



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**TRATAMIENTO DE ORINA HUMANA EN UN HUMEDAL  
ARTIFICIAL DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL (HAFSS)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA  
P R E S E N T A  
MARIA DEL CARMEN FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**

**DIRECTOR: DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ**

**ASESOR TÉCNICO: M.EN.I JOSÉ LUIS MARTÍNEZ PALACIOS**



**MÉXICO, D.F., 2010**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

\*ZARAGOZA\*

JEFATURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/009/10

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ MARIA DEL CARMEN  
P R E S E N T E

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>PRESIDENTE</b>	<b>Quím. Martha Ortiz Rojas</b>
<b>VOCAL</b>	<b>Dr. Ignacio Monje Ramírez</b>
<b>SECRETARIO</b>	<b>I. Q. Ana Lilia Maldonado Arellano</b>
<b>SUPLENTE</b>	<b>I. Q. Everardo Antonio Feria Hernández</b>
<b>SUPLENTE</b>	<b>M. en I. José Luis Martínez Palacios</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E**  
**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

México D. F., a 30 de Abril de 2010

**JEFA DE LA CARRERA**

**I. Q. ZULA GENNY SANDOVAL VILLANUEVA**

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A DIOS:**

Gracias por permitirme llegar hasta el día de hoy, por darme el precioso regalo de la vida, por estar a mi lado en todo momento (en momentos de felicidad, en momentos de angustia, de aflicción y de melancolía), por ser mi fuerza motora, por enseñarme a valorar la vida.

### **A MI PAPÁ:**

Joaquín Fernández Cruz, gracias por el apoyo que me has brindado a lo largo de mi vida.

Gracias por tu esfuerzo, por tu paciencia y comprensión que me has dado, por dedicarte a mí, por tus horas de desvelo cuidándome, por enseñarme los valores de la vida.

Gracias por anteponer mis sueños a los tuyos, gracias por amarme, yo también te amo.

### **A MIS HERMANOS:**

Diana, Joaquín y Sandra, gracias por ser parte de mi vida, por haber sido su bebé.

Les agradezco que hayan estado conmigo, me hayan protegido, y hasta me hayan consentido, gracias a ustedes fui inmensamente feliz en mi niñez, ahora aunque las circunstancias cambiaron siguen siendo parte de mi soporte, gracias por su amor y cariño y el de sus hijos, con ellos he descubierto el poder que tiene una sonrisa. Los quiero.

### **A MIS AMIGOS:**

Juan, Edgar, Germán y Peter, les agradezco su compañía y sus consejos, el que me escucharan, pero sobre todo que compartieran conmigo el sentimiento mutuo de la amistad. Gracias Gerardo por tu amistad sincera y por los momentos de diversión que hemos compartido, por tí descubrí que no se debe juzgar a las personas por su apariencia, de que hay amigos que lo dan todo por tí, sin esperar recibir nada a cambio.

A tí que me has soportado en mis períodos de mal humor, has estado conmigo en las buenas y en las malas, me has brindado tu hermosa compañía durante estos años, has llenado mi corazón de felicidad, me conoces tal cual soy y me aceptas, gracias por todas estas cosas, por acercarte a mí, dejarme conocer tus virtudes y defectos y por ser mi persona maravillosa.

### **A MI ASESOR TÉCNICO:**

M. en I. Martínez, gracias por la asesoría durante mi estancia en el instituto.

### **A MI DIRECTOR:**

Dr. Monje, que me ha ayudado mucho en la elaboración de esta tesis. Gracias por su aportación, su apoyo pero sobre todo por la paciencia y comprensión que me brindó.

### **A LA UNIVERSIDAD:**

A la Universidad Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de estudiar una Licenciatura y por el apoyo económico que me brindaron durante el estudio de la misma.

### **A LA DIRECCIÓN GENERAL DE ASUNTOS DEL PERSONAL ACADÉMICO (DGAPA):**

Por aprobar el proyecto PAPIIT (IN-123009) "*Tratamiento, recuperación de nutrientes y aplicación de orina en suelo*" y apoyar este tipo de estudios. Así como también se agradece el apoyo económico otorgado para desarrollar la investigación en el grupo de trabajo del que es responsable el maestro José Luis Martínez Palacios.

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mi mamá, María Elena Rodríguez Pérez  
sin cuya presencia  
ni este trabajo  
ni yo  
hubiéramos existido.

Matita, admiré tu tenacidad, amor, paciencia hacia conmigo, dulzura, bondad, me amaste por sobre todas las cosas, a pesar de mis incontables errores siempre estuviste conmigo, siempre estuviste para mí, protegiéndome entre tus brazos, desde mi infancia me hiciste feliz, velaste para que no me faltara nada, me hiciste creer en sueños y esperanzas.

Gracias por acompañarme y darme fortaleza en mi recuperación, gracias por confiar en mí, por reprendermelo cuando lo necesité, pero sobre todo gracias por darme la vida.

Le agradezco a Dios por haberte compartido conmigo.

Perdóname por haberte fallado.

Siempre te amaré y estarás en mi corazón.



<b>ÍNDICE GENERAL</b>		<b>Pág.</b>
Resumen		1
Introducción		2
Justificación del tema		3
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>Fundamentos teóricos</b>	<b>4</b>
1.1	Antecedentes	5
1.1.1	Marco de referencia de estudio	5
1.1.2	Separación y tratamiento de corrientes domiciliarias	7
1.1.3	Características fisicoquímicas de la orina humana separada	9
1.2	Humedales artificiales	10
1.2.1	Historia	11
1.2.2	Clasificación	12
1.2.3	Principales componentes de un humedal artificial	15
1.2.3.1	Plantas acuáticas	16
1.2.3.2	Microorganismos, invertebrados y vertebrados	18
1.2.3.3	Substrato o medio soporte	19
1.2.4	Mecanismos de remoción de contaminantes	20
1.3	Plantas de tratamiento de aguas residuales en México basadas en humedales artificiales	25
Problemática		28
Objetivos		30
Objetivo general		30
Objetivos específicos		30
Hipótesis		31
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Metodología</b>	<b>32</b>
2.1	Modelo experimental del humedal de flujo sub-superficial	33
2.1.1	Descripción del área del HAFSS con <i>Phragmites spp</i> (carrizo)	34
2.2	Etapas de acondicionamiento del HAFSS	36
2.3	Pruebas experimentales con orina humana	41
2.3.1	Agua residual problema	41
2.3.2	Pruebas de tratabilidad de orina humana en el HAFSS	42
2.4	Parámetros de control y métodos de análisis	44
2.4.1	Parámetros fisicoquímicos	45



	Pág.	
2.4.2	Parámetros ambientales	49
CAPITULO 3	Resultados y discusión	51
3.1	Características fisicoquímicas de una corriente separada de orina humana	52
3.2	Estabilización de la operación en continuo del HAFSS	54
3.2.1	Control de flujo de operación y TRH	54
3.2.2	Comportamiento del HAFSS durante la etapa de estabilización	55
3.3	Comportamiento del HAFSS durante el tratamiento de orina humana	57
3.3.1	Efecto de la transpiración de las plantas acuáticas en el flujo y TRH	57
3.3.2	Remoción de nitrógeno de la orina humana	60
3.3.3	Comportamiento del pH y conductividad eléctrica	66
3.3.4	Censo de plantas	69
3.4	Distribución del contaminante en el humedal artificial	72
3.4.1	Durante la operación del HAFSS con disolución de urea	72
3.4.2	Durante el tratamiento de orina humana	74
3.5	Comportamiento de parámetros ambientales	77
3.5.1	Temperatura ambiente (máxima y mínima) y del agua	77
3.5.1.1	Temperatura máxima del ambiente	77
3.5.1.2	Temperatura mínima del ambiente	78
3.5.1.3	Temperatura del agua	79
3.5.1.4	Luminosidad	79
3.5.1.5	Humedad relativa (HR)	80
Conclusiones		82
ANEXO A		85
A.1	Plantas de tratamiento de aguas residuales en México basadas en humedales artificiales (continuación)	86
A.2	Conceptos básicos	90
A.2.1	Parámetros fisicoquímicos	90
A.2.2	Parámetros ambientales	92
ANEXO B		94
B.1	Factores de conversión de conductividad eléctrica	95
B.2	Cálculos de los requerimientos de nutrientes	95
ANEXO C		97
C.1	Determinación de NTK y amoniacal	98



	Pág.	
C.2	Determinación de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )	100
C.3	Determinación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )	100
C.4	Determinación de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )	101
ANEXO D	Tablas	102
Glosario		119
Bibliografía		120
Alcances		125



## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo general evaluar la capacidad de un humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) para remover nitrógeno de orina humana en un proceso continuo utilizando *Phragmites spp* como planta acuática, como una medida orientada a un uso más sustentable del agua de sanitarios, la recuperación de nutrientes de corrientes domiciliarias y el tratamiento de aguas residuales generadas en los procesos de recuperación de N y P (Maurer et al., 2006).

Se estudió la remoción de nitrógeno en sus diferentes formas (N-total,  $\text{NH}_3$ , N-orgánico,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) en el HAFSS durante dos etapas, la primera con una duración de cuatro meses para lograr un periodo de adaptación y acondicionamiento, alimentando con una disolución de urea una concentración promedio de  $37.2 \pm 5.5$  mg NTK/L (miligramos de nitrógeno total Kjeldahl/litro) equivalente a una carga de  $2.79 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día. En la segunda etapa, el HAFSS operó con orina humana aplicando una concentración promedio de  $14.2 \pm 4.76$  mg NTK/L equivalente a una carga de NTK de  $1.24 \pm 0.5$  g/m<sup>2</sup>·día; estos valores de carga de NTK fueron menores a efecto de mejorar el desempeño de la primera etapa de operación del humedal. Además de la remoción de nitrógeno, se llevó a cabo: el seguimiento de los niveles de transpiración de las plantas acuáticas y las variaciones de flujo de salida del humedal; el monitoreo de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica) en el influente, efluente y puntos de muestreo ubicados dentro del humedal, así como de parámetros ambientales (temperatura ambiente máxima y mínima, humedad relativa y luminosidad). El desempeño del humedal artificial se evaluó en términos de la carga removida por unidad de superficie del humedal (CR) y del porcentaje de reducción de masa (%RM). Durante el primer mes de operación con orina (6-27 febrero de 2009), se alimentó una carga promedio de  $1 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día y se removieron  $0.72 \pm 0.5$  g NTK/m<sup>2</sup>·día, equivalente a una remoción del 72%. En el segundo mes de operación (2 marzo al 8 abril) para una alimentación de  $1.42 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día se obtuvo una remoción de  $1.27 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día, equivalente a 89% de remoción. En términos de reducción de masa, las remociones logradas fueron 68 % y 89 %, para el primer y segundo mes de prueba con la orina humana, respectivamente. El TRH promedio fue de  $4.2 \pm 1.2$  días y  $4.6 \pm 1.7$  días para las etapas de acondicionamiento y operación con orina humana, respectivamente.

De este trabajo se concluye que el humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS), conteniendo *Phragmites spp* como planta acuática, puede ser una alternativa de tratamiento para la remoción del nitrógeno presente en la orina humana.



# INTRODUCCIÓN



## Justificación del tema

Debido al problema de contaminación del agua se han explorado alternativas a los sistemas tradicionales de tratamiento. Una de ellas es el uso de sistemas naturales o también referidos como ecotecnologías, dentro de las cuales se encuentran los “*humedales artificiales*” (HA) o filtros verdes, con el propósito de dar tratamiento a las aguas residuales, reducir la contaminación del ambiente y conservar los recursos asociados.

En la última década, los HA han ido ganando popularidad en la depuración de aguas residuales al ser referidos en la literatura como una tecnología de bajo costo, por los requerimientos mínimos de construcción, operación y mantenimiento. Es una de las pocas tecnologías de tratamiento sustentable y compatible con el medio ambiente, en donde la remoción de contaminantes (nutrientes) por plantas acuáticas, está asociada a la producción de grandes cantidades de biomasa misma que puede ser aprovechada para la generación de energía (Ciria et al., 2005).

En los HA el tratamiento se realiza mediante la combinación de mecanismos de tipo biológico, físico y químico, en los cuales intervienen plantas acuáticas, microorganismos y medio de soporte. En los humedales artificiales de flujo sub-superficial (HAFSS) se logran altas eficiencias de remoción de nitrógeno, fósforo y metales pesados, como resultado de diferentes mecanismos de remoción: filtración y adsorción al soporte, sedimentación, asimilación por plantas acuáticas, nitrificación/desnitrificación, entre otros (Ran et al., 2004).

Por otra parte, el nitrógeno es uno de los nutrientes y contaminantes a la vez de mayor relevancia en las aguas residuales, y en las descargas domiciliarias, que causan la contaminación de las fuentes de agua. La forma en que se puede encontrar en ambientes acuáticos es la orgánica y la inorgánica; en éste último caso, como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). Todas ellas factibles de ser transformadas en los HA.



# CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS



## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1 Marco de referencia de estudio

La eficiencia de humedales artificiales para remover nitrógeno de aguas residuales constantemente es revisada y muestra cierta controversia entre investigaciones, con respecto al papel que juegan las plantas acuáticas. Investigadores como Tanner et al. (1995), no detectaron diferencia alguna entre la eficiencia de sistemas plantados y no plantados.

Li et al. (2008) experimentaron con tres HA piloto, uno de flujo sub-superficial vertical (FSSV), otro de flujo sub-superficial horizontal (FSSH) y uno de flujo superficial de agua libre (FSW) para evaluar su capacidad de depuración de un agua del lago Taihu en China con problemas de eutroficación. El agua del lago se bombeó continuamente a cada humedal con una carga hidráulica de  $0.64 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ . Durante un año de funcionamiento encontraron tasas de remoción de nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrógeno total (N-total) y fósforo total (P-total) de: 23-46%, 34-65%, 20-52% y 35-66%, respectivamente. Estadísticamente, con el FSSV y el FSSH se obtuvieron altos niveles de remoción de nutrientes, excepto  $\text{NH}_3$ . La media de las remociones en el efluente de tratamiento en el FSSV ( $0.056 \text{ mg/L}$ ) y el FSSH ( $0.052 \text{ mg/L}$ ) prácticamente alcanzó el grado III ( $\leq 0.05 \text{ mg/L}$  para lagos) de los estándares de calidad de agua en China. La planta utilizada en los humedales (*Typha angustifolia*) creció bien en los tres HA. También observaron que la absorción en la planta juega un papel importante en la remoción de nitrógeno y fósforo en los tres tipos de humedales.

Keffala y Ghrabi (2005) compararon el funcionamiento de un sistema combinado compuesto de un lecho de flujo vertical con *Phragmites* y un lecho de flujo horizontal con *Typha*, con un sistema sin plantas para remover nitrógeno. Cada lecho de flujo vertical se alimentó intermitentemente con un flujo de  $0.144 \text{ m}^3/\text{día}$  correspondiente a una aplicación de carga hidráulica de  $0.24 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ . De este estudio se concluye que la remoción de NTK y nitrógeno amoniacal fue mayor en el sistema que contiene plantas (27% y 19%) comparado con el que no tiene (5 % y 6%). No obstante se tienen menores remociones en nitratos y nitritos.

Huang et al. (2000) evaluaron el efecto del tiempo de residencia en la remoción de nitrógeno en humedales artificiales de flujo sub-superficial (HAFSS) utilizando aguas residuales domésticas. El estudio consideró las combinaciones de dos especies de plantas acuáticas (*Scirpus cyperinus* y *Typha latifolia*) y cuatro tiempos de residencia (2.6, 3.9, 4.8 y 12 días). El agua residual fue



obtenida de fosas sépticas de residencias familiares. La concentración de N-total (NTK), amoniacal ( $\text{NH}_3$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) se monitorearon en el influente y efluente durante un período de tres años. Estos autores concluyen que las especies de plantas acuáticas tuvieron poco efecto en la remoción de nitrógeno, la concentración de  $\text{NH}_3$  y NTK disminuyó exponencialmente con respecto al tiempo de residencia. Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en el influente y efluente en ambos casos fueron bajas y no se observaron diferencias en las concentraciones con respecto al tiempo.

Respecto a la remoción de nitrógeno a partir de orina humana con humedales artificiales, el único reporte que se ha encontrado a la fecha es el estudio realizado por Farahbakhshazad y Morrison (1997). Experimentaron la remoción de nitrógeno a partir de orina humana diluida en una columna experimental (0.06 m diámetro y 0.5 m de altura) con un régimen de flujo ascendente y plantada con *Phragmites australis* soportada en arena.

Después de un periodo de adaptación del sistema de cuatro semanas con agua de la llave, la columna fue alimentada con una solución de orina diluida preparada a una concentración de 0.1 a 4 mg/L de amoníaco y con tiempos de retención hidráulicos de 4 min a 10 hr.

La acción microbiana proporcionó una remoción máxima del 40 % para amoníaco y fue similar en ambos sistemas (plantado y no plantado) a un tiempo de retención relativamente corto (30 min). El sistema plantado presentó mejores remociones de amoníaco y nitrato para tiempos grandes de retención (>150 min). Tiempos de retención grandes incrementan el tiempo de contacto entre la raíz y el agua residual y, por lo tanto, la posibilidad de transferir nutrientes a la raíz donde pueden ser removidos por absorción de la planta y por el aumento de la actividad microbiana, con lo que se induce la remoción efectiva de nutrientes.

Para las condiciones de operación, tiempo de retención de 5 h y cargas de 0.1 a 4  $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$  de amoníaco, la concentración de amoníaco a través de la columna fue dependiente del tiempo de retención, en un inicio ambos sistemas (plantado y no plantado) removieron la misma concentración de amoníaco, sin embargo cuando la carga excedió 1  $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$ , el sistema plantado continuó proporcionando una remoción efectiva (la eficiencia de remoción en este sistema fue mayor al 60 %), mientras la capacidad del sistema no plantado fue excedida. Esto demuestra la importancia de la absorción de la planta cuando las condiciones de carga se incrementan.

También se observó que con una razón de carga mayor a 3  $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$  hay evidencia de una producción neta de amoníaco en el sistema no plantado probablemente producto de la amonificación de nitrógeno orgánico. En los perfiles de concentración de amoníaco y nitrato para



la concentración inicial de 0.5 mg/L de amoníaco, es observado que debido a la amonificación hay un incremento gradual en la concentración de amoníaco en el sistema no plantado, la nitrificación produce un incremento gradual en la concentración de nitrato tanto en el sistema plantado como en el no plantado.

Por último, las condiciones indicadas para el desarrollo de la desnitrificación se encuentra entre 0.14 y 0.39 m de profundidad dependiendo de la concentración inicial de amoníaco, para la concentración inicial de 0.5 mg/L de amoníaco de la dilución de orina, la remoción efectiva se logró antes de 0.2 m. Las raíces modifican el balance amoníaco/nitrato y promueven la nitrificación por bacterias adheridas a la arena. En el sistema plantado la remoción de nitrato se lleva a cabo por la absorción de la planta y por desnitrificación.

Finalmente, Farahbakhshazad y Morrison (1997) concluyen de su investigación la importancia que tiene el tiempo de retención hidráulico y el contacto de las aguas residuales con la raíz en la remoción de nutrientes por absorción de la planta, y en el aumento de la actividad microbiana cercana a las raíces (rizomas) lo cual induce los procesos de nitrificación.

### **1.1.2 Separación y tratamiento de corrientes domiciliarias**

Tomando en consideración el elevado volumen de agua que se destina a la conducción y/o transporte de residuos domiciliarios, sería conveniente y benéfico, implementar sistemas para separar las corrientes domiciliarias (orina y heces humanas) para con ello minimizar el consumo de agua potable y los correspondientes problemas que ocasionan las descargas residuales. Otro beneficio adicional implicaría la posibilidad de recuperar nutrientes con valor agregado (N, P, K, materia orgánica) mismos que podrían ser reincorporados al ciclo productivo como fertilizantes. Una persona excreta alrededor de 500 L de orina en un año, del 85-88% de nitrógeno y del 67-81% de fósforo vertido a los sistemas de drenaje provienen de la orina humana (Drangert, 1998, Behrendt et al., 2001).

El actual sistema de manejo de los residuos domiciliarios, y el correspondiente de aguas residuales, restringe la posibilidad de recuperación y reciclado de nutrientes. La mezcla de desechos domiciliarios con alto contenido de nutrientes y materia orgánica (orina y heces humanas) con aguas residuales menos contaminadas (lavado, higiene y similares) complica la recuperación de nutrientes y el tratamiento de las mismas.



La separación y tratamiento de orina humana ha atraído considerablemente la atención en años recientes debido a la situación de escasez de agua que enfrenta la sociedad, además de que es un tema de debate en la literatura en donde se plantea como una solución al problema de las aguas residuales (Vinneras et al., 2002; Jönsson et al., 1997; Drangert, 1998, Behrendt et al., 2001).

La alternativa de recuperar nutrientes a partir de residuos sanitarios para su reuso, ha dado lugar al diseño de sanitarios con sistemas de separación de orina y heces. Estos nuevos sanitarios cuentan con dos salidas, una de ellas utiliza solamente de 0.2 a 0.8 L de agua para la dilución controlada de la orina y, la otra usa 2 L de agua para el arrastre de las heces. Los residuos se transportan por diferentes tuberías y se almacenan en depósitos separados, evitando así la excesiva dilución y la mezcla con otras aguas residuales domésticas (baño, lavado de trastos, lavandería, etc.). La orina colectada es utilizada en algunos casos sin más tratamiento en la agricultura.

Maurer et al., (2006) identifican distintas formas de manejo y tratamiento para la orina humana:

- 1) Higienización por almacenamiento.
- 2) Reducción de volumen por evaporación, congelación-descongelación, osmosis inversa.
- 3) Estabilización por acidificación, nitrificación parcial.
- 4) Recuperación de fósforo por formación de estruvita ( $MgNH_4PO_4$ );
- 5) Recuperación de nitrógeno por intercambio iónico, desorción de amoníaco, precipitación de isobutilaldehído-diurea (IBDU, por sus siglas en inglés).
- 6) Remoción de nutrientes (N y P) mediante el proceso de oxidación anaerobia de amonio (Anammox process, por sus siglas en inglés).
- 7) Remoción de micro-contaminantes por electrodiálisis, nanofiltración, ozonización y oxidación avanzada.

De todas estas opciones la recuperación de nitrógeno a partir de la orina humana y su posible reciclaje como fertilizante, es una de las opciones más interesantes del manejo separado de este residuo sanitario.

El intercambio iónico con intercambiadores de iones de origen natural como las zeolitas (clinoptilolita) han sido probados para la remoción de amonio a partir de orina, así como también zeolitas con óxido de magnesio (MgO) para la recuperación de fósforo en forma de estruvita (Lind et al., 2000). Altas eficiencias de remoción fueron obtenidas con dosis de MgO de 0.5 mg/L y de zeolita de 15 g/L; la concentración remanente del proceso de recuperación en fósforo y nitrógeno, son del orden de 10 mg/L y de 1000 mg/L, respectivamente.



Cuando la orina almacenada es sometida a un proceso de desorción de amoníaco al vacío (0.4 bar, 40°C) y la corriente de gas absorbida en agua a presión de 5 bares y 20°C, se obtiene un producto de recuperación que contiene 10% de amoníaco, este es inestable a presión normal (Behrendt et al., 2001). La recuperación de amoníaco puede alcanzar el 95%.

Independientemente del proceso utilizado para la recuperación de N y P a partir de la orina humana, es importante considerar que se producirá un agua residual que deberá ser tratada para su descarga segura al ambiente.

### 1.1.3 Características fisicoquímicas de la orina humana separada

El principal constituyente de la orina es agua (de 93-96 %), no obstante la cantidad de nutrientes que se excreta vía orina de N, P y K, es de 4.0, 0.4 y 0.9 kg/año, respectivamente (Dranger, 1998).

Kirchmann y Pettersson (1995) reportan que la orina humana almacenada tiene un valor de pH básico (8.9) e identifican ocho especies iónicas ( $>0.1$  meq/L), los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Otro constituyente importante es el nitrógeno, el cual está presente principalmente en forma de nitrógeno amoniacal ( $>90\%$ ), como bicarbonato de amonio. La urea y el urato experimentan un proceso de descomposición durante el almacenamiento.

