



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

***“REMOCIÓN DE FÓSFORO EN UN SISTEMA DE  
HUMEDALES ARTIFICIALES A ESCALA DE  
LABORATORIO”***

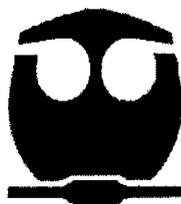
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

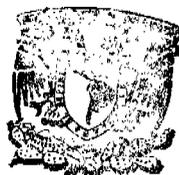
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

MARÍA IVONNE REYES LUZ



MÉXICO, DF.



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA

2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

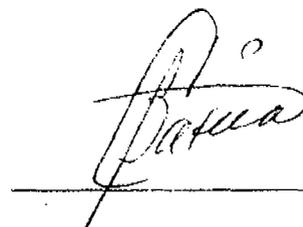
<b>CARGO</b>	<b>PROFESOR</b>
<b>Presidente</b>	<b>DR. REYNALDO SANDOVAL GONZÁLEZ</b>
<b>Vocal</b>	<b>DRA. MARÍA DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ DE BAZÚA</b>
<b>Secretario</b>	<b>IQ. ALEJANDRO LEÓN ÍÑIGUEZ HERNÁNDEZ</b>
<b>Primer suplente</b>	<b>IQ. TORRES RODOLFO BARRERA</b>
<b>Segundo suplente</b>	<b>DR. ALFONSO DURÁN MORENO</b>

**Sitio donde se realizó la investigación:**

Laboratorios 301, 302 y 303 del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA), Conjunto E, Facultad de Química, UNAM, México D.F.

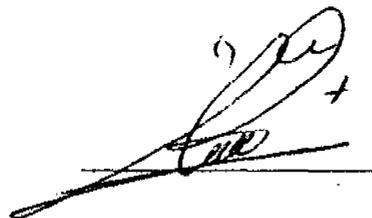
**Directora de tesis:**

Dra. en Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa



**Supervisor técnico:**

M. en Ing. Amb. Alejandro Guido Zárate



**Sustentante:**

María Ivonne Reyes Luz



## RECONOCIMIENTOS

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos Institucionales para el Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME). EN103704, “Apoyo a la enseñanza experimental de los laboratorios terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM”, por el apoyo económico parcial, otorgado para la impresión de este trabajo de investigación, que se inició en la asignatura “Ingeniería de Proyectos” de la carrera de Ingeniería Química y que culminó con esta tesis.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
GLOSARIO .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....	vi
CAPÍTULO 1 .....	1
PROBLEMÁTICA .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo .....	2
1.3 Hipótesis.....	2
1.4 Alcances .....	2
CAPÍTULO 2 .....	3
ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Antecedentes.....	3
2.2 Aspectos generales de los humedales artificiales.....	5
2.3 Aplicaciones de los humedales artificiales.....	5
2.4 Clasificación de los humedales artificiales.....	6
2.4.1 Sistemas emergentes.....	6
2.4.1.1 Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH).....	7
2.4.1.2 Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV) .....	8
2.4.2 Componentes de un humedal artificial .....	9
2.4.2.1 Agua .....	9
2.4.2.2 El lecho o material de empaque.....	9
2.4.2.3 Las plantas .....	10
2.4.2.4 Los microorganismos .....	12
2.5 Humedales artificiales a escala de laboratorio .....	13
2.6 Remoción de fósforo .....	13
CAPÍTULO 3 .....	16
MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
3.1 Lugar donde se realizó la experimentación.....	16
3.2 Sistema experimental.....	16
3.2.1 Descripción del sistema experimental.....	16
3.2.2 Alimentación del sistema .....	16
3.3 Mediciones analíticas .....	17
3.3.1 Medición de fósforo.....	18
3.3.2 Medición de DQO (demanda química de oxígeno).....	19
3.3.3 Medición del pOR (potencial de óxido-reducción).....	19
3.3.4 Medición de pH .....	19
3.3.5 Medición de temperatura .....	19
3.4 Análisis estadísticos.....	19
CAPÍTULO 4 .....	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	20
4.1 Fósforo.....	20
4.2 Remoción de materia contaminante medida como demanda química de oxígeno	24
4.3 Potencial redox .....	25

4.4 Valores de pH.....	26
4.5 Discusión final de los resultados experimentales.....	27
CAPÍTULO 5.....	28
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	28
5.1 Conclusiones.....	28
5.2 Recomendaciones.....	28
ANEXOS.....	30
ANEXO A.....	30
MÉTODOS ANALÍTICOS EMPLEADOS.....	30
A.1 TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS RESIDUALES (NMX-AA-029-SCFI-2001).....	30
A.2 TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) EN AGUAS RESIDUALES (NMX-AA-030-SCFI-2001).....	35
A.3 PREPARACIÓN DEL AGUA SINTÉTICA.....	39
ANEXO B.....	41
RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	41
B.1 Fósforo.....	41
B.2 DQO (demanda química de oxígeno).....	42
B.3 pOR (potencial de óxido- reducción).....	43
B.4 pH.....	51
B.5 Temperatura.....	51
ANEXO C.....	53
ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	53
ANEXO D.....	60
ACERVO FOTOGRÁFICO.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	62

## RESUMEN

Los humedales artificiales (HA) han sido utilizados para el tratamiento de aguas residuales desde hace varias décadas. La remoción de contaminantes como C, N y P principalmente, se puede llevar a cabo con el uso de estos humedales construidos. A estos sistemas se les conoce como sistemas o tecnologías "pasivas" donde el uso de energía se minimiza al permitir que la remoción de los contaminantes se lleve a cabo por mecanismos que ocurren de manera espontánea en la naturaleza. Este aspecto es quizás el más importante desde el punto de vista económico en un HA. En la presente investigación, se estudió la remoción de fósforo en reactores biológicos empacados que simulan la parte radicular de un HA. Se construyeron cuatro reactores empacados con escoria volcánica (tezontle) como material de empaque, los reactores RA<sub>1</sub> (reactor con planta) y RA<sub>2</sub> (reactor sin planta) y sus duplicados (RB<sub>1</sub> con planta y RB<sub>2</sub> sin planta). Los reactores que no tuvieron planta (RA<sub>2</sub> y RB<sub>2</sub>) sirvieron como blancos para aquellos que sí la tuvieron (RA<sub>1</sub> y RB<sub>1</sub>), para comparar el efecto de la planta en la remoción de fósforo. Los cuatro reactores se alimentaron con agua residual sintética utilizando una bomba peristáltica, realizando dos experimentos, uno con una relación C:N:P de 30:1:0.04 (equivalente a 450 mg DQO/L, demanda química de oxígeno) y otro con 15:1:0.04 (225 mg DQO/L). La iluminación se efectuó utilizando lámparas de tubos fluorescentes de 30 W cada una (ocho en total), con características similares a la luz de día con un periodo constante de 16 h de luz y 8 h de oscuridad. En cada uno de ellos se colocaron tres electrodos comerciales para medir potenciales de oxidación-reducción, redox (Ag/AgCl-Pt) a 2, 10 y 30 cm respecto de la parte superior de cada reactor para poder registrar el cambio del potencial redox (E<sub>h</sub>) capturando los datos cada 10 minutos de manera automática a través de una tarjeta de adquisición conectada a una computadora personal. Las plantas se tomaron de un humedal artificial ubicado en los Viveros de Coyoacán. Se colocaron dos brotes de una misma planta madre a una profundidad de 10 cm, uno en cada reactor. Luego de alcanzar la estabilidad, se midieron los parámetros de fósforo total, DQO, potenciales redox, pH y temperatura. Los resultados obtenidos en la parte experimental muestran, en primer término, que en todos los reactores hubo remoción de fósforo y que esta remoción fue ligeramente mayor en los reactores con planta (RA<sub>1</sub> y RB<sub>1</sub>, 93% en promedio, para ambos reactores). En términos del fósforo se puede observar en los resultados, que en todos los reactores con y sin planta hay una remoción de este elemento siendo ésta ligeramente mayor en los reactores con planta, comprobándose el efecto significativo que tiene la planta en la remoción de este elemento. Los resultados obtenidos no muestran una correlación entre la disminución de la DQO y la de P para los dos experimentos. La remoción de la DQO en ambos sigue un comportamiento similar a la del fósforo, siendo ligeramente mayor en aquellos reactores con planta.

**Palabras clave:** Humedales artificiales o construidos, flujo vertical, laboratorio, remoción de fósforo

## ABSTRACT

Constructed or artificial wetlands (CW, AW) have been implemented for wastewater treatment for several decades. C, N, and P removal can be carried out by using these systems. These systems are known as "passive technologies" where energy consumption is reduced considerably by allowing pollutants removal to be achieved spontaneously through natural processes. This may be the most important aspect from the economical point of view within a CW. In the present research, phosphorus removal in biological packed reactors was studied. Four reactors were constructed and packed with volcanic slag (*tezontle* in Aztec or Náhuatl language) as packing material, reactors RA1 (planted reactor) and RA2 (unplanted reactor) and their corresponding duplicates (RB1 and RB2, planted and unplanted, respectively). Unplanted reactors RA2 and RB2 were blanks for planted reactors to compare the effect of plants in phosphorus removal. All reactors were fed with synthetic water by using a peristaltic pump carrying out two experiments, one with a C:N:P ratio of 30:1:0.04 (equivalent to 450 mg COD/L, chemical oxygen demand), and the other one with 15:1:0.04 (225 mg COD/L). Illumination was possible by using fluorescent tubes lamps (30W each one) having similar characteristics to natural light, in constant cycles of 16 h of light and 8 h of darkness. Three commercial redox potential sensors (Ag/AgCl-Pt) were placed at 2, 10, and 30 cm with respect to packing material level in order to record oxidation-reduction, redox, potential changes ( $E_h$ ). Data gathered were automatically captured every 10 minutes through a specific data capturing software in a personal computer. Two plants shoots were taken from a constructed wetland system located in the Vivero Forestal de Coyoacán and placed at 10 cm depth in reactors RA<sub>1</sub> and RB<sub>1</sub>, one in each. After reaching a stable or steady state, total phosphorus concentration, COD, redox potential, and pH were measured. Results obtained showed that phosphorus removal was achieved in all reactors, and that these removal percentages were slightly higher in planted reactors (RA<sub>1</sub> and RB<sub>1</sub>, 93%, mean value for both reactors). These results prove the significant effect that plants have concerning phosphorus removal. Results did not show a correlation between COD removal in both experiments with P removal. COD removal behavior for both experiments showed a similar effect as that for phosphorus removal, being slightly higher for planted reactors.

**Keywords:** Constructed or artificial wetlands, flow vertical, laboratory, phosphorus removal.

GLOSARIO

Aerénquima	Palabra que no existe en el Diccionario de la Lengua Española pero que viene de parénquima, del gr. cient. <i>παρέγχυμα</i> , sustancia de los órganos. Tejido vegetal constituido por células de forma aproximadamente esférica o cúbica y con espacios de separación y que sirve para "absorber" el CO <sub>2</sub> del aire y transformarlo en biomasa celular y oxígeno molecular ( <i>aeros</i> , aire y <i>enchyma</i> , infusión). En inglés es aerenchyma (spongy tissue characteristic of aquatic plants)
Acidogénesis	Generación de ácidos orgánicos a partir de la materia orgánica degradada por organismos generadores de ácidos grasos volátiles (acético, propiónico, butírico), conocidos como bacterias acidogénicas
Aerobio	Ser vivo que necesita del oxígeno molecular para subsistir
Anaerobio	Ser vivo que no necesita del oxígeno molecular para subsistir
Biota	<i>Biol.</i> Conjunto de la fauna y la flora de una región
BOKU-Viena	Boden Kultur (Nombre de la Universidad Agrícola de Viena, que ahora se llama Universidad de Recursos Naturales y Ciencias Biológicas Aplicadas de Viena)
Detritus	Del lat. <i>detritus</i> , desgastado, m., residuo de una masa sólida que se descompone en partículas
DQO	Demanda química de oxígeno. Medida de la cantidad de reactivos químicos oxidables requerida para la oxidación química de la materia orgánica disuelta o soluble de agua potable o de agua residual
E <sub>h</sub> , pOR	Potencial de óxido-reducción (redox)
HA	Humedal artificial
HAFH	Humedal artificial de flujo horizontal
HAFV	Humedal artificial de flujo vertical
Lisis	<i>Quím.</i> Descomposición de una sustancia por rotura de sus enlaces químicos. <i>Med.</i> Terminación lenta y favorable de una enfermedad
Radicular	Perteneciente o relativo a las raíces
RA <sub>1</sub>	Reactor con planta
RA <sub>2</sub>	Reactor sin planta
RB <sub>1</sub>	Reactor con planta
RB <sub>2</sub>	Reactor sin planta
P	Fósforo
pH	Potencial de hidrógeno
pOR, E <sub>h</sub>	Potencial de óxido-reducción (redox)

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Nombre de la tabla</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1	Plantas acuáticas comunes en los humedales artificiales	6
Figura 2.2	Humedales de tipo libre superficial	7
Figura 2.3	Humedales de tipo subsuperficial	7
Figura 2.4	Humedales de tipo subsuperficial horizontal	8
Figura 2.5	Humedales de tipo subsuperficial vertical	8
Figura 3.1	Diagrama del sistema experimental completo	18
Figura 3.2	Detalle de la construcción de los reactores	18
Figura 4.1	Valores obtenidos para fósforo durante el período de la primera etapa (reactores con planta (RA <sub>1</sub> , RB <sub>1</sub> ) y sin planta (RA <sub>2</sub> , RB <sub>2</sub> ))	20
Figura 4.2	Variación de la concentración del fósforo durante el período de la primera etapa (reactores con planta (RA <sub>1</sub> , RB <sub>1</sub> ) y sin planta (RA <sub>2</sub> , RB <sub>2</sub> ))	21
Figura 4.3	Valores obtenidos para fósforo durante el período de la segunda etapa (reactores con planta (RA <sub>1</sub> , RB <sub>1</sub> ) y sin planta (RA <sub>2</sub> , RB <sub>2</sub> ))	22
Figura 4.4	Variación de la concentración del fósforo durante el período de la segunda etapa (reactores con planta (RA <sub>1</sub> , RB <sub>1</sub> ) y sin planta (RA <sub>2</sub> , RB <sub>2</sub> ))	23
Figura 4.5	Valores obtenidos durante las mediciones de demanda química de oxígeno soluble, durante el período de la primera etapa (reactores con planta (RA <sub>1</sub> , RB <sub>1</sub> ) y sin planta (RA <sub>2</sub> , RB <sub>2</sub> ))	24
Figura 4.6	Valores obtenidos durante las mediciones de demanda química de oxígeno soluble, durante el período de la segunda etapa (reactores con planta (RA <sub>1</sub> , RB <sub>1</sub> ) y sin planta (RA <sub>2</sub> , RB <sub>2</sub> ))	25
Figura 4.7	Valores obtenidos para pH durante el período de la primera etapa (reactores con planta (RA <sub>1</sub> , RB <sub>1</sub> ) y sin planta (RA <sub>2</sub> , RB <sub>2</sub> ))	26
Figura 4.8	Valores obtenidos para pH durante el período de la segunda etapa (reactores con planta (RA <sub>1</sub> , RB <sub>1</sub> ) y sin planta (RA <sub>2</sub> , RB <sub>2</sub> ))	27
Figura C.1	Gráfica para la tabla de medias para fósforo con un 95% de confianza	54
Figura C.2	Gráfica para la tabla de medias para fósforo con un 99% de confianza	56
Figura C.3	Gráfica para la tabla de medias de DQO con un 95% de confianza	57
Figura C.4	Gráfica para la tabla de medias de DQO con un 99% de confianza	59
Figura D.1	Descripción del sistema experimental	60
Figura D.2	Descripción del sistema experimental con iluminación	60
Figura D.3	Descripción del sistema experimental para el mes de febrero	61
Figura D.4	Sistema experimental y altura de las plantas en el mes de mayo	61
Tabla 3.1	Estratos de material de soporte en las columnas de estudio (Fenoglio-Limón, 2000)	17
Tabla 3.2	Concentración del agua sintética empleada para la primera etapa	17
Tabla 3.3	Concentración del agua sintética empleada para la segunda etapa	17

Tabla 4.1	Porcentajes de remoción de fósforo promedio de cada reactor durante las dos etapas	21
Tabla 4.2	Valores promedio del pOR para las diferentes profundidades	25
Tabla A.1	Preparación de la curva de calibración para fósforo	33
Tabla A.2	Preparación de la curva de calibración para DQO	37
Tabla A.3	Concentración del agua residual sintética primera etapa	39
Tabla A.4	Concentración del agua residual sintética segunda etapa	39
Tabla B.1	Valores de fósforo durante la primera etapa (mgP/L)	41
Tabla B.2	Valores de fósforo durante la segunda etapa (mgP/L)	41
Tabla B.3	Valores del porciento de remoción de fósforo durante la primera etapa	42
Tabla B.4	Valores del porciento de remoción de fósforo durante la segunda etapa	42
Tabla B.5	Valores de DQO durante la primera etapa (mgO <sub>2</sub> /L)	42
Tabla B.6	Valores de DQO durante la segunda etapa (mgO <sub>2</sub> /L)	43
Tabla B.7	Valores de pOR (mV) durante algunos días en la primera etapa en el sistema RA <sub>1</sub> y RA <sub>2</sub>	43-51
Tabla B.8	Valores de pH durante la primera etapa	51
Tabla B.9	Valores de pH durante la segunda etapa	51
Tabla B.10	Valores de Temperatura durante la primera etapa	51
Tabla B.11	Valores de Temperatura durante la segunda etapa	52
Tabla C.1	Análisis de variancia (ANDEVA) para fósforo con un 95% de confianza	53
Tabla C.2	Tabla de medias para fósforo con un 95% de confianza	54
Tabla C.3	Análisis de variancia (ANDEVA) para Fósforo con un 99% de confianza	55
Tabla C.4	Tabla de medias para fósforo con un 99% de confianza	55
Tabla C.5	Análisis de variancia (ANDEVA) para la DQO con un 95% de confianza	56
Tabla C.6	Tabla de medias para la DQO con un 95% de confianza	57
Tabla C.7	Análisis de variancia (ANDEVA) para la DQO con un 99% de confianza	58
Tabla C.8	Tabla de medias para la DQO con un 99% de confianza	58

# CAPÍTULO 1

## PROBLEMÁTICA

### 1.1 Introducción

El agua es la fuente de vida más importante para los seres vivos, constituye las tres cuartas partes del total del planeta y sin ella sería imposible la vida en la tierra. El agua es utilizada en los procesos biológicos, químicos, físicos, etc., es difícil citar algún proceso cualquiera en el que no sea utilizado este líquido vital, por lo que es indispensable cuidarlo y darle el tratamiento que se requiere para garantizar que futuras generaciones puedan disfrutar de este valioso líquido.

En México, el problema de la contaminación del agua y su disponibilidad para las diversas actividades económicas y productivas del país, es cada vez más creciente (Guido-Zárate, 2006), lo cual ha obligado a la búsqueda de alternativas de solución económicamente viables (Durán de Bazúa, 1999). Se estima que aproximadamente el 80% de las aguas residuales generadas son descargadas al ambiente sin ningún tratamiento adecuado (SEMARNAT, 2006).

La contaminación de los cuerpos de agua (ríos, lagos, lagunas, etc) se inició con la aparición de los primeros asentamientos humanos. Los seres humanos encontraron conveniente deshacerse de los materiales indeseables vertiéndolos a las corrientes naturales de agua. No fue sino hasta la revolución industrial cuando los países desarrollados empezaron a generar más fuentes contaminantes, por lo que la contaminación aumentó en forma constante, conforme la industria manufacturera creció y las comunidades se hicieron cada vez más grandes, la autodepuración (purificación por la naturaleza) resultó insuficiente, provocando así un estado permanente de contaminación de los cuerpos receptores, manteniéndolos en muchos casos en un alto nivel de septicidad, con la consecuente inviabilidad para ser usados de manera tradicional (fuente de abastecimiento de agua potable, riego, etcétera).

Las aguas residuales son aguas de composición variada, provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (Macias-Ontiveros, 2005).

A nivel mundial la preocupación por los problemas de contaminación del agua, se dio con mayor ahínco a partir de la década de los setenta del siglo XX en Europa y países como Estados Unidos de América, Canadá, Gran Bretaña y Japón, en donde la urbanización y la industrialización creciente se vieron acompañadas de graves problemas de contaminación del agua. En las regiones menos desarrolladas, los desechos de las poblaciones constituyen una amenaza para la salud pública y ponen en peligro el uso ininterrumpido de reservas de agua (Luna-Pabello *et al.*, 2001).

En el agua residual el fósforo puede provenir de varias fuentes, principalmente por el uso de los detergentes a los que todavía se les adicionan fosfatos, generando problemas

en los cuerpos de agua ya que el fósforo en grandes cantidades provoca daños al alterar el equilibrio de los mismos.

Debido a que el fósforo es un nutriente esencial para los seres vivos, los microorganismos presentes en los procesos de tratamiento pueden asimilarlo e incorporarlo a sus tejidos celulares. Cuando el fósforo no es removido de las aguas residuales y cuando éste llega en concentraciones relativamente altas a los cuerpos de aguas, este nutriente permite el crecimiento y desarrollo de una gran cantidad de algas y otros microorganismos y que al morir, éstos tienden a flotar en la parte superficial del agua limitando el paso de la luz solar y con ello limitando que la fotosíntesis se lleve a cabo de manera normal, lo que da lugar a una disminución en la concentración de oxígeno dentro del cuerpo de agua, provocando la muerte de peces y otros organismos superiores. A este fenómeno se le conoce como "eutrofización".

Es necesario que el fósforo se elimine de las aguas residuales antes de que éstas se descarguen a los cuerpos de agua causando al fenómeno antes descrito. El empleo de tecnologías alternativas como los humedales artificiales puede ser la solución a este problema. Sin embargo, es necesario estudiar los mecanismos de remoción que se presentan dentro de estos sistemas para poder entender mejor su funcionamiento y aplicar criterios de diseño basados en la información generada.

## **1.2 Objetivo**

Con base en las generalidades expuestas, el objetivo principal de la presente investigación fue:

Evaluar la eliminación de fósforo en reactores biológicos de flujo vertical a escala de laboratorio empacados con escoria volcánica que simulan un humedal artificial.

## **1.3 Hipótesis**

Las plantas en los reactores empacados contribuyen a una mayor remoción de fósforo presente en el agua residual sintética, debido a la simbiosis que presentan las plantas y los microorganismos.

## **1.4 Alcances**

- Se observará la influencia de las plantas en la remoción del fósforo solamente para los primeros días de crecimiento de las plantas.
- Se evaluará el efecto de la variación en la concentración de la materia orgánica medida solamente como demanda química de oxígeno (DQO) en la remoción del fósforo total.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

Los múltiples beneficios del agua han ayudado a las sociedades en su desarrollo. Por siglos, el hombre ha utilizado el agua para satisfacer sus necesidades básicas, la agricultura y el desarrollo de la industria. Sin embargo la mayoría de las personas han visto al agua como un recurso abundante y renovable y no como lo que es, un recurso NO renovable, que debe ser administrado y conservado adecuadamente (Durán-de-Bazúa, 2002).

