicio de excavación

Con el mismo material de la excavación se realizó una pared de soporte alrededor del humedal, la cual tendrá una altura de 40 cm, con esto se podrá subir el nivel de terreno y reducir a la mitad la profundidad de la excavación.



Ilustración 21. Pared de soporte del humedal

Una vez terminada la excavación se procedió con la instalación hidráulica, se colocó una válvula de 2 pulgadas después del cárcamo de bombeo para desviar el flujo del agua, y así llenar un tinaco de 450 litros el cuál se utilizó para almacenar el agua que se le iba a suministrar a los humedales.



Ilustración 22. Colocación de la válvula



Ilustración 23. Tinaco para almacenamiento del agua residual



Se prosiguió con la instalación de la tubería desde el tinaco hasta el área de los humedales. Se utilizó tubería de 1 pulgada de pvc hidráulico.



Ilustración 24. Tubería tinaco - humedales

Se utilizó geomembrana de polietileno alta densidad de 1 mm de grosor, para evitar que hubiese filtraciones de agua del exterior, ya que como la zona dónde se instalaron los humedales se encuentra a 30 centímetros del área de inundación dónde descarga la planta de tratamiento, se podría llegar infiltrar agua a la zona de experimentación y afectar los resultados; además también podría filtrarse agua aún sin tratar hacia el subsuelo, ocasionando que este se contaminase. Primeramente se cortó la geomembrana a la medida necesaria para que se acomodasen debidamente en los módulos excavados.



Ilustración 25. Geomembrana de 1 mm de grosor

Debido a que no se contaba con las herramientas necesarias para garantizar un correcto sellado de las geomembranas se decidió llevar estas a la empresa AQUALMA para que las pegasen y sellasen debidamente.



Ilustración 26. Geomembrana armada

Se continuó con la colocación de las geomembranas, así como la instalación de la tubería de salida de los humedales, por dónde se descarga el agua ya una vez tratada.



Ilustración 27. Colocación de la tubería de salida



Se cribo el tezontle a través de una malla con una abertura de 1.20 mm, desechándose el material menor a 1.20 mm.



Ilustración 28. Cribado del medio de soporte

Se continuó con la colocación del medio de soporte en los humedales.



Ilustración 29. Colocación del medio de soporte

Una vez se terminó con la colocación del medio de soporte se prosiguió con el trasplante de la vegetación, para esto se tuvo que sacar cuidadosamente la planta con todo y rizoma, después se realizó una excavación con una profundidad de 30 cm en el medio de soporte del humedal para colocar la planta.

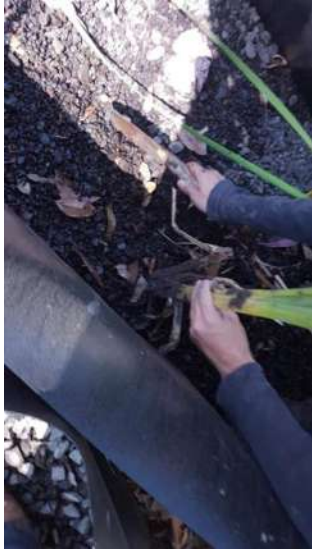


Ilustración 31. Colocación de la vegetación en el humedal



Ilustración 30. Trasplante de la vegetación

Se continuó con la instalación de 4 válvulas, 1 válvula a la entrada de cada modelo, ya que debido a que el gasto necesario es muy pequeño, se utilizaron estas válvulas para dosificar adecuadamente el gasto necesario. También se instalaron tubos horizontales en las entradas para que el influente se distribuyese uniformemente a lo ancho de todo el humedal.



Ilustración 32. Tubería de ingreso al humedal

Una vez terminada el trasplante de la vegetación, se comenzó con el aforo del influente, para poder ajustar la abertura de las válvulas de entrada hasta que ingresase el gasto calculado para cada uno de los módulos.



Ilustración 33. Aforo del influente



### 7.7. Monitoreo del desarrollo y crecimiento de la vegetación.

Se observó que la vegetación se ha desarrollado de forma adecuada en los 3 humedales artificiales.

El primer muestreo se llevó a cabo durante la segunda semana del mes de enero del año del 2019, cuando fue realizado este muestreo la mayoría de la vegetación tenía una altura que oscilaba entre los 60 y 110 centímetros.



Ilustración 34. Desarrollo de la vegetación primer muestreo.

Durante el segundo muestreo realizado en la primera semana del mes de abril del presente año, la vegetación ya rondaba una altura entre 100 a 140 centímetros, pero aún no había brotes de nuevas plantas.



Ilustración 35. Desarrollo de la vegetación segundo muestreo

En la última semana de julio cuándo fue realizado el tercer muestreo la vegetación que se trasplanto inicialmente, ya tenía una altura entre 170 y 240 centímetros, además de nueva vegetación que emergió la cual ya contaba con una altura entre 90 y 150 centímetros.

De los 3 humedales en los que la vegetación tuvo un menor crecimiento fue en el que se utilizó tezontle-gravilla como medio de soporte, ya que en este humedal la vegetación tenía una altura entre 170 y 220 centímetros.



Ilustración 36. Desarrollo de la vegetación tercer muestreo

## 7.8. Monitoreo de la eficiencia de remoción.

Se propuso realizar tres muestreos y análisis de la calidad del agua tratada por los humedales, el primero de estos se realizó mes y medio después de que se implementó el modelo, el segundo muestreo 3 meses después del primer muestreo, y posteriormente el último muestreo se llevó a cabo seis meses después del primer muestreo.

### 7.8.1. Primer muestreo.

Se tomaron 4 muestras de 1.5 litros cada una para su respectivo análisis físico-químico, 3 de estas a la salida de los diferentes humedales una vez ya tratada el agua; y 1 más correspondiente al influente de los humedales. De igual manera se tomaron 4 muestras de 125 ml en bolsas estériles con cierre hermético para la realización del análisis bacteriológico.



Ilustración 37. Muestreo en campo



Ilustración 38. Muestras para análisis físico-químico



Ilustración 39. Muestras para análisis bacteriológico

### 7.8.1.1. Determinación de los parámetros de campo

Se determinaron los parámetros de campo tales como temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad electrolítica y salinidad, valores base que nos sirven de referencia para conocer las condiciones del agua tanto en el influente como en el efluente.

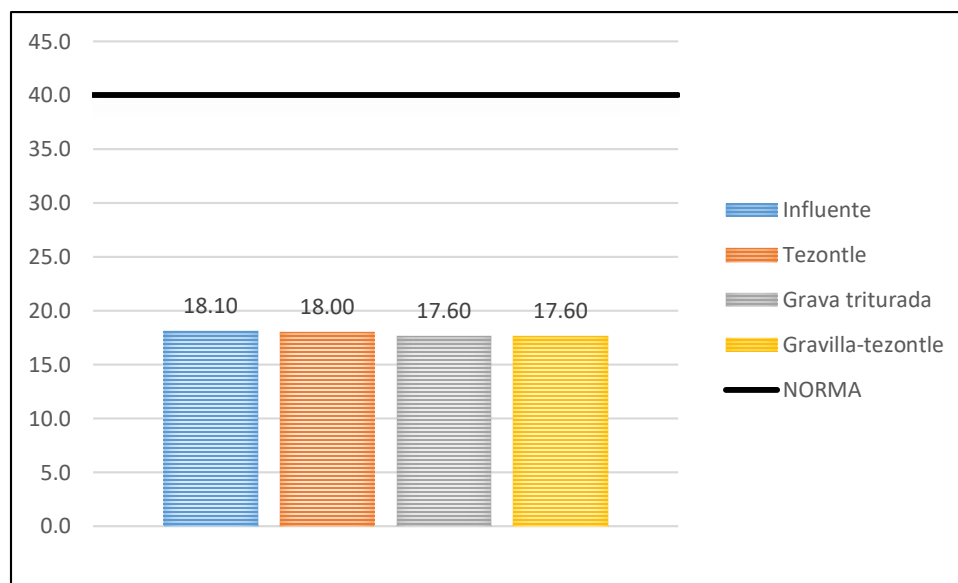
Tabla 6. Muestreo 1. Parámetros de campo

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible
Conductividad electrolítica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	901	734	733	808	_____
Salinidad (ppt)	0.4	0.4	0.4	0.4	_____
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	18.1	18	17.6	17.6	40 *
pH	7.4	7.7	7.7	7.7	5 – 10 *
Oxígeno disuelto (mg/L)	1.16	4.52	3.36	4.72	>5 **

\*NOM-001-SEMARNAT-1996

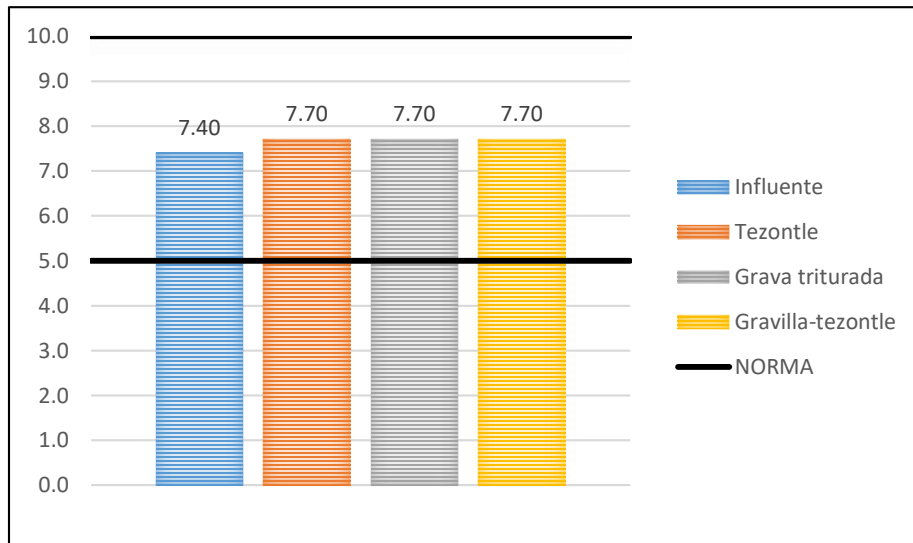
\*\* Niveles compatibles con la vida de los peces. Colas R. (1972).

### Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )



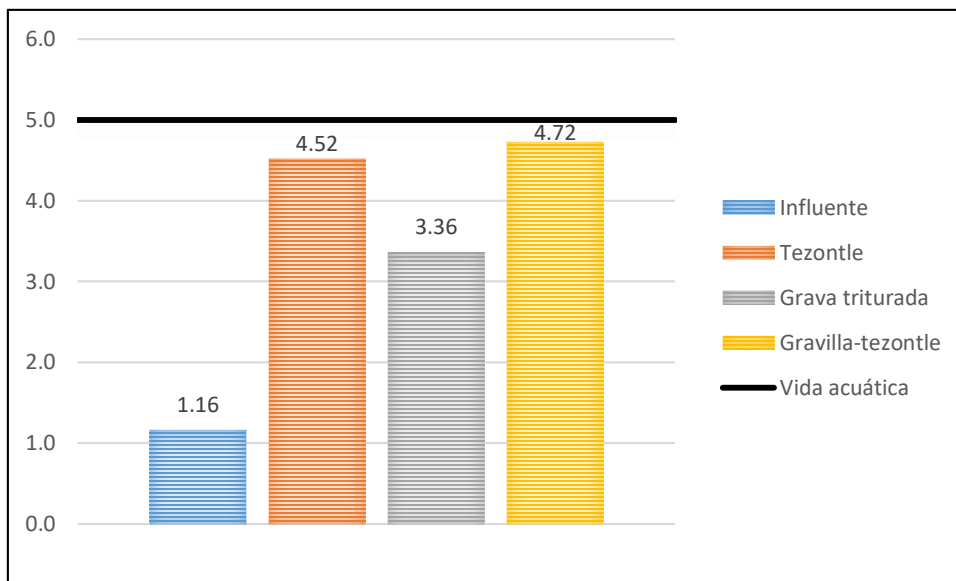
Gráfica 4. Muestreo 1. Comparación de la temperatura de las muestras con la norma

## pH



Gráfica 5. Muestreo 1. Comparación del pH de las muestras con la norma

## Oxígeno disuelto (mg/L)



Gráfica 6. Muestreo 1. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática



### 7.8.1.2. Determinación de los sólidos en todas sus formas

Es importante determinar la cantidad de sólidos así como su remoción ya que la mayoría de contaminantes son sólidos.

Para la determinación de los sólidos sedimentables se utilizó el cono Imhoff.