En la tabla 1.1 se enlistan datos de concentración de constituyentes de la orina humana para diferentes sistemas de captación, publicada por Maurer et al., 2006 y reportada por diferentes autores en la literatura. En esta tabla la última columna corresponde a datos obtenidos en orina fresca no diluida (no hidrolizada).

Durante el almacenamiento de la orina bajo condiciones no estériles, la urea presente es hidrolizada a amoníaco y a carbonato de amonio debido a la actividad microbiana. Esto provoca un incremento en el pH, aproximadamente de 6 a alrededor de 9 lo cual desencadena la precipitación de calcio y magnesio en forma de carbonatos y fosfatos (Udert et al., 2003). A este se debe las bajas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en la orina almacenada.

Los niveles de concentración de nitrógeno en la orina pueden alcanzar los 9200 mg/L, la relación  $\text{NH}_3/\text{N}$ -total es variable y depende del grado de hidrólisis de la urea. Con respecto a fósforo y el potasio el contenido también es alto, en este caso se reportan valores de 2000 mg/L y 3284 mg/L, respectivamente. Lo anterior indica que la orina es una fuente potencial de nutrientes.



Tabla 1.1 Concentración de orina de diferentes sistemas de colección (Maurer et al., 2006)

Parámetro		Unidad							Concentración	
Fuente		Familia S[1]	Colegio S[1]	Lugar de trabajo CH[2]	Lugar de trabajo CH[3]	Familia S[4]	Lugar de trabajo CH[4]	Orina Fresca [6] [c]		
Dilución[a]	(-)	0.33	0.33	0.26	--	0.75	1	1		
pH	(-)	9.0	8.9	9.0	9.0	9.1	9.1	6.2		
N <sub>total</sub>	(mg/L)	1795	2610	1793	--	3631	9200	8830		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> +NH <sub>3</sub>	(mg/L)	1691	2499	1720	4347	3576	8100	463		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	(mg/L)	0.06	0.07	--	--	<0.1	0	--		
P <sub>total</sub>	(mg/L)	210	200	76	154	313	540	800-2000		
DQO	(mg/L)	--	--	1650	6000	--	10000	--		
K <sup>+</sup>	(mg/L)	875	1150	770	3284	1000	2200	2737		
S <sup>2-</sup>	(mg/L)	225	175	98	273[b]	331	505[b]	1315		
Na <sup>+</sup>	(mg/L)	982	938	837	1495	1210	2600	3450		
Cl <sup>-</sup>	(mg/L)	2500	2235	1400	2112	1768	3800	4970		
Ca <sup>2+</sup>	(mg/L)	15.75	13.34	28	--	18	0	233		
Mg <sup>2+</sup>	(mg/L)	1.63	1.50	1.0	--	11.1	0	119		
Mn <sup>2+</sup>	(mg/L)	0	0	--	--	0.037	--	0.019		
B <sup>3+</sup>	(mg/L)	0.435	0.440	--	--	--	--	0.97		

El dato dilución [a] por efecto de la descarga de agua en los sistemas de colección fue obtenida a partir de la información proporcionada en las publicaciones. Para fines de comparación, en la última columna [6] se incluyen datos de composición de orina fresca (no hidrolizada). [a]: se define como la relación Vorina/(Vorina + Vagua), [b]: sólo sulfato-S (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S), [c]: valor medido en orina fresca, no diluida, sin precipitación, [1]: Kirchmann and Petterson (1995), [2]: Udert et al. (2003), [3]: Ronteltap et al. (2003), [4]: Jonsson et al. (1997), [5]: Udert et al. (2005a), [6]: Ciba-Geigy (1997).

## 1.2 Humedales artificiales

Los humedales naturales son áreas inundadas o saturadas por agua cuya frecuencia y duración es suficiente para el desarrollo de plantas acuáticas, donde predomina vegetación adaptada para vivir bajo condiciones de saturación. Tomando en cuenta esta definición, los pantanos, ciénagas, y áreas afines, pueden ser considerados como humedales naturales (USEPA, 2000).

Hammer y Bastian (1989) definen a los humedales artificiales (HA) como sistemas diseñados por el hombre, que constan de un substrato o medio soporte-saturado, vegetación emergente y sub-



emergente, organismos vivos y agua, que simulan a un sistema de humedal natural y que son utilizados con un fin determinado.

Estos sistemas buscan reproducir, en un ambiente controlado, aquellos procesos que ocurren en los humedales naturales, para eliminar contaminantes del agua con la ayuda de plantas acuáticas sembradas sobre sustratos granulares como grava, arena o suelo (USEPA, 2000).

Se han usado para tratar diferentes tipos de aguas residuales a distintos niveles, por ejemplo se utilizan para dar tratamiento secundario a aguas residuales municipales y para el pulimento (elimina trazas de metales) de efluentes secundarios para descargarlos al ambiente. Los Humedales artificiales son sistemas naturales que combinan procesos físicos, químicos y biológicos para remover contaminantes del agua. Son eficientes para remover materia orgánica (DQO, DBO) y sólidos en suspensión de las aguas residuales. La transformación y la mineralización de los contaminantes orgánicos son realizadas principalmente por microorganismos asociados al sustrato y a las raíces de la planta. Sin embargo algunos reportes de la literatura indican que las eficiencias de remoción para nitrógeno y fósforo son a menudo bajas (USEPA, 2000; Vymazal, 2007).

### **1.2.1 Historia**

De acuerdo con lo publicado por la USEPA (2000), Kadlec y Knight (1996), proporcionan una buena reseña histórica sobre la utilización de humedales naturales y artificiales en el tratamiento y disposición de las aguas residuales. Estos autores señalan que los humedales naturales probablemente han sido usados con este fin desde el tiempo en que las aguas residuales empezaron a ser colectadas, los registros que se tiene sobre el vertido de aguas residuales se remontan a 1912. En la construcción de los primeros humedales artificiales, es probable que los primeros esfuerzos estuvieran basados en la observación de la capacidad de tratamiento de los humedales naturales. Otra posible visión fue la posibilidad de utilizar el agua residual como una fuente de nutrientes para la restauración o creación de humedales.

Como tecnología de tratamiento de aguas residuales fue introducida en 1952 por la Dra. Kathe Seidel en Alemania y el primer sistema completo de HA a escala fue construido en los Países Bajos a finales de los años 1960 (Vymazal et al., 1998). En las décadas siguientes el desarrollo de esta tecnología creció rápidamente, un importante número de HA estaban siendo aplicados para



tratar aguas residuales en Europa y Norteamérica. Hasta el año 2004 se tenían registrados aproximadamente 5000 HA en operación en Europa y 1000 en EU (USEPA, 2004).

Los primeros estudios de investigación sobre el uso de humedales artificiales para tratar aguas residuales iniciaron en Europa en la década de 1950 y en los Estados Unidos a finales de 1960. Los esfuerzos de investigación en los Estados Unidos aumentaron durante los años 1970 y 1980, con una importante participación federal de las autoridades del Valle de Tennessee y del departamento de agricultura a finales de los años 80's y principios de los 90's.

La tabla 1.2 resume la cantidad de humedales artificiales y naturales y la fecha de inicio de operación en los Estados Unidos. De acuerdo con la Base de Datos de Tratamiento y Calidad de Agua de Humedales de Norte América (NADB, por sus siglas en inglés), humedales de flujo de agua superficial (FWS, por sus siglas en inglés) y humedales de flujo de agua sub-superficial o de cama con vegetación sumergida (VSBs, por sus siglas en inglés) en Norteamérica empezaron a ser utilizados a principios y finales de los años 1980's, respectivamente. Con respecto a los sistemas naturales, a partir de 1990 no se registraron nuevos casos donde se hayan aplicado al tratamiento de agua, y al menos una tercera parte de los que se tenían registrados en la NADB se encontraban fuera de operación.

Tabla 1.2 Número de humedales artificiales en el NADB (USEPA, 2000)

Tipo	antes de 1950	1950's y 60's	1970's	'80-'84	'85-'89	'90-'96
Artificial, FWS	1	0	3	8	33	85
Artificial, VSB	0	0	0	0	21	31
Artificial, híbrido	0	0	0	1	4	6
Natural, FWS	4	3	9	5	8	1

### 1.2.2 Clasificación

Los humedales artificiales se clasifican según el régimen de flujo de agua dentro del sistema en humedales artificiales de flujo superficial libre (HAFSL) y humedales artificiales de flujo sub-superficial (HAFSS). Los HAFSL están formados por estanques o canales con el fondo



impermeabilizado de material natural o artificial (para evitar la infiltración del agua y contaminantes al sub-suelo), suelo u otro medio como material de soporte, vegetación emergente y agua con un nivel de profundidad relativamente bajo que fluctúa entre 0.1 y 0.6 m. El nivel de agua está por encima de la superficie del suelo, la vegetación está enraizada y emerge encima de la superficie del agua.

La profundidad de agua y el flujo lento de operación son características típicas en estos sistemas, así como la presencia de los tallos de las plantas acuáticas, son factores que regulan el flujo de agua dentro del sistema.

Este tipo de humedales se alimentan con agua residual pre-tratada y la remoción de contaminantes inicia en el momento que entra en contacto con el tallo y la raíz de la vegetación emergente y el material de soporte. En la Figura 1.1 se presenta un esquema general que describe a un HAFSL, son los que mayor semejanza tienen con los humedales naturales, en apariencia y función, con zonas de aguas abiertas, vegetación emergente, diferentes profundidades, y se diseñan para maximizar el valor de un hábitat al tiempo que mejora la calidad del agua.

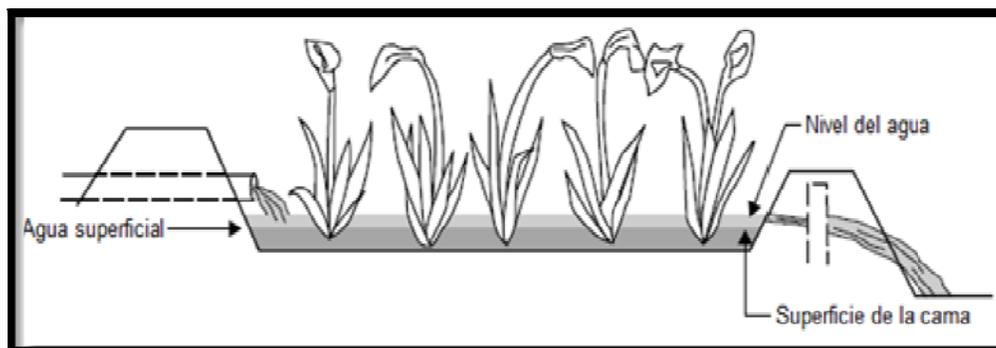


Figura 1.1 Humedal artificial de flujo superficial libre

Los humedales artificiales de flujo sub-superficial (HAFSS) tienen similitud con los filtros horizontales de las plantas de tratamiento convencionales. Estos sistemas también se conocen como "sistemas de zona-raíz", "filtros de carrizo-roca" o "sistemas de cama con vegetación sumergida". El medio soporte utilizado, por lo general suelo, arena o grava, tiende a afectar el desempeño hidráulico del sistema (USEPA, 1993a).

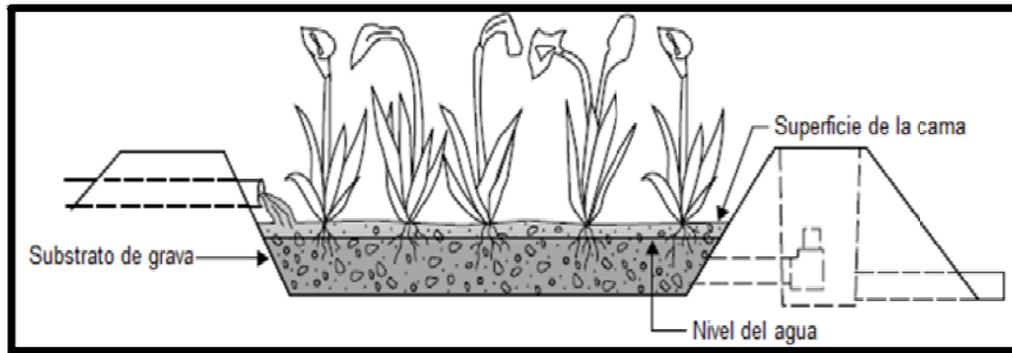


Figura 1.2 Humedal artificial de flujo sub-superficial

A diferencia de los de flujo superficial, el nivel de agua en estos sistemas está por debajo de la superficie del sustrato (Figura 1.2), evitando así el desarrollo de olores y otros problemas molestos. Microorganismos facultativos se adhieren al medio soporte y a las raíces de las plantas permitiendo así el contacto con el agua residual que fluye a través del lecho (Kadlec *et al.*, 1993). Estos sistemas de flujo sub-superficial se diseñan con el propósito de obtener niveles de tratamiento secundarios.

La eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos es alta debido al comportamiento hidráulico del sistema, baja velocidad de flujo y grandes tiempos de retención hidráulica. Una alta eliminación de nitrógeno, fósforo y metales pesados se produce debido a la amplia variedad de procesos producidos en el suelo, tales como la filtración y la adsorción (USEPA, 2000; Ran *et al.*, 2004).

En los HAFSS el agua residual fluye a través de lechos inundados conteniendo especies de plantas emergentes y en ambientes predominantemente anaerobios. La vegetación desempeña un papel esencial, especialmente en la remoción de nitrógeno. Consiste en un canal sellado con un material impermeable, sobre éste se construye un sustrato poroso de roca o grava. El nivel de agua está diseñado para mantenerse por debajo de la superficie del sustrato. En la mayoría de los sistemas en Estados Unidos, la trayectoria del flujo es horizontal, aunque algunos sistemas europeos usan trayectorias de flujo vertical.

Debido a las limitaciones hidráulicas que suelen presentarse por el sustrato o medio soporte, los HAFSS suelen emplearse para tratar aguas residuales con concentración de sólidos relativamente bajos y condiciones de flujo relativamente uniforme y se usan con frecuencia para reducir la DBO.



Algunas de las ventajas a destacar de estos sistemas son las siguientes:

1. Mayor tolerancia a las bajas temperaturas.
2. Minimizan el desarrollo de plaga de insectos y problemas de olores.
3. Mayor asimilación por unidad de área que en sistemas de HAFSL.
4. Debido a que el medio poroso proporciona una mayor superficie de contacto, las respuestas de tratamiento son más rápidas y por tanto su área superficial es más pequeña que un sistema HAFSL diseñado para el mismo volumen de agua residual a tratar.

La operación del sistema no requiere de mano de obra especializada. Es posible lograr niveles de tratamiento significativos con un bajo consumo de energía y mínimo mantenimiento. No obstante que los costos de operación y mantenimiento son relativamente económicos y rentables para el usuario, estos son generalmente superiores al de los HAFSL, al igual que los costos de construcción. El flujo de agua es más difícil de regular debido al taponamiento y saturación del substrato o medio soporte.

### **1.2.3 Principales componentes de un humedal artificial**

En términos generales los humedales artificiales se componen por estanques o canales someros (generalmente menores a 1 m de profundidad), sembrado con plantas acuáticas y cuyo principio de tratamiento se basa en procesos naturales microbianos, biológicos, físicos y químicos. Suelen impermeabilizarse con arcilla o revestimiento sintético, están provistos de estructuras y obras de ingeniería para controlar la dirección del flujo, tiempo de retención del líquido y nivel del agua. Dependiendo del tipo de sistema, pueden o no contener un medio poroso inerte tales como rocas, grava o arena (USEPA, 2000).

En la mayoría de los humedales naturales o artificiales se distinguen cinco componentes principales:

- Plantas adaptadas a substratos anaeróbicos de agua saturada
- Medio soporte-substrato con varias velocidades de conductividad hidráulica
- Columna de agua que fluye sobre la superficie de medio soporte-substrato ó por debajo de este
- Población microbiana aeróbica y/o anaeróbica
- Invertebrados y vertebrados



### 1.2.3.1 Plantas acuáticas

Las plantas acuáticas actúan como filtros biológicos que ayudan a remover los contaminantes del agua (Lord, 1982). Tienen un papel importante en los procesos de tratamiento que se llevan a cabo en los humedales artificiales, mediante una compleja relación simbiótica entre plantas, microorganismos y sustrato (Surrency, 1993). La vegetación proporciona área superficial para la formación de películas bacterianas (biopelículas), facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno al agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.

Al igual que todas las plantas, las de los humedales requieren de macro y micronutrientes en proporciones adecuadas para su crecimiento. Nitrógeno y fósforo son los nutrientes esenciales en su ciclo de vida, aunque no necesariamente es el principal mecanismo de remoción, ya que después de ser absorbidos durante la etapa de crecimiento, nuevamente son liberados al terminar su ciclo de vida (Kadlec y Knight 1996 reportado en USEPA 2000).

Las plantas acuáticas se pueden clasificar de acuerdo a su forma de crecimiento en los siguientes grupos:

#### a) Enraizadas al medio soporte-sustrato

Estas a su vez pueden ser emergentes o sumergidas, flotantes o de tallo postrado. Las emergentes mantienen su estructura reproductora y la parte vegetativa por encima del agua, las sumergidas, la parte vegetativa se encuentra inmersa en el agua y la parte reproductora puede encontrarse sumergida, por encima de la superficie del agua o emergiendo. Las de hojas flotantes, como su nombre lo indica, sus hojas flotan sobre la superficie de agua al igual que sus flores. En las de tallos postrados, su estructura vegetal y reproductora emerge sobre la superficie de agua.

#### b) Libres no enraizadas al fondo

Puede ser de dos tipos, flotadoras y sumergidas, en las primeras sus estructuras vegetativas y reproductoras flotan libremente sobre la superficie del agua y sólo las raíces se mantienen sumergidas. Las sumergidas, generalmente tienen la estructura vegetativa sumergida y la parte reproductora emerge ligeramente de la superficie del agua (Lot y Novelo, 2004).



Las plantas acuáticas flotantes se distinguen por la capacidad que tienen para derivar el dióxido de carbono y las necesidades de oxígeno de la atmósfera directamente; obtienen los nutrientes minerales a partir del agua. Las sumergidas, absorben oxígeno, dióxido de carbono, y minerales de la columna de agua; se inhiben fácilmente por la alta turbiedad en el agua porque sus partes fotosintéticas están bajo la superficie de agua. Las plantas emergentes son un componente estructural importante en los humedales, que ayuda a mejorar los procesos de floculación, sedimentación, y filtración de sólidos en suspensión (Llagas y Gómez, 2006). En la tabla 1.3 se da una lista de plantas que han sido probadas en los humedales artificiales.

El carrizo (*Phragmites*) es probable que sea la planta acuática más ampliamente utilizada en los humedales artificiales, no obstante en Estados Unidos no es una especie que se use con frecuencia. Tiene excelentes características de crecimiento, pero se considera una especie invasora en los humedales naturales. (USEPA, 2000).

Tabla 1.3 Especies de plantas probadas para uso en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (Guntenspergen et al., 1989)	
<p><b>EMERGENTES</b></p> <p><i>Scirpus robustus</i>  <i>Scirpus lacustris</i>  <i>Schoenoplectus lacustris</i>  <i>Phragmites australis</i>  <i>Phalaris arundinacea</i>  <i>Typha domingensis</i>  <i>Typha latifolia</i>  <i>Canna fláccida</i>  <i>Iris pseudacorus</i>  <i>Scirpus validus</i>  <i>Scirpus pungens</i>  <i>Glyceria maxima</i>  <i>Eleocharis dulcis</i>  <i>Eleocharis sphacelata</i>  <i>Typha orientalis</i>  <i>Zantedeschia aethiopica</i>  <i>Colocasia esculenta</i></p>	<p><b>SUBEMERGENTES</b></p> <p><i>Egeria densa</i>  <i>Ceratophyllum demersum</i>  <i>Elodea nuttallii</i>  <i>Myriophyllum aquaticum</i></p> <p><b>FLOTANTES</b></p> <p><i>Lagrosiphon major</i>  <i>Salvinia rotundifolia</i>  <i>Spirodela polyrhiza</i>  <i>Pistia stratiotes</i>  <i>Lemna minor</i>  <i>Eichhornia crassipes</i>  <i>Wolffia arrhiza</i>  <i>Azolla caroliniana</i>  <i>Hydrocotyle umbellata</i>  <i>Lemna gibba</i>  <i>Lemna spp.</i></p>



*Phragmites australis* y *Typha angustifolia* son dos especies de plantas acuáticas que se caracterizan por su capacidad para asimilar el nitrógeno del agua a través de la absorción directa en sus tejidos y por favorecer la absorción y transformación microbiana de dicho nutriente mediante los procesos de nitrificación (Otto et al., 1999).

En la tabla 1.4 se presentan algunas características de plantas emergentes utilizadas con frecuencia para tratar aguas residuales.

Tabla 1.4 Plantas acuáticas emergentes utilizadas en tratamiento de aguas residuales (Reed et al., 1995, reportado en Llagas y Gómez 2006).

Nombre común	Nombre científico	Distribución	Temperatura deseable (°C)	Máxima salinidad (mg/L)	Rango de pH efectivo
Totora	<i>Typha spp.</i>	En todo el mundo	10-30	30	4-10
Caña común	<i>Phragmites communis</i>		12-23	45	2-8
Junco	<i>Juncus spp.</i>		16-26	20	5-7.5
Junco	<i>Scirpus</i>		18-27	20	4-9
carrizo	<i>Carex spp.</i>		14-32	---	5-7.5

### 1.2.3.2 Microorganismos, invertebrados y vertebrados

Los microorganismos comprenden bacterias, levaduras, hongos, protozoos, y algunas especies de algas. La actividad microbiana altera las condiciones de oxidación-reducción que prevalecen en el sustrato y juegan un papel particularmente importante en las transformaciones que experimenta el nitrógeno y en la disponibilidad del mismo para el metabolismo de las plantas.

La asimilación de fósforo por plantas también depende en parte de la actividad de microorganismos ya que estos convierten el fósforo insoluble a formas solubles las cuales pueden ser absorbidas por las plantas. Los microorganismos metabolizan compuestos orgánicos, y liberan dióxido de carbono en las zonas aerobias de un humedal artificial y otros gases como el sulfuro de hidrógeno, metano y dióxido de carbono, en zonas anaerobias. La actividad microbiana se encuentra asociada a la raíz de las plantas, al sustrato o medio soporte y en sedimentos, entre otras superficies sólidas.

Otro tipo de organismos presentes en los humedales son los invertebrados tales como protozoarios, insectos, arácnidos, moluscos y crustáceos; y vertebrados como peces, anfibios,



reptiles, aves y mamíferos (USEPA, 1993b). Los mosquitos se pueden considerar como parte integrante de la cadena alimenticia ecológica, pero en general se consideran una especie de plaga.

### 1.2.3.3 Substrato o medio soporte

Los sustratos o medio soporte comúnmente empleados en los humedales artificiales incluyen: diferentes tipos de suelos, arena, grava, roca y materiales orgánicos. Sirven de soporte para las plantas y microorganismos y como un medio de retención de contaminantes. La permeabilidad del sustrato, el flujo del agua, porosidad del medio favorece la transferencia de oxígeno dentro del humedal debido a que aumenta el área de transferencia. Muchas transformaciones químicas y biológicas, especialmente microbianas, están asociadas al sustrato o soporte.

Las características físicas y químicas del suelo y otros sustratos se alteran cuando se inundan. En un sustrato saturado el agua reemplaza los gases atmosféricos en los espacios porosos y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera, puede darse lugar a la formación de un sustrato anóxico (sin oxígeno), esta reducción del medio ambiente es importante para la remoción de contaminantes tales como el nitrógeno y metales (Lara, 1999).

El sustrato o medio de soporte se reemplaza cada 10-15 años ya que al finalizar este período queda totalmente obstruido por lodos y residuos (Celis et al., 2005). En la tabla 1.5 se muestran características de algunos materiales.