Los países con economías emergentes no sólo enfrentan el problema de la escasez, sino también el de la contaminación del agua. Es por esta razón que en estos países es necesario que se desarrollen e implementen tecnologías adecuadas desde el punto de vista económico y técnico.

El tratamiento de aguas residuales por medio de los humedales artificiales (HA) se ha empleado en el mundo por más de 30 años. El uso de estos sistemas tiene sus bases en las investigaciones realizadas en el Instituto Max Plank de Alemania. Sus ventajas, con respecto a sistemas convencionales, son su bajo costo de operación y mantenimiento (Reed *et al.*, 1995), así como requerimientos mínimos de personal capacitado. Además logran buenas eficiencias en remoción de contaminantes y de microorganismos patógenos (Luna-Pabello *et al.*, 2001). Lo anterior hace de los humedales artificiales sistemas que no solamente puedan ser empleados para tratar las aguas residuales de pequeñas y medianas comunidades, sino que se puedan utilizar para la depuración de aguas residuales de tipo industrial. Por tal motivo este tipo de ecotecnología resulta altamente atractiva para ser implantada en países como México (Luna-Pabello *et al.*, 2001).

Debido a que la aplicación de las tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales suele ser de un alto costo, se pretende aplicar tecnologías de bajos costos de operación y mantenimiento, que sean económicamente viables, que tengan una alta eficiencia en la remoción de contaminantes y que la maniobra del mismo no tenga dificultad para un buen manejo por el personal encargado. De esta forma, resultaría relativamente fácil la aplicación en zonas rurales o en poblaciones pequeñas.

Las alternativas tecnológicas utilizadas actualmente para contrarrestar y aminorar los efectos de los efluentes contaminantes vertidos a los cuerpos receptores, se han desarrollado acorde con la disponibilidad de los recursos económicos, capacidad técnica y legislación que, en forma general, requieren de operaciones con altos costos de operación y mantenimiento (Durán-de-Bazúa, 2002; Luna-Pabello *et al.*, 1997 a,b).

Los humedales artificiales (HA), son sistemas de tratamiento de aguas residuales que imitan la actividad depuradora realizada por los humedales naturales. A grandes rasgos, un HA se construye haciendo una excavación de forma rectangular que es impermeabilizada y después rellena con uno o varios materiales de empaque como

arena, grava o tezontle que funcionan como filtro para el agua y como soporte para las plantas que son sembradas en él. El material de empaque también funciona como soporte para la gran cantidad y diversidad de microorganismos (bacterias principalmente) que se desarrollan sobre él y sobre las raíces de las plantas y que contribuyen a la depuración del agua degradando la materia orgánica. Desde el punto de vista de la ingeniería, un humedal artificial puede conceptualizarse como un reactor empacado donde ocurren reacciones químicas y biológicas, así como procesos físicos sobre la superficie del empaque.

Los HA imitan los procesos que ocurren en los humedales naturales, con las variantes de que en los HA se regulan ciertos parámetros como la cantidad de agua a tratar, el régimen de flujo y la calidad de agua obtenida. Los contaminantes en los HA se remueven a través de una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos, incluyendo la sedimentación, precipitación, adsorción, asimilación por las plantas y transformaciones bioquímicas mediante los microorganismos presentes en forma de película sobre el material de soporte (Metcalf y Eddy, 1991). Dentro de un HA, las áreas próximas a las raíces de las plantas son aerobias, especialmente durante el día cuando la actividad fotosintética de la planta favorece la generación de oxígeno, mientras que las más alejadas de ellas o durante la noche cuando las plantas respiran como cualquier organismo aerobio, consumen el oxígeno presente en sus alrededores y las condiciones de las áreas de todo el reactor son anaerobias, con excepción del área en contacto con el aire del ambiente, donde por difusión molecular este elemento se difunde al reactor, permitiéndose así que se desarrolle una gran variedad de microorganismos dentro del lecho, incluyendo no sólo bacterias, sino también protozoarios, rotíferos, nemátodos, etc., mismos que contribuyen a la remoción de los contaminantes (Guido-Zárate, 2006).

Se sabe que los tiempos largos de residencia hidráulica (TRH) y una superficie de sedimentos muy grande en contacto con el agua fluyendo, promueven una remoción efectiva de la materia orgánica particulada al permitir un mayor tiempo de contacto entre los contaminantes y los microorganismos. Por lo económico en su operación y mantenimiento, los HA son una alternativa muy atractiva para pequeñas y medianas comunidades relativamente alejadas de los centros urbanos, tanto en países avanzados como en países en vías de desarrollo. Por ello, es de gran importancia realizar más investigación en nuestro país en torno a este tipo de sistemas, a fin de definir con claridad la viabilidad de su implantación para tratar las aguas residuales generadas en las comunidades rurales y que no cuentan con ningún sistema de tratamiento de aguas residuales, ni tienen los fondos económicos para instalar y operar sistemas tradicionales.

En México, el empleo de los HA se ha limitado a la construcción de algunos de ellos principalmente para la depuración de aguas residuales domésticas. En el Vivero Forestal de Coyoacán, México, D.F., se tiene un sistema experimental de flujo horizontal, HAFH, con las dimensiones de una planta piloto, con capacidad de tratar cerca de 6 m<sup>3</sup>/d de aguas domésticas. Este sistema fue desarrollado por la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México en el marco del convenio de colaboración existente con la Universidad BOKU de Viena, Austria en 1993 (Durán-de-Bazúa y col., 2005). Además, a finales de 1999, se terminó de construir una planta piloto tipo humedal artificial de flujo vertical, HAFV para el tratamiento de las aguas residuales generadas por las oficinas adyacentes instaladas en la planta de "compost" en el campus de Ciudad Universitaria (Esponda-Aguilar, 2001; Fenoglio-Limón, 2000, 2003; Soto-Esquivel, 1997, 2003).

En estos últimos trabajos se incluyen una serie de propuestas experimentales planeadas para ser realizadas en el HAFV de CU y/o uno equivalente con objeto de generar información sobre la operación y el diseño de los HAFV.

## **2.2 Aspectos generales de los humedales artificiales**

Los humedales son áreas de tierra periódicamente inundadas ya sea en gran parte o todo el año, que permiten el crecimiento de vegetación relacionada a las condiciones del suelo. Están compuestos por agua, sustrato o material de soporte, plantas vasculares, residuos de la planta, invertebrados y una gran variedad de microorganismos, reptiles, anfibios, peces, aves y mamíferos, los cuales se alimentan de las plantas de ese hábitat y de algunos otros animales (Hammer y Bastian, 1991). En todos los casos el principio único es, que los humedales tienen la capacidad de alterar las condiciones del suelo, debido a los cambios físicos, biológicos, y químicos que ocurren en estos y descartando el desarrollo de plantas que no pueden crecer en condiciones de suelos saturados (Kadlec y Knight, 1996, Reed *et al.*, 1995).

La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar (Padrón-López, 2005).

Los humedales son sistemas con bajos costos en su construcción, operación y mantenimiento. Esto se debe a la energía que toman del ambiente natural. En general, en los sistemas de tratamiento de humedales es mínima la energía de combustible y no necesariamente química. Los humedales son utilizados como tecnologías de bajo costo para el tratamiento en la calidad del agua en pequeñas ciudades (Kadlec y Knight, 1996).

Tomando en cuenta que los humedales construidos o artificiales son ecotecnologías económicamente viables, de gran capacidad para la remoción de contaminantes y que no necesitan de grandes costos en su operación y mantenimiento, los humedales son una buena opción para implementarse en comunidades pequeñas o rurales para el tratamiento de las aguas residuales que éstas generan y que, después de ser tratadas puedan utilizarse para el riego, en zonas que no cuentan con el capital para el suministro de ésta, además de que son estéticamente agradables a la vista.

## **2.3 Aplicaciones de los humedales artificiales**

Debido a los problemas de contaminación en el agua y a los altos costos de operación en los sistemas de tratamiento de la misma cuando se emplean sistemas convencionales (sistemas de lodos activados, sistemas de reactores de biodiscos y otros), se ha tenido que recurrir a sistemas de tratamiento de menor costo, pero también eficientes en la remoción de los contaminantes presentes en las cargas de agua contaminadas, llegando hasta la implementación de sistemas "copiados" de la misma naturaleza. Los humedales artificiales o construidos son sistemas que imitan a los humedales naturales y que, modificando algunas variables, son de gran ayuda en la eliminación de contaminantes y así, se pueden tratar aguas de diferentes fuentes contaminantes. Hasta ahora, son de mayor relevancia para el tratamiento de las aguas

residuales domésticas, siendo estos sistemas una manera económica y eficiente en la depuración y tratamiento de las aguas residuales.

En los humedales, el ecosistema puede llegar a alterarse por aguas que contengan grandes cantidades de fósforo, ya que este elemento puede ser utilizado en un humedal a través de ciclos biogeoquímicos muy complicados que involucran muchos caminos y diversas fuentes temporales y permanentes.

Se ha encontrado que los humedales son efectivos para el tratamiento de la DBO, DQO, sólidos suspendidos, nitrógeno y, aparentemente, también para fósforo, ya que muchos de los grupos microbianos de los humedales lo pueden utilizar (Hammer y Bastian, 1991, IWA, 2001).

## 2.4 Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales son sistemas poco profundos (menos de 1 m) plantados con macrofitas propias de zonas húmedas (macrófitos acuáticos o hidrófitas) adaptadas a las condiciones de los suelos saturados (Bastian *et al.*, 1991) y en los que los procesos de descontaminación llevan a cabo simultáneamente procesos físicos, químicos y biológicos (García *et al.*, 2006). Los humedales pueden tener plantas flotantes como las lentejas de agua (*chichicaxtle*), jacintos de agua, etc; sumergidas como *Potamogeton crispus* y *Littorella uniflora* y plantas que llegan al fondo como las espadañas, los carrizos y los juncos, que emergen del nivel del agua (Trautmann *et al.*, 1991) (Figura 2.1).

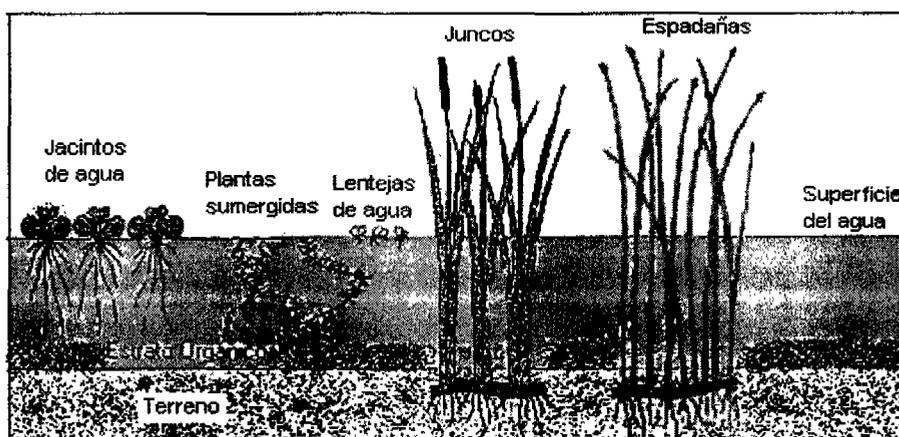


Figura 2.1 Plantas acuáticas comunes en los humedales artificiales

### 2.4.1 Sistemas emergentes

En estos sistemas las plantas sobresalen del nivel del agua y las plantas se encuentran adheridas al material de soporte (Ramírez-Carrillo, 1998). Existen dos variantes de sistema en este grupo: los humedales de flujo libre superficial y los de flujo subsuperficial (Padrón-López, 2005).

En los humedales de flujo superficial (en inglés *surface flow constructed wetlands* o *free water surface constructed wetlands*) el agua está expuesta directamente a la

atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de las macrófitas. Los sistemas de tratamiento de humedales de tipo superficial funcionan como un sistema de tratamiento biológico intensivo (García *et al.*, 2006) (Figura 2.2). Una parte importante en los sistemas de humedales de flujo superficial, es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija, que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre.

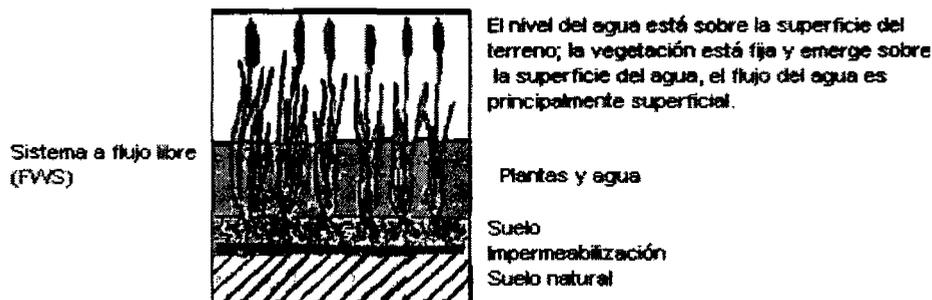


Figura 2.2 Humedales de tipo libre superficial (modificado de Lara-Borrero, 2006)

En los sistemas de humedales de flujo subsuperficial (en inglés *subsurface flow constructed wetlands*) la circulación del agua es por debajo del medio de soporte y se encuentra en contacto con los rizomas y raíces de las macrófitas. La profundidad de estos sistemas está entre los 0.3 y 0.6 m. (Reed *et al.*, 1995) (Figura 2.3).

En los humedales de flujo subsuperficial la capacidad de sorción del medio puede ser diseñada para proveer una remoción significativa de fósforo. Este almacenamiento se satura eventualmente siendo necesario un reemplazo del medio y el reestablecimiento del humedal. En los humedales de flujo libre, la sorción del medio puede proveer la remoción inicial pero este proceso es parcialmente reversible y eventualmente se vuelve saturado. Para algunas condiciones del medio puede existir una liberación inicial de fósforo. Una porción de fósforo actúa como fertilizante del humedal y otra parte del fósforo es utilizado en el crecimiento y el establecimiento de nuevas plantas (IWA, 2001).

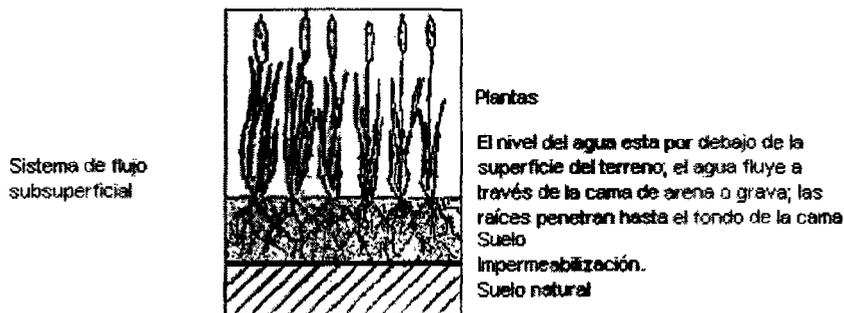


Figura 2.3 Humedales de tipo subsuperficial (modificado de Lara-Borrero, 2006)

#### 2.4.1.1 Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH)

Se denominan humedales de flujo horizontal porque el agua residual es alimentada en la entrada con un flujo lento a través de los poros de la tubería puesta en

la superficie de manera horizontal hasta alcanzar la zona de descarga, donde se colecta y es descargada hacia fuera del humedal (Ramírez-Carrillo, 1998, Rodríguez y Varela, 2003). Durante el camino, el agua entra en zonas aerobias y anaerobias o anóxicas. La zona aerobia ocurre alrededor de las raíces y los rizomas que permiten la entrada del oxígeno al sustrato. Durante el paso del agua residual por la rizosfera el agua se limpia por la degradación microbiológica y por procesos físicos y químicos (Figura 2.4).

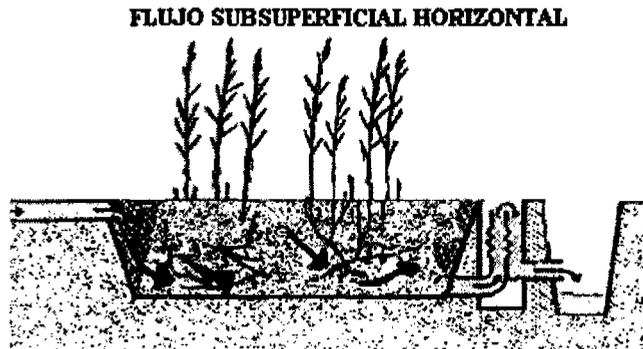


Figura 2.4 Humedales de tipo subsuperficial horizontal (modificado de García, 2006)

#### 2.4.1.2 Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)

Los sistemas de tratamiento de flujo vertical generalmente son plantados con carrizos (*Phragmites australis*), entre otras. Este tipo de humedales están compuestos por una cama de grava como soporte y plantadas con carrizos, muy parecido al sistema de flujo horizontal, en este caso el líquido es dosificado sobre toda la superficie del medio de soporte. Se filtra por gravedad a través del medio de soporte y se drena verticalmente (Rodríguez y Varela, 2003), lo que causa la aireación de éste, transfiriendo oxígeno al medio (Fenoglio-Limón, 2003). El agua después es recolectada por una tubería que hay en la base inferior para así, poder disponer del agua (IWA, 2001) (Figura 2.5).

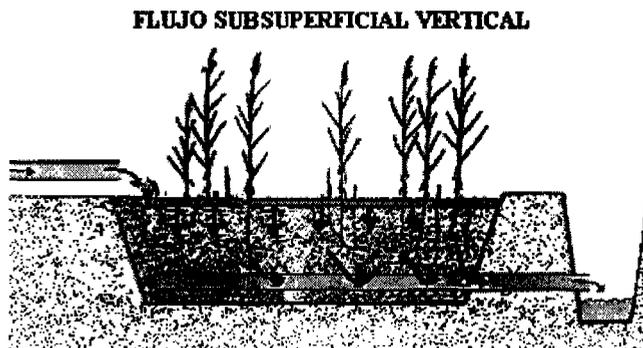


Figura 2.5 Humedales de tipo subsuperficial vertical (modificado de García, 2006)

## **2.4.2 Componentes de un humedal artificial**

Un humedal está compuesto por agua, sustrato o material de soporte, plantas vasculares, residuos de la planta, invertebrados (larvas y lombrices) y una gran variedad de microorganismos (en su mayoría bacterias), existen varios mecanismos interrelacionados para el mejoramiento de la calidad del agua entre los cuales están (IWA, 2001):

- La sedimentación de partículas.
- La filtración y la precipitación química.
- La transformación química.
- La adsorción y el intercambio iónico en la superficie de las plantas, sustrato y sedimento.
- La degradación, la transformación y la toma de los contaminantes y nutrientes por los microorganismos y las plantas.
- La depredación y la muerte natural de los patógenos.

Otro componente importante de un humedal artificial es la capa impermeable que evita que el agua contamine el subsuelo y las aguas subterráneas, quedando aislado de los alrededores, el humedal sólo cumple con la función de tratar el agua, quedando así aislado para evitar contaminar.

### **2.4.2.1 Agua**

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal artificial porque es éste factor el que determina en mayor medida muchos de los mecanismos por los cuales se remueven los contaminantes dentro de un HA. La hidrología de un humedal construido no es muy diferente que la de otras aguas superficiales y cercanas a superficie, difiere en algunos aspectos importantes:

- 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 evaporación-transpiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo desigual el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas y, segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

### **2.4.2.2 El lecho o material de empaque**

Se requiere un soporte de grava o arena principalmente debido a que las semillas no cuentan con un medio de soporte, para que la germinación sea óptima. Si la porción del sustrato o medio de soporte permanece inundada se puede formar una capa de hojarasca que favorezca la germinación de las semillas de las plantas, de manera más

frecuente una parte del soporte puede permanecer menos mojada permitiendo la invasión de especies terrestres tales como las hierbas.

El material de empaque utilizado en los humedales artificiales generalmente es inerte como la arena, la escoria volcánica, piedras o materiales de las propias zonas que resulten económicas y viables para su utilización (Rodríguez y Varela, 2003).

La sorción que ejerce el material de soporte en los humedales con algunos elementos, le da la capacidad de una mejor remoción de ciertos contaminantes que tienen las descargas de aguas que pasan por el medio de soporte, así también el medio de soporte es muy importante para los microorganismos que viven dentro de los humedales ya que los sostiene, creando una buena distribución de éstos en las zonas del humedal, por lo que el contacto del agua y los microorganismos con la materia orgánica e inorgánica es mayor, llevándose a cabo una mejor remoción de nutrientes por parte de los organismos que se encuentran como una biopelícula sobre el material de soporte.

Otro elemento fundamental en el proceso de depuración por humedales es el sedimento orgánico, que además de ser sustrato para el crecimiento microbiano, presenta una elevada capacidad de cambio que asegura la retención y posterior transformación del material orgánico e inorgánico. Así mismo, juega un papel fundamental en la dinámica del fósforo, cuyo principal mecanismo de eliminación es, junto con la asimilación biótica, su adsorción a las arcillas y la precipitación y formación de complejos con Al, Fe y Ca, presentes en los sedimentos.

#### **2.4.2.3 Las plantas**

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los tallos, raíces, y rizomas) permite la penetración al medio de soporte y transporta el oxígeno de manera más profunda (IWA, 2001, Lara-Borrero, 1999, Soto-Esquivel, 2003), de lo que llegaría naturalmente a través de la difusión.

Las plantas son parte fundamental en los humedales, ya que sirven como soporte de muchos microorganismos que viven en la zona de las raíces de las mismas, las plantas ayudan en gran medida a la depuración de los contaminantes, al asimilar los nutrientes que ellas necesitan para llevar a cabo sus procesos metabólicos que les sirven para vivir, crecer y reproducirse, también son parte fundamental en la oxigenación del sistema (generalmente la parte de la rizosfera). Las macrófitas en un humedal artificial promueven que éste tenga diferentes propiedades y mejora el ambiente dentro del humedal para que existan zonas aerobias, siendo un componente esencial en el diseño.

Un efecto importante de las macrófitas en relación con los procesos de tratamiento del agua residual son los efectos físicos que los tejidos de la planta van creando al crecer (control de la erosión, efecto de filtración y el suministro de área superficial para la adhesión de los microorganismos). En la zona de la rizosfera de las plantas no sólo viven los organismos, las semillas de las plantas también se alojan en esa zona, formando un banco de semillas para la posible regeneración de las plantas, entre otros microorganismos. El metabolismo de las macrófitas (tal como la liberación de oxígeno y la acumulación de nutrientes) ayuda al desempeño del proceso. Las macrófitas tienen

otras funciones tales como el proveer un hábitat sustentable para ciertas especies de aves y mamíferos menores y dar una apariencia estética (Lara-Borrero, 1999).

La presencia de la vegetación en los humedales distribuye y disminuye las velocidades de las corrientes de agua. Esto genera mejores condiciones para la sedimentación de sólidos suspendidos, disminución del riesgo de erosión y resuspensión, y el incremento del tiempo de contacto entre el agua y la superficie de la planta. Las macrófitas son importantes para estabilizar la superficie del suelo en los humedales artificiales, porque la densidad de raíces del sistema impide la formación de canales de erosión. En sistemas de flujo vertical la presencia de las macrófitas junto con un régimen intermitente de carga ayuda a prevenir la obstrucción del material de soporte. Los movimientos de las plantas, como consecuencia del viento y otros factores, mantienen la superficie abierta para el crecimiento de las raíces dentro del material de soporte ayudando a la descomposición de la materia orgánica y previniendo la obstrucción (IWA, 2001).