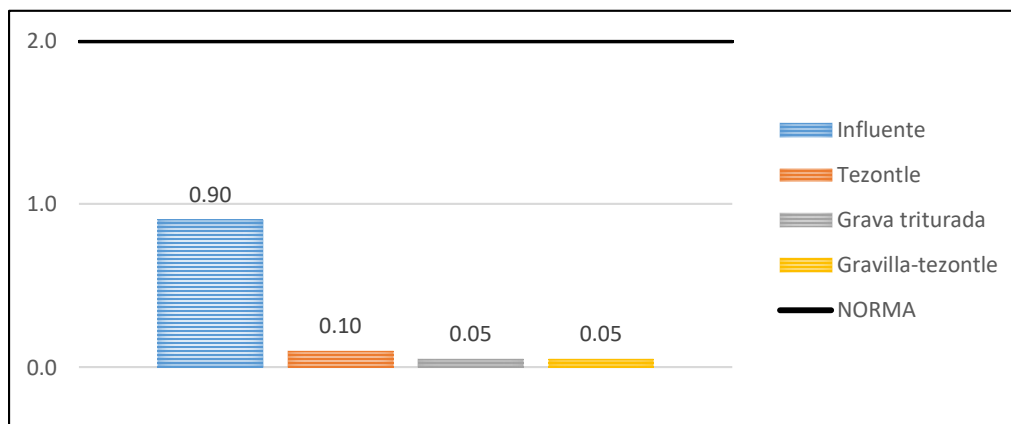
Ilustración 40. Muestreo 1. Medición de los sólidos sedimentables

Tabla 7. Muestreo 1. Sólidos sedimentables

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible	
Sólidos Sedimentables (mL/L)	0.9	0.1	0.1	0.05	2*	

\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Promedio diario.

### Sólidos sedimentables (mL/L)



Gráfica 7. Muestreo 1. Comparación de los sólidos sedimentables en las muestras con la norma.

Para la determinación de los sólidos en cada una de sus formas se utilizaron métodos gravimétricos.

Tabla 8. Muestreo 1. Sólidos en todas sus formas

Parámetro	Influyente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle
ST	572	480	492	436
SST	145	76	68	51
SDT	427	404	424	385
SSF	99	62	43	29
SSV	46	14	25	22
SDF	86	58	51	62
SDV	341	336	373	323

Sólidos Totales (ST). Es importante medir la cantidad de material sólido, ya que la mayor parte de los contaminantes de agua son sólidos, ya sean disueltos o suspendidos.

Sólidos Suspendidos Totales (SST). Sólidos suspendidos totales. Es uno de los parámetros usados para valorar la concentración de las aguas residuales domésticas y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento.

Sólidos Disueltos Totales (SDT). Esta medida indica la capacidad de una muestra para conducir la corriente eléctrica, la cual a su vez está relacionada con la concentración de las sustancias ionizadas en el agua.

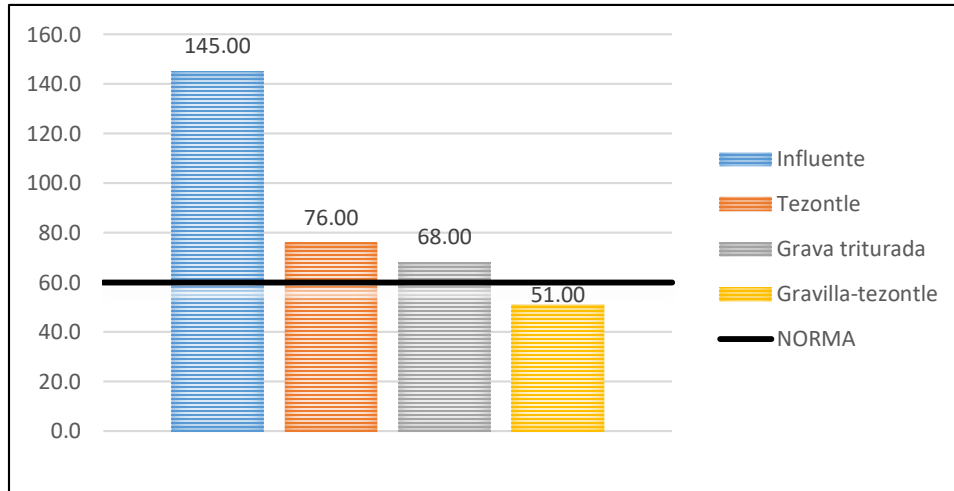
Sólidos Totales Fijos (STF) y Sólidos Totales Volátiles (STV). El principal objetivo para efectuar estas determinaciones en aguas residuales domésticas e industriales, es obtener una medida de la cantidad de materia orgánica presente. (UMSNH, 2018)

Tabla 9. Muestreo 1. Sólidos suspendidos totales

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible
SST (mg/L)	145	76	68	51	60*

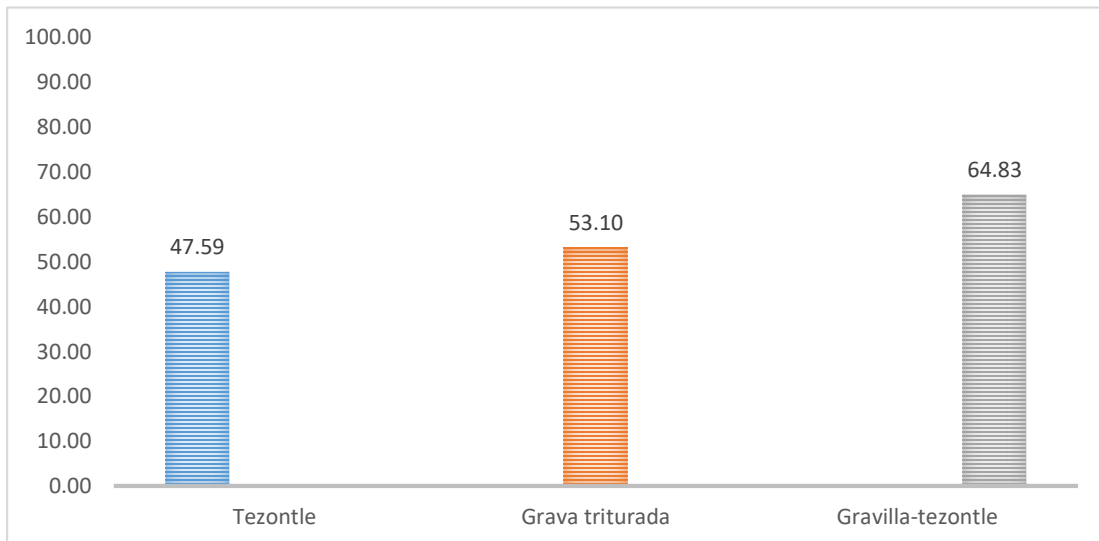
\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Protección de vida acuática. Promedio diario.

### Sólidos suspendidos totales (mg/L)



Gráfica 8. Muestreo 1. Comparación de los SST en las muestras con la norma

### Remoción de SST (%)



Gráfica 9. Porcentaje de remoción de SST en los humedales

### 7.8.1.3. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En esta prueba se utilizó un método colorimétrico y se usó un espectrofotómetro para realizar la medición de la DQO.

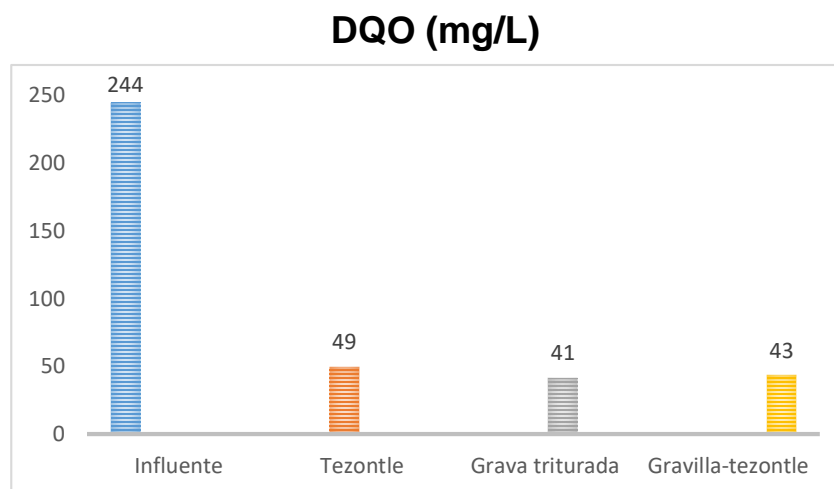
Esta prueba es importante ya que es un índice de calidad del agua, además que en un par de horas podemos obtener un valor aproximado de la DBO sin la necesidad de esperar los que 5 días que marca la norma para la prueba de DBO<sub>5</sub>.



Ilustración 41. Lectura de la DQO en el espectrofotómetro

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle
DQO (mg/L)	244	49	41	43

Tabla 10. Muestreo 1. Valores de DQO en las muestras



Gráfica 10. Muestreo 1. Valores de DQO en las muestras

#### 7.8.1.4. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Para la determinación de la DBO<sub>5</sub> se utilizó un método electrométrico con base en la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas método de prueba.

La DBO<sub>5</sub> es importante ya que es un indicador de que tan contaminada se encuentra el agua, y es uno de los principales factores al momento de realizar el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales.



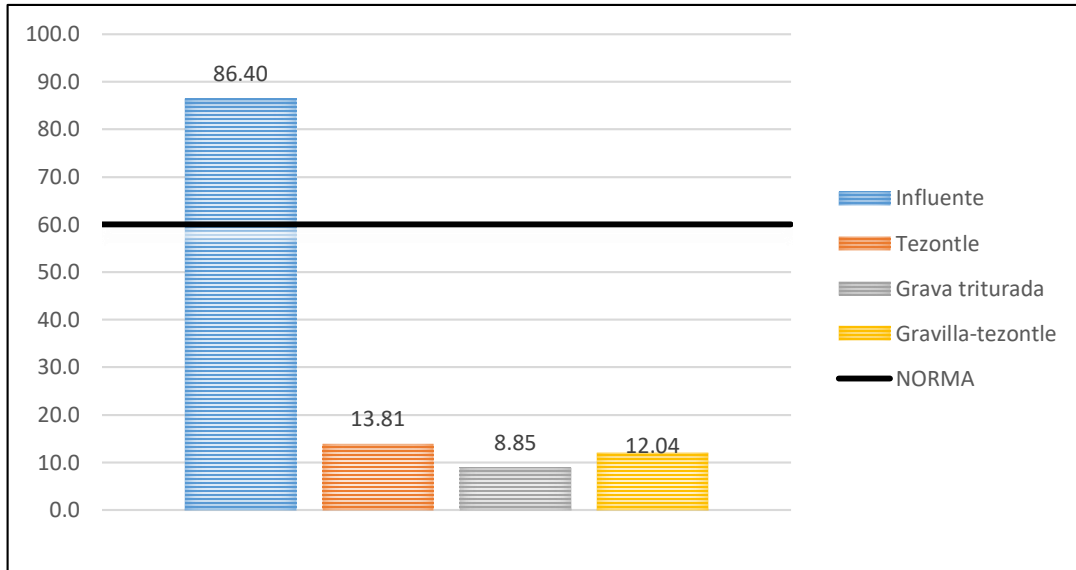
Ilustración 42. Determinación del oxígeno disuelto para la prueba de DBO<sub>5</sub>

Tabla 11. Muestreo 1. Valores de DBO<sub>5</sub>

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	86.4	13.81	8.85	12.04	60*

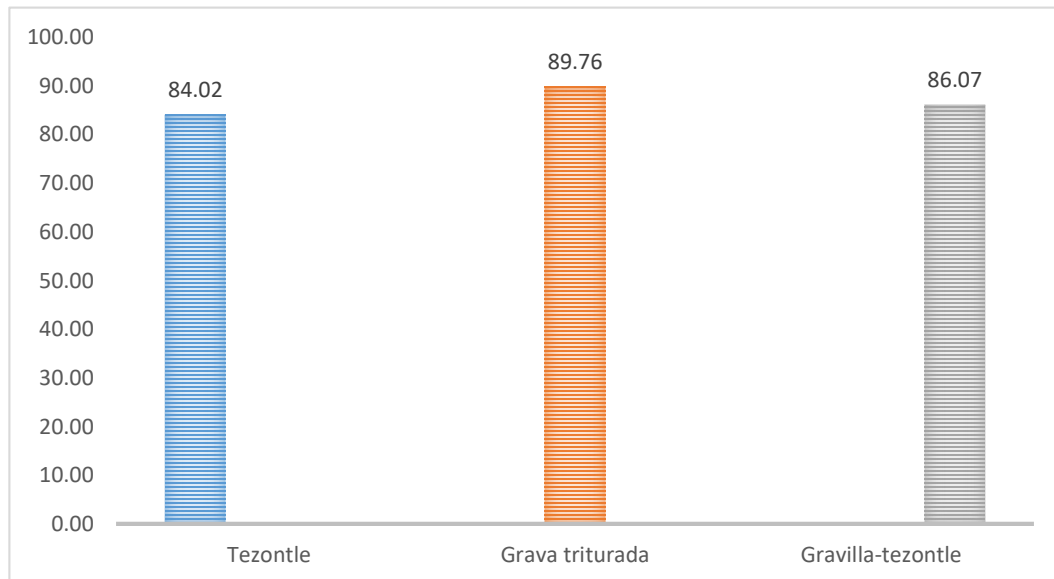
\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Protección de vida acuática. Promedio diario.