En el caso de los suelos las propiedades que deben considerarse es la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el pH, la conductividad eléctrica (CE), la textura y el contenido de materia orgánica. El pH afecta la disponibilidad y la retención de metales pesados y nutrientes, este debe estar entre 6.5 y 8.5. La CE afecta la capacidad de las plantas y los microorganismos para metabolizar los residuos materiales que fluyen en el humedal. Suelos con CE menores a 4 mohm/cm son los más adecuados como medio de crecimiento. El CIC mide la capacidad del suelo para mantener iones cargados positivamente y varía ampliamente entre los diferentes tipos de suelos, se recomiendan suelos con CIC superior a 15 meq/100 g como medio para la plantación.

El potencial redox es un factor que influye en la eliminación de nitrógeno y fósforo. El suelo debe proporcionar suficiente materia orgánica ya que esta funciona como combustible para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana, sobre todo en la etapa inicial del humedal.



Tipo de material	Tamaño efectivo D <sub>10</sub> (mm)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica, K <sub>H</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)
arena gruesa	2	28-32	100-1000
arena gravosa	8	30-35	500-5000
grava fina	16	35-38	1000-10000
grava media	32	36-40	10000-50000
roca gruesa	128	38-45	50000-250000

Entre los tipos de suelos tenemos, suelos arenosos (de textura gruesa, textura media o suelos limosos) o con grava, suelos con sedimentos, suelos orgánicos, suelos infértiles con residuos orgánicos (suelos densos como las arcillas). Los de textura media o suelos limosos tienen alta capacidad de retención de contaminantes y ofrecen poca resistencia al crecimiento de las plantas. Los suelos densos como las arcillas, deben evitarse ya que pueden inhibir la penetración de la raíz, carecen de nutrientes, y tienen baja conductividad hidráulica, aunque contribuyen en la retención de fósforo.

La arena es un soporte económico y proporciona la textura ideal para la plantación a mano. En muchos HAFSS donde se tratan aguas residuales domésticas en Estados Unidos han utilizado grava de tamaño medio hasta roca gruesa. Como las arenas y gravas se secan rápidamente, puede ser necesario que mientras la vegetación se establezca, necesite regarse para mantener los niveles de agua establecidos.

#### 1.2.4 Mecanismos de remoción de nitrógeno

La remoción de contaminantes de las aguas residuales en los humedales ocurre mediante mecanismos de tipo físico, químico y biológico. Todos ellos pueden ocurrir simultáneamente o en forma secuencial, dependiendo del flujo de agua dentro del sistema (superficial, vertical sub-superficial, y horizontal sub-superficial), las especies de plantas acuáticas, el tipo de substrato o soporte (suelo o grava) y en general del diseño del sistema.

La separación sólido-líquido puede llevarse a cabo por gravedad, filtración, absorción, adsorción, intercambio iónico, extracción y lixiviación. Por otra parte, las transformaciones de los



contaminantes pueden ser por procesos químicos, incluidos las reacciones de oxido-reducción, floculación, reacciones ácido-base, precipitación, o una serie de reacciones bioquímicas derivadas de condiciones aerobias o anaerobias. La tabla 1.6 resume los principales mecanismos y procesos mediante los cuales es posible llevar a cabo la depuración de un agua residual en un humedal artificial.

Por el interés particular de esta tesis se revisará aquellos mecanismos relacionados con la remoción de nitrógeno.

Tabla 1.6 Principales procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración de aguas residuales en los humedales (Mitsch y Gosselink, 2000 reportado en Lahora, 2002).

Contaminante	Proceso de eliminación
Materia orgánica	Sedimentación Asimilación Mineralización
Sólidos en suspensión	Floculación Sedimentación Filtración Degradación
Nitrógeno	Amonificación Volatilización de amoníaco Nitrificación Desnitrificación Asimilación vegetal
Fósforo	Adsorción Sedimentación Precipitación química Asimilación vegetal
Patógenos	Sedimentación y muerte gradual Radiación UV Antibióticos naturales Predación
Compuestos inorgánicos	Asimilación Inmovilización
Metales pesados	Fijación al sedimento Adsorción por las plantas

El nitrógeno tiene un complicado ciclo biogeoquímico con diversas transformaciones bióticas y abióticas. Los compuestos incluyen una variedad de formas orgánicas e inorgánicas del nitrógeno que son esenciales para su vida biológica. Las formas inorgánicas más importantes de nitrógeno



en los humedales son el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$ ), los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (Vymazal, 2007).

Analíticamente, el amoníaco y nitrógeno orgánico se pueden cuantificar juntos, denominado "nitrógeno total Kjeldahl" (NTK). El nitrógeno orgánico en las aguas residuales incluye proteínas, péptidos, ácidos nucleicos y urea, puede encontrarse en forma soluble y particulada. Las otras especies de nitrógeno son solubles en agua.

El nitrógeno amoniacal se puede encontrar en forma no-ionizada como  $\text{NH}_3$  o bien en la forma ionizada,  $\text{NH}_4^+$  dependiendo de la temperatura y el pH del agua. La forma ionizada es la que predomina en los humedales. A 25 °C y un pH de 7.0 el porcentaje de amoníaco no-ionizado es aproximadamente de 0.6% (USEPA, 2000).

La descarga de nitrógeno a fuentes de aguas superficiales y subterráneas receptoras es motivo de preocupación por una serie de razones. El nitrógeno amoniacal puede agotar o reducir el oxígeno disuelto en las aguas naturales por medio de las reacciones de nitrificación microbiana.

La acumulación excesiva de nitrógeno en las aguas superficiales da lugar a desequilibrios ecológicos que pueden causar el crecimiento y sobrepoblación de plantas y otros organismos, lo que lleva a la degradación de la calidad del agua (eutroficación). Una alta concentración de las especies de amoníaco no ionizado, son tóxicas para los peces y otras formas de vidas acuática. Los nitratos y los nitritos constituyen un problema de salud pública, sobre todo relacionado con la carcinogénesis y metamoglobinemia (USEPA, 2000).

Los mecanismos de remoción principales son desnitrificación, amonificación del nitrógeno orgánico, y absorción del amonio por plantas y microorganismos heterotróficos. La vegetación proporciona algunas zonas aerobias alrededor de los rizomas de las plantas, en los humedales artificiales la nitrificación puede ser favorecida alternando el drenado y la inundación del humedal (Novotny, 2003).

### **a) Amonificación**

La mitad del nitrógeno presente en aguas residuales que llegan a las plantas de tratamiento se encuentra principalmente en la forma de nitrógeno orgánico, y otra parte se transforma a nitrógeno amoniacal durante su paso por las redes de alcantarillado (USEPA, 2000).



A la transformación biológica de nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal, se le conoce como amonificación, hidrólisis o mineralización (2.1). El proceso puede llevarse a cabo bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas, aunque en la ausencia de oxígeno es más lento, la velocidad de reacción depende principalmente del pH y de la temperatura. Se ha reportado que en aguas residuales municipales la hidrólisis ocurre en un periodo de 19 hrs a temperaturas entre 11 °C y 14 °C (USEPA, 2000).



Una vez que el nitrógeno orgánico es transformado a nitrógeno amoniacal, este puede ser absorbido y asimilado por las plantas acuáticas a través de las raíces, o bien es retenido en el sedimento por intercambio iónico, puede solubilizarse e incorporarse a la columna de agua, volatilizarse como gas amoníaco, o también puede ser transformado nuevamente en materia orgánica por microorganismos anaerobios.

### **b) Nitrificación**

En presencia de oxígeno, los microorganismos que se encuentran suspendidos en el agua o formando parte de las biopelículas, pueden convertir el amonio a nitrito y a nitrato en dos etapas de oxidación (2.2), las cuales también son dependientes de la temperatura y del pH del agua. A diferencia del nitrógeno amoniacal, los nitratos no son retenidos en suelos y permanecen en forma soluble en la columna de agua, o bien pueden ser absorbidos por las plantas y por los microorganismos.



### **c) Desnitrificación**

El nitrógeno en forma de nitrato puede ser reducido a N<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O gas (2.3) mediante la acción de microorganismos en condiciones anaerobias en una reacción de oxido reducción en donde nitrato es el aceptor de electrones y el carbono orgánico el donante de electrones, para que dicha reacción ocurra se requiere de la ausencia de oxígeno y de una fuente de carbono orgánico. La desnitrificación sucede principalmente en los sedimentos del humedal y en zonas donde el nivel de oxígeno es bajo. La relación carbono: nitrato para que pueda llevarse a cabo la desnitrificación es 1:1 (C: NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) USEPA, 2000. La descomposición de la estructura de planta y su raíz son fuentes potenciales de carbono orgánico biodegradable para este propósito. El proceso es dependiente de



la temperatura y pH. Cuando el sistema es pobre en nitrógeno, la desnitrificación en sedimentos facilita la fijación de  $N_2$  por bacterias y la absorción en la planta en la zona de la raíz; el resto se mantiene en equilibrio con  $N_2$  de la columna de agua. También se establece un intercambio de  $N_2$  con el sistema aire-agua.



### e) Fijación de nitrógeno

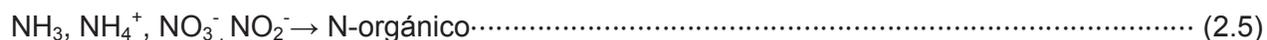
El  $N_2$  puede convertirse en nitrógeno orgánico (2.4) por medio de organismos que contengan la enzima nitrogenasa. La reacción la pueden llevar a cabo bacterias y algas verde-azules en condiciones aerobias o anaerobias. Para los humedales naturales es una fuente importante de nitrógeno, sin embargo, no lo es en los sistemas de tratamiento de aguas residuales en donde el nitrógeno es abundante.



### f) Absorción por la planta

Las plantas asimilan nitrógeno como una parte importante de su metabolismo, el nitrógeno inorgánico es reducido a compuestos de nitrógeno orgánico (2.5) y es utilizado por la estructura de la planta. Durante la fase de crecimiento, hay una tasa importante de absorción de nitrógeno por la vegetación emergente, la sumergida y en los sedimentos. De acuerdo con estimaciones, la absorción de nitrógeno anual para especies de plantas emergentes varía de 0.5 a 3.3 gN/m<sup>2</sup>/año (USEPA, 2000); los *Carrizos* y los *Juncos* se ubican en el extremo inferior de este rango de absorción, las *Typhas* se encuentran en el extremo superior. Durante el crecimiento de la planta, una cantidad significativa del nitrógeno total se encuentra en los tallos y las hojas de la planta.

Durante la etapa de envejecimiento de la planta el nitrógeno es transportado de nuevo a la raíces y rizomas para su almacenamiento, una porción se queda en la columna de agua debido a la caída de las hojas en otoño y posterior lixiviación. El intercambio total de nitrógeno ocurre en el otoño y principios de la primavera, el reciclamiento de nitrógeno dentro del humedal depende en gran medida de la carga que se tenga de nitrógeno en el sistema.





### 1.3 Plantas de tratamiento de aguas residuales en México basadas en humedales artificiales

En México, un número importante de plantas de tratamiento están basadas en el proceso de humedales artificiales o bien están formando parte de los trenes de tratamiento de aguas residuales municipales (Figura 1.3). Hasta el año 2007 la CONAGUA reportaba un total de 130 instalaciones de tratamiento que cuenta con sistema de humedales artificiales, 60 de ellas como sistema único de tratamiento con una capacidad instalada total de 578.7 L/s y un caudal tratado de 364.9 L/s.

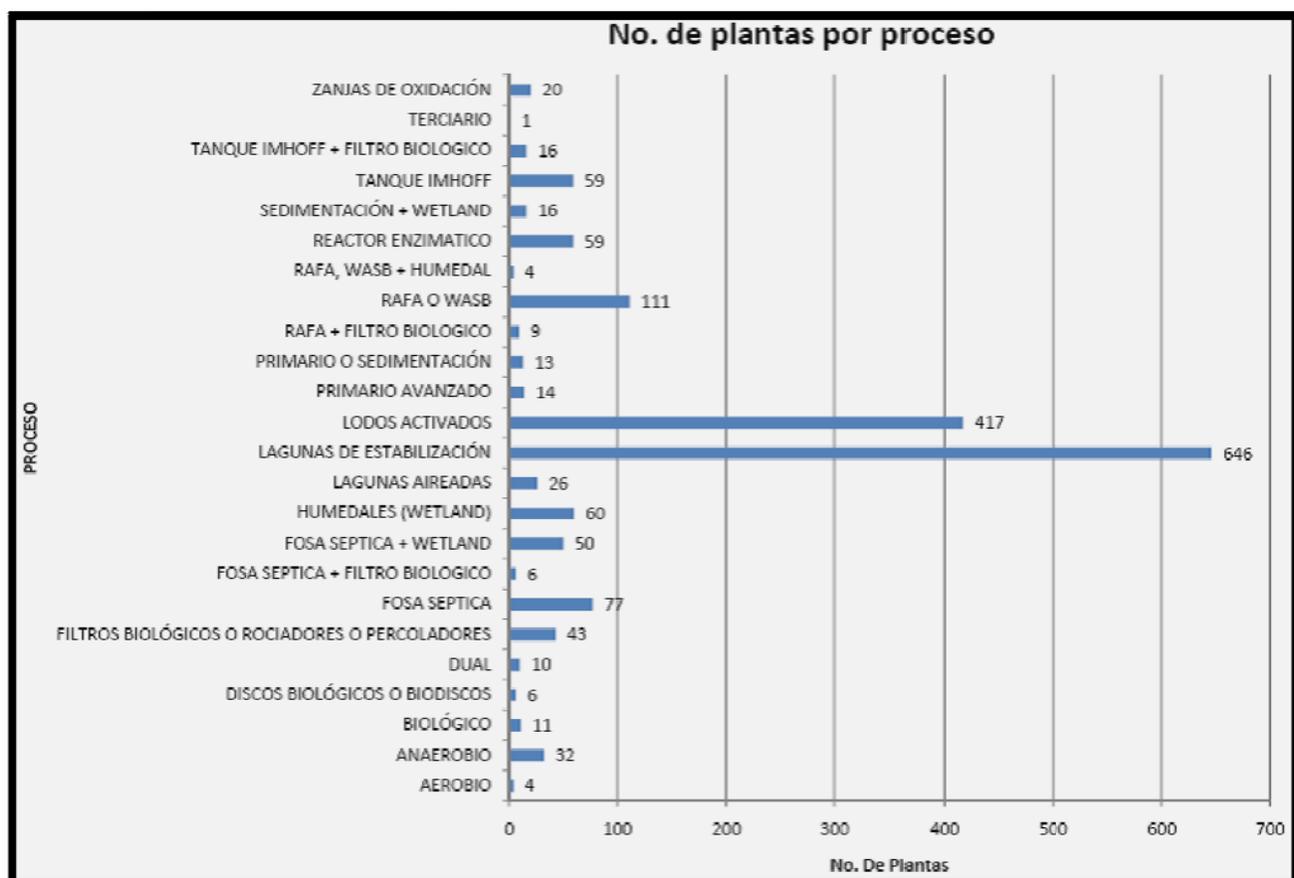


Figura 1.3. Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales en México por tipo de proceso (CONAGUA, 2007)

De acuerdo a la Tabla A.1 (ver Anexo A), la mayor parte de las plantas de tratamiento basadas en sistemas de humedales se encuentran ubicadas en el estado de Sinaloa con 49 plantas de



tratamiento seguida por Oaxaca con 38. La capacidad instalada se encuentra entre 0.35 L/s y 125 L/s y el caudal de agua tratado entre 0.1 L/s y 75 L/s. El agua residual tratada por estos sistemas es vertida en cuerpos de agua naturales o bien es reusada en el riego agrícola y en algunos casos en la infiltración al subsuelo.

Con respecto a las características constructivas de los HA distribuidos en la república, se conoce muy poco debido a que la información disponible es limitada. De acuerdo con la CONAGUA (2007), la mayoría de los HA se encuentran operando de manera regular, algunas plantas de tratamiento presentan problemas de operación por lo que se encuentran en rehabilitación y algunas otras en ampliación. En general operan alrededor de un 66% de su capacidad instalada.

Un par de casos son los humedales experimentales de Cucuchucho (Tzintzuntzan, Mich.) y Santa Fe de la Laguna (Municipio de Quiroga, Mich.) ambos construidos y operados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

#### *Humedal artificial experimental Cucuchucho (IMTA).*

Este humedal fue construido en el Municipio de Tzintzuntzan, Mich., en el 2005 para dar tratamiento al agua residual de la población de dicho municipio. El proyecto inicial contemplaba que el agua tratada sería reutilizada para la producción de peces (especies locales como pez blanco y acúmara) y para riego de cultivos (hortalizas básicamente). Por otra parte, el agua tratada permitirá proteger la salud del ganado y la calidad de los productos obtenidos del mismo; además se obtendrán ingresos por la comercialización de flores de ornato (alcatraz) que se sembrarán alrededor de los humedales, lo que mejorará su aspecto estético, y por la comercialización de peces, de hortaliza y de tule, esta última como materia prima para la comercialización de artesanías; actualmente ya se encuentra en operación (Figura 1.4).



Figura 1.4 Humedal Cucuchucho en operación



### *Humedal artificial Santa Fe (IMTA).*

A mediados del 2007 se instaló un humedal artificial de tipo sub-superficial para el tratamiento de las aguas residuales de la comunidad ribereña de Santa Fe de la Laguna, municipio de Quiroga, como parte de un plan piloto para incentivar la aplicación de tecnologías alternativas a las plantas de tratamiento mecanizadas, con lo cual se espera incrementar el volumen de las aguas residuales tratadas que se descargan al lago de Pátzcuaro, para tratar de controlar el deterioro de la calidad del agua de este cuerpo que actualmente llega a niveles eutróficos. El tren del tratamiento consiste en diversos sistemas eslabonados, entre los componentes se tiene una unidad de pretratamiento, un humedal principal, una laguna de maduración y un humedal de pulimento.



## Problemática

El constante aumento en la demanda de agua, debido al crecimiento demográfico, aunado a los grandes volúmenes de aguas residuales que la actividad humana genera, hace que el reúso de estas últimas sea una etapa inevitable en un esquema de manejo sustentable de los recursos hídricos.

De acuerdo con lo publicado en el último Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (CONAGUA, 2008), en el 2007 se extrajeron del orden de 79 km<sup>3</sup> de agua de los ríos, lagos y acuíferos para fines consuntivos, volumen que representa 17% del agua disponible. Del volumen total de agua que se extrae, la mayor parte, 77%, se destina a actividades de tipo agropecuario, en segundo lugar, al abastecimiento público (14%) y el porcentaje restante al sector industrial (9%).

A lo anterior, hay que agregar el problema que representa la generación de aguas residuales. Para el mismo año de 2007, dicha dependencia de gobierno, reporta que el volumen de descargas residuales provenientes de centros urbanos ascendió a 7.99 km<sup>3</sup>, con un caudal de producción de 243 m<sup>3</sup>/s. De esta cantidad de agua residual generada, 85% (207 m<sup>3</sup>/s) fue recolectada mediante los sistemas de alcantarillado, de ésta solo 38% (79.3 m<sup>3</sup>/s) recibió algún tipo de tratamiento, previa disposición en el ambiente. El resto se descarga de manera directa o bien es vertida y diluida por cuerpos de agua superficiales ocasionando daños ambientales irreversibles, propagación de virus y bacterias patógenas para el ser humano.

Tomando en consideración que grandes volúmenes de agua de calidad potable se destinan diariamente a la conducción y/o transporte de residuos, es necesario implementar sanitarios que permitan la separación de las corrientes que se producen a nivel domiciliario, como las aguas grises, la orina y las heces humanas.

Al mezclarse orina y heces humanas con productos de limpieza y alimentos, dan como resultado una matriz compleja de contaminantes, nutrientes, materiales orgánicos, sales, patógenos, etc., la cual es diluida en el drenaje en una extensa red de tuberías de alcantarillado. Este proceso da origen a las aguas residuales cuyo destino final, en el mejor de los casos, son las plantas de tratamiento y el reúso posterior en riego de áreas verdes, riego agrícola, entre otros usos.

La separación de orina humana ha sido recientemente un tema de debate que ha cobrado gran interés en la literatura, en donde se ha propuesto por un lado como una medida que puede contribuir a la solución del problema de aguas residuales (Vinneras et al., 2002; Drangert, 1998).



Por otra parte, el alto contenido de nutrientes tales como N, K y P, hacen de la orina, un recurso renovable que puede ser reincorporado al ambiente, si se cuenta con las alternativas de manejo, procesamiento y aplicación seguras.

Independientemente del proceso que se utilice para la recuperación de nutrientes (N, K y P) a partir de la orina humana, se debe tomar en cuenta la posible producción de un agua residual de proceso que deberá ser tratada para su descarga segura al ambiente.

Los “*humedales artificiales*” (HA) son una de las tecnologías sustentables y compatibles con el medio ambiente con un alto potencial de aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

Es por ello que en esta tesis se aborda el tratamiento de la orina humana en un humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS). De manera particular se evalúa la remoción de nitrógeno amoniacal en una corriente separada de orina humana.



## Objetivos

Con base en la problemática planteada, el objetivo general y los objetivos específicos de la presente tesis son los siguientes.

### Objetivo general

Evaluar la capacidad de un humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) para remover nitrógeno de orina humana en un proceso continuo utilizando *Phragmites spp* como planta acuática.

### Objetivos específicos

1. Llevar a cabo la caracterización fisicoquímica de una corriente separada de orina humana mediante el análisis de los parámetros: pH, conductividad, sólidos en sus formas (SST, SS, SDT, ST, SVT, SFT), nitrógeno en sus formas (N-total,  $\text{NH}_3$ , N-orgánico,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
2. Estabilizar la operación en continuo de un modelo de humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) utilizando una disolución de urea como fuente de nitrógeno, monitoreando el pH, la remoción de nitrógeno, flujos de entrada y salida, midiendo los parámetros ambientales humedad relativa, temperatura del agua y del aire.
3. Realizar pruebas de tratabilidad de orina humana en el HAFSS bajo condiciones definidas de carga orgánica y de nitrógeno.
4. Evaluar la capacidad del HAFSS para reducir los niveles de nitrógeno presentes en orina humana.
5. Determinar la distribución de contaminantes en el perfil vertical y a lo largo de una sección experimental en el HAFSS.



## Hipótesis

Los HA son sistemas naturales ampliamente utilizados para remover materiales orgánicos y nutrientes de aguas residuales. Como hipótesis de trabajo se plantea que, en un humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) conteniendo *Phragmites spp* como planta acuática, se podrá llevar a cabo la remoción de nitrógeno presente en una corriente de orina humana separada.



# CAPITULO 2 METODOLOGÍA

## 2.1 Modelo experimental de humedal de flujo sub-superficial

Las pruebas de tratabilidad se realizaron en un humedal artificial de flujo sub-superficial del Instituto de Ingeniería (HAFSS-IIUNAM) ubicado en el área de modelos hidráulicos (Figura 2.1 y 2.2). Consiste en cuatro tanques contiguos de 5 m de largo por 1 m de ancho y 1 m de altura. Como material de soporte se utiliza grava volcánica (tipo andesita) de granulometría definida de ~2" en la parte del fondo y ~1" en la parte superior, respectivamente. Para proteger de la lluvia, el frío y el viento, y permitir el paso de la luz, el modelo cuenta con techo de láminas transparentes y cortinas de plástico translúcido. El volumen de agua efectivo varía entre 0.8 y 0.95 m<sup>3</sup> por tanque y pueden operar en forma individual o en serie, en modo intermitente o continuo.