El término macrófito incluye plantas vasculares que tienen tejidos que son fácilmente visibles, las hidrófitas son el componente estructural dominante de la mayoría de los sistemas de tratamiento basados en los humedales. El conocer los requerimientos de crecimiento y las características de estas plantas es esencial para un diseño y operación exitosa. Las plantas vasculares se diferencian de las algas en la organización interna de sus tejidos resultando en la presencia de células especializadas. Una gran variedad de plantas hidrófitas están presentes en los humedales en forma natural (Ramírez-Carrillo, 1998).

Existen tres especies de plantas que son las más utilizadas en los humedales superficiales y subsuperficiales, los juncos, los carrizos y las espadañas. Sin embargo, la planta más utilizada alrededor del mundo es el carrizo (*Phragmites australis*), una planta ubicua que tiene una velocidad de crecimiento elevada, un desarrollo de raíces importante y gran tolerancia a las condiciones inundadas del suelo. Los carrizos se plantan utilizando rizomas, semillas y trasplante de plantas. Todas estas técnicas son utilizadas si la planta es saludable y existe una humedad adecuada en el suelo durante el periodo de adaptación de la planta.

Las plantas son el elemento más visible dentro de un sistema de tratamiento en un humedal, no hay duda que son esenciales para un alto nivel en el mejoramiento de la calidad del agua en los sistemas de tratamiento de los humedales, varios estudios han demostrado que el tratamiento de aguas es mejor cuando hay plantas presentes (IWA, 2001). Se sabe que son el mecanismo principal para la remoción sólo de algunos contaminantes ya que, para otros, las macrófitas no son el principal mecanismo de remoción, en comparación con las transformaciones físicas y microbianas que ocurren dentro de un humedal. Las plantas que son típicamente usadas en los sistemas de tratamiento de humedales no se consideran como factores significantes en la remoción de fósforo (Reed *et al.*, 1995).

Las principales funciones de las plantas en los humedales son:

- Estabilizar el sustrato y limitar la canalización del flujo.
- Dar lugar a velocidades de agua bajas y permitir que los materiales suspendidos se depositen.
- Tomar el carbono, nutrientes y elementos de traza e incorporarlos a sus tejidos.

- Transferir gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- A través de la entrada de oxígeno desde las estructuras superficiales de las plantas, oxigenar otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para el soporte de microorganismos.

Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

#### **2.4.2.4 Los microorganismos**

Los microorganismos que están presentes en el material de soporte dentro de los humedales juegan un papel muy importante en la degradación de la materia orgánica, ya que pueden existir transformaciones microbianas aerobias (es decir, requieren oxígeno libre o molecular) mientras otras transformaciones son llevadas a cabo en condiciones anaerobias (tienen lugar en ausencia de oxígeno libre o molecular). Muchos microorganismos son facultativos, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aerobias y anaerobias en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales.

Los microorganismos presentes en el material de soporte de un humedal y en la zona de la rizosfera de las plantas son los responsables de llevar a cabo la degradación biológica de la materia orgánica. Estos consumen el C, N y P disueltos en el agua y parte de estos nutrientes los incorporan a su tejido celular (Guido-Zárate, 2006), para llevar a cabo los procesos metabólicos, como su crecimiento y reproducción.

Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes. Los microorganismos también transforman la materia orgánica en elementos más simples que son fácilmente asimilables por las plantas, que en la forma que vienen en el agua residual no serían fáciles de asimilar por la planta y no los podría incorporar a sus tejidos.

Las funciones generales de los microorganismos son:

- Transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles (Lara-Borrero, 1999).
- Alterar las condiciones del potencial de óxido-reducción al ser los responsables de llevar a cabo las reacciones de óxido-reducción (Guido-Zárate, 2006).
- Involucrarse en la degradación y transformación de la materia orgánica.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y puede permanecer así durante años.

La comunidad microbiana de un humedal construido o artificial puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales. En casos especiales, pueden adaptarse las comunidades a estos contaminantes.

Los organismos dentro de un humedal requieren fósforo para su metabolismo al incorporarlo a sus tejidos. La forma más rápida en que es asimilado el fósforo es por la microbiota (bacterias, algas, microinvertebrados, etc.) debido a que los microorganismos proliferan y se multiplican en grandes cantidades (Kadlec y Knight, 1996).

Estudios en el microcosmos de un humedal indican que el fósforo que es asimilado por la microbiota ocurre en una escala de tiempo menor a una hora. Sin embargo, más del 90% es consumido en las siguientes 6 horas (Kadlec y Knight, 1996).

El fósforo se incorpora a todos los tejidos de los organismos vivos y, por lo tanto, está presente en toda la biota del humedal y la masa orgánica descompuesta.

## **2.5 Humedales artificiales a escala de laboratorio**

El estudio de humedales artificiales a escala de laboratorio es una técnica que permite simular las condiciones que se pueden presentar en un humedal, por lo cual se hace necesaria la utilización de diferentes variables de proceso y variables de medición para el estudio de los niveles de remoción de los contaminantes del sistema, mediante variables tales como pH, temperatura, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, medida como demanda química de oxígeno (DQO), fósforo (P), nitrógeno amoniacal, entre otros. Este tipo de estudios sirve de referencia para la optimización de la operación de un humedal.

Un humedal a escala de laboratorio permite, en cierta manera, el control y el estudio de las variables que se presentan en los humedales. Obviamente, no se puede decir que lo que se observa en el laboratorio sucederá en un humedal a escala real, ya que los humedales en la naturaleza dependen de muchos factores y las variables que los afectan también son muchas. Evidentemente, mientras más controladas se tengan las variables de operación para las que fue construido el humedal, serán más eficientes en la remoción de contaminantes.

Dependiendo de lo que se quiera estudiar en los humedales a escala de laboratorio, los resultados permitirán inferir cómo será el comportamiento del humedal a escala real y, con la información obtenida, ayudar en su diseño.

## **2.6 Remoción de fósforo**

Cuando existe suficiente cantidad de N y P, se produce un crecimiento masivo de algas en la superficie de las masas de agua que, al morir caen al fondo, donde se descomponen agotando el oxígeno en la profundidad. También por el exceso de éstas en la superficie es obstruido el paso de oxígeno a los cuerpos de agua por lo que el poco oxígeno que queda se va agotando y los seres vivos mueren a causa de este fenómeno llamado "eutrofización" (Kadlec y Knight, 1996).

Debido a que el fósforo es un macronutriente, la adición de éste a un humedal estimula el crecimiento de algas y organismos biológicos (Metcalf y Eddy, 1991), lo que provoca un incremento en la cantidad de biomasa. El fósforo además de ser asimilado por las plantas también sirve para su crecimiento.

Igualmente los microbios presentes en los procesos de tratamiento tenderán a asimilarlo e incorporarlo a su masa celular. Una parte del fósforo retorna al agua residual con la lisis y la muerte de las células y otra mayor tenderá a precipitar formando complejos con metales tales como hierro, aluminio y calcio que pudieran estar presentes.

El estudio del proceso de la remoción de fósforo puede ser muy efectivo con la utilización de HAFV a escala de laboratorio o de banco. Siempre es conveniente medir otros parámetros que permiten evaluar la eficacia de la operación del sistema como puede ser: la medición de los potenciales de óxido-reducción, conductividad eléctrica, pH, temperatura. El principal mecanismo de remoción del fósforo es por reacciones de intercambio de ligandos en los que los fosfatos desplazan el agua o los iones hidroxilo de la superficie de los óxidos hidratados de Fe y Al (Ramírez-Carrillo, 1998) y como los medios de soporte usados en los sistemas de humedales son, generalmente, grava o arena, que no contienen Fe o Al, la remoción de fósforo en general no es baja, ya que estos elementos están presentes en el agua de la llave con la que son alimentados los reactores.

Las plantas necesitan el fósforo como macronutriente y éste es almacenado en sus tejidos celulares como reserva de energía. Sin embargo, la cantidad de fósforo removido por este mecanismo es muy inferior al que se alcanza por precipitación (Lara-Borrero, 1999, Reed *et al.*, 1995).

Los humedales naturales y artificiales son capaces de absorber nuevas cargas de fósforo y, en condiciones apropiadas, proveen una alternativa de bajo costo a los procesos químicos y biológicos. El fósforo interactúa fuertemente con el suelo del humedal y la biota que provee un almacenamiento de corto y largo plazo de este nutriente (IWA, 2001).

La oxidación biológica produce la conversión de la mayor parte del fósforo a ortofosfatos, forma en que se encuentra en el agua residual. La remoción de ortofosfatos se lleva a cabo principalmente por reacciones de adsorción, complejación y precipitación con aluminio, fierro, calcio y minerales arcillosos que contiene el sustrato precipitando y adsorbiéndose en el suelo y material de empaque (Trautmann *et al.*, 1991).

La remoción de fosfatos por parte de las plantas para su biomasa y la asimilación por los microorganismos es considerada insignificante por algunos autores, en comparación con los efectos de absorción, no obstante otros han encontrado que constituye un porcentaje importante (15-27%) (Luna-Pabello *et al.*, 2001).

Cuando se aplica un tratamiento anaerobio-aerobio, ocurre la remoción de fósforo principalmente bajo condiciones anaerobias.

Durante los procesos de los ciclos elementales dentro del humedal, la energía química es tomada por la biota heterótrofa, parte del carbono (CO<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub>) se liberan a la atmósfera, mientras que una porción menor de fósforo y otros elementos no volátiles se precipitan a los sedimentos del humedal. Algunos microorganismos como algas, lentejas acuáticas y bacterias toman el fósforo en un mecanismo de remoción reversible, el ciclo debido al crecimiento, muerte y descomposición regresa el fósforo al sistema.

Las macrófitas siguen un ciclo similar pero a una escala de tiempo más lento (meses o incluso años). El residuo generado por ellas contribuye a un almacenamiento de largo plazo en el sistema y la sedimentación directa y la asimilación del fósforo pueden contribuir al proceso de acumulación. También puede existir una promoción biológica debido a los procesos mineralógicos como la formación de enlaces del fósforo con el hierro y aluminio y su posterior precipitación (Reed *et al.*, 1995).

## CAPÍTULO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar donde se realizó la experimentación

Los sistemas experimentales se instalaron en los laboratorios 301, 302 y 303 del Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, en el Conjunto E de la Facultad de Química, en la UNAM, México D.F.

#### 3.2 Sistema experimental

##### 3.2.1 Descripción del sistema experimental

El sistema experimental se montó en un laboratorio donde la temperatura se mantuvo relativamente constante ( $22\pm 2^\circ\text{C}$ ). El sistema constó de cuatro reactores de 30 cm de diámetro y 35 cm de altura empacados con escoria volcánica (tezontle) previamente lavada y esterilizada a  $121^\circ\text{C}$  por 30 min (Guido-Zárate, 2006), sirviendo como soporte para las plantas y para los microorganismos, que tiene un tamaño de partícula específico y que permite un adecuado flujo del agua residual. Su granulometría estuvo distribuida como se muestra más adelante (Tabla 3.1). El sistema experimental estuvo compuesto por los reactores RA<sub>1</sub> (reactor con planta) y RA<sub>2</sub> (reactor sin planta) y sus duplicados (RB<sub>1</sub> con planta y RB<sub>2</sub> sin planta), que funcionaron como humedales artificiales de flujo vertical descendente (HAFV). La Figura 3.1 muestra a detalle el sistema experimental empleado. Estos reactores se alimentaron con agua residual sintética (Fenoglio-Limón, 2000, 2003), con un flujo de alimentación continua de 7 litros por día manteniendo condiciones de inundación (un cm debajo de la superficie). Se implementó un sistema constante para la iluminación de los reactores manteniéndose con 16 h de luz y 8 h de oscuridad, empleando ocho lámparas de tubos fluorescentes de 30 W cada una, con características similares a la luz de día. Las plantas que fueron utilizadas (carrizos) se extrajeron de una misma planta madre y con un sólo brote del mismo tamaño que fue tomado del humedal de flujo horizontal ubicado en los Viveros de Coyoacán de la Ciudad de México. Un brote de 1.5 cm de altura se plantó a 10 cm de profundidad en el reactor RA<sub>1</sub> y otro similar en el RB<sub>1</sub>. Los reactores RA<sub>2</sub> y RB<sub>2</sub> se emplearon como control sin planta. Para la medición del pOR o E<sub>h</sub> (potencial de óxido-reducción) se utilizaron electrodos comerciales de Ag/AgCl-Pt. Se colocaron a diferentes profundidades (2, 10 y 30 cm), con respecto de la parte superior de los reactores (Fig. 3.2) y se tomaron mediciones cada diez minutos con un sistema de adquisición de datos durante las 24 horas de cada día. Estos datos fueron almacenados en una computadora. En todos los reactores se midieron los parámetros de fósforo total, DQO, potenciales redox, pH y temperatura.

##### 3.2.2 Alimentación del sistema

La alimentación del sistema se llevó a cabo en dos etapas, la primera fase experimental se realizó con un agua residual sintética que tenía una  $\text{DQO}_{\text{soluble}} = 450 \text{ mg O}_2/\text{L}$  con una relación C:N:P de 30:1:0.04, empleando sacarosa como fuente de carbono,  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ; sulfato de amonio como fuente de nitrógeno,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  y fosfato de sodio dodecahidratado como fuente de fósforo,  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Para la segunda fase

experimental se redujo la  $DQO_{\text{soluble}} = 225 \text{ mg O}_2/\text{L}$ . (15:1:0.04,  $C_{12}H_{22}O_{11}$ :  $(NH_4)_2SO_4$ :  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ ).

**Tabla 3.1** Estratos de material de soporte en las columnas de estudio (Fenoglio-Limón, 2000, 2003)

Diámetro granular (mm)	Grosor del estrato (cm)	Altura relativa a la parte inferior de la columna (mm)
4-8	20	110
0.5-4	60	90
4-8	10	30
12-16	20	20

El agua sintética se preparó disolviendo 18 g de sacarosa, 1.2 g de  $(NH_4)_2SO_4$  y 0.12 g de  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  en 40 L de agua de la llave y se preparó diariamente para evitar variaciones en las características de la misma durante su almacenamiento. Para la segunda etapa, sólo se varió la cantidad de sacarosa pesando 9 g de este elemento, disminuyendo la DQO a la mitad, dando una relación C:N:P de 15:1:0.04 en peso. La composición del agua residual sintética se muestra en las **Tablas 3.2** y **3.3** respectivamente. Para la preparación del agua sintética, se utilizó un recipiente de 60 litros donde se almacenaba el agua residual sintética y mediante una bomba peristáltica de ocho canales fueron alimentados intermitentemente los reactores por medio de goteo.

**Tabla 3.2** Concentración del agua sintética empleada para la primera etapa (Guido-Zárate, 2006)

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN mg/L
$C_{12}H_{22}O_{11}$	450
$(NH_4)_2SO_4$	30
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	3

**Tabla 3.3** Concentración del agua sintética empleada para la segunda etapa

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN mg/L
$C_{12}H_{22}O_{11}$	225
$(NH_4)_2SO_4$	30
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	3

### 3.3 Mediciones analíticas

A continuación se mencionan las técnicas analíticas empleadas para la determinación de los diferentes parámetros.

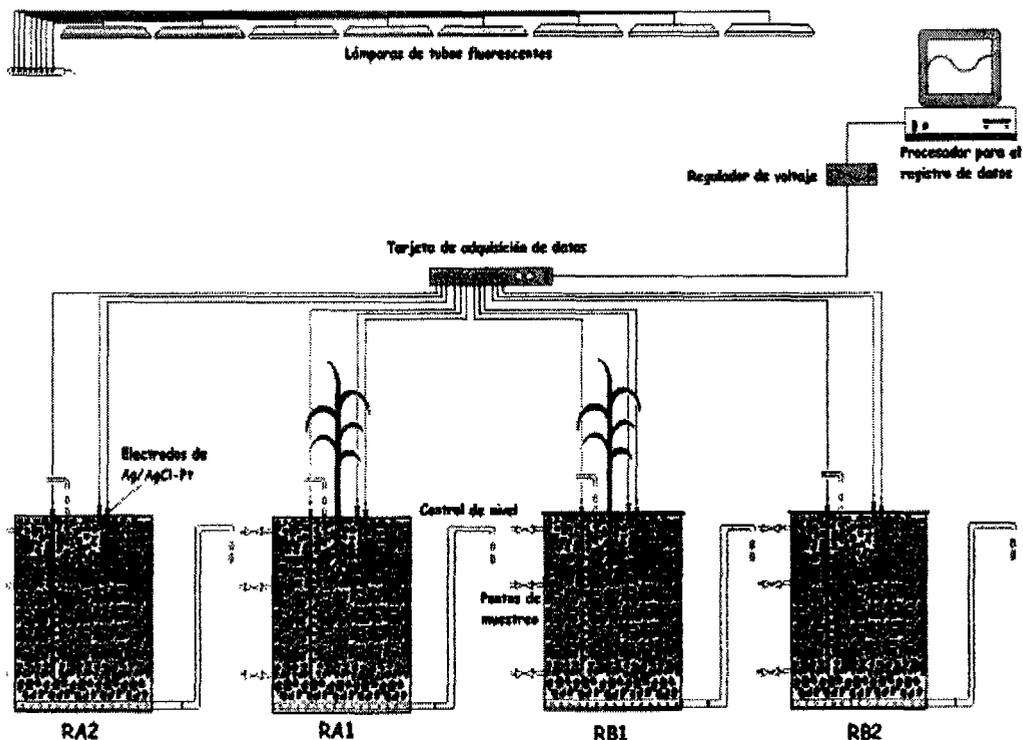


Figura 3.1 Diagrama del sistema experimental completo. (Guido-Zárate, 2006)

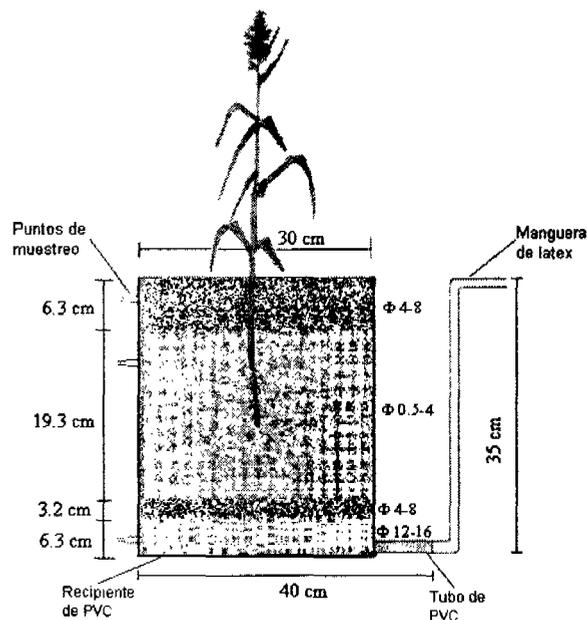


Figura 3.2 Detalle de la construcción de los reactores

### 3.3.1 Medición de fósforo

Para la técnica de fósforo total se utilizó el método de cloruro estano que fue obtenido de la norma mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001 y el texto de Métodos Normalizados (APHA, 1992), **Análisis de aguas, determinación de fósforo total en**

aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba, la cual se muestra de forma detallada en el Anexo A.1. Las medidas de absorbancia fueron tomadas con un espectrofotómetro marca SPECTRONIC modelo 21D, de acuerdo con el instructivo del fabricante.

Se realizaron las mediciones para fósforo total tres veces a la semana. Estas muestras fueron realizadas por triplicado.

### **3.3.2 Medición de DQO (demanda química de oxígeno)**

Para la técnica de DQO se utilizó el método a reflujo cerrado/método espectrofotométrico que fue obtenido de la norma mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 y el texto de Métodos Normalizados (APHA, 1992), **Análisis de agua, determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas método de prueba**, corregida por Oaxaca-Grande (1997), la cual se muestra de forma detallada en el Anexo A.2.

Las medidas de absorbancia fueron tomadas con un espectrofotómetro SPECTRONIC 21D, de acuerdo con el instructivo del fabricante.

Se realizó la medición en el día para DQO una vez a la semana. Estas muestras fueron tomadas por triplicado.

### **3.3.3 Medición del pOR (potencial de óxido-reducción)**

Para la medición del pOR (potencial de óxido-reducción) se utilizaron electrodos comerciales de Ag/AgCl-Pt. Se colocaron a diferentes profundidades (2, 10 y 30 cm), con respecto de la parte superior de los reactores y se tomaron mediciones cada 10 minutos con un sistema de adquisición de datos durante las 24 horas de cada día. Estos datos se almacenaron en una computadora. Se siguió la calibración y prueba de la tarjeta y electrodos de acuerdo con la metodología establecida por Guido-Zárte (2006).

### **3.3.4 Medición de pH**

Para la medición del pH se utilizó un potenciómetro comercial ORIÓN, Modelo 720A, de acuerdo con las condiciones del fabricante.

Se realizaron las mediciones en el día para pH una vez a la semana. Antes de tomar las mediciones el potenciómetro se calibró con una solución estándar de pH 7.

### **3.3.5 Medición de temperatura**

La temperatura del sistema fue medida con un termómetro de la marca "Brannan".

## **3.4 Análisis estadísticos**

Para evaluar la significancia de las diferencias entre los datos de los sistemas en estudio, se utilizó el programa Statgraphics Plus 5.0, de acuerdo con las instrucciones de la empresa licenciadora.

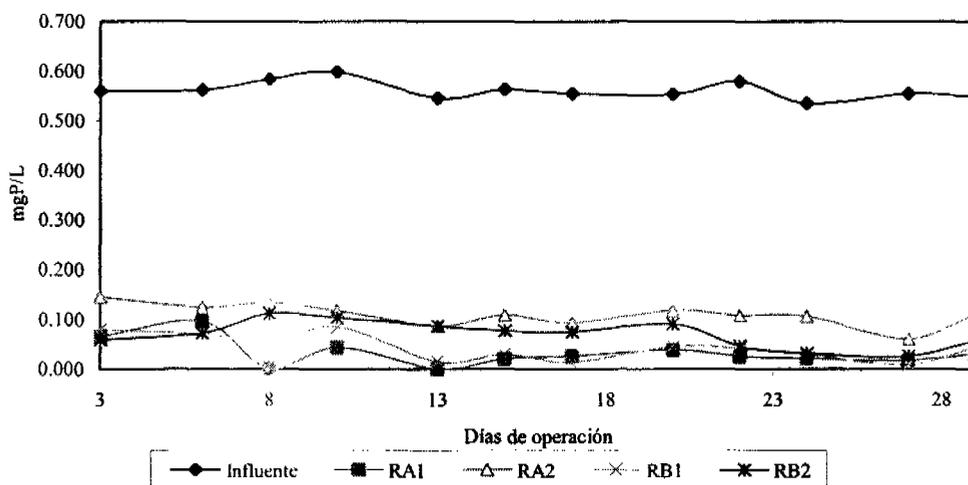
## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de los parámetros evaluados, fósforo, DQO, potencial redox, pH y temperatura en cada reactor.