### DBO<sub>5</sub> (mg/L)



Gráfica 11. Muestreo 1. Comparación de la DBO<sub>5</sub> en las muestras con la norma

### Remoción de DBO<sub>5</sub> (%)



Gráfica 12. Muestreo 1. Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> en los humedales

### 7.8.1.5. Determinación de microorganismos coliformes fecales

Para la determinación de los coliformes fecales se siguió el procedimiento estipulado en la norma mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua - enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y escherichia coli método del número más probable en tubos múltiples.

La prueba se realizó utilizando el método del número más probable con una serie de 3 tubos y las diluciones que se utilizaron variaron dependiendo si era influente o efluente la muestra.



Ilustración 43. Determinación de los coliformes fecales usando la técnica del número más probable

Tabla 12. Muestreo 1. Comparación de coliformes fecales en las muestras con la norma

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla	Límite máximo permisible
<b>C.F (NMP/100ml)</b>	2.3 X 10 <sup>6</sup>	23000	7000	<3000	2000*

\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Promedio diario.

Tabla 13. Muestreo 1. Porcentaje de remoción de coliformes fecales en los humedales

	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla
<b>% de remoción de C.F.</b>	99	99.70	99.99

## 7.8.2. Segundo muestreo.

El segundo muestreo se realizó durante la primera semana de abril

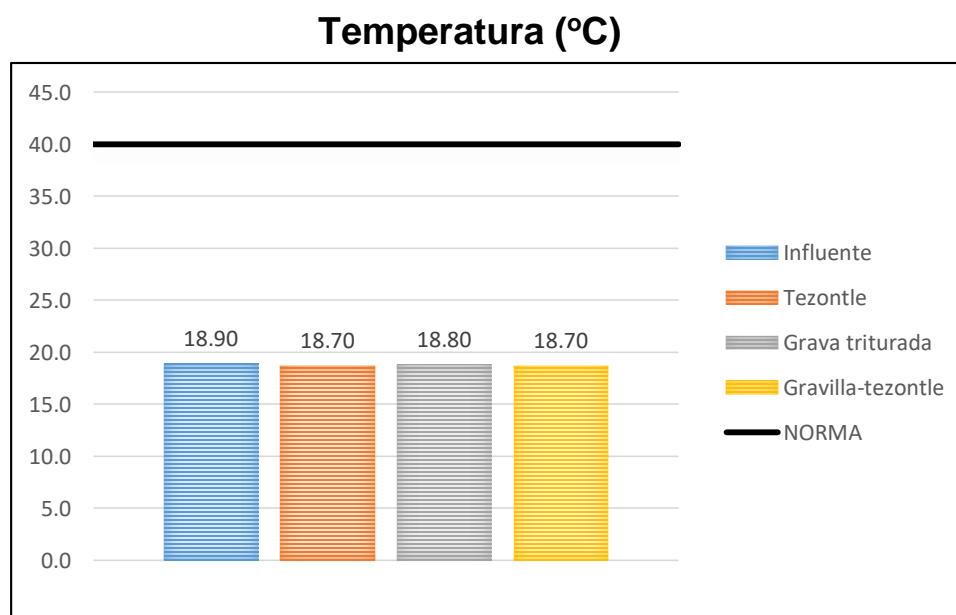
### 7.8.2.1. Determinación de los parámetros de campo

Tabla 14. Muestreo 2. Parámetros de campo

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-Tezontle	Límite máximo permisible
Conductividad electrolítica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1598	2070	1685	2100	_____
Salinidad (ppt)	0.8	1	0.8	1	_____
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	18.9	18.7	18.8	18.7	40 *
pH	8	7.9	7.8	7.8	5 – 10 *
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.37	5.37	2.67	4.51	>5 **

\*NOM-001-SEMARNAT-1996

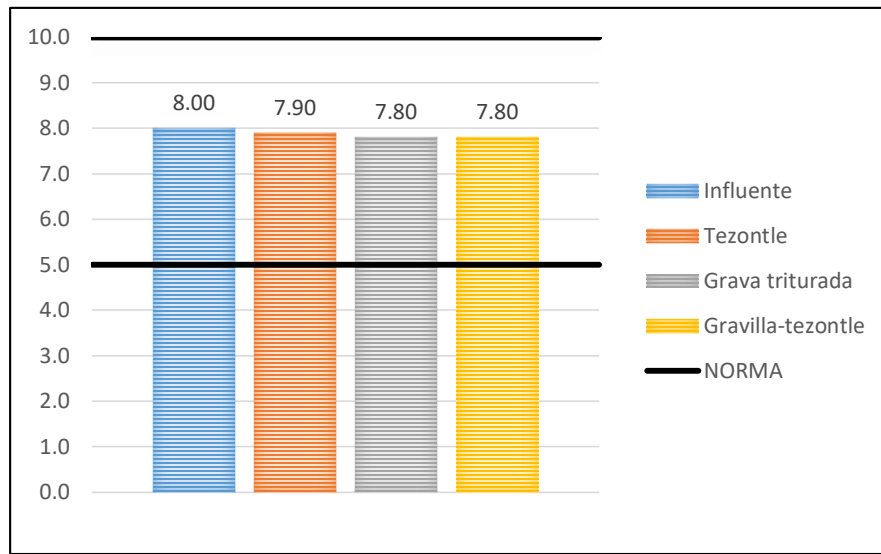
\*\* Niveles compatibles con la vida de los peces. Colas R. (1972).



Gráfica 13. Muestreo 2. Comparación de la temperatura de las muestras con la norma

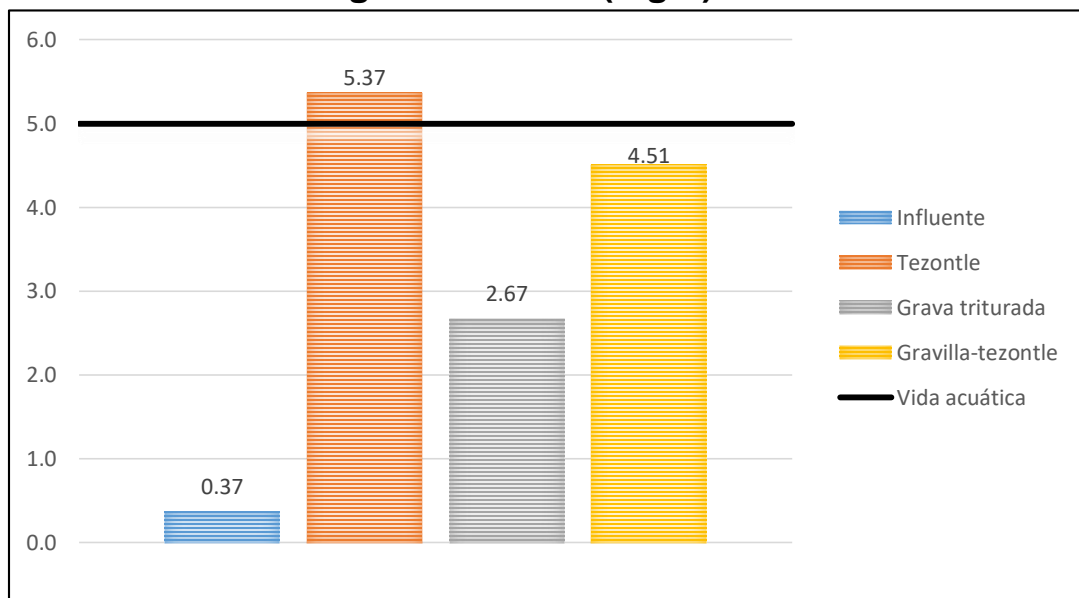


## pH



Gráfica 14. Muestreo 2. Comparación del pH de las muestras con la norma

## Oxígeno disuelto (mg/L)



Gráfica 15. Muestreo 2. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática

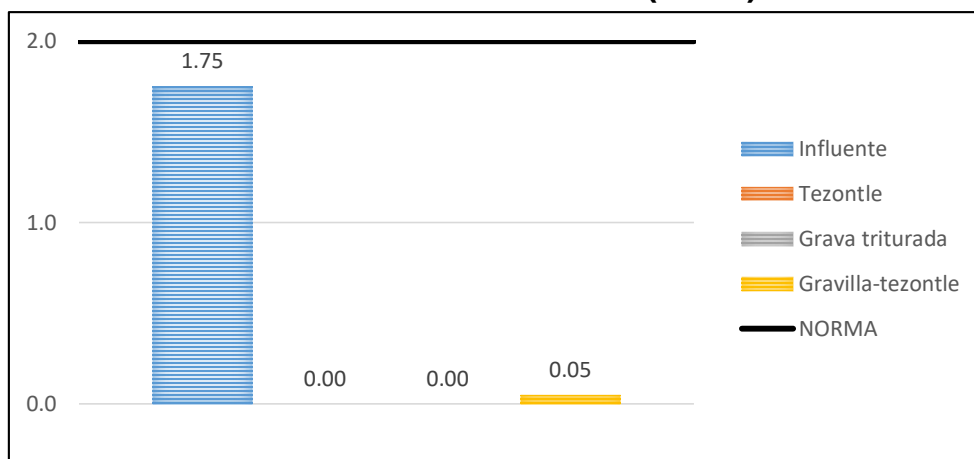
### 7.8.2.2. Determinación de los sólidos en todas sus formas

Tabla 15. Muestreo 2. Sólidos sedimentables

Parámetro	Influyente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible
Sólidos sedimentables (mL/L)	1.75	0	0	0.05	2*

\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Promedio diario.

#### Sólidos sedimentables (mL/L)



Gráfica 16. Muestreo 2. Comparación de los sólidos sedimentables en las muestras con la norma

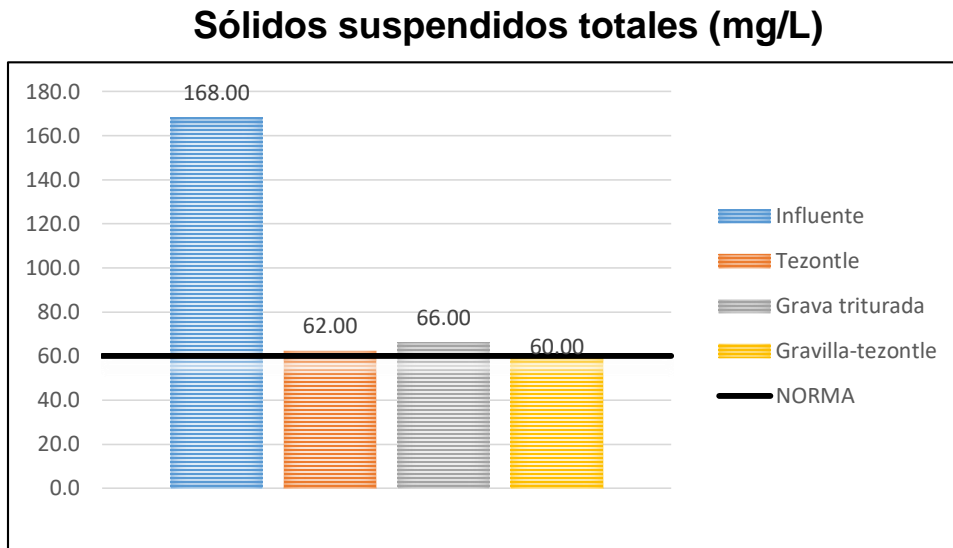
Tabla 16. Muestreo 2. Sólidos en todas sus formas

Parámetro	Influyente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla
ST	784	815	872	796
SST	168	62	66	60
SDT	616	754	807	736
SSF	54	21	22	20
SSV	114	41	44	40
SDF	486	615	658	600
SDV	130	139	149	130

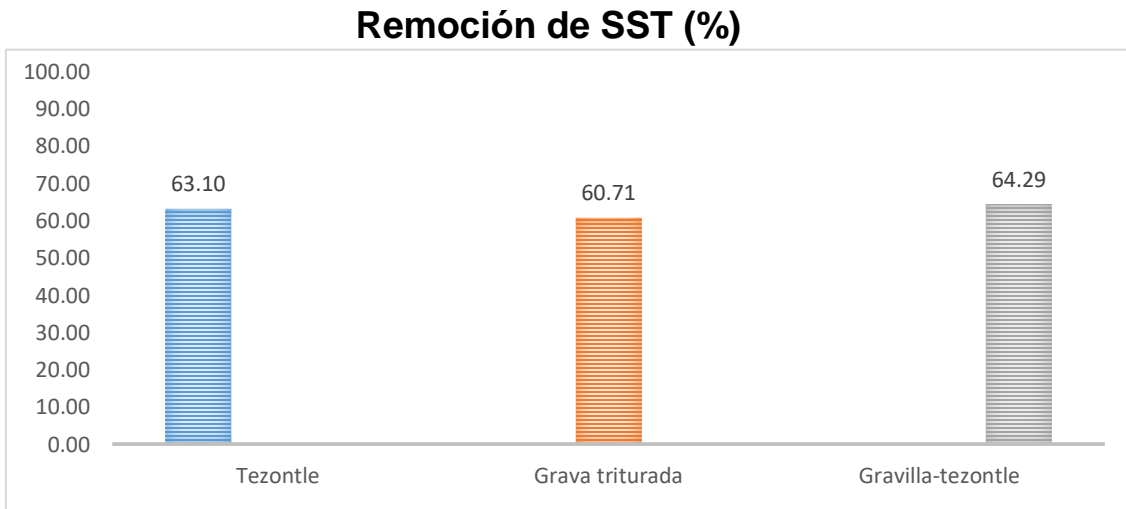
Tabla 17. Muestreo 2. Sólidos suspendidos totales

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla	Límite máximo permisible
SST (mg/L)	168	62	66	60	60*

\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Protección de vida acuática. Promedio diario.