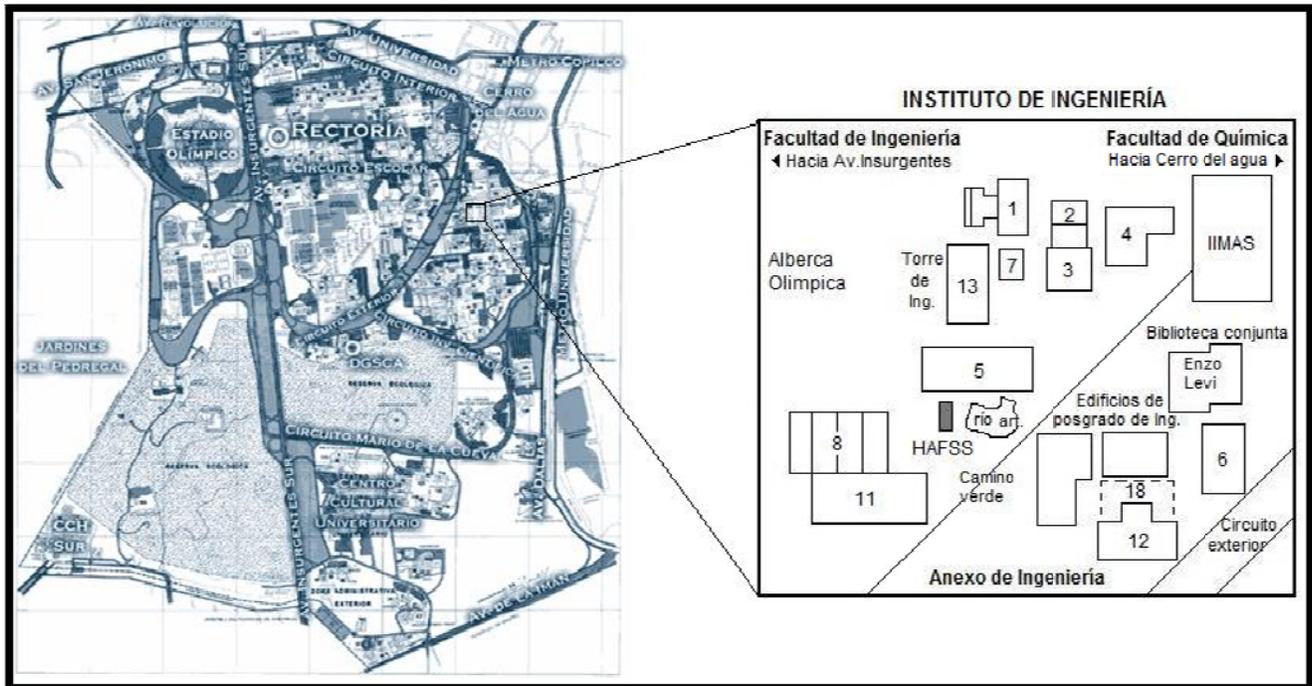


Figura 2.1 Plano general de ubicación del HAFSS en Ciudad Universitaria

Al momento del estudio se encontraban en experimentación y operando de manera independiente, los tanques 1 y 2 con la planta acuática *Typha domingensis*, y el tanque 3 con *Phragmites spp*, el tanque 4 se encontraba fuera de servicio, ya había sido utilizado para evaluar el fenómeno de evaporación sin planta acuática.



Figura 2.2 Vista del humedal artificial de flujo sub-superficial II-UNAM

### 2.1.1 Descripción del área del HAFSS con *Phragmites spp.* (carrizo)

Para el desarrollo de la tesis se utilizó el tercer tanque, el cual contenía *Phragmites spp.* como planta acuática (Figura 2.3) debido a que los tanques 1 y 2 se encontraban en proceso de readaptación mientras que el tanque 3 estaba en condiciones óptimas para la experimentación.



Figura 2.3 HAFSS con *Phragmites spp.* y grava volcánica como medio soporte

Las plantas fueron traídas del humedal de Cuitzeo, Michoacán y se plantaron en el tanque tres de HAFSS, entre agosto y septiembre de 2006, colocando de siete a ocho plantas por sección siguiendo el arreglo de la Figura 2.4. Durante un periodo aproximado de dos años, las plantas pasaron primero por un proceso de adaptación al soporte y posteriormente se experimentó con fertilizantes comerciales (triple 16, sulfato de amonio, urea) con el fin de evaluar su capacidad para asimilar y remover nitrógeno de aguas sintéticas.

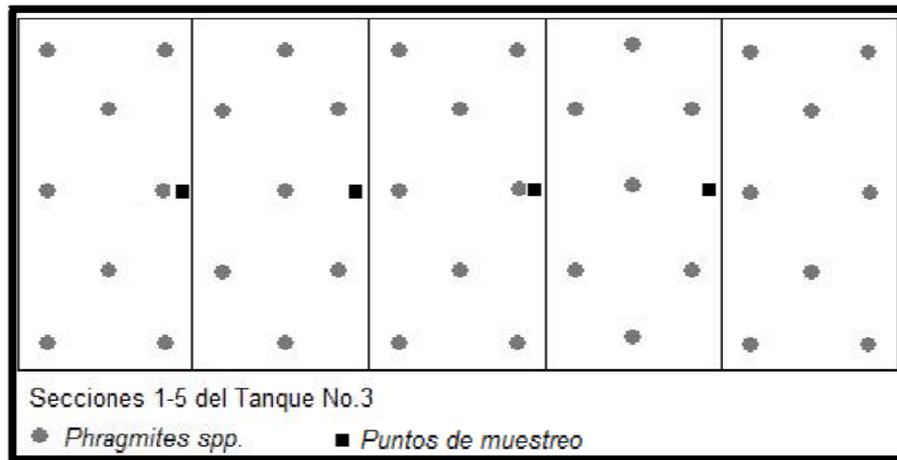


Figura 2.4 Arreglo inicial de las distribución de las plantas en cada sección

En este trabajo de tesis, antes de iniciar la etapa de acondicionamiento del sistema con la disolución de urea (16 de octubre de 2008) se hizo un conteo del número de plantas el 15 de octubre donde se obtuvo un total de 287 plantas verdes, de las cuales 107 eran delgadas y 180 gruesas y 51 brotes nuevos. La sección cinco presentó la mayor población con 82 plantas verdes y la sección tres la menor con 34. La densidad de plantas al inicio de la etapa de acondicionamiento era de 57.4 plantas/m<sup>2</sup> con una altura promedio que oscilaba entre 2.5 y 4 m.

Al igual que los demás tanques del modelo, el tanque tres está dividido en cinco secciones por medio de láminas corrugadas de fibra de vidrio de 1 m de ancho y 0.70 m de largo. Cada una de las láminas contiene siete orificios, en la parte central o en la parte inferior, por donde fluye el agua entre una sección y otra. La Figura 2.5(a) corresponde a la primera y tercer mampara y la Figura 2.5(b) corresponde a la segunda y cuarta mampara, como se puede observar en este arreglo de placas los orificios perforados quedan intercalados, en la lámina 1 y 3, los orificios están a 0.32 m sobre el nivel del piso y, en la lámina 2 y 4 a 0.08m.



Mediante este arreglo se busca favorecer el flujo de agua ascendente-descendente para mejorar la turbulencia entre las secciones y lograr con ello una mejor distribución de los contaminantes a lo largo del sistema.

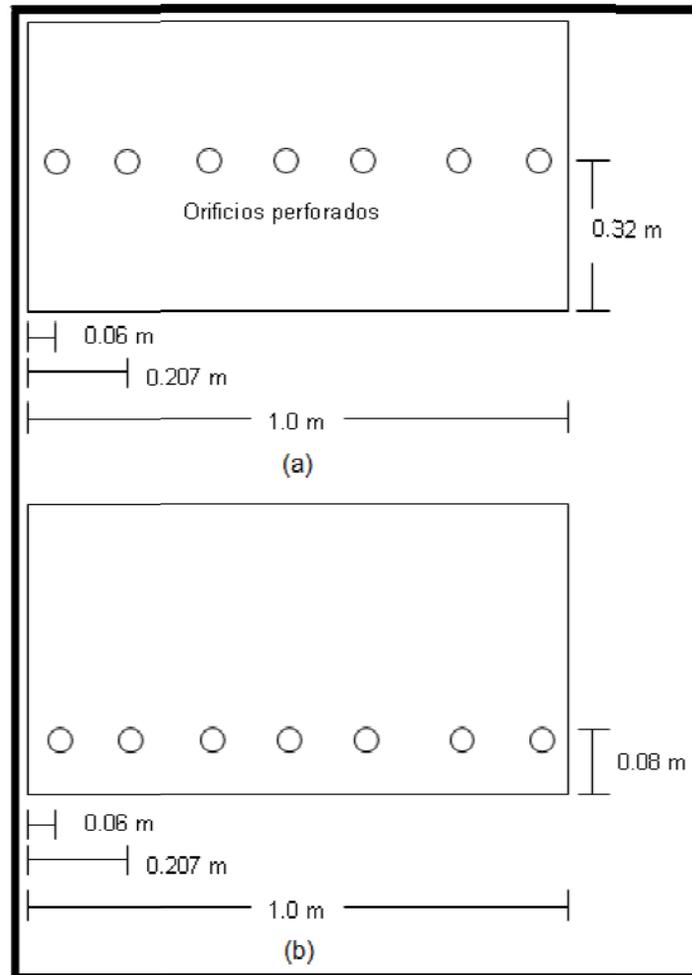


Figura 2.5 Arreglo de láminas entre las secciones dentro del HAFSS

## 2.2 Etapa de acondicionamiento del HAFSS

En una primera etapa de experimentación el HAFSS fue sometido a un periodo de adaptación (los parámetros ambientales se comenzaron a monitorear el 24 de septiembre para conocer la forma de operación del humedal pero fue hasta el 16 de octubre cuando se dio seguimiento a parámetros fisicoquímicos) alimentando en forma continua una disolución de urea como fuente de nitrógeno.



Para evaluar el desempeño del humedal durante esta etapa experimental se llevó un monitoreo de los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica, concentración de nitrógeno (N-total,  $\text{NH}_3$ ), flujo de agua a la entrada y salida del humedal. También se llevó un registro de los parámetros ambientales: temperatura ambiente (máxima y mínima) y temperatura del agua del humedal, luminosidad y humedad relativa.

#### a) Preparación de la disolución de urea

Se preparaba en lotes de 50 L a una concentración de 280 mg NTK/L la cual fue definida en estudios previos que se realizaron con esta misma sección del humedal. En un vaso de vidrio se pesaban 30 g de urea pura (100%) con la ayuda de una balanza granataria, posteriormente se disolvía con un poco de agua y se transfería a una botella de plástico de 2 L, agregando agua de la red y agitando hasta obtener una solución homogénea. Paralelamente, en un recipiente de plástico de 50 L (Figura 2.6) se agregaba aproximadamente 20 L de agua de la red y enseguida se vertía la urea en solución contenida en la botella de 2 L para finalmente llevar hasta el nivel de 50 L con agua de la red. Después de un periodo de mezclado, los 50 L de solución de urea eran vertidos a un tanque reservorio con capacidad de 120 L; el mismo procedimiento era repetido para completar un volumen de 100 L de solución de urea a 280 mg NTK/L para alimentar en forma continua al modelo de HAFSS.



Figura 2.6 Preparación y alimentación con la disolución de urea



### *b) Alimentación de la disolución de urea al HAFSS*

La disolución de urea contenida en el tanque reservorio era alimentada en forma continua con un flujo promedio de 0.038 L/min con la ayuda de una bomba de desplazamiento positivo. El flujo de disolución de urea era mezclado a su vez con agua de clorada de la red (agua de dilución) proveniente de un tinaco misma que era alimentada por gravedad a razón de 0.23 L/min, obteniéndose así un flujo total a la entrada del humedal de 0.26 L/min y una concentración promedio de urea equivalente a 40 mg/L de NTK.

En el diagrama de flujo de proceso de la Figura 2.7 se muestra con detalle el arreglo experimental utilizado para la alimentación de la disolución de urea al HAFSS. Cabe aclarar que durante la etapa de acondicionamiento, el flujo y la concentración de NTK a la entrada del humedal, fueron ajustados regularmente de acuerdo con los niveles de transpiración de las plantas acuáticas y las eficiencias de remoción obtenidas.

### *c) Diagrama de flujo de proceso del HAFSS*

Para la alimentación del modelo se utilizó el arreglo experimental que se describe en el diagrama de flujo de la Figura 2.7. Como se indica en el diagrama, el modelo se alimentaba a partir de dos corrientes principales: la corriente 4 (C4), que alimentaba por gravedad agua de dilución de la red proveniente de un tinaco (TB-1); y la corriente 2 (C2), que alimentaba con la ayuda de una bomba (GA-1) el agua residual (disolución de urea u orina humana) contenida en un tanque reservorio (TB-2). Cada una de las corrientes era regulada a un flujo tal que permitiera por un lado garantizar la concentración de nitrógeno en la entrada del humedal y por otro, los niveles de transpiración de las plantas acuáticas. En el diagrama de flujo, se indican los gastos de operación respectivos de cada corriente, es importante mencionar que el flujo de la C2 era ajustado con relativa frecuencia dependiendo de los niveles de transpiración. Con respecto a este último punto se buscó mantener un gasto continuo en la corriente de salida del humedal (C9). Las válvulas V-1, V-2 y V-5, permitían regular el flujo de cada corriente y hacer las mediciones respectivas de esta variable, así como la toma de muestra para determinar la concentración de nitrógeno en la entrada.

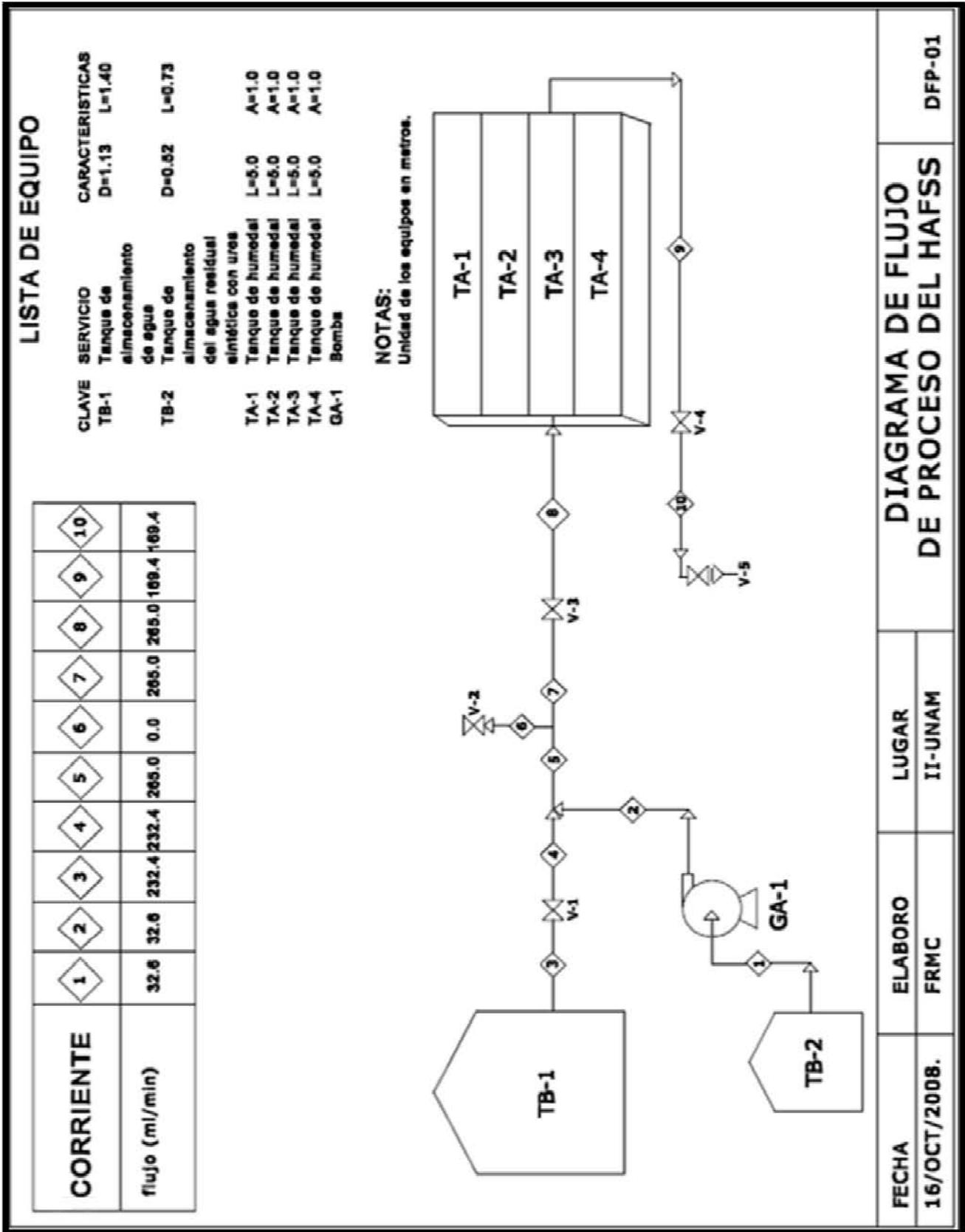


Figura 2.7 Diagrama de flujo de proceso de la alimentación de la disolución de urea al HAFSS

d) *Desempeño del HAFSS con la disolución de urea.*

Para evaluar el desempeño del HAFSS con *Phragmites spp* durante la etapa de acondicionamiento se tomaron muestras cada tercer día para el análisis de parámetros de control (16 de octubre-26 de enero, excepto sábados y domingos). Las muestras fueron recolectadas en frascos de polietileno de 250 ml y se mantuvieron a 4°C, cuando fue necesario se preservaron en medio ácido hasta su análisis. Como parte del control se midieron los flujos de entrada y salida de agua del humedal (Figura 2.8). Se tomaron periódicamente muestras de agua del influente y efluente para medir las eficiencias de remoción de nitrógeno (NTK, NH<sub>3</sub>, N-orgánico) y otros parámetros como el pH y la conductividad. Se llevó registro de las variaciones de temperatura ambiente (máxima y mínima) y del agua, los niveles de transpiración de la planta acuática (Figura 2.9), la humedad relativa y la intensidad de luz (ver Anexo D).



Figura 2.8 Medición del gasto de agua del influente y efluente



Figura 2.9 Monitoreo del nivel de agua en el HAFSS

## 2.3 Pruebas experimentales con orina humana

### 2.3.1 Agua residual problema

Se utilizó una muestra puntual de una corriente separada de orina humana, la cual se obtuvo a partir de una red de captación que se encuentra conectada a un sistema de baño seco en los sanitarios de caballeros del edificio cinco del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Como parte de otro proyecto de tesis, que se realizó en forma paralela a este trabajo, se diseñó y construyó un tanque reservorio de 120 L de capacidad para el almacenamiento y preservación de la orina humana, a partir del cual se obtuvo el agua residual problema para el desarrollo de las pruebas experimentales. Una vez colectada, la orina se almacenó a una temperatura promedio de 4°C y en la obscuridad hasta su uso.

Como una medida de control para los ensayos experimentales, la orina humana fue caracterizada mediante los parámetros pH, conductividad, sólidos en sus formas (SST, SS, SDT, ST, SVT, SFT), nitrógeno en sus formas (N-total, NH<sub>3</sub>, N-orgánico, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

### 2.3.2 Pruebas de tratabilidad de orina humana en el HAFSS

Después de la etapa de acondicionamiento se llevaron a cabo las pruebas de tratabilidad con la orina humana bajo condiciones definidas de carga de N-total. Para ello fue necesario implementar un arreglo experimental que permitiera la alimentación en continuo de orina en condiciones controladas de temperatura para evitar al máximo la hidrólisis de urea y la pérdida de nitrógeno amoniacal por volatilización (Figura 2.10).



Figura 2.10 Arreglo experimental para controlar la temperatura de almacenamiento durante la alimentación de la orina humana al HAFSS

#### a) Preparación de la solución de orina para la alimentación del HAFSS

Para las pruebas experimentales se tomó un volumen de 20 L de orina del tanque reservorio de 120 L, previo mezclado con una bomba centrífuga marca Little Giant durante 3 minutos, y conservado en un cuarto frío hasta su uso (Figura 2.11).

La solución de orina diluida se preparaba con agua de red de suministro la cual era almacenada en recipientes de plástico de 20 L a 4°C y 24 horas antes de su uso. Al día siguiente, con el agua de



dilución a 4°C, volúmenes de orina cruda perfectamente homogeneizada eran agregados a los recipientes de plástico para obtener diluciones 1:200 y 1:100, equivalente a 30.1 mg NTK/L y 60.2 mg NTK/L, respectivamente. Las soluciones así preparadas se transportaban hasta el área donde se encuentra ubicado el HAFSS. Posteriormente la solución diluida de orina era transferida mediante la ayuda de una bomba centrífuga marca Little Giant a un tanque de almacenamiento de 50 L de capacidad, el cual se encontraba en el interior de un refrigerador para mantener la solución a 4°C y así controlar la hidrólisis de la urea (ver Figura 2.10).



Figura 2.11 Tanque con solución de orina diluida para la carga del HAFSS

### *b) Alimentación de la solución de orina diluida al HAFSS*

La orina diluida se alimentaba al HAFSS por medio de una bomba de desplazamiento positivo marca Wallace and Tiernan, con gastos promedio entre 0.03 y 0.04 L/min. Al igual que la disolución artificial, la solución de orina se mezclaba con agua de clorada de la red (agua de dilución) proveniente del tinaco de 1100 L misma que era alimentada por gravedad a razón de 0.23 L/min. Este último flujo se fue incrementando gradualmente debido a las altas tasas de transpiración de las plantas acuáticas, a finales del mes de marzo de 2009, el gasto se llevó hasta 0.47 L/min, por lo que el flujo promedio alimentado al humedal fue de 0.51 L/min. La primer carga de orina humana (solución 1:200) se inició el 5 de febrero de 2009, el 13 de febrero del mismo año se modificó la carga y se empezó a alimentar la solución de dilución 1:100.

### *c) Desempeño del HAFSS durante las pruebas de tratabilidad de la orina humana.*

Para evaluar el desempeño del HAFSS durante la experimentación con orina humana se tomaron muestras diarias por duplicado para el análisis de parámetros de control del 6 de febrero al 8 de abril (excepto sábados y domingos). De la misma forma que en la etapa de acondicionamiento las



muestras fueron recolectadas en frascos de polietileno de 250 ml preservadas a 4°C. Se midieron los flujos de entrada y salida de agua del humedal, las eficiencias de remoción de nitrógeno (NTK, NH<sub>3</sub>, N-orgánico), así como pH, conductividad, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, además se llevó un registro de parámetros ambientales. Adicionalmente se llevó un conteo del número de plantas desde el inicio hasta el término de las pruebas experimentales (ver Anexo D).

## 2.4 Parámetros de control y métodos de análisis

En la tabla 2.1 se presenta los parámetros, el método de análisis y/o equipo que fueron utilizados en la caracterización de la orina humana y para la evaluación del desempeño del humedal durante las pruebas de tratabilidad, respectivamente. En las siguientes secciones se describen estos parámetros y su respectivo método de análisis.

Tabla 2.1. Parámetros y métodos de análisis

Parámetro	Método analítico/Equipo
<b>Parámetros ambientales</b>	
Temperatura ambiente máx. (°C)	- Termómetro de máximos y mínimos, Marca Taylor
Temperatura ambiente mín. (°C)	- Termómetro de máximos y mínimos, Marca Taylor
Temperatura del agua (°C)	- Termómetro
Luminosidad (lux)	- Luxómetro (Light Meter Lux/FC, Model Sper Scientific 840020)
Humedad relativa (%)	- Higrómetro (Thermo-hygrometer, Model CA846, Marca AEMC Instruments)
<b>Parámetros fisicoquímicos</b>	
pH	- Potenciómetro(Multi 340i/SET WTW)
Conductividad(μS/cm)	- Conductímetro(Multi 340i/SET WTW)
N-total (mg/L)	- 4500-N C <sup>+</sup> . Kjeldahl
NH <sub>3</sub> (mg/L)	- 4500-NH <sub>3</sub> B <sup>+</sup> . Destilación / 4500-NH <sub>3</sub> E <sup>+</sup> . Volumétrico
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	- Colorimétrico basado en ISO 7890/1 <sup>**</sup> / DIN 38405 D9
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	- Colorimétrico basado en EPA 354.1 <sup>**</sup> y 4500-NO <sub>2</sub> -B
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	- Colorimétrico basado en EPA 365.2 <sup>**</sup> , 4500-P E / ISO 6978/1
SST(mg/L)	- 2540 D <sup>+</sup> . Sólidos totales en suspensión secados a 103-105 °C
SS (mg/L)	- 2540 F <sup>+</sup> . Sólidos sedimentables
SDT (mg/L)	- 2540 C <sup>+</sup> . Sólidos totales disueltos secados a 180 °C
ST (mg/L)	- 2540 B <sup>+</sup> . Sólidos totales secados a 103-105 °C
SVT (mg/L)	- 2540 E <sup>+</sup> . Sólidos fijos y volátiles incinerados a 550 °C
SFT (mg/L)	- 2540 E <sup>+</sup> . Sólidos fijos y volátiles incinerados a 550 °C
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	- Respirométrico utilizando el Sistema OxiTop
DQO (mg/L)	- Colorimétrico análogo al de la EPA 410.4 <sup>**</sup>

\* APHA-AWWA-WPCF Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales Edición 1995.