#### 4.1 Fósforo

La Figuras 4.1 y 4.2 muestran el comportamiento de la disminución de fósforo en la etapa con el agua residual sintética de carga orgánica de 450 mg O<sub>2</sub>/L (DQO<sub>soluble</sub>) y la Tabla 4.1, da las eficiencias de remoción. Los valores de fósforo obtenidos indican que hay una disminución de este elemento en forma de fosfatos en todos los efluentes de los reactores. Es claro que tanto la biopelícula como las propias plantas están haciendo uso de esta fuente como macronutriente esencial, que es necesario también para su crecimiento. En el caso de los microorganismos que están presentes en el material de soporte como biopelícula, este nutriente es esencial ya que lo asimilan para así poder llevar a cabo los procesos metabólicos para su desarrollo y su reproducción incorporándolo a sus tejidos y como la tasa de crecimiento de los mismos se lleva a cabo muy rápido, los microorganismos juegan un papel muy importante en la remoción de este elemento.



**Figura 4.1** Valores obtenidos para fósforo durante el período de la primera etapa (reactores con planta (RA<sub>1</sub>, RB<sub>1</sub>) y sin planta (RA<sub>2</sub>, RB<sub>2</sub>))

Como puede verse en la Figura 4.2, los reactores con planta (RA<sub>1</sub> y RB<sub>1</sub>) muestran claramente una remoción mayor que los reactores que no la tienen (RA<sub>2</sub> y RB<sub>2</sub>) (debido justamente a la presencia de la hidrófita), por lo que se puede observar que la planta juega un papel importante en la remoción de fósforo, ya que los cuatro reactores tienen el mismo material de soporte y también biopelículas microbiológicas similares. Sin embargo, dentro de los reactores se llevan a cabo otros mecanismos de remoción de fósforo además de la toma de este nutriente por la biopelícula y las propias plantas. Estos mecanismos son de tipo químico, tales como la formación de complejos con aluminio y con hierro a valores de pH ligeramente ácidos. El fósforo puede ser adsorbido en los hidróxidos de Fe y Al de la roca volcánica en condiciones ácidas y

pueden precipitar como fosfatos de Fe y Al (Faulkner y Richardson, 1991). El fósforo forma comúnmente complejos insolubles con el hierro oxidado (Kadleck y Knight, 1996). Ésta podría ser una línea de investigación interesante de seguir.

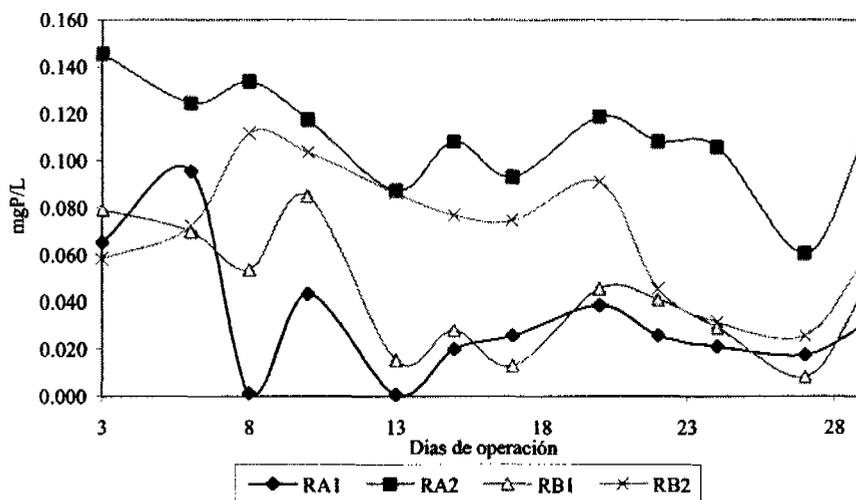


Figura 4.2 Variación de la concentración del fósforo durante el período de la primera etapa (reactores con planta (RA<sub>1</sub>, RB<sub>1</sub>) y sin planta (RA<sub>2</sub>, RB<sub>2</sub>))

Tabla 4.1 Porcentajes de remoción de fósforo promedio de cada reactor durante las dos etapas (450 y 225 mg DQO/L, respectivamente)

Reactor	Primera etapa	Segunda etapa
Reactor con planta (RA <sub>1</sub> )	94.3	93.0
Réplica del reactor con planta (RB <sub>1</sub> )	92.4	93.2
Reactor sin planta (RA <sub>2</sub> )	80.5	89.6
Réplica del reactor sin planta (RB <sub>2</sub> )	87.6	87.8

De la **Tabla 4.2** se pueden observar los valores del potencial redox del reactor con planta (RA<sub>1</sub>), donde se puede ver que a la profundidad de 10 cm se tienen condiciones oxidantes (potenciales positivos) de lo que se puede pensar que el hierro está presente en forma oxidada y disponible para formar complejos oxidados con el fósforo. Este fenómeno puede ser exclusivo de este reactor ya que en el reactor sin planta (RA<sub>2</sub>) se obtuvieron pOR negativos en todos los casos (**Tabla 4.2**). Cabe señalar que aunque no se hizo un análisis cualitativo ni cuantitativo para corroborar la presencia de Fe en el agua sintética, los reactivos utilizados en la preparación de la misma, contienen trazas de este elemento así como de Al y Ca, aunado a eso, cantidad de estos mismos elementos también se encuentran presentes en el agua de la llave con la que se preparó el agua sintética.

La **Figura 4.3** muestra el comportamiento de la disminución de fósforo en la etapa con la mitad de la concentración de materia orgánica (propuesta) DQO<sub>soluble</sub> = 225 mgO<sub>2</sub>/L. Los valores de fósforo obtenidos muestran que hay una disminución de fósforo en todos los efluentes de los reactores, como en el caso anterior, debido a los procesos de remoción físicos, biológicos y químicos, los cuales ayudan a la remoción de este nutriente, disminuyendo el fósforo total en los efluentes de los reactores. Como se puede observar en la gráfica, los reactores que tienen planta tienen una remoción de fósforo ligeramente mayor comparada con los reactores sin planta (debido a la presencia

de la hidrófita), lo que influye visiblemente en la disminución de este elemento, dado que la misma planta necesita de este macronutriente para vivir y lo incorpora a sus tejidos, asimilándolo para su crecimiento.

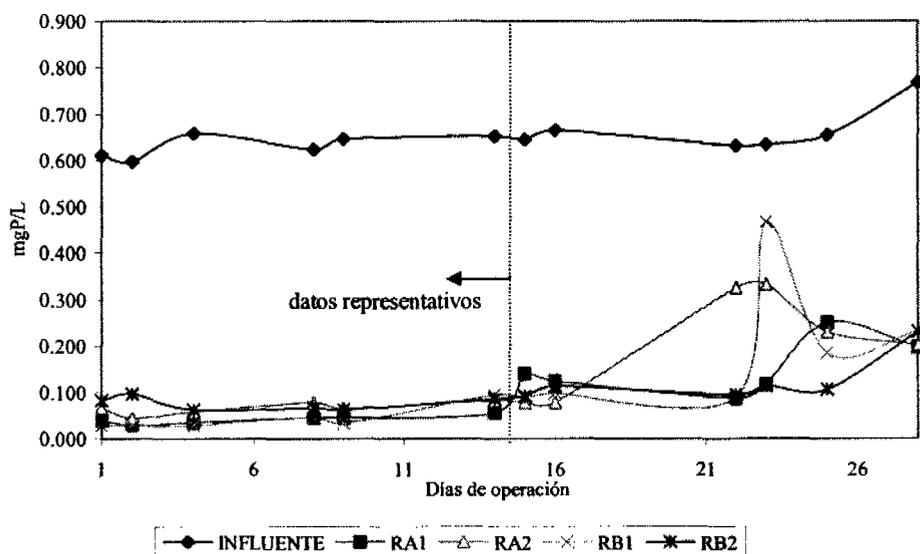


Figura 4.3 Valores obtenidos para fósforo durante el período de la segunda etapa (reactores con planta (RA<sub>1</sub>, RB<sub>1</sub>) y sin planta (RA<sub>2</sub>, RB<sub>2</sub>))

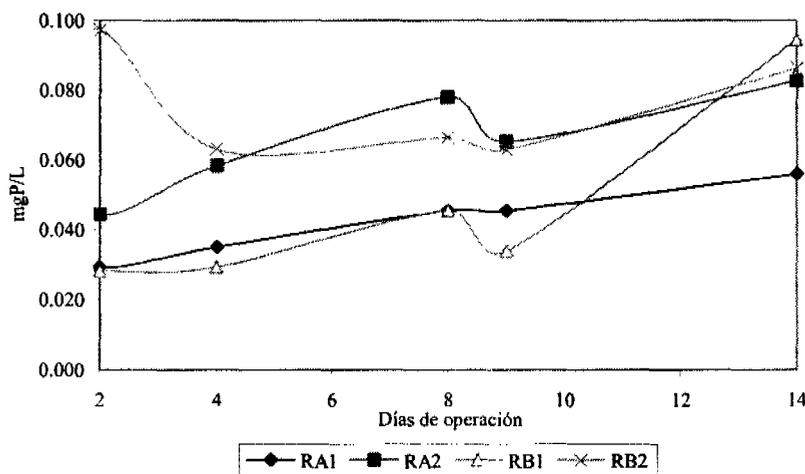
Por lo que se puede observar en la gráfica anterior (Figura 4.3), el comportamiento en la tendencia de los valores en los primeros días de operación (días del 1-15) es estable en general en todos los reactores. Debido a los problemas de operación que se tuvieron a partir del día de operación 15 hasta día 28 (fallas eléctricas, estancamientos de agua en los reactores), dichos valores no reflejan un comportamiento claro y no se toman en cuenta para el análisis y conclusiones en este trabajo (día de operación 15-28), tomándose en cuenta solo los primeros días donde los reactores muestran una tendencia estable en los datos. La Figura 4.4 muestra más claramente las diferencias encontradas entre los reactores con planta y los reactores sin planta durante los primeros 14 días de operación.

Se esperaba una mayor eficiencia en la remoción de fósforo total en la etapa de 450 mgO<sub>2</sub>/L ya que los microorganismos y la planta deberían de tener el suficiente sustrato para su crecimiento y así una mejor asimilación del fósforo. Sin embargo, una mayor concentración de materia orgánica (DQO) incrementa el consumo de oxígeno necesario para oxidarla y por ende se crean condiciones más reductoras en los reactores lo que afecta en la presencia de especies oxidadas de Fe para la formación de complejos insolubles de fósforo.

Se esperaba que en los reactores con planta, se viera un diferencia notable de los reactores que no la tenían, debido a una mayor disponibilidad de oxígeno disuelto aportado por la raíz de la plantas en la zona de la rizosfera. Esto permitiría una buena oxigenación para los microorganismos aerobios que se encuentran en los alrededores de la raíz, por lo que habría una buena eficiencia en la remoción de fósforo por la planta y por microorganismos. Sin embargo, como se muestra en la Figura 4.4, el aporte de la planta es todavía muy bajo, ya que es una sola planta y se encuentra en su primera etapa

de crecimiento. El comportamiento es similar, tanto en los reactores que tienen planta como en los que no la tienen. Aunque el aporte de la planta es mínimo en la remoción de fósforo, no deja de ser importante su aporte en un humedal. En esta investigación se muestra una tendencia clara de que la remoción de fósforo en aquellos reactores con planta es ligeramente mayor. En el Anexo C se presenta el estudio estadístico para verificar si son significativamente diferentes y se demuestra que sí lo son (favoreciendo a los reactores con planta).

Es importante resaltar que el objetivo de este trabajo es el de estudiar la remoción de este elemento a escala de laboratorio, ya que esto presenta ventajas importantes al poder controlar las variables que afectan a la eficiencia de remoción en los sistemas reales. Se puede decir que los resultados obtenidos en esta experimentación pueden ayudar a verificar que, en condiciones de laboratorio (condiciones controladas, equipo experimental pequeño y poca cantidad de plantas), se puede estudiar la remoción de este nutriente.



**Figura 4.4** Variación de la concentración del fósforo durante el período de la segunda etapa (reactores con planta (RA<sub>1</sub>, RB<sub>1</sub>) y sin planta (RA<sub>2</sub>, RB<sub>2</sub>))

Los resultados obtenidos no muestran un cambio importante entre las dos etapas estudiadas (DQO diferente) (Tabla 4.1). Dado que las plantas necesitan el fósforo como macronutriente para llevar a cabo sus procesos metabólicos y a que éste es utilizado para su crecimiento y parte del mismo es almacenado en sus tejidos celulares como reserva de energía, se esperaría que la diferencia en la fuente de carbono tuviera un efecto. Sin embargo, la cantidad de fósforo removido por este mecanismo es similar en ambos casos (IWA, 2001) y el análisis estadístico así lo demuestra.

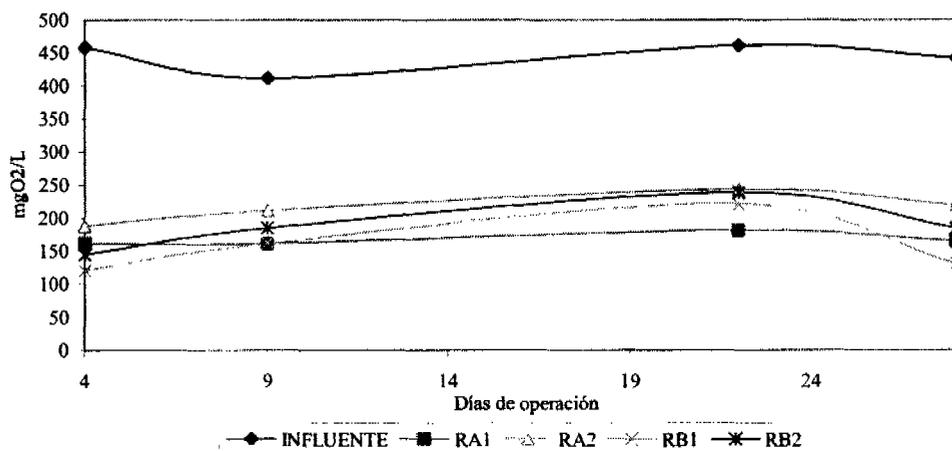
Por ese motivo y por los datos obtenidos de la parte experimental, se infiere que una parte de la eliminación del fósforo es llevada a cabo por la biopelícula que todos los reactores tienen sobre el soporte pero, muy probablemente, la vía de remoción de fósforo se lleva a cabo principalmente por reacciones de adsorción, formación de complejos y precipitación con aluminio y hierro o con otros metales que estén en el medio, lo cual podría constituir una investigación subsecuente a ésta.

Como se observa en la Tabla 4.1, el porcentaje de remoción de fósforo en los reactores que tienen planta es 5% mayor que en los controles. Esto significa que entre el 80 y el

87% del fósforo se elimina por mecanismos ajenos a la planta. Estos mecanismos pueden ser físicos o químicos o bioquímicos y será motivo de investigaciones futuras corroborar cuáles son los limitantes.

#### 4.2 Remoción de materia contaminante medida como demanda química de oxígeno

Como se puede observar en la **Figura 4.5** hay una disminución en la DQO en todos los reactores, observándose que en los reactores con planta es ligeramente mayor esta remoción. Debe recordarse que los reactores sin planta tienen microorganismos adheridos al material de empaque formando una biopelícula que es la responsable de la mayor parte de la degradación de la materia biodegradable. La planta es una fuente de oxígeno fotosintético transportado a través de la aerénquima (tejido poroso). Por ello, aún cuando los microorganismos remueven material orgánico en los reactores sin planta, en los que sí la tienen se observa una degradación ligeramente mayor, producto del efecto de la macrófita. En sistemas reales no se tiene una sola planta ni ésta está en su etapa inicial de crecimiento, lo que evidentemente cambiará esta relación.

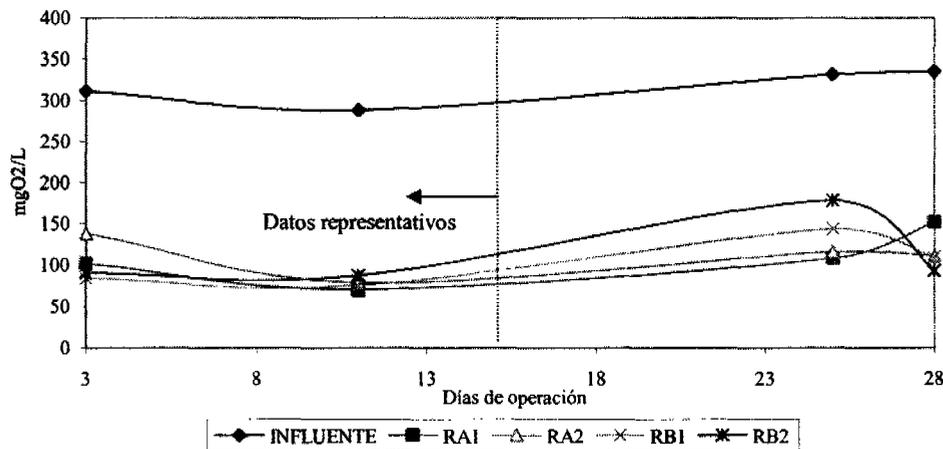


**Figura 4.5** Valores obtenidos durante las mediciones de demanda química de oxígeno soluble el período de la primera etapa (reactores con planta (RA<sub>1</sub>, RB<sub>1</sub>) y sin planta (RA<sub>2</sub>, RB<sub>2</sub>))

Las plantas como tales tienen, aparentemente, poco efecto en la remoción de la materia orgánica en esta investigación. Pero sí es importante enfatizar que existe una relación simbiótica que se establece entre ellas y los microorganismos adheridos a sus raíces, lo que hace que la degradación sea más eficiente que en los reactores sin planta (Guido-Zárate, 2006). Como son generadoras “netas” de oxígeno incrementan la degradación de la materia orgánica y, por ello, en el caso de los reactores sin planta, hay una remoción de la DQO<sub>soluble</sub> ligeramente menor. Como se mencionó antes, la zona radicular de las dos macrófitas es todavía muy pequeña ya que tienen solamente unos meses de haber sido plantadas. A futuro, se verán los cambios en los resultados que se obtengan.

Como se puede observar en la **Figura 4.6**, hay una disminución en la carga orgánica en todos los reactores, observándose que en los reactores con planta es ligeramente mayor la degradación. En esta segunda etapa hubo problemas en la operación de los reactores ocasionados por causas externas a los experimentos, por lo que sólo se tomaron los datos de los primeros 15 días de operación, donde se puede observar que existe una

concentración estable de la carga orgánica. Para este parámetro, la tendencia no es muy clara debido a los problemas de operación mencionados.



**Figura 4.6** Valores obtenidos durante las mediciones de demanda química de oxígeno soluble el período de la segunda etapa (reactores con planta (RA<sub>1</sub>, RB<sub>1</sub>) y sin planta (RA<sub>2</sub>, RB<sub>2</sub>))

### 4.3 Potencial redox

La **Tabla 4.2** muestra los valores promedio del pOR para el reactor con planta RA<sub>1</sub>. En la zona de la rizosfera (a 10 cm de profundidad), los valores son positivos, a diferencia de los obtenidos a 2 y a 30 cm. Esto podría explicarse porque el oxígeno que se genera en esa zona es suficiente para elevar los valores del potencial, debido a que la planta por medio de la raíz que se encuentra en esa zona, genera oxígeno durante el día, siendo suficiente para que los pOR sean positivos.

**Tabla 4.2** Valores promedio del pOR para las diferentes profundidades (sistema RA)

Profundidad	Reactor RA <sub>1</sub> (con planta)	Reactor RA <sub>2</sub> (sin planta)
2 cm	- 151 mV	- 171 mV
10 cm	+ 213 mV	- 191 mV
30 cm	- 91 mV	- 141 mV

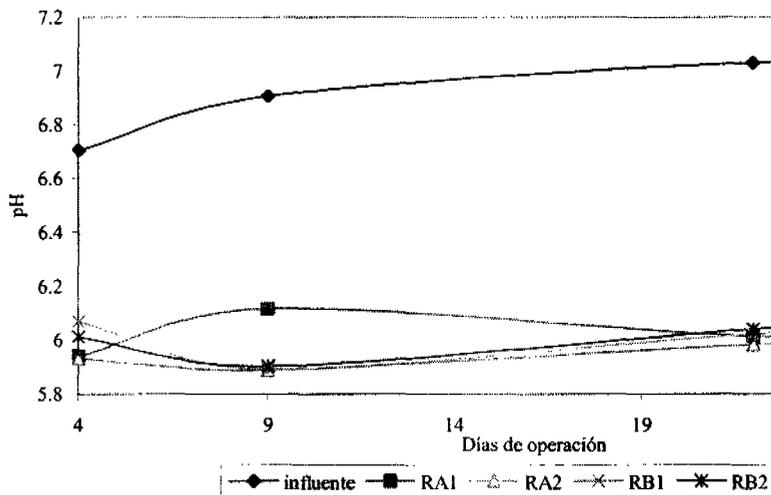
Los valores del pOR a 2 y 30 cm indican las condiciones reductoras que hay en esas zonas. Esto se explica por el hecho de que el oxígeno en las proximidades de las raíces de las plantas aportan a los reactores, es consumido muy rápido y éste disminuye conforme la profundidad es mayor.

En el caso del reactor sin planta RA<sub>2</sub> se puede observar que los potenciales de óxido-reducción son todos negativos a las diferentes profundidades. Es importante resaltar que la interpretación de los potenciales redox es muy difícil, así que las aseveraciones que aquí se hacen son generales. Es bien sabido que las condiciones de saturación e inundación en los humedales, limitan el paso del oxígeno hacia la columna de agua, promoviendo las condiciones anaerobias y reductoras. Este hecho puede ser modificado por la presencia de las plantas, ya que éstas conducen oxígeno directamente de la atmósfera a través de sus tejidos porosos y del que generan por la fotosíntesis.

Este fenómeno mantiene esa zona (rizosfera) oxigenada, lo que se verifica con potenciales redox menos negativos o, en algunos casos, positivos como fue en el caso de esta investigación. En la investigación previa, todos los pOR eran negativos, incluida esta zona del reactor (Guido-Zárate, 2006). Esto se debió al tamaño de la planta (que era de 10 cm en su parte aérea al inicio de esa investigación). Actualmente, mide más de un metro, mientras que en la investigación anterior llegó a alcanzar solamente 40 cm. Esto significa que la parte aérea y la rizosfera tienen un rol preponderante en la operación de los humedales (Guido-Zárate y col., 2006).

#### 4.4 Valores de pH

Como se muestra en la **Figura 4.7**, la tendencia del pH durante los días en que se alimentó el agua con una carga orgánica DQO<sub>soluble</sub> de 450 mg O<sub>2</sub>/L, tiende a ser ligeramente ácido debido al fenómeno de la acidogénesis provocada por la microanaerobiosis, el cual se muestra favorecido por las condiciones de inundación, lo que significa que las bacterias sulfato-reductoras (anaerobias estrictas) toman los sulfatos y los reducen produciendo ácido sulfhídrico y a las fuentes de carbono que las transforman en ácidos orgánicos (Castro-González, 2004). El pH durante la primera etapa es ligeramente ácido como se muestra en la misma figura. Se puede observar que en los cuatro reactores el pH tiene valores muy cercanos a 6 (ligeramente ácidos).