Gráfica 17. Muestreo 2. Comparación de los SST en las muestras con la norma

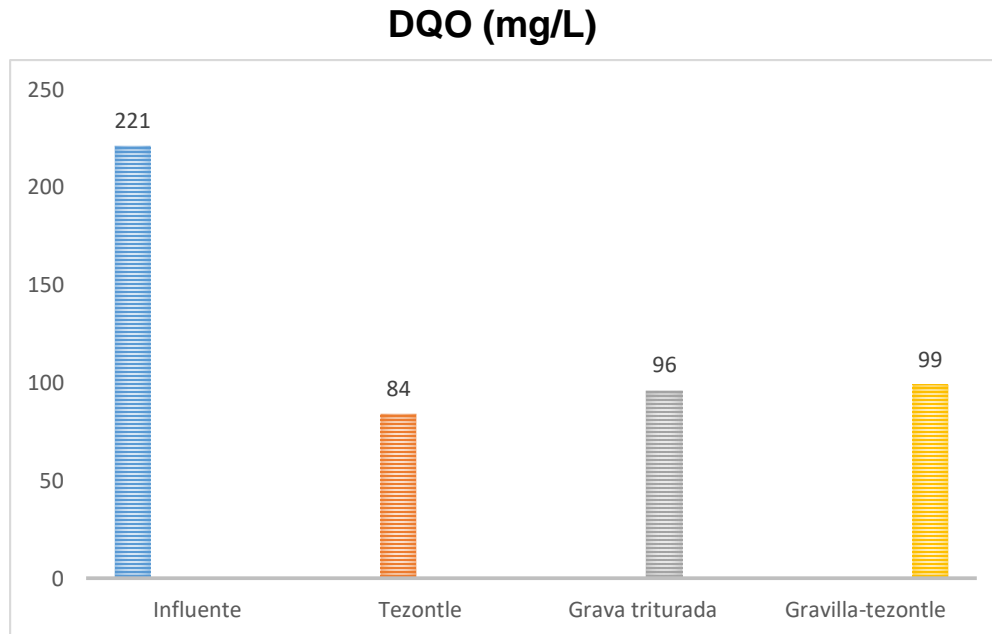


Gráfica 18. Muestreo 2. Porcentaje de remoción de SST en los humedales

### 7.8.2.3. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Tabla 18. Muestreo 2. Valores de DQO

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla
DQO (mg/L)	221	84	96	99



Gráfica 19. Muestreo 2. Valores de DQO en las muestras

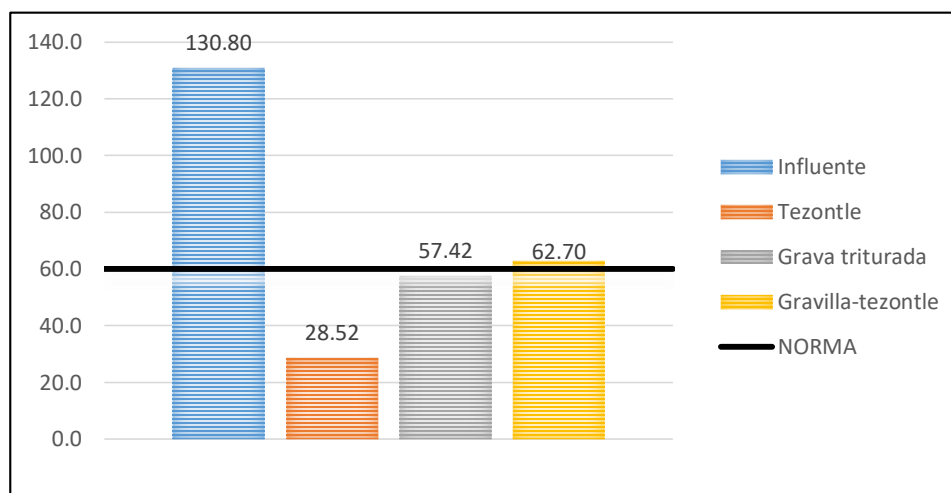
### 7.8.2.4. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Tabla 19. Muestreo 2. Valores de DBO<sub>5</sub>

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla	Límite máximo permisible
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	130.80	28.52	57.42	62.70	60*

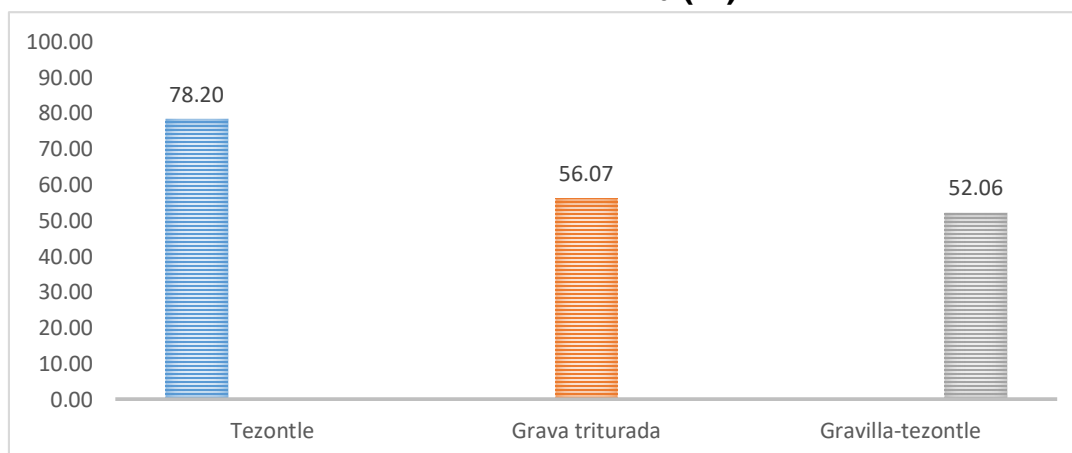
\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Protección de vida acuática. Promedio diario.

#### DBO<sub>5</sub> (mg/L)



Gráfica 20. Muestreo 2. Comparación de la DBO<sub>5</sub> en las muestras con la norma

#### Remoción de DBO<sub>5</sub> (%)



Gráfica 21. Muestreo 2. Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> en los humedales

### 7.8.2.5. Determinación de microorganismos coliformes fecales

Tabla 20. Muestreo 2. Comparación de coliformes fecales en las muestras con la norma

Parámetro	Influyente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible
C.F (NMP/100ml)	2.3 X 10 <sup>6</sup>	23000	23000	4300	2000*

\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Promedio diario.

Tabla 21. Muestreo 2. Porcentaje de remoción de coliformes fecales

	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle
% de remoción de C.F.	99	99	99.81

### 7.8.3. Tercer muestreo.

El tercer muestreo se llevó a cabo en la última semana del mes de julio.

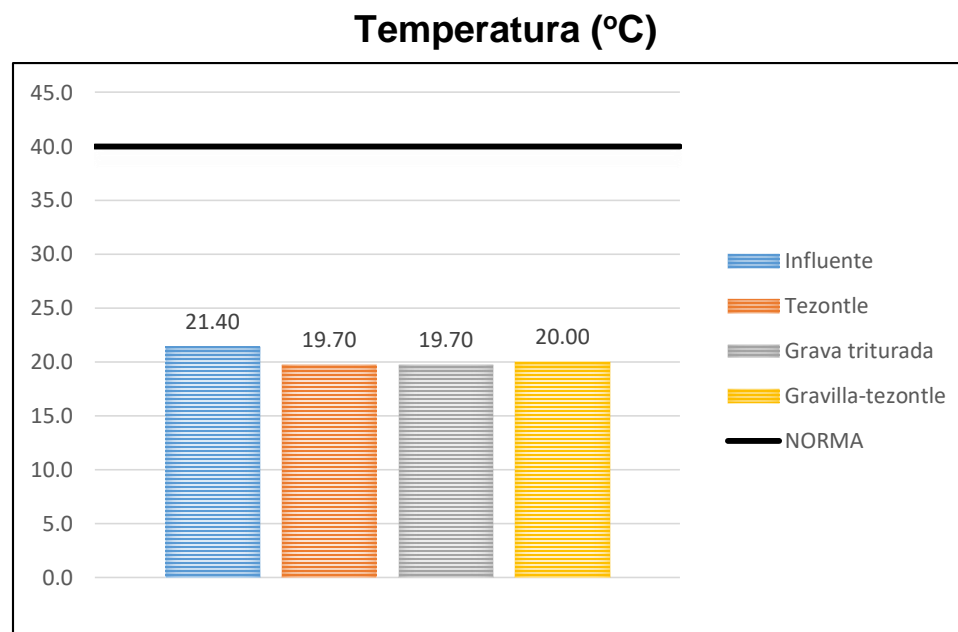
#### 7.8.3.1. Determinación de los parámetros de campo

Tabla 22. Muestreo 3. Parámetros de campo

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-Tezontle	Límite máximo permisible
Conductividad electrolítica (μS/cm)	620	722	931	612	_____
Salinidad (ppt)	0.3	0.4	0.5	0.3	_____
Temperatura (°C)	21.4	19.5	19.7	20	40 *
pH	7.2	7.4	7.2	7.2	5 – 10 *
Oxígeno disuelto (mg/L)	1.82	3.85	2.85	3.52	>5 **