\*\* Las mediciones colorimétricas se realizaron en un fotómetro Spectroquant Nova 60, utilizando los reactivos respectivos de la marca Merck.



## 2.4.1 Parámetros fisicoquímicos

### a) pH

En este trabajo fue utilizado como una medida de control para garantizar el estado fisiológico de la planta acuática y la operación en el intervalo de pH recomendado (6-8). El pH fue medido con un equipo multiparámetro Multi 340i/SET, WTW (Figura 2.12).

### b) Conductividad eléctrica (CE).

En este trabajo se midió con una celda de conductividad del equipo multiparámetro Multi 340i/SET, WTW (Figura 2.12). Dado que es un parámetro que depende de la temperatura, este fue corregido para reportarlo a las condiciones estándar de 25°C.



Figura 2.12 Equipo multiparámetro Multi 340i/SET, WTW

### c) Nitrógeno en sus formas (*N*-total, *N*-orgánico, $NH_3$ , $NO_2^-$ , $NO_3^-$ )

*Nitrógeno total por el método Kjeldahl.* Para el desarrollo de este método, se utilizó una unidad de digestión modelo K-424 y una unidad de destilación modelo 323, ambas de la marca Büchi. Volúmenes de muestra de 25 ml eran colocados en tubos Kjeldahl, a los cuales se adicionaba cuidadosamente 10 ml de reactivo de digestión aplicando un mezclado suave. Para controlar la proyección de la muestra se agregaban algunas perlas de vidrio.



Las muestras así preparadas fueron colocadas en la unidad de digestión y durante 2.5 horas fueron digeridas con un incremento gradual de la temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición y el reflujo ácido de la muestra.

Por seguridad esta etapa se realizó bajo una campana de extracción para evitar la posible fuga de vapores tóxicos; al reducir el volumen inicial de la muestra (35 ml) a 5 ml o 10 ml aproximadamente se observó desprendimiento de vapor blanco. Este vapor puede oscurecerse cuando la muestra presenta grandes cantidades de materia orgánica, después de su aparición se continúa la digestión durante 30 minutos más.

En este período la disolución cambia a una ligera coloración azul. Finalizada la digestión se deja enfriar el tubo y su contenido durante aproximadamente 30 minutos, posteriormente se adiciona 100 ml de agua destilada y se mezcla.

Cuidadosamente se añade 10 ml de la disolución de hidróxido de sodio-tiosulfafo de sodio para neutralizar el remanente de ácido y alcalinizar el medio a un  $\text{pH} > 9.0$ .

Finalmente la muestra queda lista para la etapa de destilación y cuantificación del nitrógeno, como NTK, por titulación con una solución valorada de ácido sulfúrico como se describe a continuación.

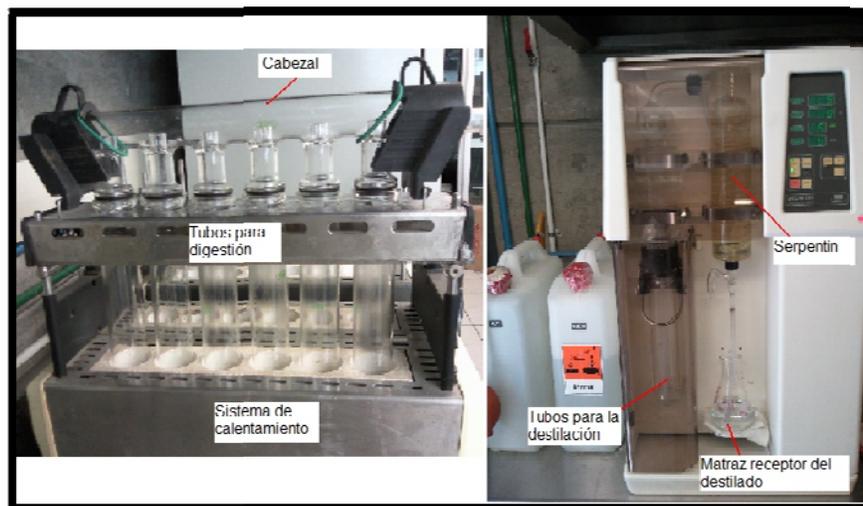


Figura 2.13 Unidad de digestión K-424 y destilación 323 marca Büchi

*Nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$ )*. Se realizó con el método 4500- $\text{NH}_3$  E. Método titulométrico (APHA, 1995) el cual se aplica a muestras que hayan sido sometidas a una destilación previa (ver método



4500-NH<sub>3</sub> B). En esta tesis se emplearon volúmenes de muestra de 100 ml los cuales se colocaron en tubos Kjeldahl y se ajusto el pH (>9) con solución de hidróxido de sodio-tiosulfato de sodio, cuando fue necesario, el pH de la mezcla era corroborado mediante el uso de papel indicador. La muestra así preparada era sometida a una etapa de destilación con la ayuda de una unidad de destilación Büchi modelo 323 durante un intervalo de tiempo de cinco minutos. Lo anterior con el fin de recuperar el nitrógeno amoniacal contenido en el agua por arrastre de vapor, el cual posteriormente era condensado y recuperado en 25 ml de solución indicadora de ácido bórico. Al término de este tratamiento se procedía a su cuantificación mediante titulación con una solución de ácido sulfúrico 0.02 N.

Se usan las siguientes ecuaciones para calcular la concentración del nitrógeno en sus formas:

$$mg\ NTK/L = (A) (N) (14) (1\ 000) / V \dots\dots\dots (3.1)$$

$$mg\ NH_3/L = (A) (N) (14) (1\ 000) / V \dots\dots\dots (3.2)$$

$$mg\ N-org/L = mg\ NTK/L - mg\ NH_3/L \dots\dots\dots (3.3)$$

donde:

A: Volumen de ácido sulfúrico gastado en la titulación de la muestra (ml)

N: Concentración del ácido sulfúrico (Normal, eq/L)

V: Volumen de muestra (ml)

14: Peso atómico del nitrógeno.

*Nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)*. Los iones NO<sub>2</sub><sup>-</sup> se determinaron por el método colorimétrico basado en EPA 354.1 y 4500-NO<sub>2</sub>-B con la ayuda de un espectrofotómetro Spectroquant Nova 60, utilizando reactivos de la marca Merck.

*Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)*. Los iones NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se determinaron por el método colorimétrico basado en ISO 7890/1/DIN 38405 D9 utilizando un espectrofotómetro Spectroquant Nova 60, utilizando reactivos respectivos de la marca Merck.

En el Anexo C se dan detalles de los reactivos y soluciones utilizados para el análisis de nitrógeno en sus formas.



d) Fosfatos ( $PO_4^{3-}$ )

Los  $PO_4^{3-}$  se determinaron por el método colorimétrico basado en EPA 365.2, 4500-P E / ISO 6978/1, usando un espectrofotómetro Spectroquant Nova 60, con reactivos de la marca Merck.

e) Demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ )

La demanda bioquímica de oxígeno fue cuantificada en muestras de orina cruda para fines de caracterización mediante el método de respirometría.

Para el desarrollo de esta prueba se utilizó el sistema OxiTop (WTW), el cual consta de frascos ámbar de vidrio con capacidad de 510 ml, una placa para agitación con barras magnéticas para proveer un mezclado óptimo y la transferencia de oxígeno y, una incubadora para controlar la temperatura a  $20^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ . La preparación de las muestras se realizó de la siguiente manera, para el ensayo la orina humana se diluyó con agua destilada (1:20) y se ajustó el pH a un valor de 7. Se utilizó un volumen de muestra de 97 ml como lo recomienda el método, tomando en cuenta el valor esperado de DBO y los resultados del análisis previo de DQO. Adicionalmente se agregaron a la muestra tres gotas de inhibidor de nitrificación (WTW) para evitar el consumo de oxígeno por esta reacción, 1 ml de solución de inóculo preparada con lodos activados (1:100) de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria. De tres a cuatro perlas de NaOH fueron colocadas en el soporte y sello de plástico con que cuentan las botellas de DBO. Las muestras así preparadas fueron cerradas con sus cabezales los cuales tienen un sistema electrónico que registra los cambios de presión y proporciona directamente los valores de DBO por cada día transcurrido de la prueba. Durante cinco días consecutivos fue desarrollada y monitoreada la prueba. En la Figura 2.14 se muestra el sistema OxiTop (WTW) utilizado.



Figura 2.14 Sistema OxiTop para pruebas de  $DBO_5$



#### f) *Demanda Química de oxígeno (DQO)*

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se determinó mediante el método colorimétrico análogo al de la EPA 410.4 utilizando un termoreactor Spectroquant TR 420 y el espectrofotómetro Spectroquant Nova 60 (Figura 2.15), utilizando los reactivos respectivos de la marca Merck.



Figura 2.15 Fotómetro Spectroquant Nova 60 y Termoreactor Spectroquant TR 420

### 2.4.2 Parámetros ambientales

#### a) *Transpiración de plantas acuáticas*

Se denomina evapotranspiración a la pérdida de agua de una superficie por evaporación y por la transpiración de las plantas, en ambos casos el agua regresa a la atmósfera en forma de vapor. Dado que en la práctica es difícil cuantificar la liberación de agua en forma separada, generalmente se reporta como evapotranspiración.

En el caso de esta tesis, y como se describió al principio de este capítulo, en el humedal artificial utilizado para la experimentación, el flujo es de tipo sub-superficial y el agua fluye por debajo de la grava utilizada como soporte. Por lo que el fenómeno de transpiración es el que predomina.

En el trabajo experimental se consideró la pérdida de agua dentro del tanque como resultado de la transpiración, ya que estudios anteriores a este trabajo demostraron que el fenómeno de evaporación es despreciable, además se cuenta con un techo de láminas transparentes y cortinas de plástico translúcido que protege al humedal del viento y reduce al mínimo la evaporación. La tasa de transpiración se determinó restando al gasto de entrada (influyente) el gasto de salida (efluente), la medición de los gastos se realizó con una probeta graduada de vidrio de 0.25 L y una



probeta graduada de plástico de 0.50 L. Además se midió el nivel del agua dentro del tanque con una regla, por ser un sistema que opera a régimen continuo el nivel de profundidad de agua (46 cm) permaneció prácticamente constante.

*b) Humedad relativa*

Para la evaluación del desempeño del humedal se utilizó el equipo Thermo-hygrometer, Model CA846, Marca AEMC Instruments (Figura 2.16).



Figura 2.16 Higrómetro Thermo-hygrometer, Model CA846

*c) Luminosidad*

El parámetro luminosidad se midió con el luxómetro Light Meter Lux/FC, Model Sper Scientific 840020.

*d) Temperatura del aire (máxima y mínima) y del agua*

Para medir la temperatura ambiente máxima y mínima se utilizó un termómetro de máximos y mínimos, Marca Taylor (Figura 2.17) que registra el promedio de temperaturas durante 24 horas. La temperatura del agua en el humedal se midió con un termómetro con escala de -20 a 150 °C.



Figura 2.17 Termómetro de máximos y mínimos marca Taylor



# CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN



### 3.1 Características fisicoquímicas de una corriente separada de orina humana

La Tabla 3.1 resume los resultados obtenidos de la medición y el análisis de parámetros indicadores de características fisicoquímicas de la orina humana, la cual, como se indicó en la sección de metodología, fue obtenida mediante un sistema de captación a partir de un mingitorio seco de sexo masculino de un centro de trabajo, y almacenada en refrigeración.

Parámetro	Valores promedio*
pH	9.5
SST(mg/L)	6045
SDT(mg/L)	12925
ST(mg/L)	18970
SVT(mg/L)	9649
SFT(mg/L)	9321
NTK (mg/L)	6020
NH <sub>3</sub> (mg/L)	4984
N-orgánico (mg/L)	1036
DQO (mg/L)	7880
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	4800

\*Valor promedio obtenido a partir de una muestra representativa de 100 L almacenados en refrigeración.

El pH de la corriente separada de orina es básico (9.5), que se atribuye a la hidrólisis de la urea a amoníaco y a carbonato de amonio, promovida principalmente por la actividad microbiana y las condiciones naturales bajo las cuales fue obtenida dicha corriente. La mayor parte del nitrógeno se encuentra en forma de nitrógeno amoniacal. Estos resultados coinciden con lo publicado por Maurer et al., (2006) para este tipo de corrientes separadas quienes reportan también valores de pH alcalino de 9.1 (ver Tabla 1.1, Capítulo 1). Cabe recordar que el pH de la orina fresca y obtenida bajo condiciones estériles es de pH≈6.0.

La concentración de otros parámetros en la corriente separada de orina humana como el nitrógeno total y amoniacal (6020 mg NTK/L, 4984 mg NH<sub>3</sub>-N/L), la demanda química de oxígeno (7880 mg DQO/L), se encuentran dentro de las órdenes de magnitud publicados en la literatura. Otros parámetros indicadores que destacan por su concentración en la orina humana, son los sólidos en



sus diferentes formas como se muestra en la Tabla 3.1. Las diferencias que se tienen en los niveles de concentración de los parámetros, como por ejemplo en el contenido de nitrógeno total, entre el encontrado en este trabajo y el promedio reportado (9200 mg/L), se atribuye al número de personas que aportaron su orina durante la recolección, la dieta alimenticia, la generación per cápita, el sistema de captación y preservación empleado, entre otras posibles causas.

Como medida de control en este trabajo se dio seguimiento a la concentración del nitrógeno durante el almacenamiento de la orina; en la Tabla 3.2 se muestran los cambios registrados. Se observa que la concentración de NTK disminuyó gradualmente con el tiempo, probablemente existan pérdidas de amoníaco en el tanque de almacenamiento debido a las condiciones de pH básico de la orina el cual favorece su volatilización.

Parámetro	Concentración (mg/L)				
	02/02/2009	03/02/2009	05/02/2009	06/02/2009	16/02/2009
NTK	6496	6216	-	-	6020
NH <sub>3</sub>	2940	3108	3304	3584	4984
N-orgánico	3556	3108	-	-	1036

Se observa también que la concentración de nitrógeno amoniacal tiende a aumentar con el tiempo de almacenamiento producto de la hidrólisis de la urea, lo cual se ve reflejado en una disminución del contenido de N-orgánico. Después de aproximadamente 16 días de almacenada la orina, 82% de la urea estaba ya completamente hidrolizada.

Otro aspecto a considerar de las características fisicoquímicas de la orina humana son sus propiedades de biodegradabilidad, de acuerdo con los valores de DBO<sub>5</sub> (4800 mg/L) y la relación DBO<sub>5</sub>/DQO de 0.61, una parte importante de la materia presente en este fluido biológico es biodegradable, indicando con ello que esta puede ser tratada con un sistema de tratamiento biológico, de ahí la posibilidad de utilizar los humedales artificiales.



## 3.2 Estabilización de la operación en continuo del HAFSS

En las tablas D.1 y D.2 de la sección de Anexo D se incluye con detalle los resultados y valores de parámetros de control registrados durante toda la etapa experimental del HAFSS. Como se mencionó la fecha de arranque de la operación del humedal fue el 24 de septiembre de 2008 pero fue hasta el 16 de octubre cuando se dio seguimiento a parámetros fisicoquímicos.

### 3.2.1 Control del flujo de operación y TRH

La medición del gasto a la entrada y salida del humedal, al igual que el de la bomba dosificadora de disolución de urea y orina humana, se hizo con un mínimo de tres y un máximo de cinco repeticiones.

El control del flujo fue un aspecto importante durante la operación del HAFSS por el efecto que tiene sobre el tiempo de retención hidráulico (TRH) y el desempeño del mismo. Durante la operación del modelo fue necesario hacer ajustes en el flujo de entrada para compensar el efecto de transpiración de las plantas acuáticas.

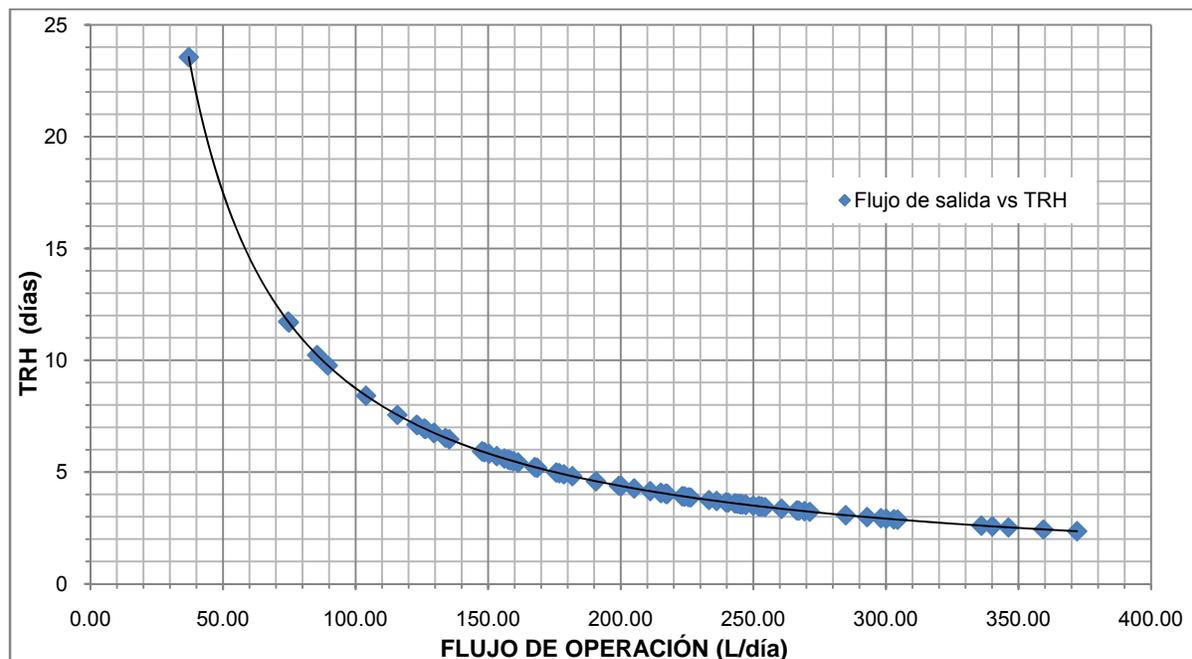


Figura 3.1 Comportamiento del TRH durante la etapa experimental del humedal artificial



En la gráfica de la Figura 3.1 se muestra el comportamiento global del TRH en función de los flujos de agua registrados a la salida del humedal. Los puntos graficados corresponden a valores promedio diarios de un total de 197 días de operación del humedal. De acuerdo con el registro de los flujos de salida en algunos días el TRH superó los 10 días, sin embargo en la mayor parte de los casos que duró el estudio se mantuvo por debajo de los 5 días, la mayor incidencia de valores de TRH se encontró entre 3.0 y 3.9 días. En estudios anteriores a la presente tesis (Beltrán, 2010) se estableció trabajar con flujos cercanos a 4 días para este mismo sistema de tratamiento.

### **3.2.2 Comportamiento del HAFSS durante la etapa de estabilización**

Durante la etapa de estabilización se dio seguimiento al humedal analizando parámetros como el pH, la conductividad eléctrica, la remoción de nitrógeno y parámetros ambientales (temperatura del ambiente y del agua, humedad relativa y luminosidad); adicionalmente también se llevo un registro del número de plantas.

El pH es un parámetro importante que fue utilizado en este estudio como una medida de control de operación. En estudios previos y con la misma planta acuática se determinó que pH alcalinos (>8.5) afectan su actividad metabólica, lo cual puede ocurrir en condiciones de sobrecarga de urea y la correspondiente hidrólisis de la misma; respecto a este último punto, tanto el pH como la conductividad eléctrica resultaron ser buenos indicadores.

Desde el arranque de la operación del humedal (24 de septiembre de 2008) y durante la etapa de acondicionamiento (16 de octubre de 2008 a 26 de enero de 2009), alimentando urea como nutriente, el pH del influente se mantuvo en el orden de 7.4 y a la salida ligeramente por debajo de la neutralidad (6.5 a 6.9), indicando con ello que el humedal operó bajo condiciones adecuadas de pH.

La conductividad eléctrica es un parámetro que presentó mayores variaciones tanto en el influente como en el efluente del humedal. A la entrada se registraron valores promedio de  $537.7 \pm 35.3$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la cual se puede atribuir a las características propias del agua de la red de Ciudad Universitaria, ya que la urea contenida en el tanque reservorio de alimentación, no presentó evidencias de hidrólisis durante su almacenamiento. Cabe recordar que los valores de conductividad eléctrica fueron corregidos por temperatura a 25 °C, para compensar diferencias atribuibles a dicha variable (ver Tabla B.1, del Anexo B).



Con respecto a los datos de salida los valores más altos de este parámetro se presentaron al arranque de la operación (773.3  $\mu\text{S/cm}$ ), posteriormente los registros fluctuaron entre 560.7 y 770.6  $\mu\text{S/cm}$ , 651.1  $\pm$  43.3  $\mu\text{S/cm}$  fueron los valores promedio registrados. Durante toda la etapa de acondicionamiento la conductividad de entrada fue menor a la de salida, producto de la hidrólisis de urea que se lleva a cabo dentro del humedal, la cual da como resultado la liberación de iones amonio, no obstante que parte de estos son asimilados por los *carrizos*.

En cuanto al desempeño del humedal en la remoción de nitrógeno, este fue evaluado en términos de la carga removida y del porcentaje de la reducción en masa, las cuales fueron calculadas de acuerdo a las siguientes ecuaciones (Kadlec, 1996):

$$\text{CR} = \frac{(\text{QiCi} - \text{QeCe})}{\text{A}} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\% \text{RM} = \frac{(\text{QiCi} - \text{QeCe})}{\text{QiCi}} \times 100 \dots\dots\dots (3.2)$$

donde:

CR: Carga removida,  $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$

%RM: Por ciento de la reducción en masa

Qi: Flujo de entrada,  $\text{L/día}$

Qe: Flujo de salida,  $\text{L/día}$

Ci: Concentración de entrada,  $\text{g/L}$

Ce: Concentración de salida,  $\text{g/L}$

A: Área superficial del humedal,  $\text{m}^2$

Para este trabajo de tesis, el desempeño del humedal se evaluó mediante estas dos relaciones de eficiencia, ya que en ambos casos se considera la corrección por efecto de la transpiración de las plantas.

El humedal inició su operación con cargas de urea equivalente a una concentración de 30.9 - 40.6  $\text{mg NTK/L}$  que corresponde a 2.3 - 3.0  $\text{g NTK/m}^2\cdot\text{día}$ , registrándose durante el tiempo que duró la etapa de acondicionamiento un promedio de 37.2  $\pm$  5.5  $\text{mg NTK/L}$  correspondiente a 2.79  $\pm$  0.4  $\text{g NTK/m}^2\cdot\text{día}$ . Bajo tales condiciones las eficiencias de remoción presentaron variaciones a lo largo de la experimentación, entre otras razones, atribuibles a cambios estacionales de temperatura; la carga removida y el porcentaje de reducción de masa promedio registrada fue de 1.8  $\pm$  0.6  $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$  y del 64.4%, respectivamente. En los siguientes subcapítulos se hará un análisis del



comportamiento del humedal en términos de la remoción y transformación de nitrógeno así como de los demás parámetros ambientales.