**Figura 4.7** Valores obtenidos para pH durante el período de la primera etapa (reactores con planta (RA<sub>1</sub>, RB<sub>1</sub>) y sin planta (RA<sub>2</sub>, RB<sub>2</sub>))

La **Figura 4.8** muestra la tendencia del pH durante los días donde se alimentó la carga orgánica medida como DQO<sub>soluble</sub> de 225 mg O<sub>2</sub>/L. El pH tiende a ser ligeramente ácido como el caso anterior, con los dos reactores con planta con los valores de pH menos ácidos, especialmente en los días en que no hubo problemas técnicos.

Es interesante observar de la **Figura 4.8** que el pH, en el caso de los reactores con planta, es ligeramente mayor que en el caso de los reactores sin planta. Se puede inferir que en los reactores sin planta, se tienen condiciones más reductoras y que en éstas existe menos oxígeno, hecho que favorece a que las bacterias sulfatorreductoras y/o

anóxicas estén reduciendo las especies oxidadas ( $\text{SO}_4^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ) como aceptores finales de electrones y, por lo tanto, se generan condiciones ligeramente más ácidas.

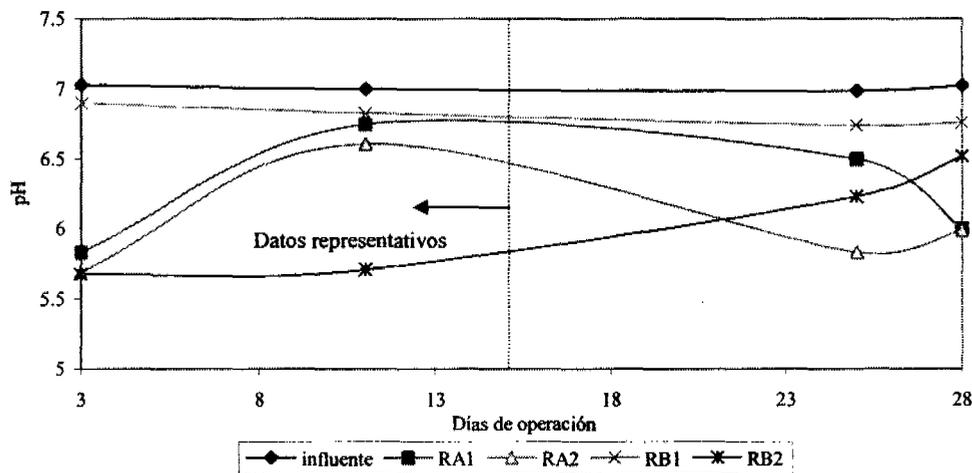


Figura 4.8 Valores obtenidos para pH durante el período de la segunda etapa (reactores con planta (RA<sub>1</sub>, RB<sub>1</sub>) y sin planta (RA<sub>2</sub>, RB<sub>2</sub>))

#### 4.5 Discusión final de los resultados experimentales

Como discusión final se puede decir que a lo largo de esta experimentación se observó que la presencia de la planta definitivamente contribuyó a que la remoción de fósforo fuera mayor. Es bien sabido que los principales mecanismos de remoción del fósforo son los procesos químicos que dan lugar a la precipitación de complejos de fósforo con sales de Fe, Al y Ca principalmente (siendo los dos primeros elementos los más comunes en condiciones ácidas como las que se observaron en nuestro caso). Pero también se sabe que las plantas y los microorganismos necesitan de macronutrientes esenciales como el fósforo para sus procesos metabólicos y es precisamente debido a estos procesos que los reactores con planta estudiados en esta investigación presentaron porcentajes de remoción de fósforo ligeramente mayores.

La temperatura dentro del laboratorio se mantuvo alrededor de los 23°C, lo que ayudó a tener un comportamiento homogéneo de los sistemas en estudio.

La presencia de la planta favoreció que los pOR fueran positivos en la parte de la rizosfera (10 cm), debido a la cantidad de oxígeno que la planta está aportando a esa zona específica, ya que es donde se encuentran en abundancia las raíces de la planta.

La variación en la concentración de la materia orgánica (medida como DQO) en esta experimentación, no afectó la remoción de fósforo. Como muestran las gráficas de remoción de fósforo, se puede inferir que la remoción de este elemento se pudo haber llevado a cabo vía otros mecanismos, como los físicos y químicos principalmente, por lo que la variación de la materia orgánica no tuvo un efecto cuantitativo en la remoción de este elemento en los sistemas.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, el objetivo planteado (Evaluar la eliminación de fósforo en reactores biológicos de flujo vertical a escala de laboratorio empacados con escoria volcánica que simulan un humedal artificial) y los alcances, se puede concluir lo siguiente:

- Hubo una remoción de fósforo en todos los reactores con y sin planta con una eficiencia de 90% aproximadamente:

Reactores con planta 93%

Reactores sin planta 86%

- Los reactores que tuvieron planta mostraron una remoción de fósforo mayor (7% aproximadamente) que los reactores sin planta.
- El efecto en la variación de la concentración de la materia orgánica (medida como DQO no influyó en la remoción de fósforo (450 versus 225 mg DQO<sub>soluble</sub> L<sup>-1</sup>).
- El potencial de óxido-reducción  $E_h$  en la zona radicular de los reactores se ve influenciado por la presencia de la planta ya que los potenciales que se observaron fueron positivos en la parte de la raíz, lo que significa que el oxígeno generado fue suficiente para volver los potenciales redox positivos, disminuyendo las condiciones reductoras que se observaron a 2 y 30 cm (+ 213 mV versus - 191 mV en el reactor sin planta).
- El crecimiento de la planta no mostró que hubiera diferencias en la remoción de fósforo para los reactores que tuvieron planta conforme ésta crecía (aumentó de 40 cm a 110 cm aproximadamente en 16 semanas).
- Por las condiciones ligeramente ácidas que se observaron en los reactores, el fósforo puede estar formando complejos de Fe y Al, presentes en el agua de la llave y estar siendo adsorbido en el material de soporte o precipitando al fondo de los reactores como lo citan algunos autores (Faulkner y Richardson, 1991).

#### 5.2 Recomendaciones

Con base en los resultados y la experiencia obtenida en el desarrollo de esta experimentación se puede recomendar en futuros estudios para la remoción de fósforo de humedales artificiales a escala de laboratorio lo siguiente:

- Se recomienda que en los próximos estudios que se hagan respecto a la remoción de fósforo se puedan comparar reactores con un número mayor de plantas para evaluar el aporte que hay cuando se presenta un número mayor de plantas en un reactor del mismo tamaño.
- En el estudio específico del fósforo sería interesante construir un sistema como con el que se trabajó, modificando lo siguiente: Hacer estos cuatro reactores secuenciados, esto es, que los efluentes de los reactores que no tuvieron planta (controles) y trabajaron como biofiltros, fueran el influente de los reactores que tuvieron planta con lo que se aumentaría la eficiencia del sistema para la remoción de fósforo.
- Una recomendación importante sería que el tiempo en el que se realice la experimentación sea más largo, ya que esto serviría para estudiar la remoción de los contaminantes a largo plazo, con lo que se tendría una estimación de cuánto tiempo podría ser adecuado y eficaz para un contaminante en especial dentro del sistema.
- Otro punto interesante sería que, junto con el tratamiento que se le diera al fósforo, se estudiaran otros contaminantes, como el nitrógeno, especialmente en sus formas inorgánicas (nitritos y nitratos), para saber qué tan eficiente resulta en su remoción.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### MÉTODOS ANALÍTICOS EMPLEADOS

##### A.1 TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS RESIDUALES (NMX-AA-029-SCFI-2001)

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos organofosforados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas.

#### MATERIAL Y EQUIPO

- 1.- Espectrofotómetro UV-Vis GBC-911
- 2.- Parrilla de calentamiento para llevar a ebullición las muestras
- 3.- Matraces aforados de 100 mL
- 4.- Matraces Erlenmeyer de 125 mL
- 5.- Celda de cuarzo de 10 mm para espectrofotómetro

#### REACTIVOS

- 1.- Fosfato monobásico de potasio anhidro ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )

Disolución madre de fosfato. Pesar con precisión 219.5 mg de fosfato monobásico de potasio anhidro previamente secado a  $105^\circ\text{C}$  durante dos horas, aforar con agua a 1 L;  $1.0 \text{ mL} = 50.0 \mu\text{g}$  de P como  $\text{PO}_4^-$ .

- 2.- Fenolftaleína
- 3.- Ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- 4.- Persulfato de amonio  $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8]$  o persulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ )
- 5.- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ )

Disolución de ácido fuerte. Cuidadosamente adicionar 300 mL de ácido sulfúrico concentrado a aproximadamente 600 mL de agua. Dejar enfriar y agregar 4 mL de ácido nítrico concentrado y aforar a 1 L con agua.

#### Método cloruro estanoso

- 1.- Ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ )
- 2.- Glicerol ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ )
- 3.- Cloruro estanoso dihidratado ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

**4.- Heptamolibdato de amonio tetrahidratado [(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>•4H<sub>2</sub>O]**

Disolución de ácido fuerte:

Cuidadosamente adicionar 300 mL de ácido sulfúrico concentrado a aproximadamente 600 mL de agua. Dejar enfriar y agregar 4 mL de ácido nítrico concentrado y aforar a 1 L  
Disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado:

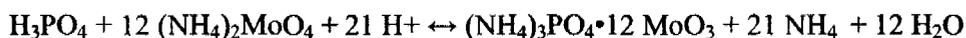
Disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado:

Pesar con precisión 2.5 g de cloruro estano dihidratado y disolver en 100 mL de glicerol. Calentar en baño de agua y agitar con una varilla de vidrio. El reactivo es estable y no requiere de la adición de conservadores o almacenamiento especial.

Disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado:

Disolver 25 g de heptamolibdato de amonio tetrahidratado en 75 mL de agua. Con mucho cuidado agregar 280 mL de ácido sulfúrico a 400 mL de agua, enfriar y adicionar al heptamolibdato de amonio tetrahidratado y diluir a 1 L.

Este método se basa en la reacción del fósforo contenido en la muestra como ortofosfato con el ácido molibdico para formar el ácido 12-molibdofosfórico según la reacción:



El ácido 12-molibdofosfórico es reducido por el cloruro de estaño a azul de molibdeno, compuesto de composición desconocida que contiene una mezcla de Mo (VI) y Mo (V), que absorbe a 690 nm. La intensidad del color azul formado depende de la concentración de fosfatos adicionados al heteropoliácido. El método es aplicable cuando el contenido de fósforo en las muestras se encuentra entre las concentraciones de 0.01 a 6.0 mg P/L. Todo el fósforo contenido en la muestra debe estar como ión ortofosfato (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>, ya que el método espectrofotométrico es esencialmente específico para este ión ortofosfato (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>. La materia orgánica de la muestra es destruida por medio de una digestión con persulfato de amonio y ácido sulfúrico, rompiendo las ligaduras orgánicas del fósforo (C-P y/o C-O-P), e hidrolizando los polifosfatos a ortofosfatos.

## **PROCEDIMIENTO**

### **Digestión de la muestra**

Preparación de la muestra por medio de la digestión con persulfato:

Usar 50 mL o la porción adecuada de la muestra bien mezclada. Adicionar una gota de fenoltalcina. Si aparece un color rojo, adicionar gota a gota ácido sulfúrico concentrado hasta que desaparezca el color. Posteriormente, adicionar 1 mL de disolución de ácido fuerte y 0.4 g de persulfato de amonio o 0.5 g persulfato de potasio.

Calentar hasta que rompa la ebullición y mantenerla sobre la placa de calentamiento, por 30 o 40 min o hasta que el volumen final alcanzado sea de 10 mL. Los compuestos organofosforados pueden requerir de 1.5 h a 2 h para su digestión completa. Enfriar,

diluir a 30 mL con agua, adicionar una gota de fenoftaleína y neutralizar hasta desvanecer a un color rosa pálido con la disolución de hidróxido de sodio. Alternativamente, calentar por 30 min en una autoclave u olla de presión de 98 a 137 kPa. Enfriar, añadir una gota de fenoftaleína y neutralizar hasta desvanecer a un color rosa pálido con la disolución de hidróxido de sodio. Aforar a 100 mL con agua destilada.

En algunas muestras puede formarse un precipitado en esta fase, pero no se debe filtrar. Mezclar bien para cualquier subdivisión de la muestra. El precipitado (posiblemente de fosfato de calcio) se redisuelve bajo condiciones ácidas de la prueba colorimétrica para determinar fósforo.

Para ajustar el pH de la muestra, a 100 mL de muestra que contenga no más de 200 µg P y libre de color y turbidez, adicionar 1 gota de fenolftaleína. Si la disolución tiene un color rosado, adicionar unas cuantas gotas de disolución de ácido fuerte para neutralizar.

Desarrollo del color en la muestra:

Adicionar, agitando fuertemente después de cada adición, 4.0 mL de disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado y 0.5 mL (10 gotas) de disolución de cloruro estano. La intensidad del color depende de la temperatura ambiente de la disolución final, incrementándose ésta alrededor de 1% por cada grado centígrado más de temperatura ambiente. Por ello, es importante realizar las mediciones a la misma temperatura.

Medición de color:

El tiempo en el cual se realiza la medición es importante para tener un buen resultado. La medición debe de efectuarse después de 10 min de haber desarrollado el color, pero antes de 12 min. Utilizar el mismo intervalo de tiempo para todas las mediciones, medir la intensidad de color espectrofotométricamente a 690 nm y comparar contra la curva de calibración, utilizar como blanco agua.

**NOTA.-** Es necesario tener un blanco de agua y un blanco de reactivos. Debido a que el color se desarrolla primero de manera progresiva y posteriormente se desvanece, mantener siempre condiciones iguales de tiempos de desarrollo de color y medición para muestras y estándares. Preparar al menos un estándar por cada lote de muestras o una cada día que se realiza la prueba. La curva de calibración es lineal en un intervalo de concentraciones de 0.3 a 2.0 mg/L.

#### Preparación de la curva de calibración

Se prepara una serie de patrones equivalentes con una solución de la disolución madre de fosfato que oscilen entre 50 y 0.0005 mg P/L completando el volumen con agua destilada. Utilizando los mismos volúmenes de reactivos, el mismo material y el mismo procedimiento de digestión que para las muestras problemas.

Cálculos

Calcular la concentración de la muestra por medio de la ecuación obtenida de la curva de calibración y que es representada por la siguiente ecuación:

$$Y = mX + b$$

donde:

m es la pendiente;

b es la ordenada al origen;

Y es la absorbancia, y

X es la concentración (mg P/L).

En caso de haber dilución de la muestra a lo largo del desarrollo del método (digestión y alicuota de muestra), utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{mg P/L} = \text{concentración} \times \text{Factor de dilución}$$

Reportar los resultados en mg P/L con dos décimas, con la precisión correspondiente.

Curva de calibración

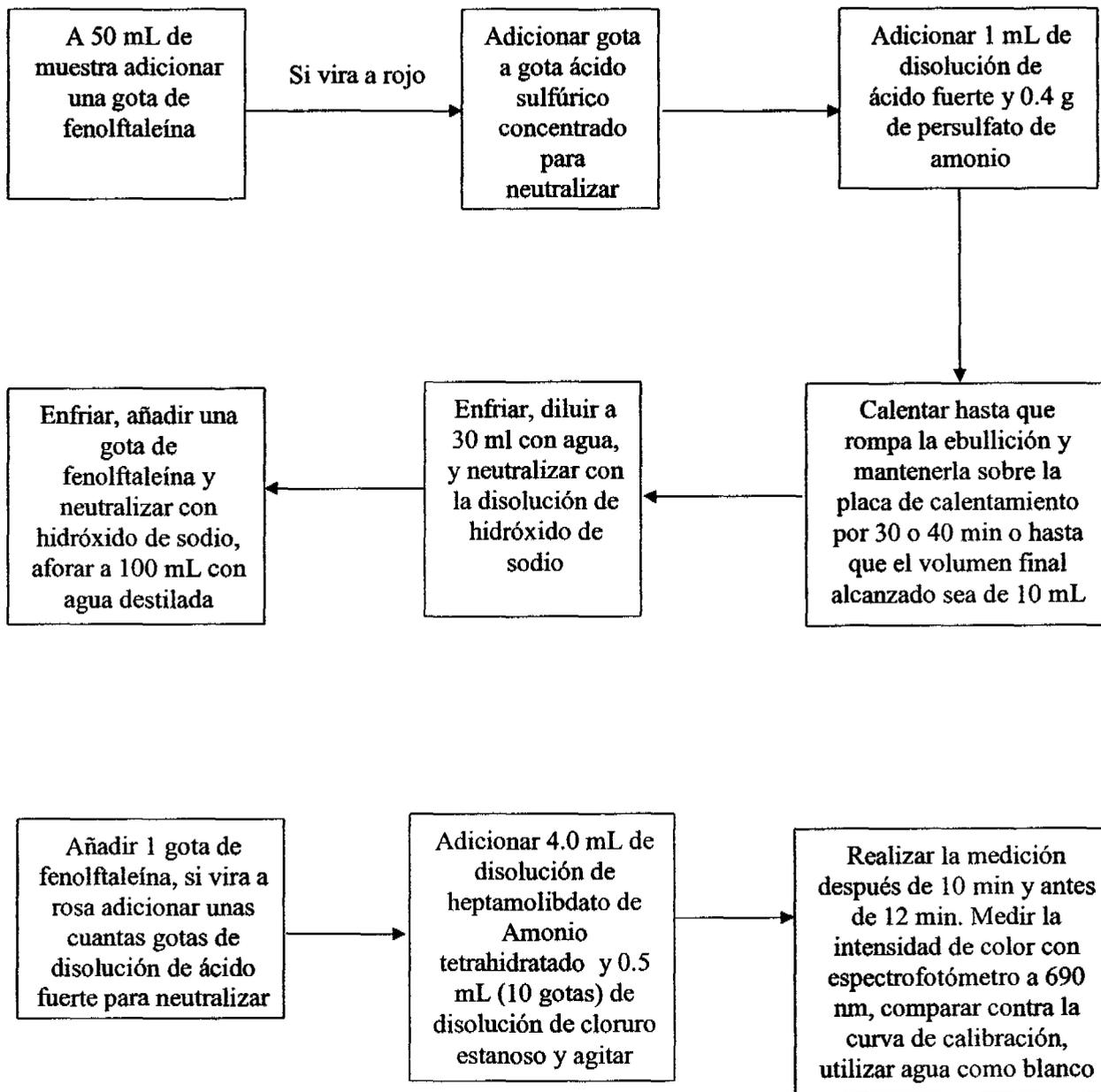
**Tabla A.1** Preparación de la curva de calibración para fósforo

matraz	Concentración de mgP/L	absorbancia
1	2	0.582
2	0.4	0.123
3	0.3	0.101
4	0.2	0.07
5	0.04	0.033
6	0.01	0.014
7	0.004	0.001
8	0	0

Para determinar la concentración de una muestra problema se gráfica una curva de calibración utilizando muestras estándares de concentración conocida. De tal manera que la absorbancia de la muestra problema se obtiene en el espectrofotómetro y su concentración se obtendrá por la interpolación de la absorbancia en la curva de calibración.

Diagrama de bloques simplificado

Determinación de fosfatos: Método cloruro estanoso



## **A.2 TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) EN AGUAS RESIDUALES (NMX-AA-030-SCFI-2001)**

Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte.

La DQO es una determinación química de la cantidad de sustancias fuertemente oxidantes requeridas para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible al dicromato o permanganato en medio ácido y, considerando que es una reacción equimolar, se espera que esta cantidad sea equivalente a la materia orgánica oxidada.

### **MATERIAL Y EQUIPO**

- 1.- Espectrofotómetro UV-Vis marca SPECTRONIC
- 2.- Horno de calentamiento para usar a 165°C (estufa de secado)
- 3.- Centrífuga
- 4.- Tubos de reacción
- 5.- Celda de cuarzo de 10 mm para espectrofotómetro

### **REACTIVOS**

- 1.- Ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ )
- 2.- Dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ )
- 3.- Sulfato de mercurio ( $HgSO_4$ )
- 4.- Hidrogenoftalato de potasio ( $C_8H_5KO_4$ )
- 5.- Sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ )

### **PROCEDIMIENTO**

#### Preparación de las soluciones de digestión

##### a) Solución de digestión 0.21 N, solución de digestión A

Disolver en agua destilada 10.216 g de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), previamente secado a 103°C durante 2 horas, 167 mL de ácido sulfúrico concentrado y 33.3 g de sulfato de mercurio, aforar a un litro con agua destilada.

##### b) Reactivo ácido sulfúrico, solución de digestión B

Pesar 10.12 g de sulfato de plata y adicionar un litro de ácido sulfúrico concentrado (El sulfato de plata tarda de uno a dos días en disolverse)

##### c) Hidrogenoftalato de potasio ( $C_8H_5KO_4$ , HFP)

Se disuelven 0.68 g de ( $C_8H_5KO_4$ ) en agua destilada, previamente secados a 120°C durante una hora y se afora a un litro. El (HFP) tiene una DQO teórica de 1.176 mg  $O_2$ /mg y esta solución tiene una DQO teórica de 800 mg $O_2$ /L.

**NOTA:** Esta solución es estable hasta 3 meses cuando se mantiene a 4°C.

##### d) Preparación de la curva de calibración

Se prepara una serie de patrones con una solución de hidrogenofalato de potasio con una DQO equivalentes que oscilen entre 20 y 800 mg O<sub>2</sub>/L completando el volumen con agua destilada (ver Anexo 2), utilizando los mismos volúmenes de reactivos, los mismos tubos y el mismo procedimiento de digestión que para las muestras problemas.

Método a reflujo cerrado/ método espectrofotométrico

- 1.- Precalentar el horno para digerir la muestra a 165°C.
  - 2.- Tomar cuidadosamente 2 mL de muestra previamente homogeneizada dentro de los tubos de reacción. Cerrar inmediatamente para evitar que se escapen los vapores, asegurarse de que están herméticamente cerrados. Suavemente invertir los tubos varias veces destapando después de cada inversión para liberar la presión.
  - 3.- Colocar en los tubos de reacción 1 mL de la disolución de digestión A.
- NOTA.-** La disolución es fuertemente ácida y el tubo se calienta en este proceso, trabajar con guantes aislantes y bajo una campana de extracción.
- 4.- Añadir cuidadosamente 3 mL de la disolución de digestión B.
  - 5.- Colocar 2 mL de agua en un tubo para la determinación del blanco de reactivos.
  - 6.- Colocar todos los tubos en el horno previamente calentado a 165°C y reflujar por 30 min.
  - 7.- Retirar los tubos del digestor y dejar que los tubos se enfríen a temperatura ambiente, permitiendo que cualquier precipitado se sedimente.
  - 8.- Centrifugar a 360 rpm en caso de que algunos sólidos no sedimenten.
  - 9.- Medir la absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600nm y determinar la concentración de la muestra (mg O<sub>2</sub>/L) con la curva de calibración, que se encuentra en la tabla A.2.