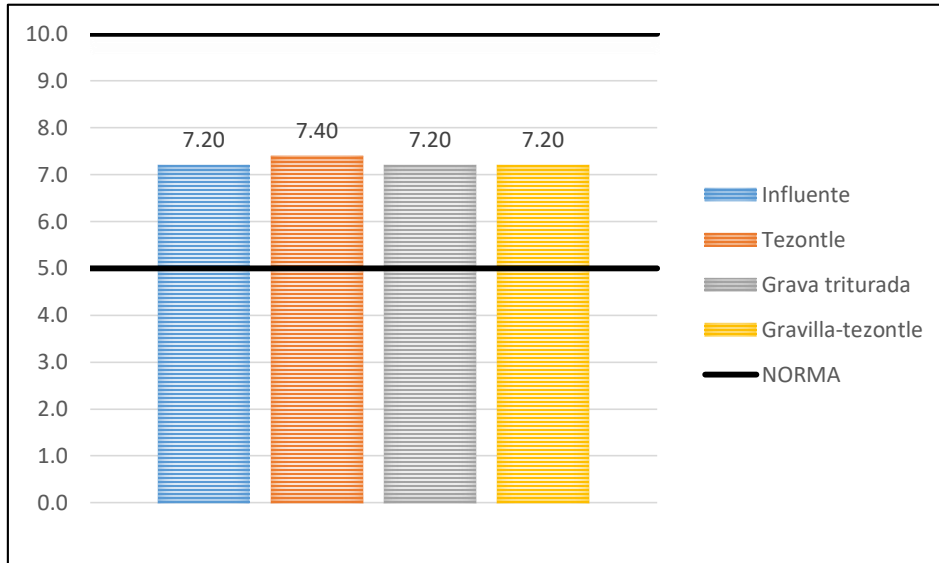
\*NOM-001-SEMARNAT-1996

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



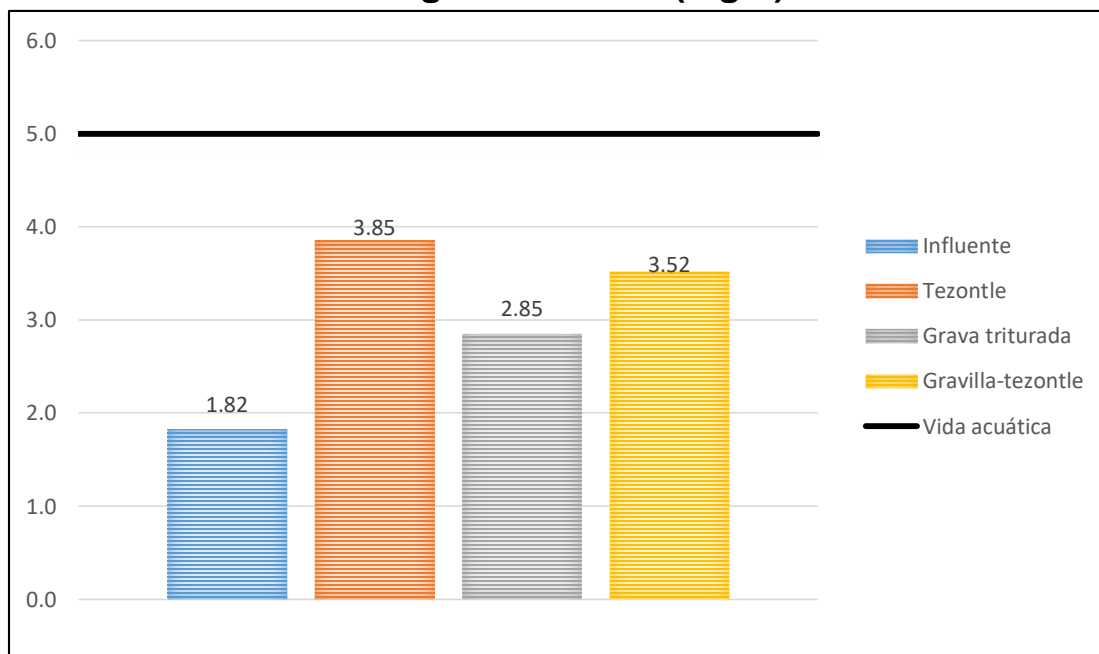
Gráfica 22. Muestreo 3. Comparación de la temperatura de las muestras con la norma

## pH



Gráfica 23. Muestreo 3. Comparación del pH de las muestras con la norma

## Oxígeno disuelto (mg/L)



Gráfica 24. Muestreo 3. Comparación del oxígeno disuelto en las muestras con el nivel compatible para vida acuática



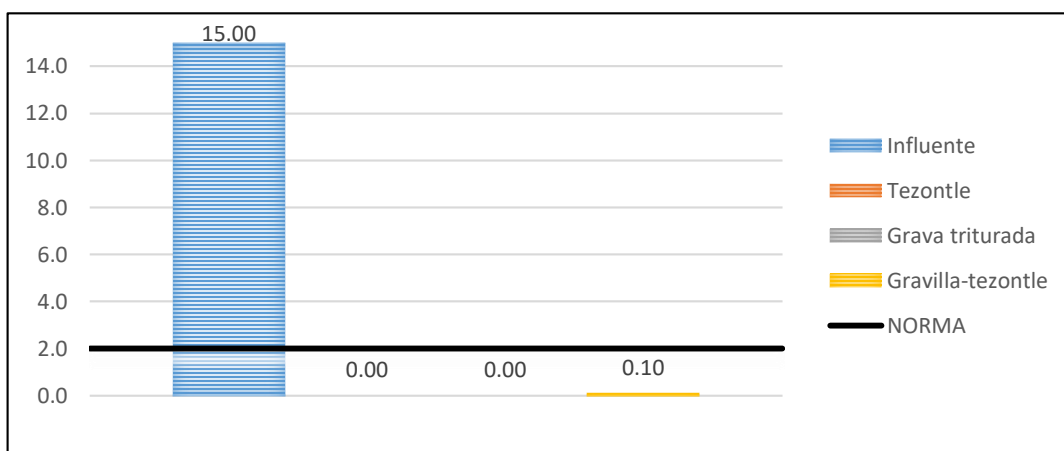
### 7.8.3.2. Determinación de los sólidos en todas sus formas

Tabla 23. Muestreo 3. Sólidos sedimentables

Parámetro	Influyente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible
Sólidos sedimentables (mL/L)	15	0	0	0.10	2*

\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Promedio diario.

### Sólidos sedimentables (mL/L)



Gráfica 25. Muestreo 3. Comparación de los sólidos sedimentables en las muestras con la norma

Tabla 24. Muestreo 3. Sólidos en todas sus formas

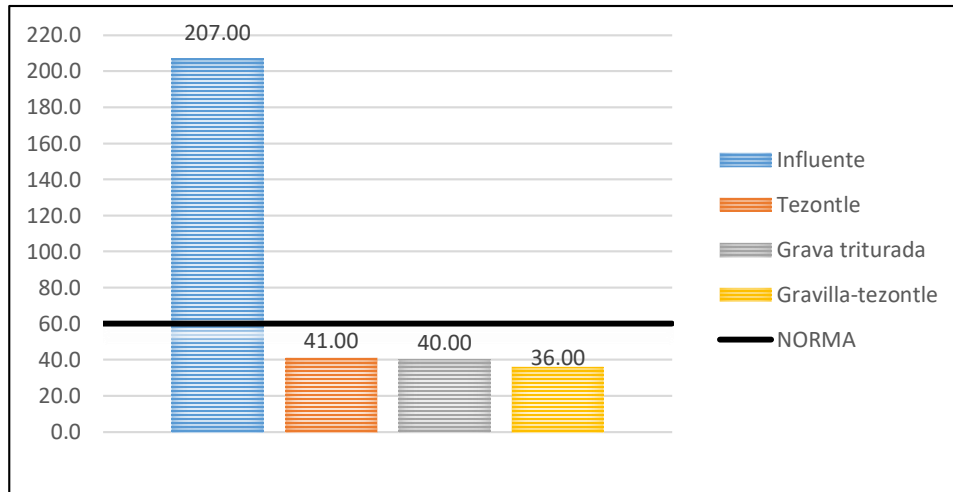
Parámetro	Influyente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla
ST	784	815	872	796
SST	168	62	66	60
SDT	616	754	807	736
SSF	54	21	22	20
SSV	114	41	44	40
SDF	486	615	658	600
SDV	130	139	149	130

Tabla 25. Muestreo 3. Sólidos suspendidos totales

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible
SST (mg/L)	207	41	40	36	60*

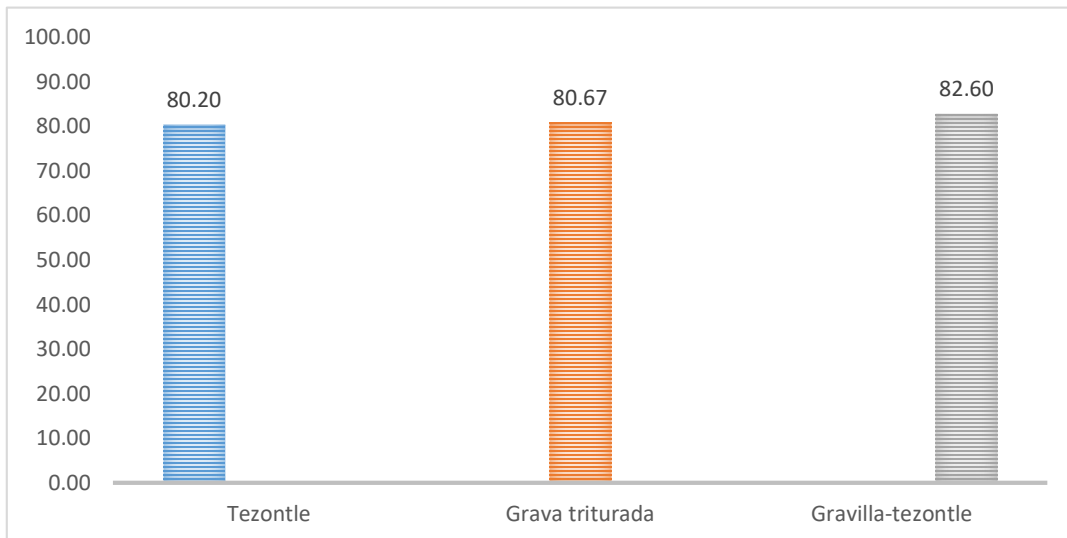
\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Protección de vida acuática. Promedio diario.

### Sólidos suspendidos totales (mg/L)



Gráfica 26. Muestreo 3. Comparación de los SST en las muestras con la norma

### Remoción de SST (%)

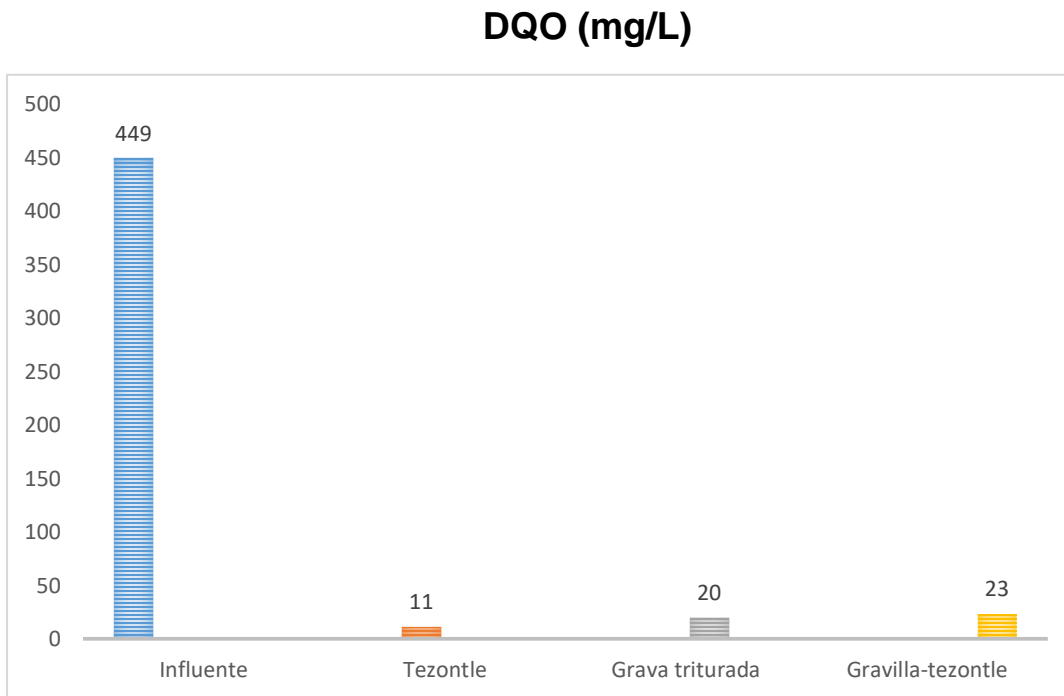


Gráfica 27. Muestreo 3. Porcentaje de remoción de SST en los humedales

### 7.8.3.3. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno

Tabla 26. Muestreo 3. Valores de DQO

Parámetro	Influyente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla
DQO (mg/L)	449	11	20	23



Gráfica 28. Muestreo 3. Valores de DQO en las muestras

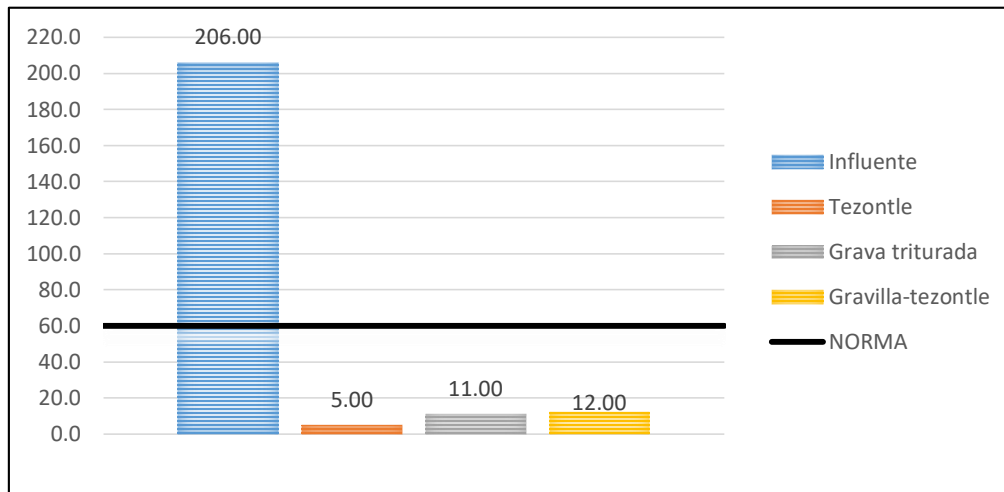
### 7.8.3.4. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno

Tabla 27. Muestreo 3. Valores de DBO<sub>5</sub>

Parámetro	Influente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla	Límite máximo permisible
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	206	5	11	12	60*

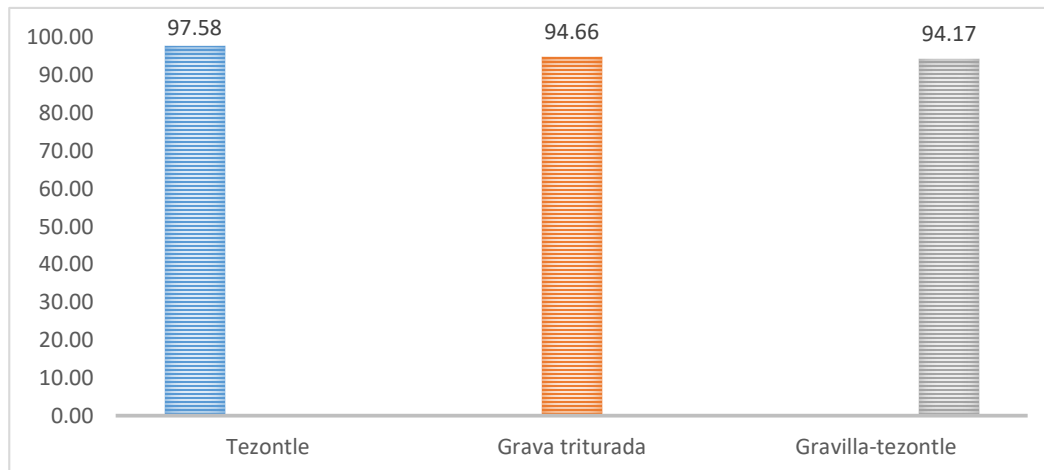
\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Protección de vida acuática. Promedio diario.