Durante el tiempo que duró la experimentación se realizaron censos de plantas, el primero se llevó a cabo en la etapa inicial de estabilización (15 de octubre de 2008), obteniendo un registro de 361 plantas en total (Figura 3.2), considerando el número de brotes (verdes y secos) y las plantas verdes y en desarrollo (delgadas y gruesas). De las cinco secciones que conforman el tanque, la número cinco fue la que presentó la mayor población de plantas con 91 plantas verdes/m<sup>2</sup> de superficie; el promedio general de densidad de plantas fue de 67 plantas/m<sup>2</sup>. Cabe señalar que un número importante de plantas alcanzaron el desarrollo alrededor de los 4 metros de altura.

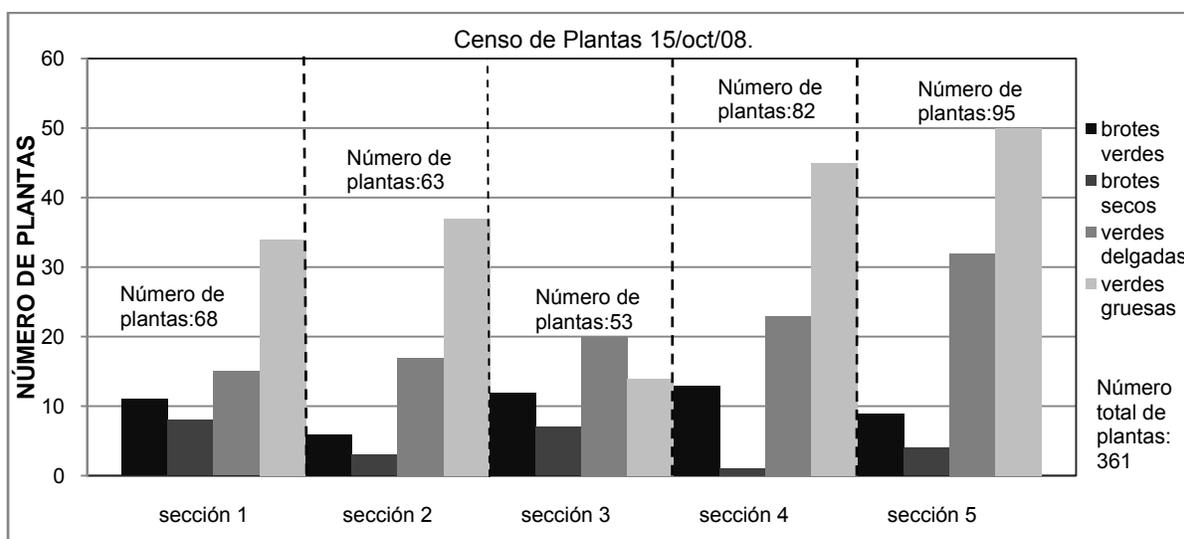


Figura 3.2 Censo de plantas en las secciones que conforman el tanque no.3 del humedal

### 3.3 Comportamiento del HAFSS durante el tratamiento de orina humana

#### 3.3.1 Efecto de la transpiración de las plantas acuáticas en el flujo y TRH

Como se mencionó, durante la experimentación se llevó un control de los flujos de entrada y salida del humedal.

Se observa en la gráfica de la Figura 3.3 que el flujo de alimentación,  $Q_e$ , se mantuvo prácticamente constante con mínimas variaciones en los seis meses que duró la experimentación (octubre de 2008 a abril de 2009), tanto en la etapa de acondicionamiento como durante las



pruebas con orina humana se registró un valor promedio de  $376.3 \pm 11.1$  L/día ( $0.26 \pm 0.01$  L/min), hasta 16 marzo. Sólo a partir de mediados del mes de marzo (18 marzo de 2009), fue necesario realizar incrementos graduales de 446.4 a 734.4 L/día (0.31 a 0.51 L/min) para compensar los niveles de transpiración de las plantas acuáticas.

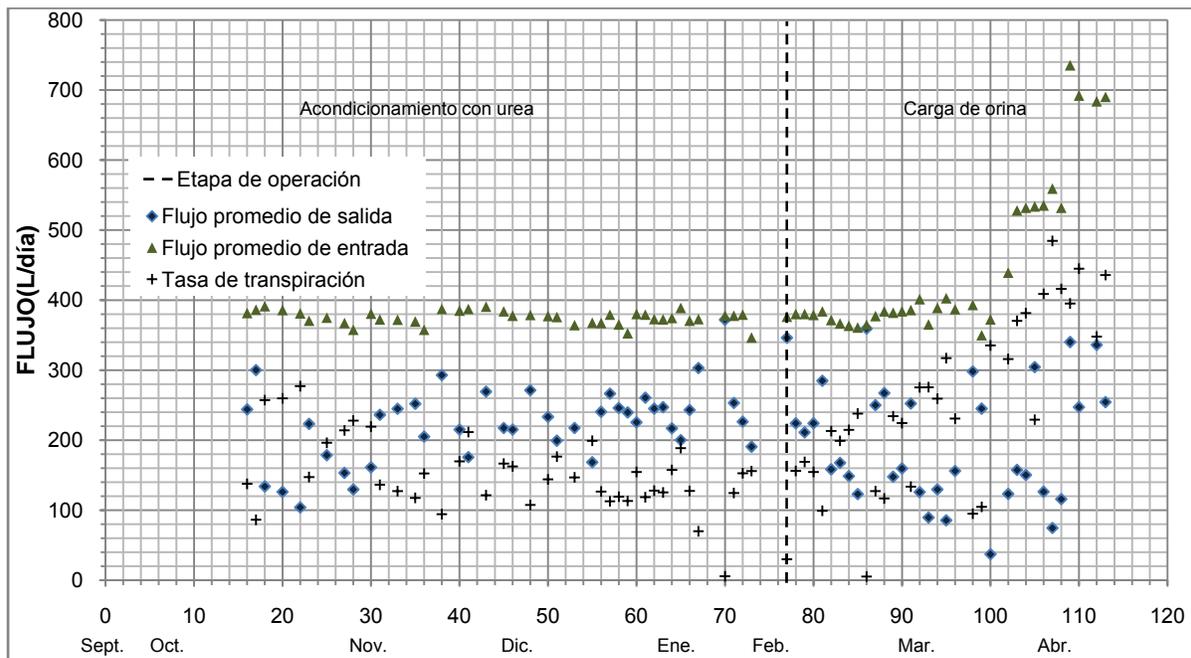


Figura 3.3 Comportamiento de los flujos de entrada y salida del HAFSS, y niveles de transpiración de las plantas acuáticas

Con respecto al flujo de salida,  $Q_s$ , este presentó variaciones más significativas (Figura 3.3) atribuibles a la transpiración de las plantas acuáticas y a las condiciones de temperatura y humedad que prevalecieron en el ambiente. El flujo promedio registrado a la salida del humedal durante todo el periodo de prueba (octubre de 2008 a abril de 2009) fue de  $211.5 \pm 70.9$  L/día ( $0.15 \pm 0.05$  L/min). Los valores más bajos de flujo se presentaron durante la época de mayor temperatura (marzo de 2009) llegando a registrar valores hasta de 37.44 L/día (0.026 L/min) a la salida.

La transpiración de las plantas acuáticas es el factor más importante que incide en las variaciones del flujo de salida y por ende en los tiempos de retención hidráulico (TRH). Durante los primeros cinco meses de operación, la tasa de transpiración promedio se mantuvo en  $160.5 \pm 64.7$  L/día ( $0.11 \pm 0.04$  L/min). Hacia el final de las pruebas experimentales, a partir del 16 de marzo, la tasa



de transpiración se incrementó al doble, es decir  $380.5 \pm 67.8$  L/día ( $0.26 \pm 0.05$  L/min), producto del aumento de la temperatura ambiente y de la actividad de las plantas acuáticas.

En el día se tienen importantes variaciones en la temperatura ambiente, lo cual se ve reflejado en el flujo de salida. En la Figura 3.4 se presenta el comportamiento del mismo en el transcurso de un día durante un periodo de tiempo de 10 hrs (8:00 a 18:00 hrs), esto con el fin de evaluar a qué hora del día era mayor la transpiración de las plantas y por lo tanto el menor flujo a la salida. El seguimiento se hizo sólo para un día en forma puntual y tomando en cuenta la época donde mayor nivel de transpiración se registró.

Como se observa en la Figura 3.4 el máximo nivel de transpiración se registró al medio día; en mediciones parciales del flujo realizadas el 12 y 23 de marzo respectivamente, coinciden también con el horario de mayor transpiración, entre las 12:00 y 12:30 hrs aproximadamente.

Tomando en cuenta las variaciones de flujo y el efecto de transpiración de las plantas se hizo una estimación de los flujos promedios a la salida del humedal para cada una de las etapas de experimentación y se calcularon los TRH correspondientes.

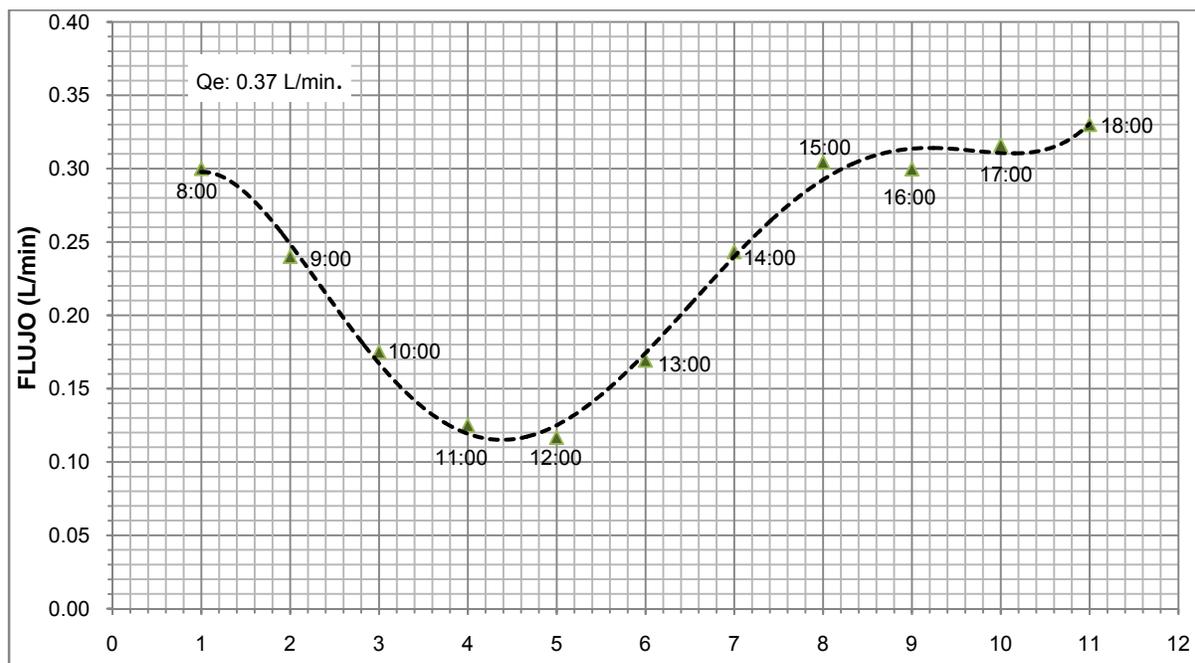


Figura 3.4 Variaciones del flujo a la salida del humedal a lo largo de un día (25/03/2009)



### 3.3.2 Remoción de nitrógeno de la orina humana

#### a) Reducción de los niveles de concentración en el efluente de tratamiento

Para valorar el desempeño del humedal respecto a su capacidad para remover nitrógeno de la disolución de urea y de la orina humana se dio seguimiento al contenido de  $\text{NH}_3$  y NTK en las diferentes condiciones de operación y carga, mismas que se resumen en la Tabla 3.3.

Condiciones de operación	Acondicionamiento con urea (16 Oct. 2008 – 26 Ene. 2009)		Experimento de orina (5 Feb. – 8 Abril 2009)	
Carga de NTK (g NTK/m <sup>2</sup> ·día)	2.79 ± 0.41		1.24 ± 0.46	
TRH (días)	4.2 ± 1.2		4.6 ± 1.7	
parámetro	entrada	salida	entrada	salida
Q (L/día)	375.2 ± 10.1	223 ± 52.8	445.9 ± 112.8	197.7 ± 86.9
pH	7.4 ± 0.09	6.8 ± 0.10	8.1 ± 0.29	6.8 ± 0.23
Conductividad (μS/cm)	537.7 ± 35.3	651.1 ± 43.3	562.2 ± 34.8	568.6 ± 32.3
NTK (mg /L)	37.2 ± 5.48	21.8 ± 5.11	14.2 ± 4.76	4.9 ± 2.27
$\text{NH}_3$ (mg /L)	1.0 ± 0.46	12.9 ± 4.84	7.1 ± 2.35	1.33 ± 1.10
$\text{NO}_2^-$ (mg /L)	0.02 ± 0.00	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.09	0.02 ± 0.01
$\text{NO}_3^-$ (mg /L)	4.3 ± 1.72	5.2 ± 1.35	6.3 ± 0.90	2.7 ± 1.76
$\text{PO}_4^{3-}$ (mg /L)	-	-	0.62 ± 0.27	0.24 ± 0.21

En la gráfica de la Figura 3.5 se muestran los perfiles de concentración de nitrógeno registrados durante las etapas de experimentación, tanto a la entrada como a la salida del humedal.

Con respecto a la etapa de acondicionamiento (16 octubre de 2008 al 26 enero de 2009), durante la cual se alimentó urea como fuente de nitrógeno, los resultados fueron los esperados de acuerdo a estudios previos (Beltrán, 2010). De la Figura 3.5 se desprende que dentro del humedal la urea está siendo transformada e hidrolizada a  $\text{NH}_3$  y parte de esta forma nitrogenada es asimilada por la planta acuática (*Phragmites spp*). La concentración promedio de entrada de NTK se mantuvo en  $37.2 \pm 5.5$  mg/L y en  $21.8 \pm 5.1$  mg/L la de salida, con valores de  $\text{NH}_3\text{-N}$  de  $12.9 \pm 4.8$  mg/L. Los



niveles de concentración de nitrógeno registrados en el efluente se mantuvieron con mínimas variaciones lo que indican que el humedal alcanzó condiciones de estabilidad durante esta etapa (Figura 3.5). Otro aspecto a destacar es el hecho que bajo las condiciones de carga de la disolución de urea y los TRH, no se logró completar la hidrólisis total de la urea y por lo mismo la remoción de  $\text{NH}_3$  tampoco fue completa. Cabe recordar que el objetivo de esta etapa fue mantener la actividad metabólica de las plantas previo a las pruebas con la orina humana.

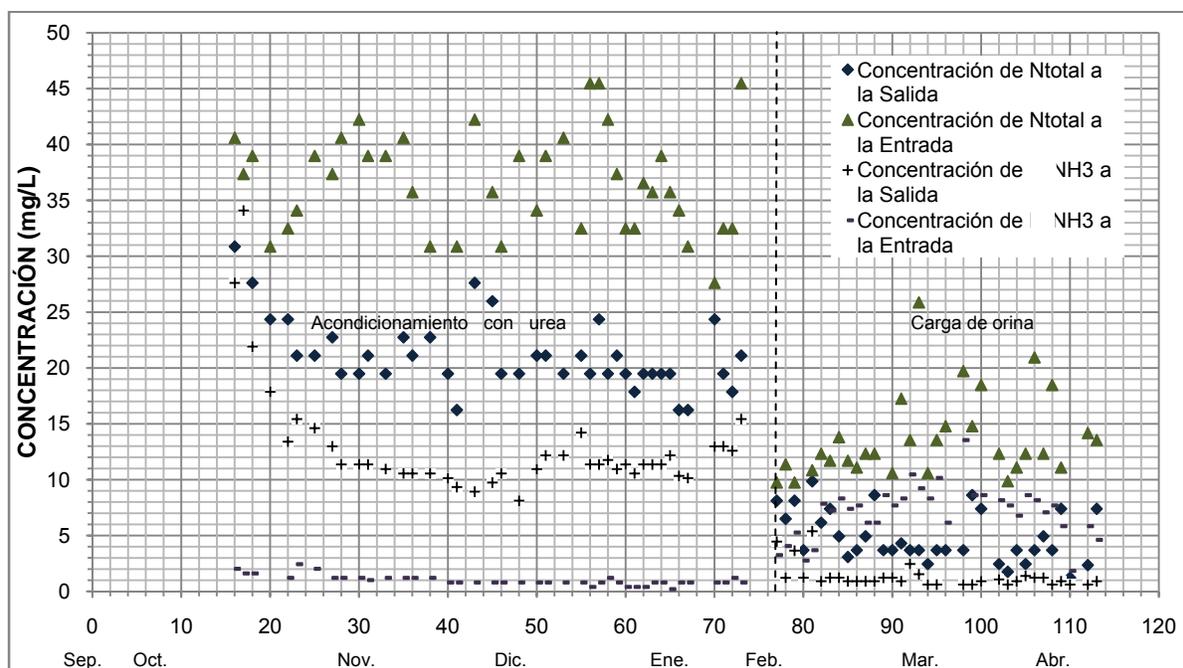


Figura 3.5 Variación de las concentraciones de NTK y  $\text{NH}_3$  durante las pruebas

Durante la operación con orina humana (5 febrero a 8 abril de 2009) los perfiles de concentración de NTK y  $\text{NH}_3$ , tanto a la entrada como a la salida del humedal, presentaron un comportamiento distinto. Los cambios se atribuyen en parte a la disminución de la carga de NTK y las características fisicoquímicas del agua residual utilizada en el estudio (orina humana).

Tomando en cuenta que en la etapa de estabilización se registraron concentraciones residuales de nitrógeno en el efluente ( $21.8 \pm 5.1$  mg NTK/L, Figura 3.5), se decidió en su momento reducir la carga para los experimentos con orina en aproximadamente una tercera parte de la utilizada con urea. De esta manera la concentración promedio de nitrógeno a la entrada del humedal se redujo a  $14.2 \pm 4.8$  mg NTK/L equivalente una carga de  $1.24 \pm 0.46$  g NTK/m<sup>2</sup>·día.



Otro cambio importante fue la concentración de entrada de  $\text{NH}_3$  en la carga de orina,  $7.12 \pm 2.35$  mg  $\text{NH}_3$ -N/L. Ésta es producto de la hidrólisis que experimenta la urea durante el proceso de recolección y almacenamiento de la orina (lo cual no ocurrió durante la operación de la disolución de urea); hidrólisis atribuida a la presencia de la enzima ureasa producida por bacterias que se desarrollan en las líneas de captación de la orina. Esta condición favorece el incremento del pH de la orina almacenada por la formación de  $\text{NH}_3$ , lo cual influye también sobre las condiciones alcalinas del influente, aspecto que será revisado con detalle más adelante.

En términos de concentración, se observa una remoción del contenido de NTK presente en la orina humana del 65.7% registrándose residuales a la salida del humedal de  $4.9 \pm 2.3$  mg NTK/L y de  $1.3 \pm 1.1$  mg  $\text{NH}_3$ -N/L, respectivamente. Cabe señalar que este porcentaje de remoción está influenciado por el efecto de transpiración de la planta acuática, el cual implica una reducción del volumen de agua a la salida del humedal y por lo tanto un efecto de concentración del nutriente en el efluente.

Por otra parte la relación  $\text{NH}_3$ /NTK encontrado en el efluente, la cual nos está indicando que hay mayor concentración de nitrógeno orgánico, se deduce que el contenido de urea presente en la orina, no se hidrolizó por completo durante su paso por el humedal, lo cual puede ser atribuible en parte a la disponibilidad que hay del  $\text{NH}_3$  en el medio (la forma más fácil de asimilar por la planta) entre otras razones como el TRH y la superficie de humedal sembrada.

#### *b) Carga removida y porcentaje de reducción de masa en el efluente de tratamiento*

Otra forma de evaluar el desempeño del humedal es en términos de la carga removida por unidad de superficie del humedal (CR) y el porcentaje de reducción de masa (%RM), que como se mencionó anteriormente (ver sección 3.2.2, pág. 54) elimina el factor transpiración; a continuación se analizan estos resultados.

Durante la operación con orina humana se maneja una carga global promedio de  $1.24 \pm 0.46$  g NTK/ $\text{m}^2$ ·día, la cual presentó variaciones significativas y atribuibles al error experimental en el manejo de la muestra de orina (preparación y alimentación de la solución de orina); a la salida se registró  $0.2 \pm 0.15$  g NTK/ $\text{m}^2$ ·día. Por lo anterior, en términos de la carga de nitrógeno, el humedal logró remover alrededor de 1 g NTK/ $\text{m}^2$ ·día, equivalente a un 84% de remoción de carga de entrada.



En la Figura 3.6 se muestra con mayor detalle el comportamiento del humedal artificial con respecto a la carga removida (CR) de NTK durante la operación con la disolución de urea y con orina humana, respectivamente, esto último discutido en la sección 3.2.2.

En la etapa de acondicionamiento se alimentó una carga promedio de  $2.79 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día, el porcentaje de remoción obtenido fue de 65%.

Durante el primer mes de operación con orina (6-27 febrero de 2009), se alimentó una carga promedio de  $1 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día y se removieron  $0.72 \pm 0.5$  g NTK/m<sup>2</sup>·día, el equivalente a un porcentaje de remoción del 72%. En el segundo y último mes de operación (2 marzo al 8 abril de 2009) el comportamiento fue similar, con una alimentación de  $1.42 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día se obtuvo una remoción de  $1.27 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día, equivalente a 89% de remoción.

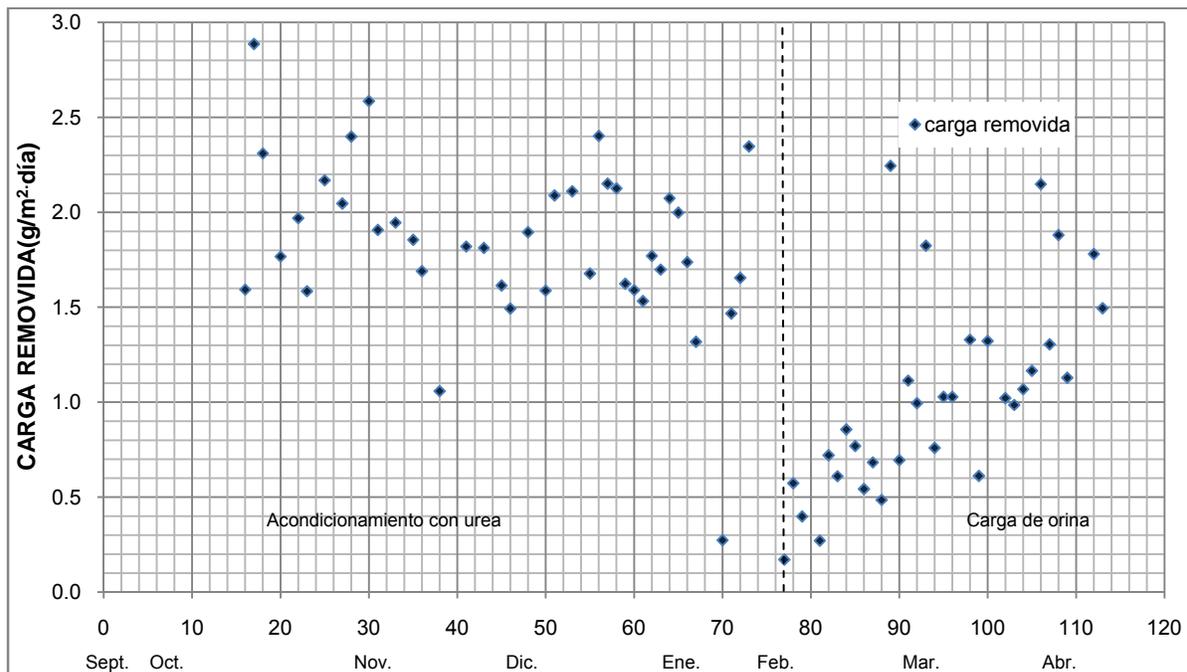


Figura 3.6 Carga removida de NTK por el humedal artificial

En términos de reducción de masa (%RM) el porcentaje logrado en la etapa de acondicionamiento fue de  $64 \pm 15\%$ , los resultados se muestran en la Figura 3.7. Cuando el humedal operó con orina humana, el porcentaje obtenido durante el primer mes de prueba fue de  $68 \pm 21\%$ , para el segundo mes esta reducción de masa mejoró alcanzándose hasta un  $89 \pm 10\%$ .