**Cálculos**

Para calcular la DQO de la muestra en miligramos por litro (mg/L) directamente de la curva de calibración o con la ecuación 1 (una recta con ordenada al origen) reportando los resultados en mg de O<sub>2</sub>/L.

$$y = mx+b \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

donde:

x = DQO, mg O<sub>2</sub>/L

y = absorbancia

Curva de calibración

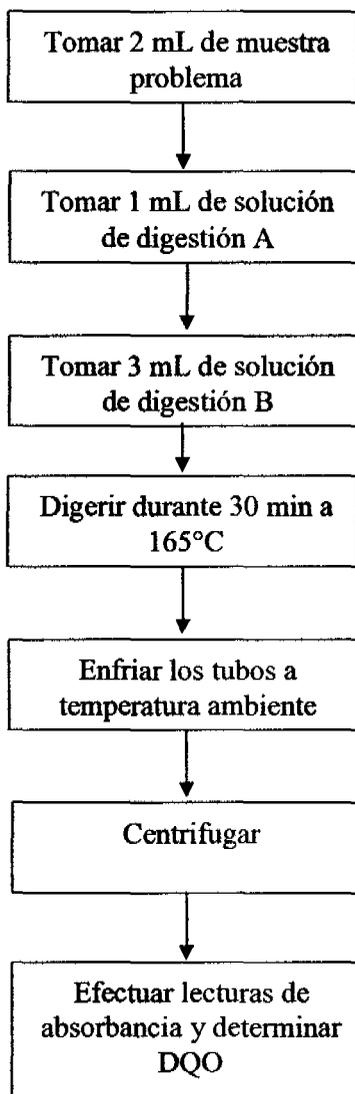
Tabla A.2 Preparación de la curva de calibración para DQO

Matraz	Concentración mgO <sub>2</sub> /L	mL (C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> KO <sub>4</sub> )	mL Agua destilada
1	0.00	0.00	25
2	50	1.56	23.44
3	60	1.875	23.125
4	70	2.187	22.813
5	80	2.5	22.5
6	90	2.812	22.188
7	100	3.125	21.875
8	150	4.687	20.313
9	200	6.25	18.75
10	250	7.812	17.188
11	300	9.375	15.625
12	350	10.937	14.063
13	400	12.5	12.5
14	450	14.062	10.938
15	500	15.625	9.375
16	550	17.187	7.813
17	600	18.75	6.25
18	650	20.312	4.688
19	700	21.875	3.125
20	750	23.437	14.563
21	800	25	0

Para determinar la concentración de una muestra problema se grafica una curva de calibración utilizando muestras estándares de concentración conocida. De esta manera, la absorbancia de la muestra problema se obtiene en el espectrofotómetro y su concentración se obtendrá por la interpolación de la absorbancia en la curva de calibración.

Diagrama de bloques simplificado

Determinación de DQO, Método a reflujo cerrado/ método espectrofotométrico



### A.3 PREPARACIÓN DEL AGUA SINTÉTICA

#### MATERIAL Y EQUIPO:

- 1.- Balanza analítica
- 2.- Espátula
- 3.- Matraz aforado de 1L
- 4.- Recipiente de plástico de 40 L

#### REACTIVOS:

- 1.- Sacarosa,  $C_{12}H_{22}O_{11}$  grado reactivo
- 2.- Sulfato de Amonio,  $(NH_4)_2 SO_4$
- 3.- Fosfato de sodio,  $Na_3PO_4 \cdot 12 H_2O$
- 4.- Agua de la llave

#### PROCEDIMIENTO:

Base de cálculo: 40 L de agua residual sintética para la primera etapa

- 1.-Pesar 18 g de sacarosa.
- 2.-Pesar 1.2 g de sulfato de amonio.
- 3.-Pesar 0.12 g de fosfato de sodio.
- 4.-Mezclar las tres sustancias en el recipiente de 40 L hasta que se disuelvan. La relación C:N:P del agua residual sintética es: 30:1:0.04

La composición resultante de esta solución se muestra en la **Tabla A.3**

**Tabla A.3** Concentración del agua residual sintética primera etapa

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN mg/L
$C_{12}H_{22}O_{11}$	450
$(NH_4)_2SO_4$	30
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	3

Base de cálculo: 40 L de agua residual sintética para la segunda etapa

- 1.-Pesar 9 g de sacarosa.
- 2.-Pesar 1.2 g de sulfato de amonio.
- 3.-Pesar 0.12 g de fosfato de sodio.
- 4.-Mezclar las tres sustancias en el recipiente de 40 L hasta que se disuelvan. La relación C:N:P del agua residual sintética es: 15:1:0.04

La composición resultante de esta solución se muestra en la **Tabla A.3**

**Tabla A.4.** Concentración del agua residual sintética segunda etapa

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN mg/L
$C_{12}H_{22}O_{11}$	225
$(NH_4)_2SO_4$	30
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	3

Para determinar la relación C:N:P se hizo lo siguiente:

Concentración de las sales:

Sacarosa = 450 mg/L

Sulfato de amonio = 30 mg/L

Fosfato de sodio = 3 mg/L

Peso molecular de las sales

$C_{12}H_{22}O_{11} = 342$

$(NH_4)_2SO_4 = 132$

$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O = 380$

$$\frac{0.45 \text{ g sacarosa}}{L} \left( \frac{1 \text{ mol sacarosa}}{342 \text{ g sacarosa}} \right) \left( \frac{12 \text{ mol C}}{1 \text{ mol sacarosa}} \right) \left( \frac{12 \text{ g C}}{1 \text{ mol C}} \right) \left( \frac{1000 \text{ mg C}}{1 \text{ g C}} \right) = 189.47 \frac{\text{mg C}}{L}$$

$$\frac{0.030 \text{ g } (NH_4)_2SO_4}{L} \left( \frac{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4}{132 \text{ g } (NH_4)_2SO_4} \right) \left( \frac{2 \text{ mol N}}{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4} \right) \left( \frac{14 \text{ g N}}{1 \text{ mol N}} \right) \left( \frac{1000 \text{ mg N}}{1 \text{ g N}} \right) = 6.36 \frac{\text{mg N}}{L}$$

$$\frac{0.003 \text{ g } Na_3PO_4 \cdot 12H_2O}{L} \left( \frac{1 \text{ mol } Na_3PO_4 \cdot 12H_2O}{380 \text{ g } Na_3PO_4 \cdot 12H_2O} \right) \left( \frac{1 \text{ mol P}}{1 \text{ mol } Na_3PO_4 \cdot 12H_2O} \right) \left( \frac{31 \text{ g P}}{1 \text{ mol P}} \right) \left( \frac{1000 \text{ mg P}}{1 \text{ g P}} \right) = 0.24 \frac{\text{mg P}}{L}$$

Se hace la relación respecto al hidrógeno:

$$\frac{189.47}{6.36} = 29.47 \approx 30$$

$$\frac{6.36}{6.36} = 1$$

$$\frac{0.244}{6.36} = 0.04$$

Lo cual nos da una relación de C:N:P de 30:1:0.04 para la primera etapa y para la segunda 15:1:0.04

## ANEXO B

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### B.1 Fósforo

**Tabla B.1** Valores de fósforo a la salida de cada reactor durante la primera etapa (mgP/L)

Días	Influyente	RA <sub>1</sub>	RA <sub>2</sub>	RB <sub>1</sub>	RB <sub>2</sub>
28-Mar-06	0.6118	0.0398	0.0665	0.0281	0.0834
29-Mar-06	0.5978	0.0293	0.0444	0.0281	0.0973
31-Mar-06	0.6583	0.0351	0.0584	0.0293	0.0630
04-Abr-06	0.6240	0.0456	0.0781	0.0456	0.0665
05-Abr-06	0.6467	0.0456	0.0653	0.0339	0.0630
10-Abr-06	0.6525	0.0560	0.0828	0.0944	0.0863
11-Abr-06	0.6455	0.1409	0.0781	0.0898	0.0921
12-Abr-06	0.6653	0.1252	0.0781	0.0979	0.1142
18-Abr-06	0.6316	0.0874	0.3258	0.0909	0.0944
19-Abr-06	0.6350	0.1177	0.3328	0.4665	0.1142
21-Abr-06	0.6548	0.2514	0.2316	0.1851	0.1072
24-Abr-06	0.7676	0.1979	0.2025	0.2328	0.2304

**Tabla B.2** Valores de fósforo a la salida de cada reactor durante la segunda etapa (mgP/L)

Días	Influyente	RA <sub>1</sub>	RA <sub>2</sub>	RB <sub>1</sub>	RB <sub>2</sub>
28-Mar-06	0.6118	0.0398	0.0665	0.0281	0.0834
29-Mar-06	0.5978	0.0293	0.0444	0.0281	0.0973
31-Mar-06	0.6583	0.0351	0.0584	0.0293	0.0630
04-Abr-06	0.6240	0.0456	0.0781	0.0456	0.0665
05-Abr-06	0.6467	0.0456	0.0653	0.0339	0.0630
10-Abr-06	0.6525	0.0560	0.0828	0.0944	0.0863
11-Abr-06	0.6455	0.1409	0.0781	0.0898	0.0921
12-Abr-06	0.6653	0.1252	0.0781	0.0979	0.1142
18-Abr-06	0.6316	0.0874	0.3258	0.0909	0.0944
19-Abr-06	0.6350	0.1177	0.3328	0.4665	0.1142
21-Abr-06	0.6548	0.2514	0.2316	0.1851	0.1072
24-Abr-06	0.7676	0.1979	0.2025	0.2328	0.2304

**Tabla B.3** Valores del porcentaje de remoción de fósforo durante la primera etapa

% de remoción <b>RA<sub>1</sub></b>	% de remoción <b>RA<sub>2</sub></b>	% de remoción <b>RB<sub>1</sub></b>	% de remoción <b>RB<sub>2</sub></b>
88.3	74.0	85.8	89.6
83.0	77.8	87.5	87.1
99.8	77.1	90.8	80.8
92.8	80.3	85.8	82.7
99.9	84.0	97.2	84.2
96.4	80.8	95.0	86.3
95.3	83.2	97.7	86.5
93.0	78.5	91.8	83.6
95.5	81.3	92.9	92.1
96.0	80.2	94.5	94.1
96.8	89.1	98.5	95.3
94.4	80.0	91.9	89.6

**Tabla B.4** Valores del porcentaje de remoción de fósforo durante la segunda etapa

% de remoción <b>RA<sub>1</sub></b>	% de remoción <b>RA<sub>2</sub></b>	% de remoción <b>RB<sub>1</sub></b>	% de remoción <b>RB<sub>2</sub></b>
93.5	89.1	95.4	86.4
95.1	92.6	95.3	83.7
94.7	91.1	95.5	90.4
92.7	87.5	92.7	89.3
93.0	89.9	94.8	90.3
91.4	87.3	85.5	86.8
78.2	87.9	86.1	85.7
81.2	88.3	85.3	82.8
86.2	48.4	85.6	85.1
81.5	47.6	26.5	82.0
61.6	64.6	71.7	83.6
74.2	73.6	69.7	70.0

**B.2 DQO (demanda química de oxígeno).**

**Tabla B.5** Valores de DQO a la salida de cada reactor durante la primera etapa (mgO<sub>2</sub>/L)

Días	Influente	RA <sub>1</sub>	RA <sub>2</sub>	RB <sub>1</sub>	RB <sub>2</sub>
04/02/2006	458.33	161.67	188.33	121.67	145.00
07/02/2006	411.67	161.67	211.89	161.67	185.00
22/02/2006	461.67	181.67	243.33	221.67	238.33
28/02/2006	441.67	165.00	219.44	130.56	183.89

**Tabla B.6** Valores de DQO a la salida de cada reactor durante la segunda etapa (mgO<sub>2</sub>/L)

Días	Influyente	RA <sub>1</sub>	RA <sub>2</sub>	RB <sub>1</sub>	RB <sub>2</sub>
30/03/2006	311.67	101.67	138.33	83.89	90.56
21/04/2006	288.33	70.56	78.33	75.00	87.22
24/04/2006	331.67	108.33	116.11	143.89	178.33
28/04/2006	335.00	151.6667	110.5556	108.3333	92.7778

**B.3 pOR (potencial de óxido- reducción).**

**Tabla B.7** Valores de pOR (mV) durante algunos días en la primera etapa en el sistema RA<sub>1</sub> y RA<sub>2</sub>

Hora	RA2-2	RA2-10	RA2-30	RA1-2	RA1-10	RA1-30
12:00	-31.000	-97	-24	259	226	217
	-55.000	-68.3	-12.67	26.7	179.645	47.14
	-10.610	-84.05	-45.55	1.58	237.585	29.2
12:30	-32.670	-93.24	-61.8	-12.11	209	29.39
	-51.800	-99.3	-68.92	-28.8	248.273	23.89
	-64.360	-103.36	-76.11	-43	213	25.39
13:00	-72.920	-106.68	-79.05	-41.99	211.0214	18.64
	-73.670	-110.93	-80.92	-46.05	222.334	17.14
	-78.740	-114.55	-83.55	-52.11	227.209	11.14
13:30	-82.680	-116.93	-84.99	-58.42	224.897	5.83
	-95.110	-118.49	-85.93	-63.49	220	2.08
	-90.680	-120.93	-86.55	-65.74	214.709	-1.8
14:00	-93.490	-122.99	-88.55	-67.05	226.834	-5.42
	-96.300	-124.61	-91.3	-73.11	225.459	-8.36
	-101.860	-126.61	-96.05	-99.61	222.084	-10.55
14:30	-111.110	-127.74	-95.86	-93.99	225.397	-12.99
	-110.240	-129.24	-95.3	-87.05	213.084	-16.55
	-106.990	-130.3	-98.86	-80.8	225.647	-20.92
15:00	-108.050	-130.43	-100.8	-89.3	226.522	-24.74
	-112.050	-130.3	-101.8	-107.18	229	-29.74
	-111.740	-132.3	-102.93	-115.74	217.8966	-31.55
15:30	-112.610	-132.74	-103.93	-120.05	219.459	-47.61
	-116.300	-133.49	-103.68	-122.3	192	-50.11
	-124.490	-134.43	-101.86	-128.05	223.834	-41.3
16:00	-116.430	-135.3	-103.43	-129.99	226.709	-42.67
	-117.860	-135.55	-105.8	-130.8	223.209	-45.05
	-121.800	-136.24	-107.68	-131.74	209	-47.11
16:30	-123.240	-136.49	-109.74	-129.18	192	-60.99
	-123.930	-137.18	-111.68	-130.68	216.6466	-51.24
	-125.860	-137.18	-113.18	-130.68	229	-52.92
17:00	-131.550	-138.24	-115.18	-132.05	215.3966	-54.49
	-126.180	-138.18	-116.3	-129.05	223.772	-55.8

	-125.610	-138.55	-116.93	-129.3	224	-68.3
17:30	-126.430	-138.93	-116.74	-128.86	236	-61.11
	-126.930	-139.74	-117.74	-129.55	219.959	-61.74
	-127.240	-140.18	-121	-129.11	224	-63.11
18:00	-133.050	-140.49	-120.68	-130.55	222.084	-64.05
	-134.930	-141.36	-121.74	-130.3	219.334	-71.74
	-131.050	-141.24	-122.55	-129.43	198.334	-67.24
18:30	-131.050	-141.55	-123.55	-128.61	221.584	-65
	-131.740	-142.43	-123.99	-130.11	219.084	-74.49
	-132.240	-142.24	-124.11	-130.93	212.8965	-69.49
19:00	-135.860	-143.24	-124.93	-129.8	163.832	-70.24
	-133.110	-143.24	-124.49	-130.8	205	-70.92
	-133.110	-142.99	-125.3	-130.8	218.2717	-90.61
19:30	-133.930	-142.93	-126.05	-129.61	217.5216	-74.36
	-133.430	-142.43	-124.8	-128.61	219.147	-73.61
	-136.610	-143.55	-123.55	-129.05	199.3961	-73.55
20:00	-135.000	-143.61	-119.36	-128.49	222.584	-73.61
	-135.430	-143.36	-113.74	-129.24	221.647	-74.11
	-136.050	-143.68	-109.99	-129.93	221.084	-74.49
20:30	-136.860	-143.99	-111.49	-130.43	221.834	-84.3
	-137.740	-144.49	-111.93	-130.93	200	-76.42
	-139.800	-145.11	-110.99	-131.05	220.709	-89.86
21:00	-140.930	-145.3	-109.8	-131.86	215	-83.49
	-139.490	-145.11	-110.43	-132.18	217.2716	-78.74
	-139.360	-145.43	-110.3	-132.05	219.084	-96.36
21:30	-138.930	-145.11	-110.68	-131.86	225.209	-80.3
	-141.360	-144.55	-109.93	-130.86	222.022	-83.43
	-140.300	-145.93	-111.18	-130.93	216.6466	-80.8
22:00	-140.430	-146.68	-111.68	-129.8	219.397	-92.24
	-141.360	-146.24	-113.18	-129.3	200.7711	-83.93
	-127.000	-146.3	-113.36	-128.18	207.7088	-84.49
22:30	-144.680	-147.05	-112.3	-130.3	215	-84.74
	-143.610	-147.43	-112.68	-126.05	216.4591	-85.05
	-143.550	-147.18	-112.61	-124.68	214.8966	-85.18
23:00	-143.490	-147.24	-110.61	-125.55	221.334	-85.05
	-148.550	-147.8	-111.36	-124.24	229	-85.18
	-144.360	-149.11	-119.36	-123.8	219.459	-80
23:30	-144.360	-150.49	-123.8	-123.86	217.7091	-86.74
	-143.740	-150.74	-126.11	-123.55	216.9591	-85.49
	-143.930	-151.68	-128.18	-122.8	221.584	-95.24
00:00	-146.110	-153.43	-129.18	-121.61	244	-87.3
	-145.680	-154.8	-130.43	-121.24	222.209	-86.49
	-146.050	-156.43	-131.74	-121.05	221.709	-91.49
00:30	-148.490	-157.68	-132.93	-121.24	226	-90.61
	-147.240	-159.3	-133.55	-120.8	220.397	-87.74
	-157.990	-160.05	-134.8	-120.55	219.147	-87.24
01:00	-154.360	-161.99	-136.24	-121.93	216.0841	-87.36
	-151.680	-166	-136.8	-121.43	220.834	-92.55

	-150.430	-164.18	-137.61	-121.43	223.834	-88.49
01:30	-158.490	-165.62	-138.93	-122.05	215	-88.3
	-151.610	-166.62	-139.3	-123.11	224.584	-88.05
	-151.180	-167.3	-140.3	-122.18	221.522	-87.93
02:00	-151.300	-169.12	-141.24	-122.05	222.209	-101.36
	-151.800	-169.43	-141.36	-123.55	215.2716	-90.11
	-152.930	-170.49	-141.8	-123.11	206.2713	-89.18
02:30	-152.610	-171.37	-142.74	-122.49	223.272	-100.05
	-155.180	-171.8	-143.18	-122.43	176.958	-90.8
	-153.050	-172.87	-143.68	-122.24	209	-89.8
03:00	-152.740	-173.24	-144.05	-122.24	225.334	-95.18
	-152.360	-173.62	-144.8	-122.18	223.522	-89.86
	-152.680	-173.99	-145.18	-122.49	219.209	-94.3
03:30	-154.740	-173.8	-145.36	-122.49	204	-90.05
	-153.110	-173.99	-145.93	-122.11	218.0216	-89.8
	-152.740	-174.05	-146.24	-121.86	219.772	-89.18
04:00	-152.550	-174.43	-146.74	-121.36	209	-101.43
	-152.300	-174.12	-147.93	-121.8	208.64636	-91.74
	-157.740	-174.37	-147.61	-121.99	222	-95.05
04:30	-157.860	-174.18	-147.61	-123.74	215.2091	-90.3
	-158.360	-174.24	-147.99	-122.49	218.7092	-96.18
	-154.430	-174.74	-148.3	-122.55	202	-103.8
05:00	-153.300	-174.62	-148.86	-122.99	221.709	-92.86
	-158.990	-175.43	-149.55	-123.86	213	-91.86
	-153.930	-174.93	-148.93	-123.86	229	-90.74
05:30	-153.490	-174.49	-148.68	-123.8	229	-102.3
	-153.740	-174.8	-149.18	-126.05	221.022	-93.3
	-152.930	-174.3	-148.55	-124.11	222.709	-96.24
06:00	-152.610	-174.74	-148.74	-123.74	221.209	-91.11
	-152.240	-174.37	-148.05	-123.61	221.209	-90.49
	-152.930	-174.8	-147.86	-125.68	224.897	-90.61
06:30	-155.180	-174.37	-147.8	-124.18	223.834	-90.68
	-153.550	-174.8	-147.74	-123.49	219.709	-90.68
	-156.550	-174.55	-147.36	-123.43	229	-91.05
07:00	-160.860	-174.8	-147.36	-127.11	214.459	-91.24
	-156.550	-175.87	-147.43	-123.93	224.709	-95.99
	-156.490	-175.8	-147.24	-122.61	211.584	-92.36
07:30	-156.610	-206	-147.11	-121.61	229	-92.36
	-159.680	-176.8	-146.93	-121.36	202	-116.36
	-157.550	-177.87	-146.8	-120.99	205.0838	-97.99
08:00	-157.490	-177.99	-146.8	-121.8	224.647	-106.8
	-156.990	-177.43	-146.3	-122.3	222.522	-96.8
	-156.860	-176.99	-146.43	-122.49	219.959	-95.3
08:30	-156.800	-183	-145.11	-122.74	215.8341	-101
	-157.300	-175.93	-144.3	-124.49	219.272	-94.3
	-157.860	-177	-143.36	-125.99	220.834	-94.11
09:00	-157.930	-175.99	-142.55	-124.49	217	-99.18
	-158.610	-175.62	-141.68	-124.8	222.834	-95.18