#### DBO<sub>5</sub> (mg/L)



Gráfica 29. Muestreo 3. Comparación de la DBO<sub>5</sub> en las muestras con la norma

#### Remoción de DBO<sub>5</sub> (%)



Gráfica 30. Muestreo 3. Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> en los humedales

### 7.8.3.5. Determinación de microorganismos coliformes fecales

Tabla 28. Muestreo 3. Comparación de coliformes fecales en las muestras con la norma

Parámetro	Influyente	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle	Límite máximo permisible
C.F (NMP/100ml)	1.1 X 10 <sup>8</sup>	24000	3000	3000	2000*

\*NOM-001-SEMARNAT-1996. Promedio diario.

Tabla 29. Muestreo 3. Porcentaje de remoción de coliformes fecales

	Typha Tezontle	Typha Grava Triturada	Typha Gravilla-tezontle
% de remoción de C.F.	99.99	99.99	99.99

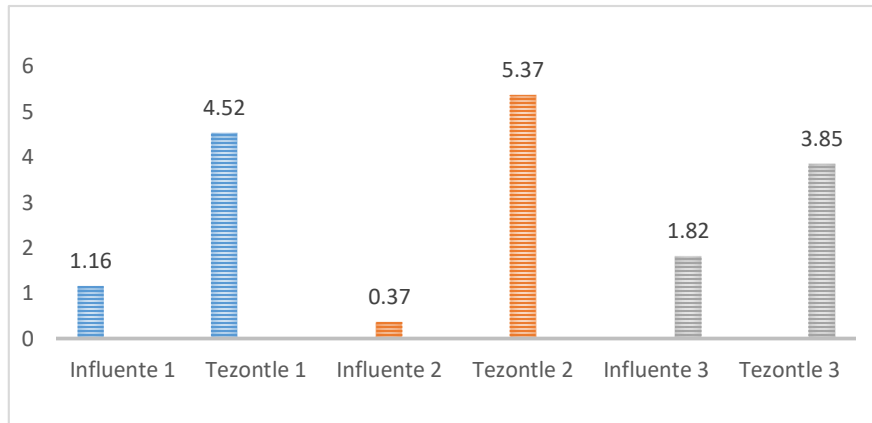
### **7.9 Beneficios y aplicación de los humedales.**

El beneficio del uso de los humedales en nuestro estado sería significativo, ya que solamente 79 de los 113 municipios cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales (CONAGUA & SEMARNAT, 2015). Lo que agrava aún más la problemática, es que un alto porcentaje de estas plantas de tratamiento actualmente no se encuentran en operación, ya sea por un mal diseño, altos costos operacionales o de mantenimiento, como se ve con estas cifras se tiene una situación un poco crítica en lo que a tratamiento de aguas residuales se refiere, es aquí donde los humedales podrían mejorar este panorama, ya que son sistemas de tratamiento muy económicos y de fácil funcionamiento, lo cuál sería una excelente solución a poblaciones pequeñas con pocos recursos monetarios.

## 8. Resultados y análisis de resultados

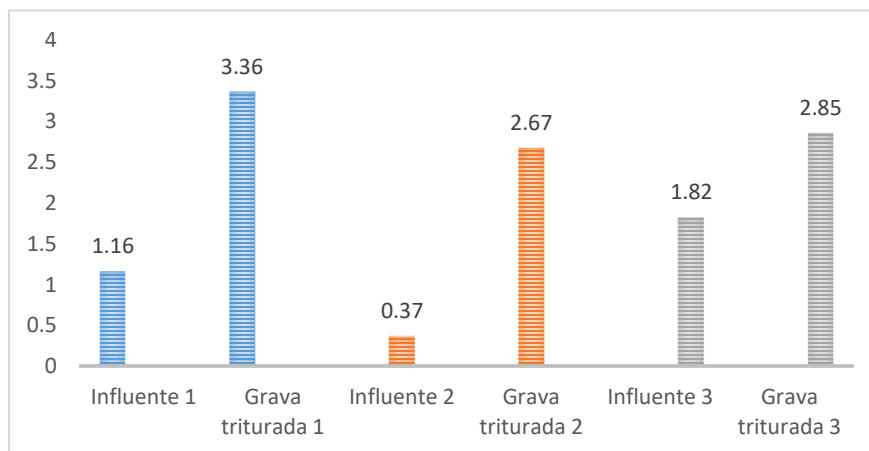
En las siguientes gráficas se puede observar el comportamiento del oxígeno disuelto durante cada uno de los 3 muestreos.

### Oxígeno disuelto (mg/L)



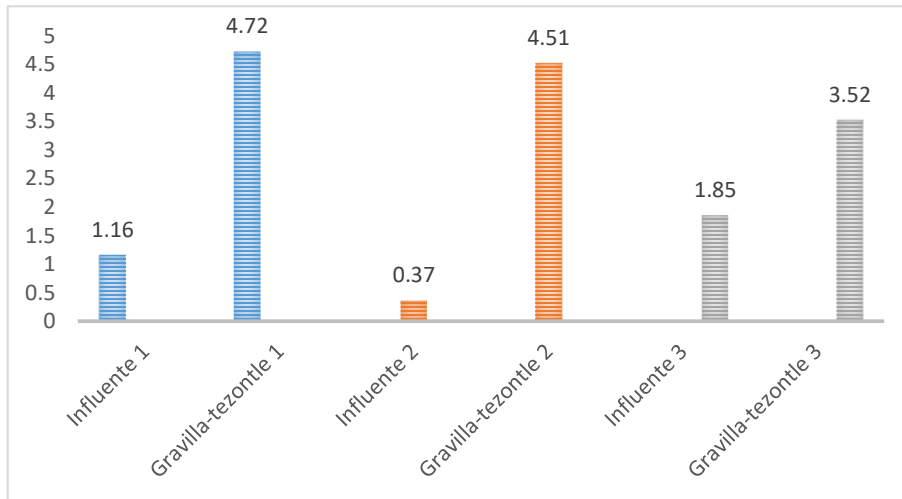
Gráfica 31. Comparativa de la concentración del oxígeno disuelto durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle.

### Oxígeno disuelto (mg/L)



Gráfica 32. Comparativa de la concentración del oxígeno disuelto durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada.

## Oxígeno disuelto (mg/L)



Gráfica 33. Comparativa de la concentración del oxígeno disuelto durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle

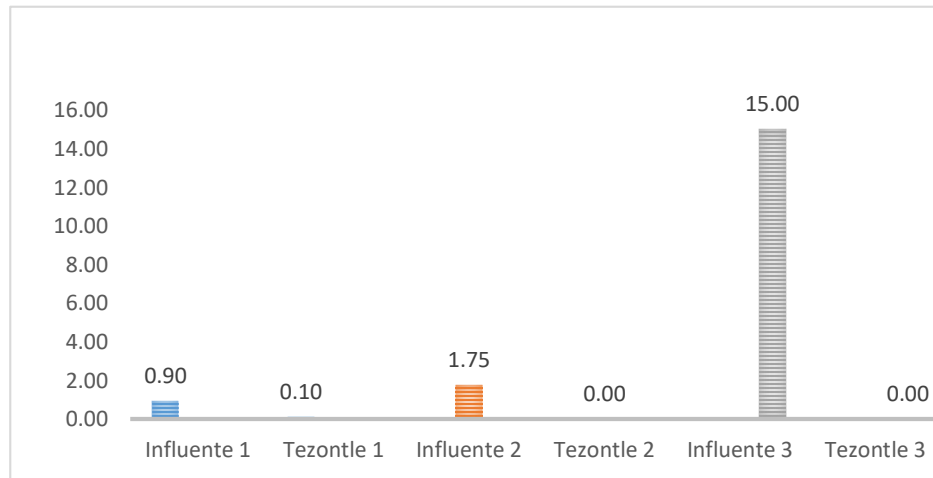
Los procesos aerobios llevados a cabo por la vegetación en los humedales, provocaron un aumento en la concentración del oxígeno disuelto.

También se observa que existe una relación entre la porosidad y el incremento del oxígeno disuelto; ya que se puede observar que en los materiales más porosos, hay un mayor incremento de oxígeno disuelto.



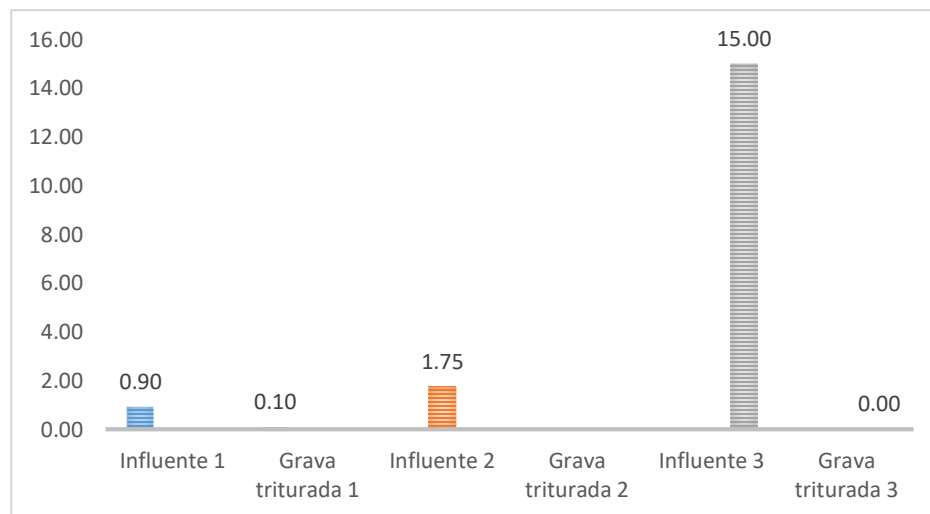
En las siguientes gráficas se puede observar el comportamiento de los sólidos sedimentables durante el transcurso de la experimentación en los humedales.