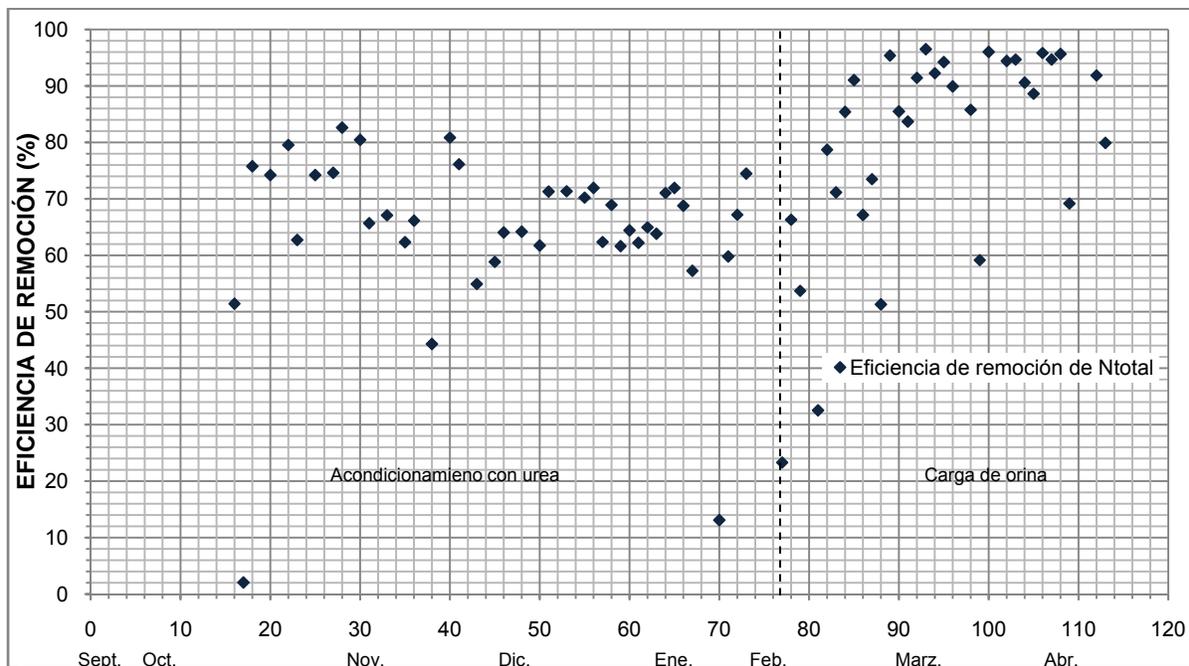


Figura 3.7 Reducción en masa de NTK

El desempeño del humedal en este estudio en términos de la carga removida por unidad de superficie del humedal (72-89%) fue similar al reportado por Sim et al. (2007), 82.11% para un sistema de humedal artificial de flujo superficial horizontal utilizando *Phragmites karka* y *Lepironia articulata* como plantas acuáticas.

En el estudio de un humedal artificial de flujo vertical utilizando *Phragmites australis* como planta acuática (De Feo et al.), para una concentración del influente de 19 mg NTK/L y tiempo de retención de 3 a 7 días, obtuvieron un porcentaje de reducción de masa del 91.4 al 95.8%, respectivamente. En este trabajo los resultados en el porcentaje de reducción de masa fueron menores, para la concentración promedio del influente de 14.16 mg NTK/L, el porcentaje de reducción de masa anduvo entre 68 y 89%.

Por otro lado, en la literatura se observa que al trabajar con concentraciones mayores la eficiencia de remoción disminuye, así An et al., 2008 (humedal artificial de flujo vertical con *Phragmites australis* como planta acuática) y Calheiros et al., 2007 (humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal utilizando *Phragmites australis* como planta acuática) obtuvieron una eficiencia de remoción del 63% y 25%, respectivamente, para una concentración en el influente de  $55.4 \pm 3.4$  mg NTK/L y 143 mg NTK/L, respectivamente.



c) Comportamiento de otras formas de nitrógeno ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) y ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Durante el tratamiento del agua residual además del  $\text{NH}_3$  se dio seguimiento a otras formas de nitrógeno ( $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ) y los ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) con el fin de conocer lo que sucede con otros nutrientes presentes en la orina humana, los resultados se muestran en la Figura 3.8.

En el caso de los iones  $\text{NO}_2^-$ , éstos son sólo un compuesto intermediario que se forma durante el proceso de nitrificación donde bacterias nitrificantes oxidan el  $\text{NH}_3$  a  $\text{NO}_3^-$ . Por lo que, tanto en las cargas de orina como en efluente del humedal, los niveles de concentración fueron bajos ( $<0.1 \text{ mg NO}_2^-$ ) comparados con las demás formas nitrogenadas. Con respecto a los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), en la carga de orina se cuantificó una concentración promedio de  $6.32 \pm 0.9 \text{ mg/L}$  la cual fue mayor a la de salida del humedal ( $2.67 \pm 1.8 \text{ mg/L}$ ), indicando con ello que existe una disminución importante de esta forma nitrogenada, aproximadamente del 57.8%.

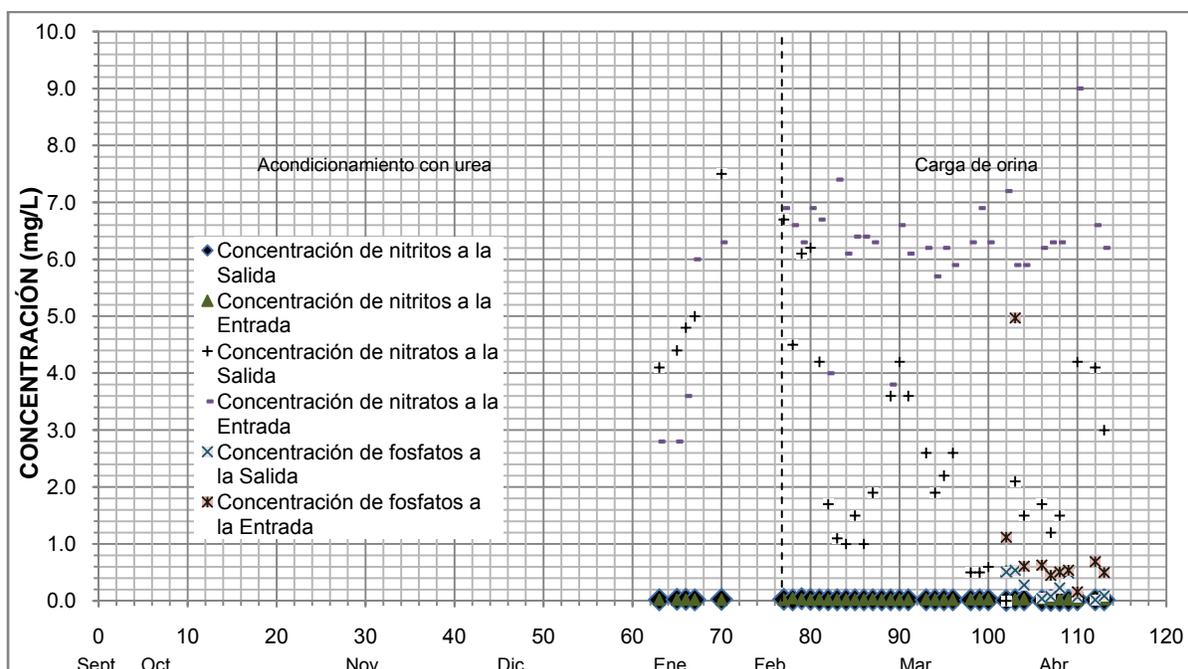


Figura 3.8 Variación de las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  durante las pruebas

Por su parte los ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) también registraron una disminución en su paso por el humedal. Las concentraciones promedio a lo largo de los ensayos con orina a la entrada y a la salida fueron de  $0.62 \pm 0.27 \text{ mg/L}$  y de  $0.24 \pm 0.21 \text{ mg/L}$ , respectivamente.

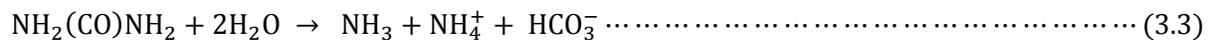


### 3.3.3 Comportamiento del pH y conductividad eléctrica

#### a) Comportamiento del pH

El pH es un factor importante para dar seguimiento porque determinados procesos químicos y bioquímicos solamente pueden tener lugar a un determinado valor. En el caso de las plantas acuáticas éstas se desarrollan y mantienen una actividad metabólica óptima en un intervalo de pH entre 5 – 8 (ver tabla 1.4 del capítulo 1).

Como se mencionó anteriormente, la enzima ureasa (urea amidohidrolasa) hidroliza la urea contenida en la orina a amonio y bicarbonato. Este último compuesto se descompone a ácido carbónico y da origen a una segunda molécula de amonio (Mobely et al., 1989, citado por Uder et al., 2003), dando como resultado un incremento en el pH del medio:



Esta reacción ocurre en los sistemas de captación y recolección de orina, durante su almacenamiento (ver Tabla 3.2 Pág.52) y durante su paso por el humedal artificial.

El interés de dar seguimiento al pH en este trabajo, fue por un lado con el fin de conocer los cambios que experimenta este parámetro durante la operación del humedal y, por otro, valorar la posible afectación del desempeño de las plantas acuáticas durante la operación con orina humana, por las condiciones que presenta la muestra cruda (pH=9.5).

Durante la etapa de estabilización del humedal (operación con la disolución de urea) el pH se comportó de manera estable con un valor de entrada ligeramente alcalino, pH  $7.40 \pm 0.09$ , y a la salida ligeramente ácido, pH  $6.75 \pm 0.10$ , como lo muestra la Figura 3.9.

En esta etapa el pH de entrada corresponde al del agua de la red de suministro de Ciudad Universitaria, con la cual se preparó la disolución de urea. El valor ligeramente ácido de salida se explica debido a que parte del nitrógeno amoniacal derivado de la hidrólisis de la urea es consumido por las plantas principalmente dentro del humedal, evitando así que el pH del agua se incremente y se mantenga cercano a la neutralidad.



A partir de que da inicio la operación con orina humana los niveles de pH en la carga de entrada se incrementaron significativamente registrándose variaciones importantes a lo largo de esta etapa, como se puede apreciar en la gráfica de la Figura 3.9.

El valor promedio de entrada fue de  $8.05 \pm 0.29$ , aproximadamente 1.5 unidades menos que el de la orina cruda, toda vez que esta era diluida con agua de la red para ajustar la carga de NTK correspondiente. El valor máximo registrado en el influente fue 8.64 (23 de febrero de 2009), un pH que de acuerdo a la literatura no es favorable para el desempeño de la planta acuática *Phragmites spp.* (ver tabla 1.4).

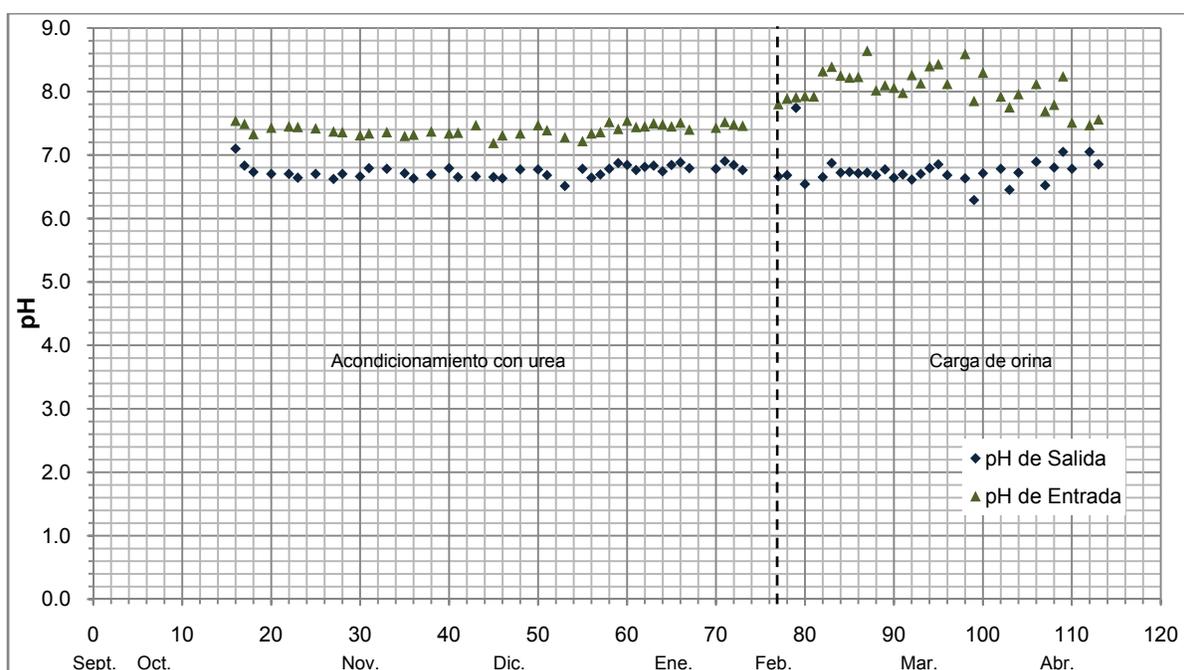


Figura 3.9 Comportamiento del pH durante la operación del HAFSS.

Los valores de pH en el efluente presentaron el mismo comportamiento que en la etapa de estabilización, con un valor promedio de  $6.75 \pm 0.23$ , y un registro máximo de 7.74. El pH de salida siempre fue menor que el de entrada, no obstante que al alimentar el humedal con orina humana este aumentó hasta en una unidad con respecto al pH manejado en el período de estabilización, sin embargo el pH a la salida se mantuvo por debajo de la neutralidad. Estos resultados muestran que en la orina humana, las condiciones de carga ni el pH afectaron el desempeño de las plantas acuáticas.



### b) Conductividad eléctrica

Este es un parámetro indicativo de la hidrólisis que experimenta la urea dentro del humedal ya que los iones  $\text{NH}_4^+$  tienden a aumentar los niveles de conductividad eléctrica. Presentó un comportamiento distinto en las dos etapas de operación del humedal (Figura 3.10).

Durante la alimentación de la disolución de urea (octubre 2008 – enero 2009), los niveles de conductividad del efluente fueron mayores que los del influente, precisamente debido a la hidrólisis de la urea. En la alimentación los niveles mantuvieron un valor promedio de  $537.7 \pm 35.3 \mu\text{S/cm}$ , el cual corresponde a la conductividad del agua de la red utilizada como agua de dilución; en el agua de salida este valor registró un incremento de 100 unidades aproximadamente, obteniéndose en el efluente un promedio  $651.1 \pm 43.3 \mu\text{S/cm}$ .

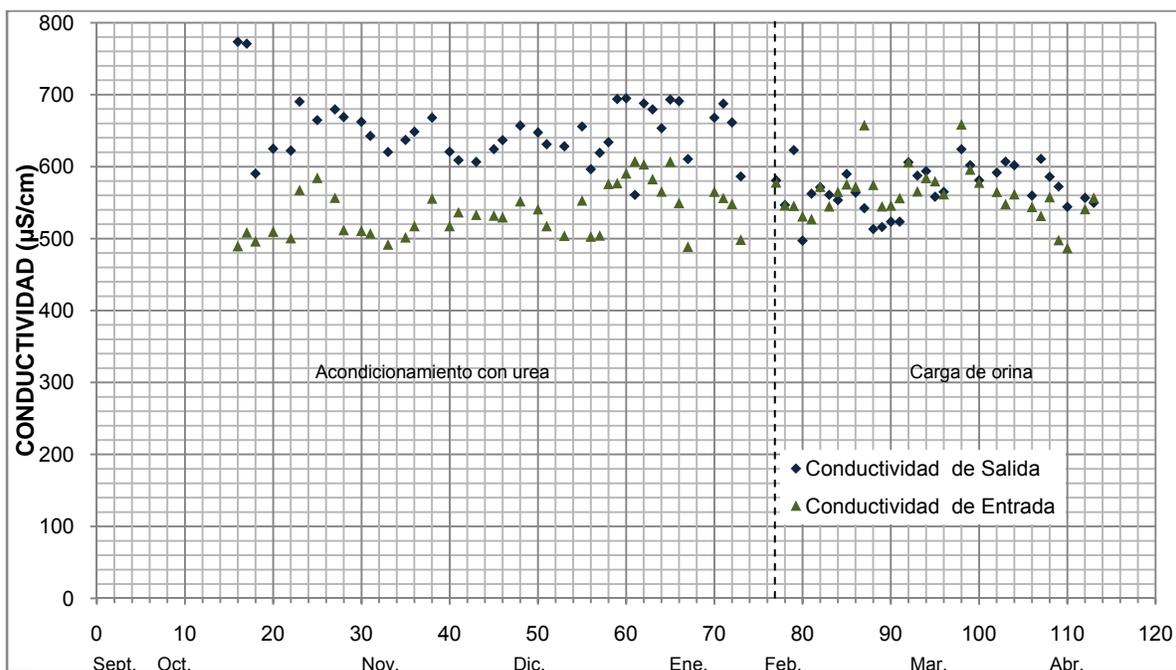


Figura 3.10 Comportamiento de la conductividad eléctrica durante la operación del HAFSS.

Cuando el humedal operó con orina humana, los niveles de conductividad tanto de salida como de entrada, se mantuvieron prácticamente en un mismo nivel,  $562.2 \pm 34.8 \mu\text{S/cm}$  y  $568.6 \pm 32.3 \mu\text{S/cm}$ , respectivamente, y además en un nivel muy cercano al del agua de dilución. Lo anterior se atribuye por un lado a que la orina alimentada presentaba un grado de hidrólisis importante ( $>50\%$ ) y por otro, las concentraciones de  $\text{NH}_3$  eran bajas, comparadas con las obtenidas durante la etapa de estabilización.



### 3.3.4 Censo de plantas

Se realizaron censos los días 9 de enero, 9 de febrero, 27 de marzo, 5 y 17 de abril de 2009, contabilizando ejemplares de plantas delgadas, gruesas y brotes (verdes y secos).

En el último mes de operación con disolución de urea, en un censo realizado el 9 de enero de 2009, se registró un total de 466 plantas en las cinco secciones del humedal con la distribución que se presenta en el gráfico de la Figura 3.11. Con excepción de las secciones 3 y 4, el promedio general es del orden de 100 plantas por sección, destacando en todos los casos en número, los ejemplares verdes y gruesos. Algunos de los brotes no desarrollaban y terminaban por secarse, no obstante la mayoría de ellos cumplía con su ciclo normal hasta alcanzar su estado adulto. Tomando en cuenta el número total de plantas viables (brotes verdes, plantas verdes delgadas y gruesas), la población promedio fue de 80 plantas/m<sup>2</sup>, con un mínimo de 47 plantas/m<sup>2</sup> en la sección 3 y un máximo de 108 plantas/m<sup>2</sup> en la sección 5. Comparado con la población de plantas registrada al inicio de la experimentación (15 de octubre de 2008), el promedio general registró un incremento al pasar de 67 a 80 plantas/m<sup>2</sup>.

Posteriormente, durante la operación del humedal con orina se levantaron cuatro censos, los resultados se presentan en la gráficas de la Figura 3.12.

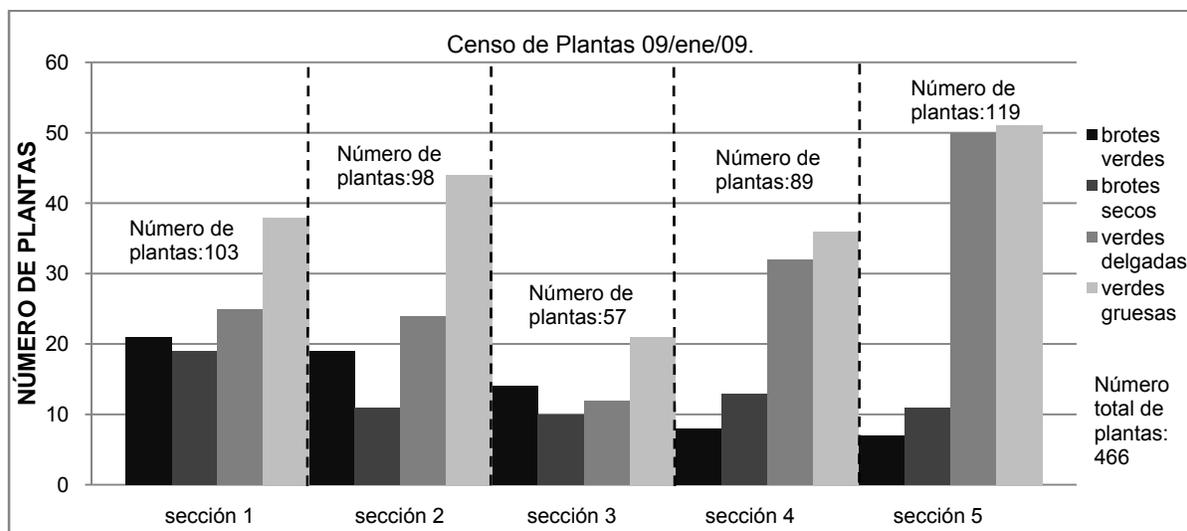


Figura 3.11 Censo de plantas realizado al final de la operación con disolución de urea



Como se observa en la Figura 3.12, durante el tratamiento de la orina humana se registró una disminución considerable del número total de plantas registradas al inicio de esta prueba al pasar de 450 plantas (09/02/2009) a 377 plantas (27/03/2009) y 256 plantas (05/04/2009).

Tomando en cuenta el número de plantas viables (brotes verdes, plantas verdes delgadas y gruesas), la disminución más significativa se tuvo en el número de brotes verdes con un 43% y 53% para las fechas mencionadas, respectivamente. Esto significa que más del 50% de los brotes verdes registrados al inicio de la prueba con orina, no se desarrollaron y se secaron. Esta disminución no se presentó durante la operación de humedal con la disolución de urea, por lo que es probable que se pueda atribuir a algún efecto de los constituyentes de la orina humana, situación que deberá ser investigada en estudios futuros.

En el caso de las plantas verdes delgadas (28%, 60% menos) y las verdes gruesas (2%, 34% menos) también hubo disminución en el número, esto último debido a la poda de plantas que se llevó a cabo los días 27 de marzo, 3 y 10 de abril, debido a que muchas de ellas habían alcanzado su madurez y con el fin de dar oportunidad a que los nuevos brotes se desarrollaran.

La sección 5 presentó la mayor población con 97 plantas verdes en el censo realizado al inicio de la operación con orina, 9 de febrero de 2009. El 27 de marzo y 5 de abril este número decreció paulatinamente debido a que, como se mencionó anteriormente, se podaron una gran cantidad de plantas los días 27 de marzo y 3 de abril que tenían aspecto de haber culminado su periodo de madurez; en estas fechas la sección que presentó mayor población de plantas fue la sección 1 con 84 plantas verdes, respectivamente (ver detalles en Tabla D.7, del Anexo D).