**REMOCIÓN DE FÓSFORO EN UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES A ESCALA DE LABORATORIO**

	-158.490	-174.55	-140.55	-124.68	217.1466	-94.49
09:30	-159.550	-174.8	-139.74	-124.49	215.7091	-94.61
	-160.240	-174.68	-139.18	-124.68	204	-94.24
	-165.120	-174.49	-137.68	-125.99	207.8963	-94.43
10:00	-166.000	-173.55	-136.18	-124.86	218.2717	-94.43
	-171.000	-172.99	-135.3	-124.86	217.8341	-96.11
	-164.930	-173.12	-133.74	-124.68	217.6466	-95.74
10:30	-168.240	-172.62	-132.43	-124.93	216.0841	-81
	-164.680	-172.8	-130.99	-126.3	213	-85
	-164.680	-172.43	-129.93	-124.99	217	-91
11:00	-181.930	-171.99	-128.99	-124.8	204	-91
	-171.870	-171.87	-128.11	-126.99	199.7086	-91
	-169.550	-172.18	-127.43	-125.49	222.334	-93.18
11:30	-167.990	-171.8	-126.61	-125.61	223.959	-93.36
	-166.930	-171.93	-126.36	-124.86	226.022	-93.86
	-167.370	-171.93	-126.24	-124.8	229	-97.05
12:00	-167.180	-171.8	-125.86	-124.86	226	-95.93
	-166.740	-171.37	-125.74	-124.05	222.209	-94.24
	-168.120	-171.37	-124.93	-123.68	220.084	-94.43
12:30	-166.870	-171.37	-124.36	-125.24	219.209	-93.86
	-166.490	-171.18	-123.93	-123.8	184.271	-94.49
	-165.680	-170.74	-123.8	-123.68	224.959	-92.49
13:00	-165.550	-170.37	-124.11	-123.43	218.9592	-93.43
	-165.490	-170.93	-124.18	-123.55	228.959	-94.18
	-165.050	-170.62	-123.49	-123.18	231.335	-94.24
13:30	-172.990	-170.93	-123.24	-123.49	222.959	-94.68
	-146.860	-170.99	-123.36	-124.05	236	-99.61
	-145.490	-171.24	-123.68	-124.8	229.272	-95.99
14:00	-157.740	-170.62	-123.3	-125.74	213	-96.43
	-157.990	-171.3	-123.68	-127.05	205	-98.55
	-170.930	-170.87	-123.43	-128.24	217	-96.36
14:30	-165.930	-170.68	-123.43	-131.99	219.272	-95.8
	-160.990	-168.68	-123.11	-132.18	215	-98.55
	-167.740	-165.18	-122.61	-133.68	211.0839	-111.36
15:00	-169.930	-163.8	-122.55	-135.43	221.209	-103.18
	-173.990	-164.55	-122.86	-139.49	217.7716	-97.55
	-174.240	-165.05	-122.93	-138.55	209	-97.36
15:30	-177.000	-166.55	-124.49	-138.8	217.1466	-97.24
	-180.050	-167.05	-124.68	-139.36	222	-85
	-177.430	-167.99	-127.93	-140.43	227.709	-83.18
16:00	-177.050	-169.18	-133.49	-142.24	229.585	-80.61
	-177.370	-169.55	-137.36	-143.43	217.7091	-82.8
	-179.550	-170.93	-141.18	-144.49	204	-86.86
16:30	-180.620	-171.18	-142.68	-145.8	221.459	-117.68
	-181.930	-172.05	-144.3	-146.86	220.772	-92.8
	-183.240	-172.24	-145.55	-148.55	223.772	-89.49
17:00	-183.800	-172.87	-146.93	-149.11	219.084	-87.55
	-187.300	-173.3	-148.24	-149.68	220	-86.11

	-185.930	-173.99	-149.43	-149.61	219.459	-85.8
17:30	-186.620	-174.43	-150.43	-152.99	224.397	-85.3
	-188.120	-174.62	-151.18	-151.68	221.022	-95.11
	-190.740	-174.68	-152.36	-151.74	209	-92.74
18:00	-188.300	-175.55	-153.24	-153.11	219.647	-85.55
	-181.000	-183	-153.24	-153.55	206.0838	-85.99
	-188.370	-181	-153.24	-156.05	227.397	-84.61
18:30	-198.120	-176.87	-154.49	-156.55	209	-89.99
	-191.620	-177.3	-154.43	-157.99	226	-106
	-191.930	-178.12	-154.99	-159.86	186.646	-91.24
19:00	-192.740	-178.49	-155.55	-159.99	217.5216	-92.24
	-191.490	-178.49	-155.55	-161.3	209	-92.8
	-193.990	-179.43	-155.74	-160.99	215	-93.24
19:30	-192.990	-179.3	-155.99	-162.36	218.2717	-94.3
	-193.120	-180.24	-156.55	-161.43	220	-95.61
	-193.240	-181.05	-157.05	-160.36	218.6467	-96.3
20:00	-204.000	-181.55	-156.74	-159.49	195	-102.68
	-194.930	-181.62	-156.93	-159.55	221.834	-99.36
	-203.550	-181.49	-157.24	-158.68	205	-99.55
20:30	-196.370	-181.55	-157.49	-156.3	222	-106.74
	-199.120	-181.62	-157.74	-154.55	209.8964	-102.36
	-196.740	-182.24	-157.8	-151.8	225.647	-102.36
21:00	-196.120	-181.93	-158.11	-148.86	219.897	-102.49
	-196.370	-182.62	-158.49	-146.05	217.3341	-102.74
	-196.430	-182.05	-158.49	-142.68	182	-103.3
21:30	-195.990	-183.3	-158.55	-143.36	221.209	-109.18
	-196.180	-183.43	-159.05	-143.86	183.208	-127.99
	-196.740	-184.24	-159.36	-145.68	205	-121.68
22:00	-196.740	-184.74	-159.74	-145.3	224.334	-110.24
	-196.370	-185.18	-160.43	-144.8	221.709	-106.3
	-195.800	-184.49	-160.68	-144.68	222.897	-104.36
22:30	-195.930	-184.74	-161.18	-144.24	205	-105.05
	-195.680	-184.99	-161.43	-143.43	224.522	-106.24
	-195.680	-184.99	-161.86	-143.05	219.084	-107.61
23:00	-195.740	-185.3	-162.3	-143.05	225.772	-103.8
	-195.990	-184.99	-162.86	-142.93	216.8966	-97.93
	-196.300	-184.93	-163.05	-143.05	219.647	-98.68
23:30	-196.120	-184.62	-162.99	-143.55	225.959	-100.24
	-195.550	-183.93	-162.68	-144.86	221.897	-102.55
	-194.800	-182.93	-162.05	-145.68	218.3342	-104.11
0:00:00	-193.430	-183.05	-162.18	-146.24	219.897	-104.99
	-192.300	-183.12	-162.49	-147.43	220.834	-105.93
	-190.740	-183.8	-162.49	-148.3	221.772	-106.05
00:30	-189.930	-182.99	-162.86	-148.99	219.897	-106.86
	-188.930	-183.37	-163.05	-141	216.3966	-108.43
	-200.000	-183.62	-163.18	-150.68	223.334	-110.55
01:00	-187.430	-184.37	-162.99	-150.99	215.5216	-111.93
	-186.740	-184.74	-162.99	-152.11	219.522	-112.99

	-186.800	-184.68	-162.43	-152.55	224.772	-114.11
01:30	-186.370	-184.8	-162.99	-153.11	215	-115.36
	-186.490	-185.12	-162.8	-153.86	225.084	-116.11
	-186.930	-185.49	-162.99	-154.43	218.8342	-116.74
02:00	-187.050	-185.8	-162.68	-155.36	222.334	-117.18
	-187.180	-185.37	-162.24	-156.11	171.645	-117.3
	-187.430	-185.68	-162.3	-156.43	220.959	-117.55
02:30	-187.430	-185.62	-162.55	-157.18	219.147	-117.74
	-187.300	-185.3	-162.61	-157.05	220.209	-117.43
	-187.240	-185.05	-162.49	-156.36	224.209	-117.11
03:00	-187.300	-185.05	-162.55	-156.68	224.584	-116.55
	-187.550	-185.18	-162.61	-158.05	219.334	-116.11
	-187.050	-184.49	-162.43	-158.49	213.209	-116.24
03:30	-187.180	-184.68	-162.18	-158.74	220.084	-115.74
	-186.680	-183.49	-161.55	-158.11	223.709	-114.93
	-186.240	-183.24	-160.93	-157.55	218.5217	-113.93
04:00	-185.930	-182.8	-160.49	-156.93	220.084	-112.3
	-185.870	-182.12	-160.36	-155.55	221.522	-110.36
	-185.990	-183.55	-160.55	-154.3	219.772	-108.8
04:30	-186.490	-183.74	-160.93	-153.43	225.647	-107.68
	-186.300	-184.43	-161.18	-151.8	223.647	-106.36
	-186.490	-184.8	-161.43	-157	216.4591	-105.24
05:00	-186.180	-184.43	-161.55	-148.05	220.897	-104.61
	-185.930	-184.37	-161.8	-146.55	218.5217	-104.36
	-185.490	-184.05	-161.93	-145.93	224.709	-103.86
05:30	-185.370	-183.87	-162.18	-144.61	228.772	-103.86
	-184.680	-183.99	-162.43	-144.8	222.834	-103.36
	-184.120	-183.43	-162.3	-143.99	199.9586	-102.93
06:00	-183.550	-183.24	-161.99	-142.18	225.459	-104.74
	-182.990	-182.99	-161.8	-138.8	216.4591	-106.43
	-182.740	-182.93	-162.18	-137.43	213.5215	-107.24
06:30	-182.120	-181.49	-162.05	-136.61	229.459	-106.61
	-181.620	-181.87	-162.24	-138.36	225.209	-106.36
	-181.430	-182.62	-162.61	-139.99	225.147	-106.55
07:00	-181.120	-182.49	-162.86	-142.3	175.645	-107.43
	-180.550	-182.99	-163.05	-144.24	228.397	-107.74
	-179.930	-184.68	-163.36	-145.8	217.8966	-107.49
07:30	-179.430	-185.93	-163.24	-146.8	217.7716	-107.8
	-179.490	-187.18	-163.8	-148.36	225.022	-108.18
	-178.370	-187.62	-154	-149.18	220.459	-107.99
08:00	-177.550	-183	-163.24	-150.3	220.897	-108.68
	-176.550	-188.74	-163.36	-151.18	226.022	-108.99
	-175.490	-189.18	-173	-151.99	207.2713	-109.05
08:30	-175.120	-189.68	-173	-152.8	226.022	-108.49
	-173.930	-190.05	-163.74	-153.93	221.897	-108.24
	-173.620	-190.68	-163.74	-155.05	222.772	-108.24
09:00	-173.300	-191.12	-166	-156.24	226.272	-107.99
	-172.800	-191.37	-163.11	-156.86	193.458	-107.61

	-171.620	-192.05	-162.93	-157.86	220.397	-107.05
09:30	-170.800	-192.12	-162.68	-158.18	226.647	-106.8
	-169.930	-192.68	-162.49	-158.74	224.397	-106.43
	-169.300	-192.62	-162.24	-158.68	220.772	-105.86
10:00	-168.430	-193.05	-161.68	-158.43	220.459	-105.61
	-167.870	-192.99	-161.24	-159.36	222	-105.3
	-167.930	-193.24	-160.93	-159.24	219.959	-104.61
10:30	-167.430	-193.43	-160.18	-159.43	222.459	-104.36
	-167.050	-194.12	-159.68	-159.24	226.459	-103.49
	-166.800	-194.3	-159.11	-158.86	220.022	-103.3
11:00	-166.680	-194.93	-158.36	-157.49	218.9592	-102.68
	-166.550	-194.74	-157.86	-157.93	221.897	-80
	-166.620	-194.3	-156.93	-156.68	228.022	-101.74
11:30	-166.300	-194.55	-156.05	-156.93	227.959	-85
	-165.870	-194.55	-155.05	-156.61	223.959	-100.3
	-165.240	-193.74	-153.99	-156.61	228.209	-99.49
12:00	-164.680	-193.05	-152.8	-155.24	229.084	-98.74
	-164.050	-192.87	-151.36	-155.18	232.522	-97.68
	-163.800	-192.68	-151	-155.68	209.27138	-96.61
12:30	-171.000	-193.62	-148.49	-154.8	228.897	-95.3
	-163.110	-192.43	-146.24	-155.61	230.21	-91
	-162.430	-191.55	-143.43	-154.55	221.084	-93.3
13:00	-161.990	-191.74	-140.99	-153.68	221.772	-91.86
	-162.050	-191.49	-139.49	-154.49	187.521	-91.05
	-161.990	-192.49	-138.05	-154.49	225.272	-90.24
13:30	-162.550	-191.93	-136.93	-154.49	227.397	-89.8
	-161.990	-192.24	-136.05	-153.93	192.146	-89.18
	-161.930	-192.24	-135.93	-153.68	216.7716	-89.24
14:00	-162.680	-191.8	-135.8	-153.86	228.647	-89.43
	-171.000	-191.93	-135.61	-153.86	235.772	-88.24
	-164.050	-192.18	-135.49	-153.61	221.022	-88.61
14:30	-164.740	-192.99	-135.55	-153.55	236.71	-87.3
	-165.050	-193.05	-135.43	-153.24	238.21	-86.74
	-165.370	-193.55	-135.74	-153.18	215.3341	-86.36
15:00	-165.300	-192.68	-135.61	-152.68	235.21	-85.93
	-165.180	-192.8	-135.86	-152.18	200.8336	-85.61
	-165.550	-192.49	-136.11	-152.11	220.709	-85.18
15:30	-165.990	-192.3	-136.11	-151.68	220.834	-84.74
	-165.800	-192.74	-136.36	-151.36	220.897	-83.99
	-164.680	-192.74	-136.49	-151.55	227.272	-83.43
16:00	-163.680	-192.87	-136.36	-151.3	220.772	-83.11
	-162.610	-192.8	-136.74	-151.43	230.96	-82.68
	-161.740	-193.12	-136.61	-151.3	236.46	-82.3
16:30	-161.930	-193.93	-137.43	-151.68	227.709	-75
	-161.860	-193.37	-137.61	-150.99	227.022	-82.05
	-161.860	-193.12	-137.61	-150.49	208.02134	-71
17:00	-161.490	-193.3	-137.68	-150.61	213.209	-75
	-160.680	-193.12	-137.99	-150.8	220.772	-80

	-160.740	-192.24	-138.05	-150.36	235.522	-81.43
17:30	-161.300	-192.24	-138.3	-150.43	218.2092	-65
	-161.800	-191.8	-138.49	-150.36	226.647	-81.11
	-161.860	-191.55	-138.68	-150.43	234.147	-85
18:00	-162.550	-191.8	-139.36	-150.68	235.46	-80.86
	-163.240	-190.62	-138.99	-150.18	216.7716	-79.99
	-171.000	-190.05	-138.93	-149.68	235.21	-79.24
18:30	-164.240	-189.55	-138.8	-151	216.7091	-78.55
	-165.120	-188.87	-138.8	-149.61	234.397	-78.61
	-165.870	-188.3	-138.93	-149.61	226.647	-78.49
19:00	-166.800	-186.93	-138.8	-146	228.959	-77.42
	-166.740	-187.12	-138.93	-149.49	217	-77.49
	-167.740	-186.43	-138.86	-149.49	225.647	-77.17
19:30	-166.550	-185.24	-139.11	-149.74	237.21	-76.8
	-166.740	-184.24	-138.99	-149.74	217	-76.8
	-166.990	-184.24	-139.18	-146	217.0216	-76.86
20:00	-167.050	-183.8	-139.11	-149.93	219.459	-76.74
	-166.620	-183.62	-139.11	-162	204	-76.61
	-164.550	-183.49	-139.3	-149.74	228.459	-76.3
20:30	-149.490	-182.49	-139.24	-149.68	220.459	-76.42
	-150.180	-182.55	-139.11	-151	241.71	-76.17
	-145.430	-182.55	-139.11	-149.61	232.397	-75.99
21:00	-133.740	-181.8	-139.18	-157	236	-75.49
	-132.930	-182.18	-139.49	-171	226.334	-74.99
	-131.110	-181.49	-139.43	-149.99	237.522	-74.67
21:30	-131.610	-182.18	-139.74	-149.99	240	-73.55
	-128.110	-182.87	-139.93	-150.3	238.335	-72.99
	-126.800	-182.93	-140.18	-150.43	214.709	-72.55
22:00	-121.050	-182.87	-140.36	-150.61	200.7711	-71.74
	-148.000	-183.93	-140.74	-150.86	228.772	-72.17
	-145.000	-184.05	-141.18	-151.3	218.2717	-72.67
22:30	-164.990	-184.05	-141.43	-151.43	232.397	-72.61
	-148.000	-183.68	-141.61	-151.74	225.584	-72.92
	-148.000	-184.3	-142.05	-151.86	215.7716	-72.99
23:00	-151.000	-184.49	-142.24	-151.93	218.8967	-72.99
	-157.000	-184.62	-142.36	-152.11	225.147	-73.05
	-154.000	-184.93	-142.55	-152.24	236.085	-73.17
23:30	-148.000	-184.49	-142.55	-152.18	217	-73.3
	-129.000	-185.74	-142.99	-152.3	180.083	-73.36
	-151.000	-185.3	-143.05	-152.36	213	-73.42
0:00:00	-141.000	-185.68	-142.93	-152.11	221.459	-73.11
	-145.000	-186.12	-143.43	-152.74	225.459	-73.49
	-146.300	-185.93	-143.36	-152.36	216.3966	-72.74
00:30	-131.000	-186.55	-143.43	-152.11	232.835	-72.49
	-138.490	-161	-143.24	-151.61	222.209	-71.86
	-148.000	-187.18	-143.3	-151.61	213.6465	-71.67
01:00	-148.000	-185.55	-142.99	-150.86	204	-71.49
	-135.000	-129.49	-138.55	-171	229.647	-71.24

	-145.000	-141.18	-138.55	-148	230.335	-71.42
01:30	-138.000	-189	-131.11	-151	229.209	-71.24
	-141.000	-154	-129.61	-148	223.522	-70.8
	-141.000	-180	-129.3	-162	227.647	-71.24
02:00	-188.000	-154	-129.8	-144	237.522	-71.49
	-145.000	-171	-130.49	-166	230.46	-72.61
	-160.000	-176	-130.99	-72.61	213.7715	-74.74
02:30	-151.000	-130.11	-132.11	-98.36	232.772	-75.86
	-145.000	-138.3	-133.24	-87.36	221.522	-77.36
	-141.000	-143.86	-134.43	-84.36	229	-79.92
03:00	-154.000	-148.11	-141	-82.05	224.272	-83.24
	-154.000	-151.11	-135.74	-78.67	230.085	-84.8
	-141.000	-153.3	-136.18	-78.67	233.397	-84.55
03:30	-138.000	-155.49	-136.68	-79.99	224.022	-85.61
	-145.000	-157.8	-137.36	-77.99	224.709	-87.43
	-108.050	-135.86	-136.24	-157	222.334	-89.49
	-114.430	-132.99	-136.36	-81.36	217	-91.8

#### B.4 pH

Tabla B.8 Valores de pH durante la primera etapa

Días	Influyente	RA <sub>1</sub>	RA <sub>2</sub>	RB <sub>1</sub>	RB <sub>2</sub>
04/02/2006	6.706	5.94	5.932	6.07	6.011
07/02/2006	6.906	6.118	5.889	5.891	5.904
22/02/2006	7.03	6.015	5.984	6.023	6.043
28/02/2006	7.001	6.011	5.996	6.025	6.106

Tabla B.9 Valores de pH durante la segunda etapa

Días	Influyente	RA <sub>1</sub>	RA <sub>2</sub>	RB <sub>1</sub>	RB <sub>2</sub>
30/03/2006	7.03	5.83	5.69	6.9	5.68
21/04/2006	7	6.75	6.61	6.83	5.71
24/04/2006	6.987	6.5	5.83	6.74	6.23
28/04/2006	7.023	6	5.989	6.76	6.52

#### B.5 Temperatura

Tabla B.10 Valores de pH durante la primera etapa

Día	Temp.°C
04/02/2006	22.5
07/02/2006	23
22/02/2006	23.5
28/02/2006	24

**Tabla B.11** Valores de pH durante la segunda etapa

<b>Días</b>	<b>Temp.°C</b>
30/03/2006	23
21/04/2006	23.5
24/04/2006	23.5
28/04/2006	23

## ANEXO C

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A continuación se resume el análisis estadístico utilizado para fundamentar la discusión y las conclusiones realizadas en esta investigación. Se utilizó el programa Statgraphics Plus 5.0 para dicho análisis. A continuación se muestra el análisis de variancia (ANDEVA) y se consideraron dos variables de respuesta (potencial redox, demanda química de oxígeno,) para un 95 y 99 % de confianza.

Análisis de variancia para la concentración del fósforo a la salida de cada reactor con un 95% de confianza y tabla de medias con gráfica.

Número de factores: 2

1: Reactor (RA<sub>1</sub> y RA<sub>2</sub>)

2: DQO (450 y 225 mg/L)

La tabla ANDEVA descompone la variabilidad de fósforo en las contribuciones debidas a varios factores. Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que los p-valores son inferiores a 0.05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en el fósforo para un 95.0%.

**Tabla C.1. Análisis de variancia (ANDEVA) para Fósforo con un 95% de confianza**

Análisis de la Varianza para[P] - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Reactor	0.00662976	1	0.00662976	9.84	0.0040
B:DQO	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
<b>RESIDUOS</b>	<b>0.0188616</b>	<b>28</b>	<b>0.000673627</b>		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	<b>0.0254913</b>	<b>31</b>			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla C.2. Tabla de medias para Fósforo con un 95% de confianza

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para [P]  
con 95.0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior	
Media Total	32	0.0698437				
Reactor						
RA1	16	0.05545	0.00648858	0.0421587	0.0687413	
RA2	16	0.0842375	0.00648858	0.0709462	0.0975288	
DQ0						
225	16	0.0698437	0.00648858	0.0565525	0.083135	
450	16	0.0698437	0.00648858	0.0565525	0.083135	
Reactor según DQ0						
RA1	225	8	0.05545	0.00917624	0.0366533	0.0742467
RA1	450	8	0.05545	0.00917624	0.0366533	0.0742467
RA2	225	8	0.0842375	0.00917624	0.0654408	0.103034
RA2	450	8	0.0842375	0.00917624	0.0654408	0.103034

La tabla muestra la media del fósforo para cada nivel de factores.

También presenta el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran intervalos de confianza del 95% para cada una de las medias.

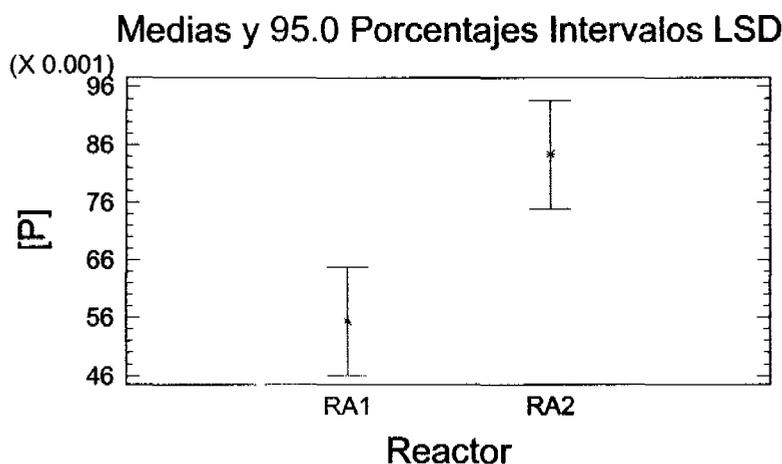


Figura C.1. Gráfica para la tabla de medias para fósforo con un 95% de confianza

Análisis de variancia para la concentración del fósforo a la salida de cada reactor con un 99% de confianza.

Número de factores: 2

1: Reactor (RA<sub>1</sub> y RA<sub>2</sub>)

2: DQO (450 y 225 mg/L)

La tabla ANDEVA descompone la variabilidad de fósforo en las contribuciones debidas a varios factores. Los p-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que valores de p son inferiores a 0.01, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en fósforo para un 99.0%.

**Tabla C.3. Análisis de variancia (ANDEVA) para Fósforo con un 99% de confianza**

Análisis de la Varianza para [P] - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A: Reactor	0.00662976	1	0.00662976	9.84	0.0040
B: DQO	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
RESIDUOS	0.0188616	28	0.000673627		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	<b>0.0254913</b>	<b>31</b>			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

**Tabla C.4. Tabla de medias para Fósforo con un 99% de confianza**

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para [P] con 99.0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	32	0.0698437			
<b>Reactor</b>					
RA1	16	0.05545	0.00648858	0.0375203	0.0733797
RA2	16	0.0842375	0.00648858	0.0663078	0.102167
<b>DQO</b>					
225	16	0.0698437	0.00648858	0.0519141	0.0877734
450	16	0.0698437	0.00648858	0.0519141	0.0877734
<b>Reactor según DQO</b>					
RA1 225	8	0.05545	0.00917624	0.0300936	0.0808064
RA1 450	8	0.05545	0.00917624	0.0300936	0.0808064
RA2 225	8	0.0842375	0.00917624	0.0588811	0.109594
RA2 450	8	0.0842375	0.00917624	0.0588811	0.109594

La tabla muestra la media del fósforo para cada nivel de factores. También presenta el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran intervalos de confianza del 99% para cada una de las medias.