### Sólidos sedimentables (mL/L)



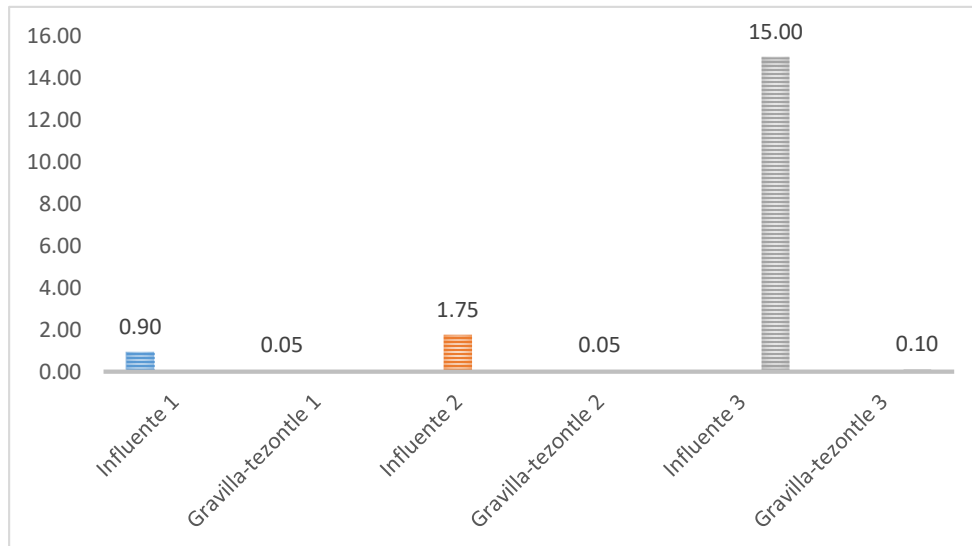
Gráfica 34. Comparativa de la remoción de sólidos sedimentables durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada

### Sólidos sedimentables (mL/L)



Gráfica 35. Comparativa de la remoción de sólidos sedimentables durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle

### Sólidos sedimentables (mL/L)

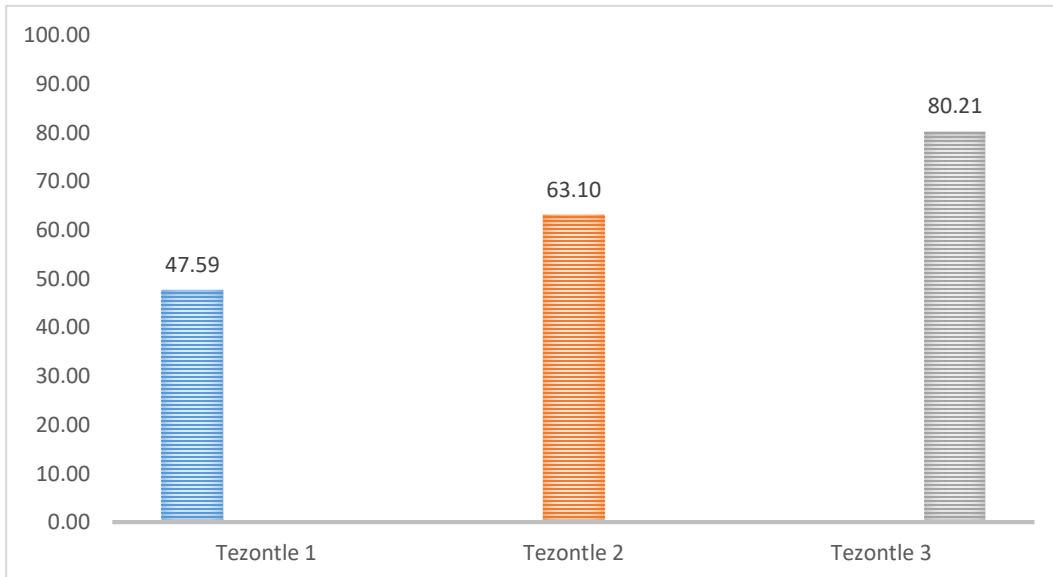


Gráfica 36. Comparativa de la remoción de sólidos sedimentables durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle

No hubo diferencia notable en lo correspondiente a la remoción de sólidos sedimentables en los diferentes humedales, ya que en todos los muestreos los valores obtenidos en los efluentes fueron cero o muy cercanos a cero.

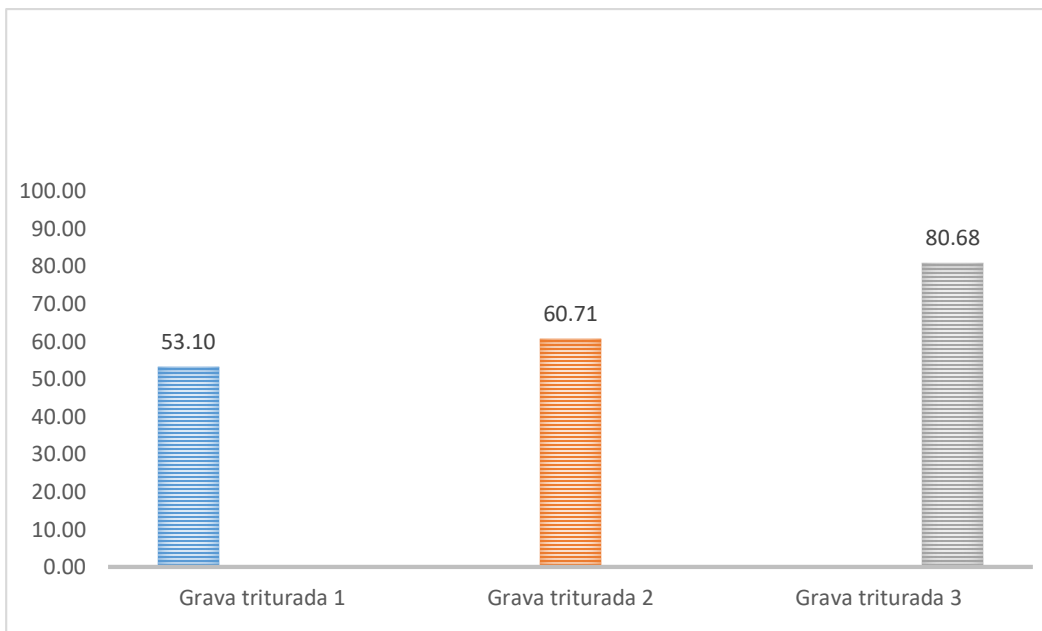
En las siguientes gráficas se puede observar, como fue variando el porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales durante los muestreos realizados.

### Remoción de SST (%)



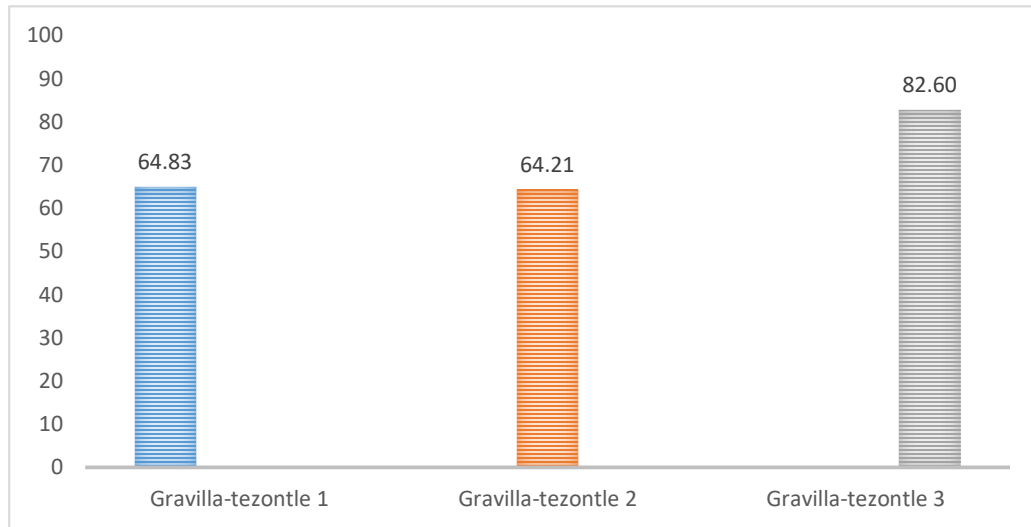
Gráfica 37. Comparativa de la remoción de sólidos suspendidos totales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle

### Remoción de SST (%)



Gráfica 38. Comparativa de la remoción de sólidos suspendidos totales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada.

## Remoción de SST (%)



Gráfica 39. Comparativa de la remoción de sólidos suspendidos totales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle

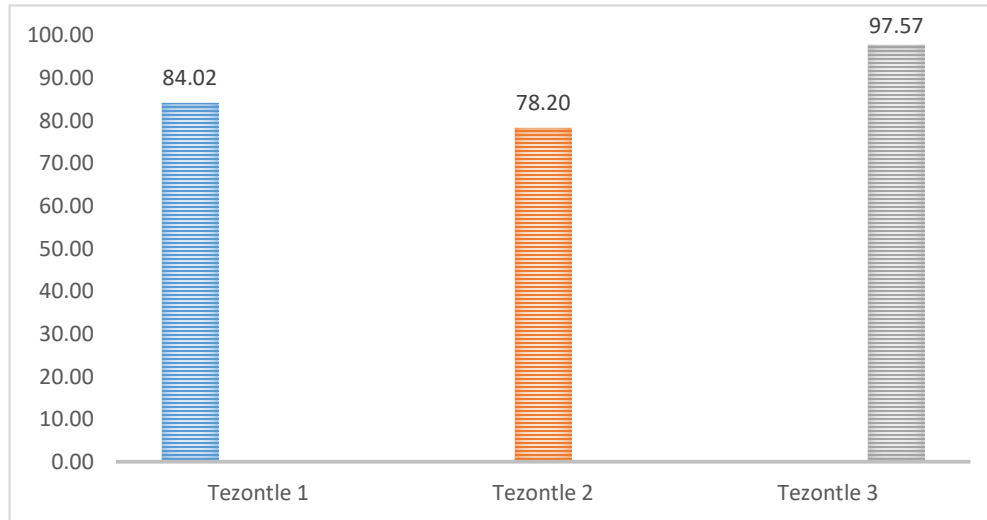
En todos los humedales artificiales se observó un comportamiento parecido, debido a que en los 2 primeros muestreos se observó una remoción entre el 50 y 65%, y fue hasta el último muestreo, ya que la vegetación terminó de desarrollarse, que se obtuvo una remoción superior de sólidos suspendidos totales mayor al 80%.

Todos los humedales cumplieron con la normativa mexicana en lo referente a sólidos suspendidos totales.

El humedal artificial que tuvo una mayor eficiencia de remoción, fue en el que se utilizó como medio de soporte gravilla con tezontle, sin embargo esta diferencia es apenas del 2% mayor si se compara con la remoción que se presentó en los otros humedales.

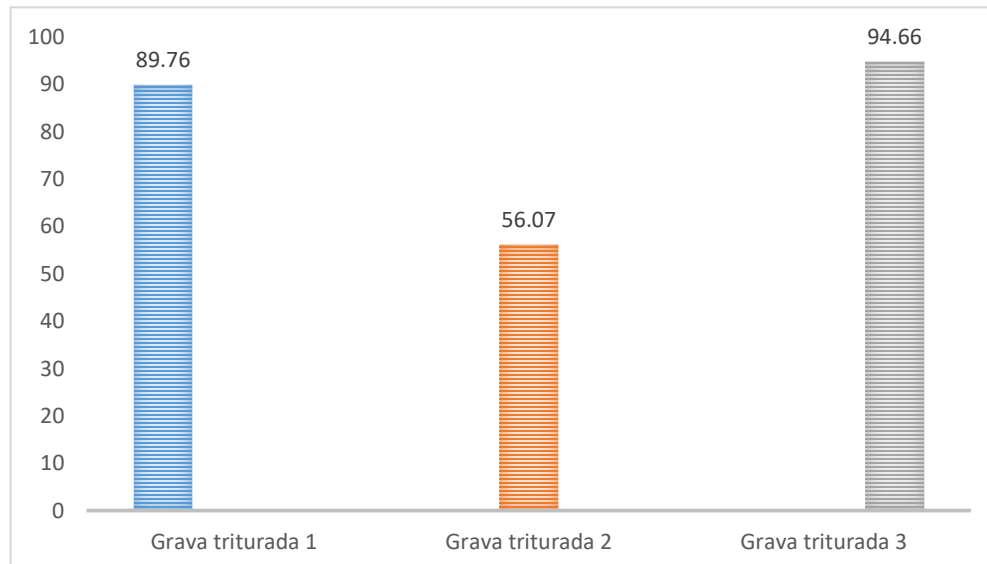
En las siguientes gráficas se puede observar una comparativa de la remoción de DBO<sub>5</sub> durante los muestreos en cada humedal.

### Remoción de DBO<sub>5</sub> (%)



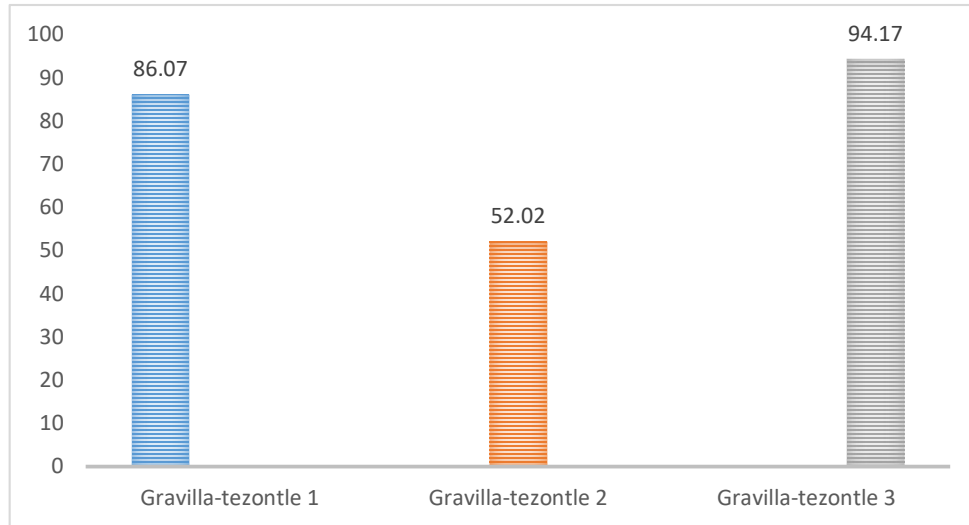
Gráfica 40. Comparativa de la remoción de DBO<sub>5</sub> durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle

### Remoción de DBO<sub>5</sub> (%)



Gráfica 41. Comparativa de la remoción de DBO<sub>5</sub> durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada

## Remoción de DBO<sub>5</sub> (%)



Gráfica 42. Comparativa de la remoción de DBO<sub>5</sub> durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle

La remoción de DBO<sub>5</sub> en el primer muestreo fue alta debido a que el humedal tenía poco tiempo de funcionamiento, y este se encontraba funcionando como filtro percolador.