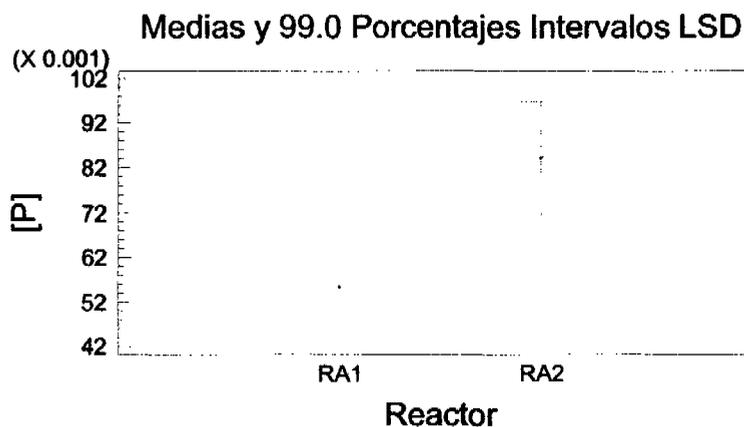


Figura C.2. Gráfica para la tabla de medias para fósforo con un 99% de confianza

Análisis de variancia para la DQO a la salida de cada reactor con un 95% de confianza y tabla de medias con gráfica.

- Número de factores: 2
- 1: Reactor (RA<sub>1</sub> y RA<sub>2</sub>)
- 2: DQO (450 y 225 mg/L)

La tabla ANDEVA descompone la variabilidad de la DQO en las contribuciones debidas a varios factores. Los p-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que 2-p valores son inferiores a 0.05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en la DQO del efluente para un 95.0%.

Tabla C.5. Análisis de variancia (ANDEVA) para la DQO con un 95% de confianza

Análisis de la Varianza para DQO efluente - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A: Reactor	3032.13	1	3032.13	5.46	0.0477
B: DQO influente	23872.6	1	23872.6	42.99	0.0002
<b>INTRERACCIONES</b>					
AB	621.072	1	621.072	1.12	0.3212
RESIDUOS	4442.79	8	555.349		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	<b>31968.6</b>	<b>11</b>			

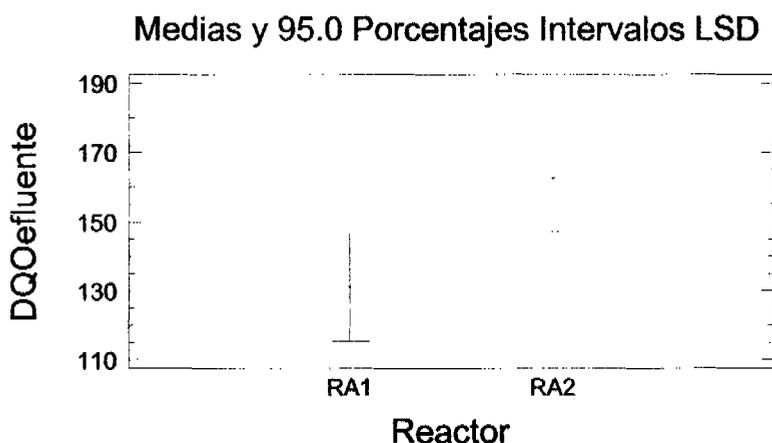
Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

La tabla muestra la DQO media para cada nivel de factores. También presenta el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran intervalos de confianza del 95% para cada una de las medias

**Tabla C.6. Tabla de medias para la DQO con un 95% de confianza**

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para DQOefluente con 95.0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	12	146.824			
Reactor					
RA1	6	130.928	9.62071	108.743	153.114
RA2	6	162.72	9.62071	140.535	184.905
DQOinfluyente					
225	6	102.222	9.62071	80.0362	124.407
450	6	191.427	9.62071	169.241	213.612
Reactor según DQOinfluyente					
RA1 225	3	93.52	13.6057	62.145	124.895
RA1 450	3	168.337	13.6057	136.962	199.712
RA2 225	3	110.923	13.6057	79.5484	142.298
RA2 450	3	214.517	13.6057	183.142	245.892



**Figura C.3. Gráfica para la tabla de medias de DQO con un 95% de confianza**

Análisis de variancia para la DQO de salida de cada reactor con un 99% de confianza.

Número de factores: 2

1: Reactor (RA<sub>1</sub> y RA<sub>2</sub>)

2: DQO (450 y 225 mg/L)

La tabla ANDEVA descompone la variabilidad de la DQO en las contribuciones debidas a varios factores. Los p-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que un p-valor es inferior a 0.01, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en la DQO del efluente para un 99.0%.

**Tabla C.7. Análisis de variancia (ANDEVA) para la DQO con un 99% de confianza**

Análisis de la Varianza para DQO efluente - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A: Reactor	3032.13	1	3032.13	5.46	0.0477
B: DQO influente	23872.6	1	23872.6	42.99	0.0002
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	621.072	1	621.072	1.12	0.3212
<b>RESIDUOS</b>					
	4442.79	8	555.349		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>					
	31968.6	11			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

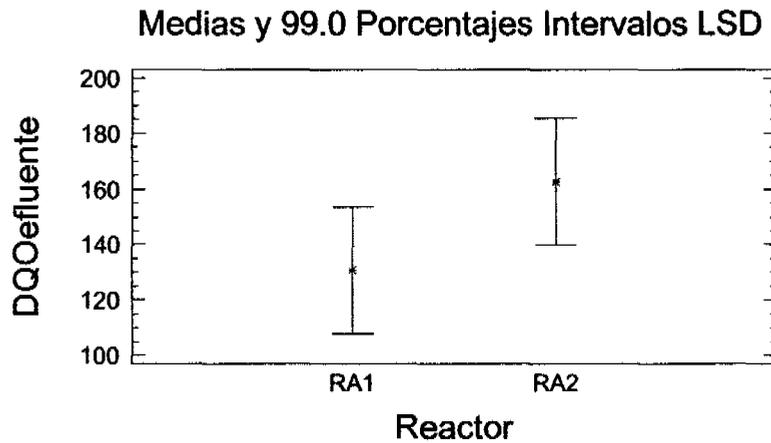
**Tabla C.8. Tabla de medias para la DQO con un 99% de confianza**

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para DQO efluente con 99.0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	12	146.824			
<b>Reactor</b>					
RA1	6	130.928	9.62071	98.647	163.21
RA2	6	162.72	9.62071	130.439	195.001
<b>DQO influente</b>					
225	6	102.222	9.62071	69.9404	134.503
450	6	191.427	9.62071	159.145	223.708
<b>Reactor según DQO influente</b>					
RA1 225	3	93.52	13.6057	47.8673	139.173
RA1 450	3	168.337	13.6057	122.684	213.989
RA2 225	3	110.923	13.6057	65.2707	156.576
RA2 450	3	214.517	13.6057	168.864	260.169

La tabla muestra la DQO media para cada nivel de factores.

También presenta el error estándar de cada media, lo cual es una medida de su variabilidad en la muestra. Las dos columnas de la derecha muestran intervalos de confianza del 99% para cada una de las medias. Ver Figura C.4.



**Figura C.4. Gráfica para la tabla de medias de DQO con un 99% de confianza**

## ANEXO D

### ACERVO FOTOGRÁFICO

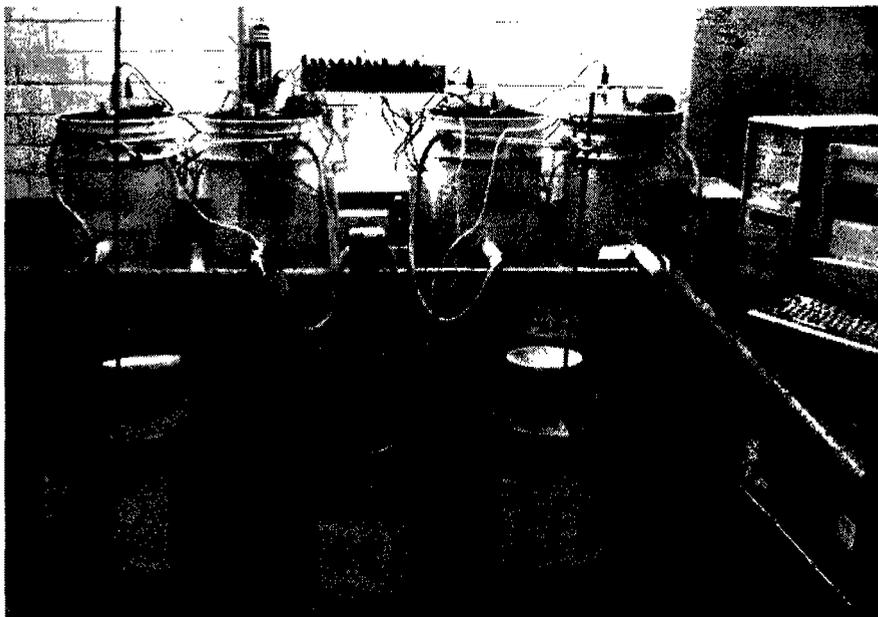


Figura D.1. Descripción del sistema experimental

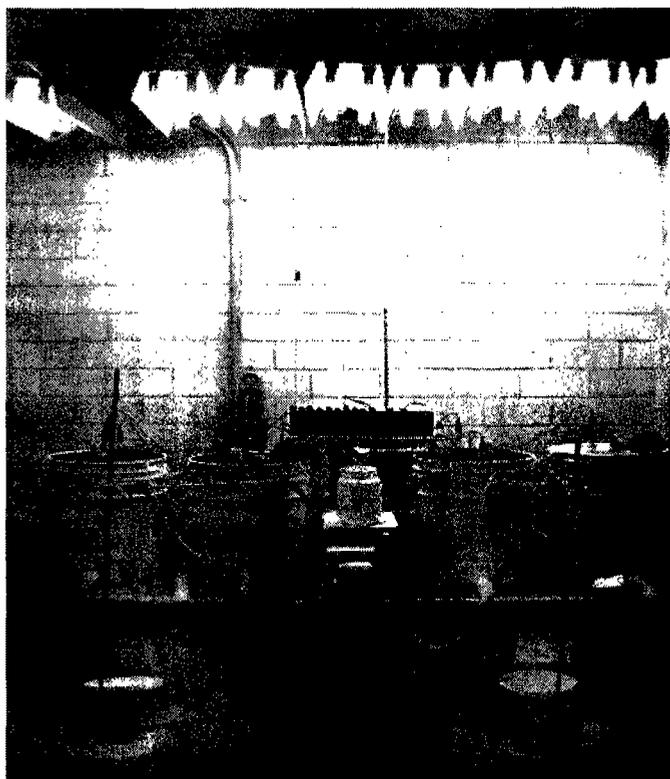


Figura D.2. Descripción del sistema experimental con iluminación

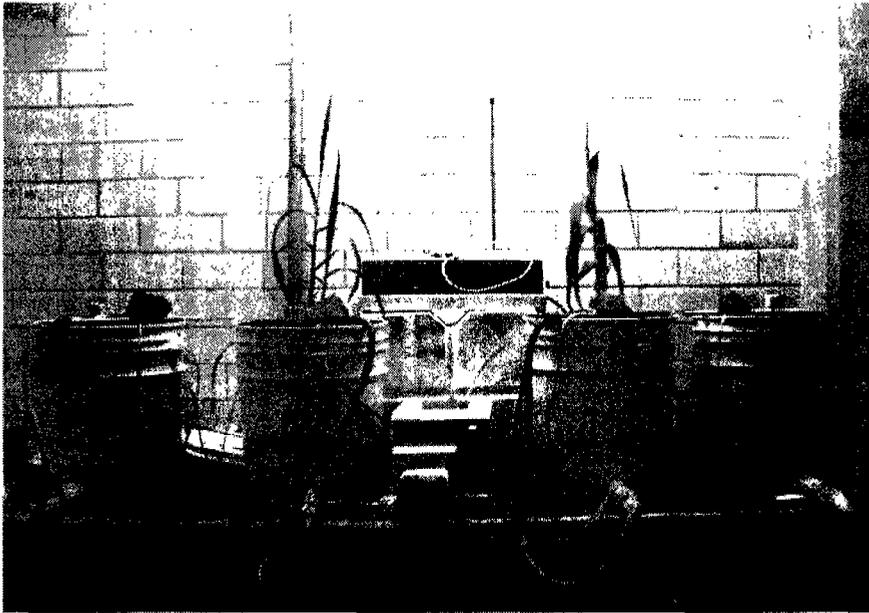


Figura D.3 Descripción del sistema experimental para el mes de febrero

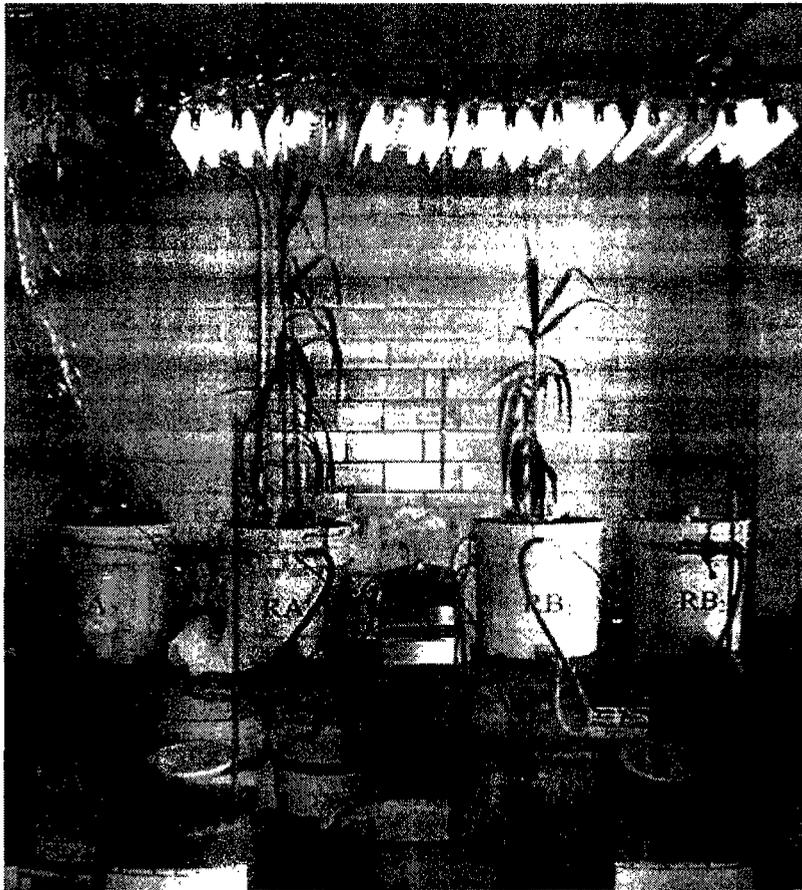


Figura D.4 Sistema experimental y altura de las plantas en el mes de mayo

## BIBLIOGRAFÍA

- APHA-AWWA-WPCF. 1992. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Díaz-de-Santos. Madrid, España.
- Bastian, R.K. Shanaghan, P.E, Thompson, B.P. 1991. Use of wetlands for municipal wastewater treatment and disposal regulatory issues and EPA policies. Wetlands for wastewater treatment. Municipal, industrial and agricultural. Tercera edición. Lewis Publishers. EEUUA.
- Castro-González, A. 2004. Efecto de la temperatura en la actividad metanogénica y sulfatorreductora de consorcios microbianos en condiciones anaerobias. *Tesis de Doctorado en Ciencias*. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Ingeniería Química). Facultad de Química. UNAM. México D.F. México.
- Durán-de-Bazúa, C. (responsable), Haberl, R., Kreiner, I., Krishnan-Ranjani, Luna-Pabello, V.M., Ramírez-Burgos, L.I. (Profesores); Bernal-González, M., Esponda-Aguilar, P.L., Fenoglio-Limón, F.E., García-Gómez, R.S., García-Vázquez, L., Guzmán-Aguirre, S., Guzmán-López, P., Juárez-Méndez, C.H., Kneidinger, Ch., Millán-Hernández, S.E., Miranda-Ríos, M., Ramírez-Carrillo, H.F., Mejía-Chávez, A.G., Padrón-López, R.M., Ramírez-Burgos, L.I., Rodríguez-Cruz, A., Rodríguez-Monroy, J., Salinas-Castillo, N.V., Schaller, P., Soto-Esquivel, M.G., Varela-Montellano, E. (Estudiantes). 1999. Humedales artificiales en México: Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales. *VOL. 6, SERIE: QUÍMICA AMBIENTAL DEL AGUA*. Pub. Prog. Ing. Quim. Amb. y Quim. Amb. ISBN 968-36-9443-8. Facultad de Química, UNAM. 185 pags. 200 ejemplares, 1a. Ed. (1999), 194 pags. 500 ejemplares, 2a. Ed. (2001), 205 pags. 500 ejemplares, 3a. Ed. (2005). En prensa (Versión corregida y aumentada). México D.F. México.
- Duran-de-Bazúa, C. 2002. Curso de maestría "Tratamiento biológico de aguas residuales". División académica de ciencias biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Agosto. Villahermosa Tabasco, México.
- Durán-de-Bazúa, C. 1999. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria de proceso. 5a. Ed. Pub. UNAM, Facultad de Química, PIQAyQA. México D.F. México.
- Esponda-Aguilar, P.L. 2001. Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. México, D.F. México.
- Faulkner, S.P y Richardson, C.J. 1991. Physical and chemical characteristics of freshwater wetland soils. Wetlands for wastewater treatment. Municipal, industrial and agricultural. Tercera edición. Lewis Publishers. EEUUA.
- Fenoglio-Limón, F.E. 2000. Bases para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical. Tesis

- Profesional (Ingeniería Química), Facultad de Química, UNAM. México, D.F. México.
- Fenoglio-Limón, F.E. 2003. Fenómenos de transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columnas empacadas. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Orientación: Química Ambiental). UNAM. México, D.F. México.
- García, J; Morató, J, y Bayona, M. 2006. Depuración con sistemas naturales: humedales construidos. Redes de páginas internacionales. [http://alojamientos.us.es/ciberico/archivos\\_word/99b.doc](http://alojamientos.us.es/ciberico/archivos_word/99b.doc)
- Guido-Zárate, A. 2006. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial. Tesis de Maestría en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental), UNAM. México D.F. México.
- Guido-Zárate, A., Mijaylova-Nacheva, P., Buitrón, G, Durán-de-Bazúa, C. 2006. Behavior of redox potentials in artificial wetlands models: a tool for controlling its efficiency. Presentado en la 7th Specialized Conference on Small Water and Wastewater Treatment Plants (7ª Conferencia Especializada sobre Sistemas Pequeños de Tratamiento de Agua y Aguas Residuales). IWA. Marzo 7-10, 2006. México D.F. México.
- Hammer, D. A. and Bastian R. K. 1991. Wetlands ecosystems: Natural water purifiers? Constructed wetlands for wastewater treatment. Municipal, industrial and agricultural. Tercera edición. Lewis Publishers. EEUA.
- IWA. 2001. Constructed wetlands for pollution control. Processes, performance, design and operation. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water in Water Pollution Control. Scientific and Technical Report Series. International Water Association, IWA Pub. Londres, Inglaterra.
- Kadlec, R.H and Knight, R.L. 1996. Treatment Wetlands. Lewis-CRC Press. Boca Raton, Florida, EEUA.
- Lara-Borrero, J.A. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.
- Luna-Pabello, V.M., C. Durán-de-Bazúa, C., Ramírez, H.F., Fenoglio-Limón, F.E., Sánchez, G.H. 1997 a. Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. En Anuario Latinoamericano de Educación Química. Pp.50-56. San Luis. República Argentina.
- Luna-Pabello, V.M., C. Durán-de-Bazúa, C., Ramírez, H.F., Fenoglio-Limón, F.E., Sánchez, G.H. 1997 b. Sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas a base de humedales artificiales. Una tecnología alterna para la protección del equilibrio ecológico zonas urbanas. En Memorias de las III Jornadas Panamericanas. Medio Ambiente y Vivienda. Pp.73-78. Zacatecas, Zac, México.

- Luna-Pabello, V.M., Miranda-Ríos, M. 2001. Estado del arte y perspectivas de aplicación de los humedales artificiales de flujo horizontal en México. Serie: Tratamiento biológico de aguas residuales. UNAM. México D.F. México.
- Macias-Ontiveros, R. I. 2005. Tratamiento de Aguas Residuales Mediante el Proceso de Lodos Activados. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz., México.
- Metcalf y Eddy, Inc. 1991. Wastewater Engineering. Treatment, disposal, and reuse. 3ª. Edición. McGraw Hill. Nueva York, EEUA.
- NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de contenido de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Norma Mexicana. Secretaría de Economía, Poder Ejecutivo Federal. México D.F: México. Tomada de las redes internacionales: <http://www.economia.gob.mx>
- NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Norma Mexicana. Secretaría de Economía, Poder Ejecutivo Federal. México D.F: México. Tomada de las redes internacionales: <http://www.economia.gob.mx>.
- Oaxaca-Grande, M.A. 1997. Estudio comparativo para la determinación de la demanda química de oxígeno entre el método estándar de reflujo abierto y el método rápido colorimétrico de reflujo cerrado. Tesis profesional (Ingeniería Química). Instituto Tecnológico de Orizaba. Orizaba, Veracruz, México.
- Padrón-López, R.M. 2005. Depuración de aguas residuales domésticas a través de humedales artificiales de flujo vertical en zonas trópico-húmedas. Tesis de maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. México.
- Ramírez-Carrillo, H.F. 1998. Desarrollo de la ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal. Tesis profesional, ingeniería química. Facultad de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM. México D.F. México.
- Reed, C.S, Crites R.W, Joe-Middlebrooks E. 1995. Natural systems for waste management and treatment. McGraw-Hill, Inc. EEUA.A
- Rodríguez-Cruz, A., Varela-Montellano, E. 2003. Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México D.F. México.
- SEMARNAT. 2006. Página de redes internacionales. [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)
- Soto-Esquivel, M.G. 1997. Tratamiento terciario de aguas residuales agroindustriales mediante el uso de reactores con plantas hidrofitas flotantes (Hydrocotyle

ranunculoides). Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. Unanimidad y Mención Honorífica. México D.F. México.

Soto-Esquivel, M.G. 2003. Efecto de la generación de oxígeno fotosintético en un sistema sólido-líquido-gas. Tesis de Maestría en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). UNAM. México D.F. México.

Trautmann, N.M, Martin, J.H, Porter, K.S. Jr., Hawk, K.C. 1991. Use of artificial wetlands for treatment of municipal solid waste landfill leachate. Wetlands for wastewater treatment. Municipal, industrial and agricultural. Tercera edición. Lewis Publishers. EEUUA.