Para el segundo muestreo la vegetación no se había desarrollado por completo así que la remoción de DBO<sub>5</sub> bajo. Para el tercer muestreo una vez que la vegetación se terminó de desarrollar y se estabilizó el humedal, se incrementó de nuevo la remoción de DBO<sub>5</sub>, obteniendo valores de remoción de DBO<sub>5</sub> superiores al 94% en todos los humedales, obteniendo la mayor remoción en el humedal compuesto de typha y tezontli; en el cuál se obtuvo una remoción de DBO<sub>5</sub> del 97.57%.

En las siguientes tablas se puede observar una comparativa de la remoción de los microorganismos coliformes fecales durante el transcurso de la experimentación en los humedales.

Tabla 30. Comparativa de la remoción de los coliformes fecales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y tezontle.

Parámetro	Influente 1	Typha Tezontle 1	Influente 2	Typha Tezontle 2	Influente 3	Typha Tezontle 3
C.F (NMP/100ml)	$2.3 \times 10^6$	23000	$2.3 \times 10^6$	23000	$1.1 \times 10^8$	24000
% de remoción de C.F.		99		99		99.99

Tabla 31. Comparativa de la remoción de los coliformes fecales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y grava triturada.

Parámetro	Influente 1	Typha Grava Triturada 1	Influente 2	Typha Grava Triturada 2	Influente 3	Typha Grava Triturada 3
C.F (NMP/100ml)	$2.3 \times 10^6$	7000	$2.3 \times 10^6$	23000	$1.1 \times 10^8$	3000
% de remoción de C.F.		99.70		99		99.99

Tabla 32. Comparativa de la remoción de los coliformes fecales durante los muestreos en el humedal compuesto de typha y gravilla-tezontle

Parámetro	Influente 1	Typha Gravilla-tezontle 1	Influente 2	Typha Gravilla-tezontle 2	Influente 3	Typha Gravilla-tezontle 3
C.F (NMP/100ml)	$2.3 \times 10^6$	<3000	$2.3 \times 10^6$	4300	$1.1 \times 10^8$	3000
% de remoción de C.F.		99.99		99.81		99.99

Se observó que los humedales artificiales son muy eficientes en la eliminación de microorganismos coliformes fecales, ya que en todos los muestreos se registró al menos una remoción del 99% de los estos microorganismos.

## 9. Conclusiones

Dado lo observado en la experimentación, se concluye que en la construcción de humedales artificiales, es recomendable utilizar un material cuyo diámetro efectivo esté en un rango entre 6.30 y 13.30 mm, ya que este tamaño de partícula propicia un desarrollo adecuado en la vegetación; así como una correcta interacción entre la planta, el medio de soporte y los microorganismos.

La porosidad de todos los materiales fue distinta, desde una porosidad del 40% para el material más compacto que fue la grava triturada, hasta una porosidad del 63% para el tezontle. A pesar de existir una gran variación de porosidad en los materiales, no hubo una notable diferencia en los resultados en la mayoría de las pruebas; en el único parámetro donde se presentó una diferencia significativa, fue en la concentración de oxígeno disuelto; en el caso del material más compacto, el aumento del oxígeno disuelto fue alrededor del 50% en el último muestreo, mientras en el material más poroso el oxígeno disuelto se duplicó.

A pesar de que la concentración de oxígeno disuelto no se encuentra normado, es un parámetro importante ya que promueve el desarrollo y la preservación de la vida acuática; por lo tanto se recomienda la utilización de un material con una porosidad mayor al 60 %, para obtener un efluente con una alta concentración de oxígeno disuelto.

Un material con una alta porosidad, permite que se trate una cantidad mayor de agua residual, hubo una notable diferencia entre la cantidad de agua residual que trató el humedal compuesto de typha y tezontle, con respecto al agua residual que trataron los otros humedales. El construir un humedal artificial con un material con la capacidad de tratar un mayor caudal, repercute directamente en la reducción del área requerida, así como también en los costos de construcción del humedal.

Se comprobó que en los humedales artificiales, se obtienen excelentes resultados, respecto a la eliminación de microorganismos coliformes fecales, logrando una remoción mayor al 99 % de estos microorganismos en todos los muestreos, a pesar del gran porcentaje de remoción de estos microorganismos, no se logró cumplir con lo estipulado



en la norma mexicana, aun así está enorme reducción de microorganismos coliformes fecales es de gran ayuda para un posterior tratamiento de desinfección.

En lo referente a los costos de los materiales el tezontle y la gravilla con tezontle tienen un costo de la mitad respecto a la grava triturada, sin embargo el precio de la grava triturada sigue siendo bastante accesible para la construcción de humedales artificiales, el material a utilizar para la construcción del humedal dependerá del que se tenga disponible en la zona, ya que acarrear un material desde una zona lejana encarecería mucho la construcción del humedal artificial.

En todos los humedales artificiales se cumplió con la normativa mexicana respecto a sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno.

## 10. Documentos consultados

- Aquaberri, S.L. (2013). Humedales artificiales. Madrid, España: Aquaberri Tecnologías naturales de depuración y tratamiento de aguas. Recuperado de <http://aquaberri.com/Dispositivos/Humedales-Artificiales>.
- Arias, O. 2004 Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Tesina, Barcelona.
- Blanco I, Molle P, Sáenz de Miera L. E., Ansola G. (2016). Basic oxygen furnace steel slag aggregates for phosphorus treatment. Evaluation of its potential use as a substrate in constructed wetlands. *Water Res.*, 89, pp.355-365.
- Brooks A. S., Rosenwald M. N., Geohring L. D., Lion L. W., Steenhuis T. S. (2000) Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate. *Ecological Engineering*, 121-132.
- Cao, W., Wang Y., Sun L., Jiang B., Zhang., Y. (2016). Removal of nitrogenous compounds from polluted river water by floating constructed wetlands using rice straw and ceramsite as substrate under low temperature conditions. *Ecological Engineering*, 77-81.
- CEAC, (08 de 02 de 2016). CEAC Michoacán. Recuperado el 01 de 05 de 2017, de <http://ceac.michoacan.gob.mx>
- Chen J., Wei X., Liu Y., Ying G., Liu S., He L., Su H., Hu L., Chen F., Yang Y. (2016). Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from domestic sewage by constructed wetlands: Optimization of wetland substrates and hydraulic loading. *Science of the Total Environment*, 240-248.
- Colas R. (1972). *La pollution des eaux Que sais-je?*. Presses Universitaires de France, 4a. ed. 128 pp., Francia.
- CONAGUA. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, México, D.F
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2015). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. México, DF.
- Delgadillo O., Camacho A., Pérez L., Andrade M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Nelson Antequera Durán, Cochamba, Bolivia
- EPA. (1999). Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Cincinnati, OH. USA.

- EPA. (2000). Guiding principles for constructed treatment wetlands. Washington DC: EPA.
- Instituto tecnológico de Canarias (2011). Humedal de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSV). Canaria, España: Sistemas de depuración natural. Recuperado de [http://depuranatura.blogspot.mx/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial\\_02.html](http://depuranatura.blogspot.mx/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial_02.html)
- Esponda A. (2001). Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Guido, A. y Durán de Bazúa, C. 2008. Remoción de contaminantes en un sistema de modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio. Tecnología, Ciencia, Educación. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQU), DF. pp. 15-22.
- Hammer M. J. & Hammer M. J. Jr (2012). Water and Wastewater Technology. USA. Pearson.
- Instituto tecnológico de Canarias (2011). Humedal de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSV). España: [http://depuranatura.blogspot.mx/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial\\_02.html](http://depuranatura.blogspot.mx/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial_02.html)
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). Treatment Wetlands. CRC Press. Boca Ratón: FL, USA.
- Kolb, P. (1998) . Design of a constructed wetland for the reclamation of the river Besós, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur.
- Kafer S.C., Magri M.E., Zaguini J. G., Philippi L.S. (2015) Application of high organic loading rate in sludge treatment wetlands as an option for developing countries with tropical as sub-tropical climate. 3rd International Faecal Sludge Management Conference-FSM3, Hanoi/Vietnã.
- Lara, J. A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. España: Tesis maestría, Instituto Catalán de Tecnología, UPC.
- Luna Pabello, V., & Ramírez Carrillo, H. (2004). Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 20(1), 31-38.
- Liu, M., Wu S., Chen L., Dong R. (2014). How substrate influences nitrogen transformations in tidal flow constructed wetlands treating high ammonium wastewater? Ecological Engineering, 478-486.

- Machado, A.I., & Beretta M., Fragoso R., Duarte,.(2017). Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 560-570.
- Matos A. T., Freitas W. S., Brasil M.S., Borges A. C. (2010) Influência da espécie vegetal cultivada nas condições redox de sistemas alagados construídos. *Eng. Agríc. Jaboticabal*, pp. 518-526
- Mateus D., Mafalda M., Henrique J. (2012). Fragmented limesote wastes as a constructed wetland substrate for phosphorous removal. *Ecological Engineering*, 65-69.
- Meftcalf and Eddy (1995) *Ingeniería de aguas residuales Tratamiento vertido y reutilización*. Madrid. Mcgraw Hill.
- Pelissari C., Sezerino P., Decezaro S. (2014). Nitrogen transformation in horizontal and vertical flow constructed wetlands applied for dairy cattle wastewater treatment in southern Brazil. *Ecological Engineering*, volume 73, pp 307-310.
- Peñuela, G., & Morató, J. (2013). *Manual de Tecnologías Sostenibles en Tratamiento de Agua*. Cataluña. Red ALFA TECSPAR.
- Ramsar (2016). *Introducción a la convención de los humedales*. Gland, Suiza. Secretaría de la Convención de Ramsar
- Reed Sherwood C. Reed, Ronald W. Crites, E. Joe Middlebrooks, *Natural Systems for waste management and treatment*. 2da edición Mcgraw Hill, New York 1995.
- Romero-Aguilar, Mariana, Colin-Cruz, Arturo, Sánchez-Salinas, Enrique, & Ortiz-Hernández, Ma. Laura. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25, 157-167
- Rodríguez–Monroy J. y Durán de Bazúa C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnol. Ciencia Ed.* 21, 25–33.
- Rossmann M., Matos A.T., Abreu E.C., Silva F.F., Borges A.C. (2012). Performance of constructed wetlands in the treatment of aerated coffee processing wastewater: removal of nutrients and phenolic compounds *Ecol. Eng.*, 49, pp. 264-269
- Rossmann M., Matos A.T., Abreu E.C., Silva F.F., Borges A.C. (2013). Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands. *J. Environ. Manage*, 128, pp. 912-919
- 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.

Trein N., Pelissari C., Hoffmann H., Platzer C. J. Sezerino P. H. (2015). Tratamiento descentralizado de esgotos de emprendimientos comercial e residencial empregando a ecotecnologia dos wetlands construídos 15(4), Ambiente Construído, Porto Alegre, pp.351-367.

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo (2018). Facultad de ingeniería civil. Manual de prácticas. Plantas de tratamiento de aguas. Morelia, Michoacán.

Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environ. Sci. Technol.*, 45(1), pp 61–69

Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Environment pollution 14. Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow.* Springer.

Wang Z., Dong J., Liu L., Zhu G., Liu C. (2013). Screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wtlands treating swine wastewater. *Ecological Engineering*, 57-65.

WEF (2003). *Wastewater Treatment Plant Design, Volume 2.* Southampton, UK. Ashford Overload

Wirasnita R., Mori K., Toyama T. (2018). Effect of activated carbon on removal of four phenolic endocrine-disrupting compounds, bisphenol A, bisphenol F, bisphenol S, and 4-tert-butylphenol in constructed wetlands. *Chemosphere*, pp 717-725.

Wittgreen H., Maehlum T. (1997). Wastewater treatment wetlands in cold climates. *Water Science and Technology*, Volume 35, pp 45-53.