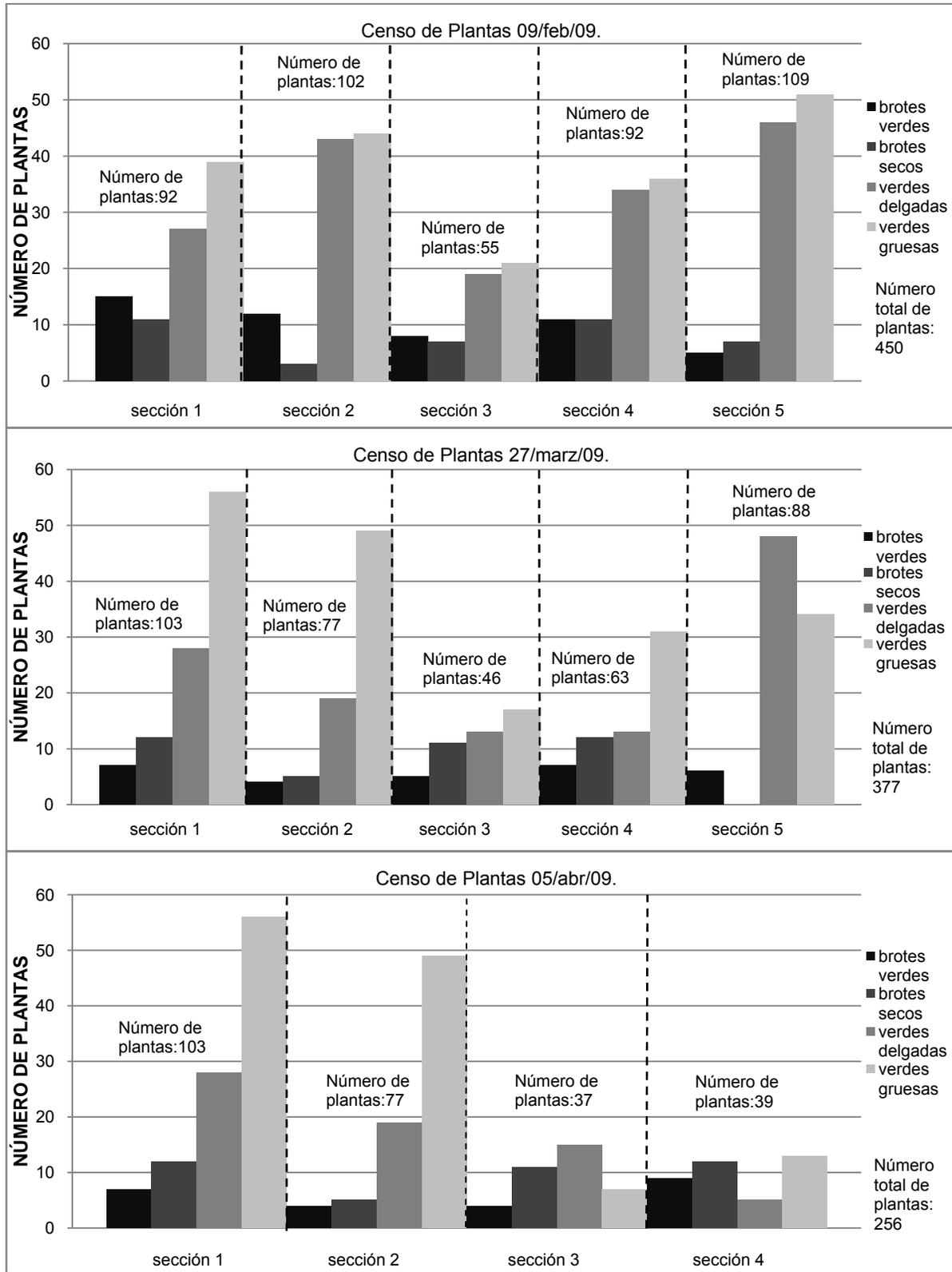


Figura 3.12 Censo de plantas durante la operación con orina humana



### 3.4 Distribución del contaminante en el humedal artificial

#### 3.4.1 Durante la operación del HAFSS con disolución de urea

Para conocer en qué medida se distribuye el contaminante dentro del humedal y las condiciones de estabilidad del sistema, se hicieron mediciones de conductividad en el perfil vertical y a lo largo del humedal. Las mediciones se realizaron sumergiendo la sonda de conductividad cada 5 cm desde la superficie del nivel de agua hasta completar los 40 cm de profundidad en los puntos de muestreo de las secciones del humedal. En el capítulo de metodología se describe con detalle el arreglo experimental de los puntos de muestreo.

Durante la operación del humedal con la disolución de urea, se realizaron un total de doce monitoreos en los meses de octubre (los días 8, 15, 20 y 28), noviembre (los días 5, 11 y 25), diciembre (los días 3, 11, 15 y 26) y enero (el día 5) de 2009. En las gráficas de la Figura 3.13 se grafican los resultados obtenidos de conductividad en función de la sección y la profundidad del tanque para el mes de octubre. En la sección de Anexo D (Tabla D.4) se incluyen los resultados de todas las pruebas realizadas.

La conductividad eléctrica en octubre (Figura 3.13) presentó un comportamiento similar. En el perfil vertical los valores de conductividad registraron variaciones mínimas, entre la superficie (5 cm) y el fondo del tanque (40 cm), indicando que existe un buen mezclado del contaminante debido a las características del flujo dentro del sistema (ascendente-descendente). Por otra parte, las variaciones más significativas ocurren a lo largo del humedal, detectándose un incremento de la conductividad a medida que avanza el fluido por las secciones del tanque. Lo anterior es lógico y es atribuible a la hidrólisis que va experimentando la urea (contaminante) en cada sección. Por ejemplo el 8 de octubre, en la sección 1 (por donde ingresa el agua residual), la conductividad eléctrica a los 5 cm de profundidad fue de 585  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a los 10, 15, 20 y 25 cm tuvo un ligero incremento en el valor (603, 609, 613, 611  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), después de los 30 cm los valores disminuyeron ligeramente para mantenerse prácticamente constantes con un valor promedio de 608  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esta sección es la que mayores variaciones experimenta por el ingreso del contaminante, el promedio global para las diferentes profundidades fue de  $606 \pm 9.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

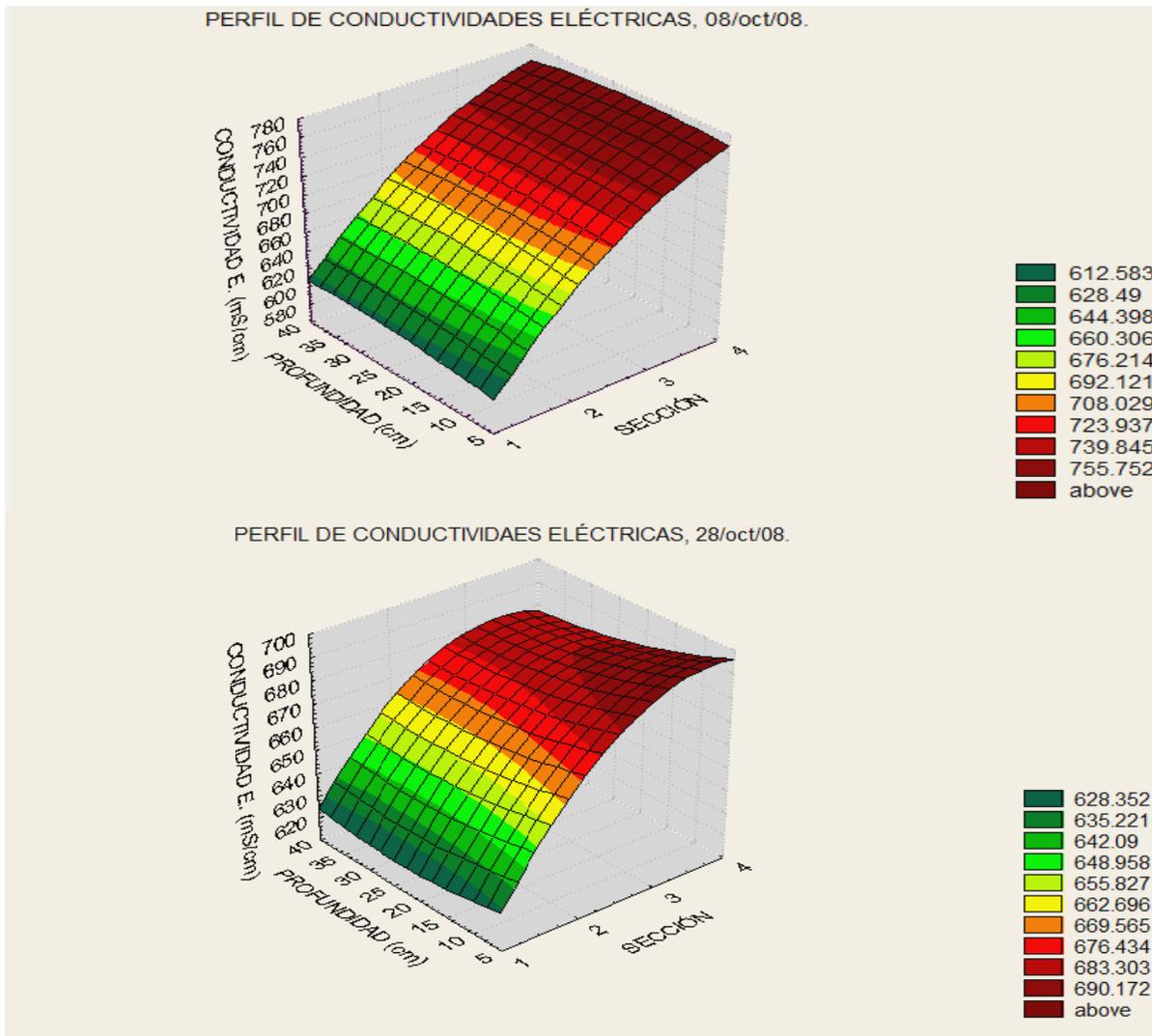


Figura 3.13 Comportamiento de la conductividad eléctrica en el perfil vertical y a lo largo del HAFSS.

En la sección 2, se registró un incremento en los valores de conductividad por efecto de la hidrólisis de urea, sin embargo en el perfil vertical las variaciones fueron mínimas arrojando un valor promedio para las diferentes profundidades de  $680 \pm 1.8 \mu\text{S}/\text{cm}$ . En las secciones 3 y 4 el comportamiento fue similar, se observó un aumento en los niveles de conductividad eléctrica por la hidrólisis del contaminante, pero con mínimas variaciones en el perfil vertical del humedal. La conductividad promedio en estas últimas secciones fue de  $742 \pm 1.5 \mu\text{S}/\text{cm}$  y  $768 \pm 1.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente.



En los meses de noviembre, diciembre y enero el humedal siguió el mismo comportamiento, algunos cambios en los niveles de conductividad se presentaron, debido a las variaciones de carga de nitrógeno durante esta etapa experimental, sin embargo la tendencia fue muy similar.

Por los resultados obtenidos en el comportamiento de la conductividad, tanto en el perfil vertical como en la sección longitudinal, se infiere que existe una buena distribución del contaminante dentro del humedal, provocada por el movimiento ascendente-descendente del agua dentro del sistema. Por otra parte, la urea experimenta la reacción de hidrólisis en diferentes grados durante su paso por el humedal, alcanzándose en mayor nivel en las últimas secciones del tanque (sección 3 y 4), lo cual es lógico debido al mayor tiempo de retención hidráulico (TRH). Finalmente también se puede deducir que el humedal alcanzó las condiciones de estabilidad en su operación.

### **3.4.2 Durante el tratamiento de orina humana**

Durante el tratamiento de la orina humana se dio seguimiento a la conductividad eléctrica y al pH, en este caso se hicieron monitoreos en marzo y abril de 2009; uno y dos meses después de iniciada la operación con esta agua residual. En las gráficas de las Figuras 3.14 y 3.15 se muestran los resultados correspondientes al mes de marzo; en la sección de Anexo D (Tabla D.5) se da la información complementaria al respecto.

La conductividad eléctrica mostró un comportamiento similar al que se tuvo con la disolución de urea a lo largo de las secciones del tanque, con incrementos graduales en los valores hasta alcanzar un nivel de estabilidad como se observa en la Figura 3.14. Sin embargo, en el perfil vertical la conductividad mostró variaciones significativas con respecto a la profundidad del volumen de agua en el humedal.

En el monitoreo del 5 de marzo de 2009, en la sección 1 del humedal el valor promedio para las diferentes profundidades fue de  $580 \pm 26.9 \mu\text{S}/\text{cm}$ , en las siguientes secciones las variaciones de conductividad fueron del orden de  $6 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Para el 17 de marzo, el comportamiento siguió una tendencia similar, en la sección 1 el promedio fue de  $595 \pm 9.4 \mu\text{S}/\text{cm}$ , con variaciones de  $3 \mu\text{S}/\text{cm}$  en las secciones subsiguientes. Lo anterior se puede atribuir a diferencias de densidad de la solución de orina utilizada, en la que se tiene un mayor número y concentración de constituyentes comparado con la disolución de urea.

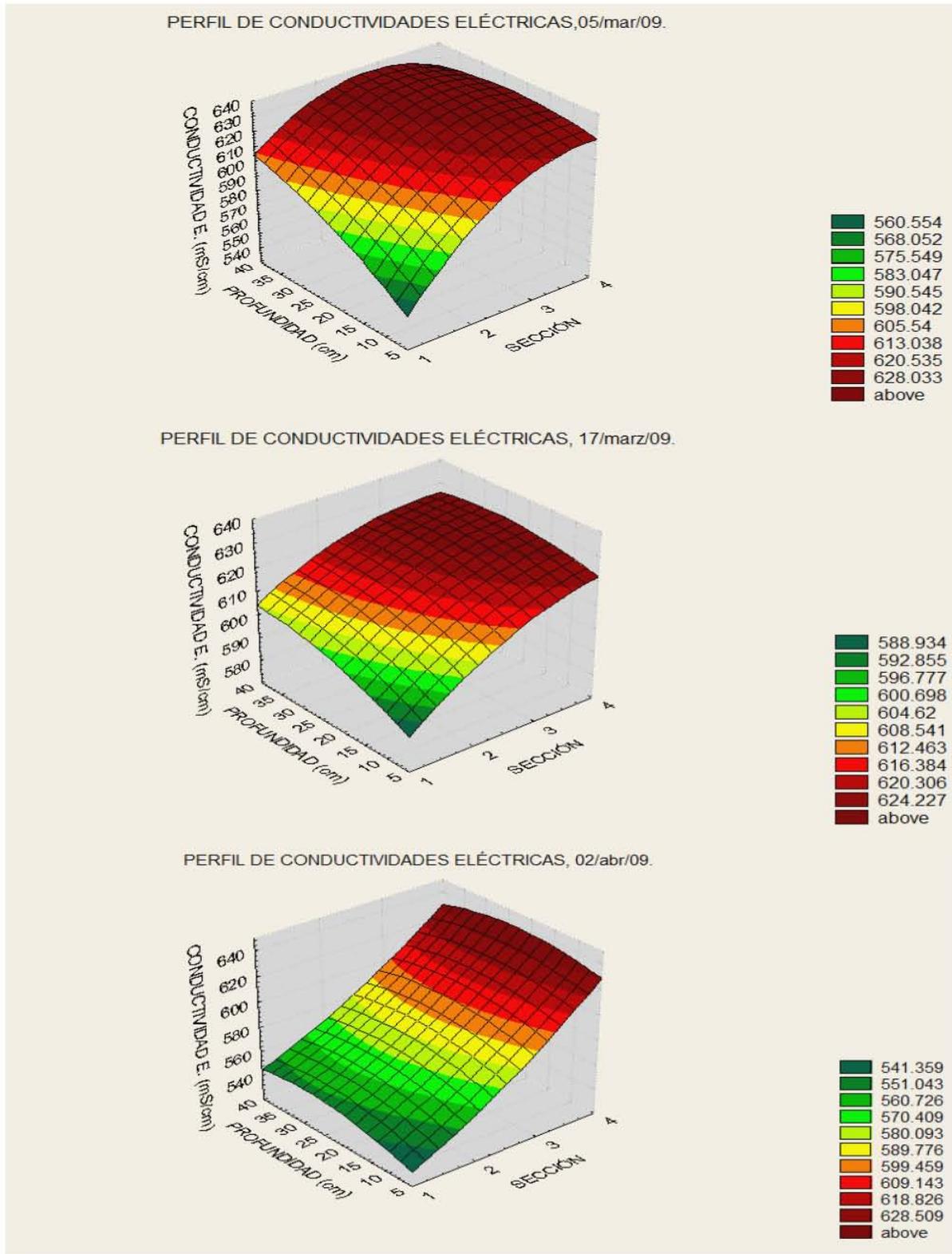


Figura 3.14 Comportamiento de la conductividad eléctrica en el en el perfil vertical y a lo largo del HAFSS durante el tratamiento de la orina humana.



En las secciones 2 y 3 tienden a ser menores las variaciones, por lo que se supone una mayor homogenización en la distribución de los contaminantes. En general, los resultados del comportamiento de la conductividad eléctrica mostraron por un lado la hidrólisis que experimenta la urea dentro del humedal y, por otro que existe una buena distribución del contaminante a lo largo del sistema.

El pH es un parámetro al que se dio seguimiento con especial atención en esta etapa experimental por las condiciones propias de la orina cruda (pH alto, 9.5) y su posible influencia sobre el desempeño del humedal.

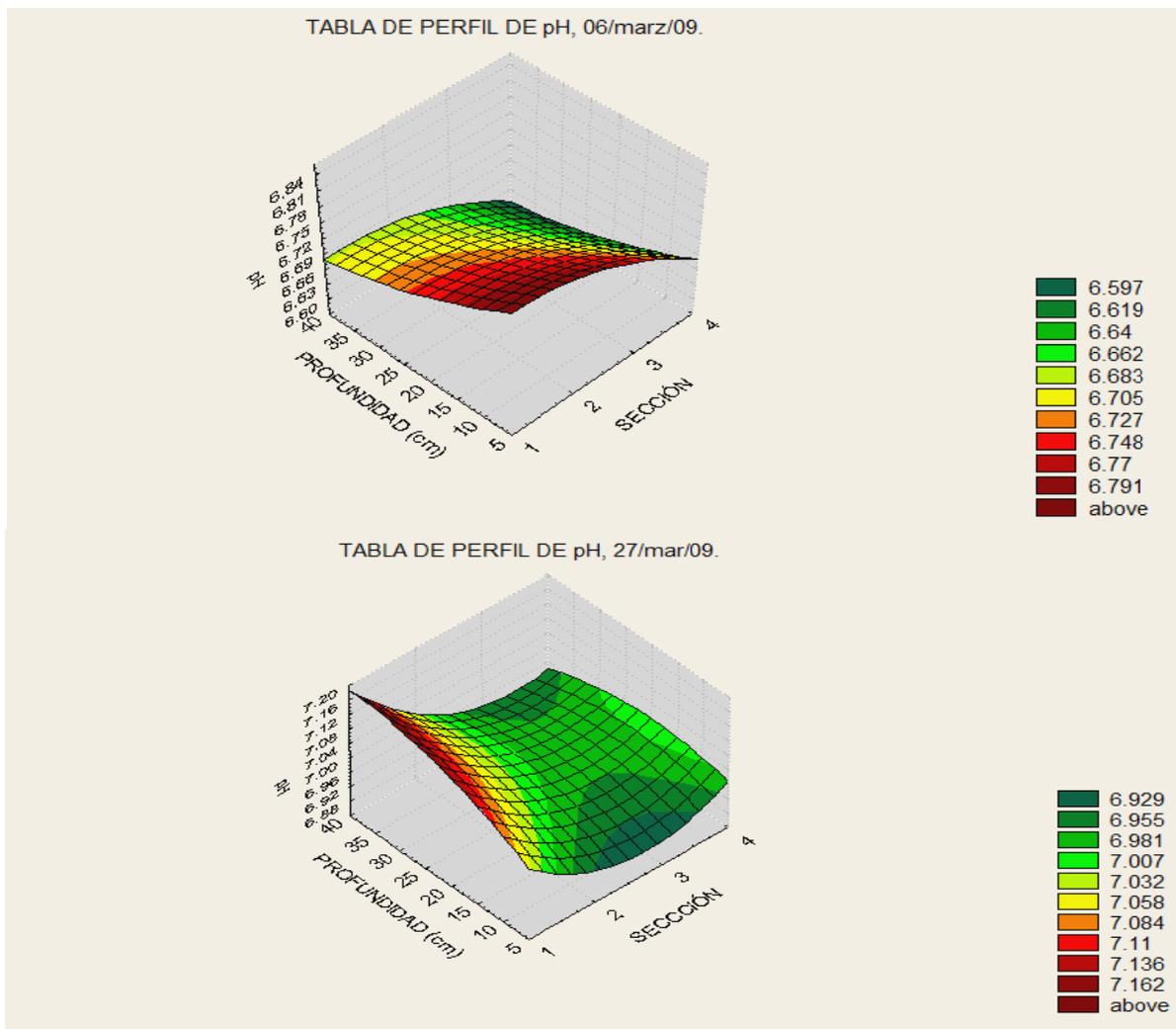


Figura 3.15 Comportamiento del pH en el perfil vertical y a lo largo del HAFSS.

Cabe recordar que la solución de orina diluida que se alimenta al humedal, ingresa con un valor promedio de pH de  $8.05 \pm 0.29$  el cual tiende a experimentar cambios por efectos de dilución y por



la disminución de los niveles de concentración a lo largo del humedal debido a la asimilación de los iones amonio por las plantas acuáticas. Los resultados del monitoreo del pH en el humedal se describen gráficamente en la Figura 3.15.

En general los cambios de pH que ocurren tanto en el perfil vertical como a lo largo del humedal son mínimos. Lo que se observa en la Figura 3.15 es que el pH tiende a disminuir con la profundidad del volumen de agua y en la medida que el fluido avanza en las secciones del humedal, registrándose los valores más altos a los 5 cm ( $6.77 \pm 0.11$ ), y los más bajos a los 40 cm ( $6.64 \pm 0.06$ ); en ambos casos el valor corresponde al promedio de las cuatro secciones, para el mismo nivel de profundidad en los cuatro puntos de muestreo del 6 de marzo.

Un aspecto a destacar es que en todas las secciones el valor de pH se encontró cercano y por debajo de la neutralidad lo cual indica que la carga de la orina humana no fue un factor importante que contribuyera a aumentar el valor de dicho parámetro, a pesar de que el valor promedio de entrada fue de  $8.05 \pm 0.29$ .

### **3.5 Comportamiento de parámetros ambientales**

Los parámetros ambientales fueron medidos en su mayoría entre las 11:00 y 15:00 horas del día, con algunas excepciones donde la medición se realizó después de estas horas. A continuación se hace una descripción general de su comportamiento mostrado durante la operación del humedal; los detalles se pueden consultar en la Tabla D.6 de la sección de Anexo D.

#### **3.5.1 Temperatura ambiente (máxima y mínima) y del agua**

##### **3.5.1.1 Temperatura máxima del ambiente**

La Figura 3.16 muestra los perfiles de temperatura registrados a lo largo de toda la operación de humedal. Durante la mayor parte de experimentación la temperatura presentó las variaciones estacionales normales, un decremento hacia los meses de diciembre, enero y un repunte a finales del mes de febrero y principios de marzo.



De manera general, la temperatura máxima del ambiente se mantuvo en la mayor parte de los días entre los 20°C y los 25°C en las estaciones de otoño e invierno, hacia al final del período de experimentación se observa un incremento por arriba de los 25 °C.

En otoño (datos 1 al 58 de la Figura 3.16) el termómetro de máximos y mínimos, registró valores de temperatura en la escala de máximos de 16 a 27°C, con una media global de  $21.8 \pm 2^\circ\text{C}$ . En invierno (datos 59 al 102) la temperatura máxima del ambiente se mantuvo muy parecida a la de la estación anterior, entre los 17 °C y 27 °C, con promedio de  $23.5 \pm 2^\circ\text{C}$ . Hacia el final de la experimentación del humedal e inicio de la primavera, se observa claramente una tendencia al aumento de la temperatura (datos del 103 en adelante), el termómetro registró temperaturas entre 24 y 31°C, manteniéndose en un promedio de  $27.7 \pm 2^\circ\text{C}$ . Estos cambios de temperatura constituyen un parámetro importante por su efecto en la actividad metabólica de las plantas acuáticas y en los niveles de transpiración como se discutió en la sección 3.3.1 de este documento.

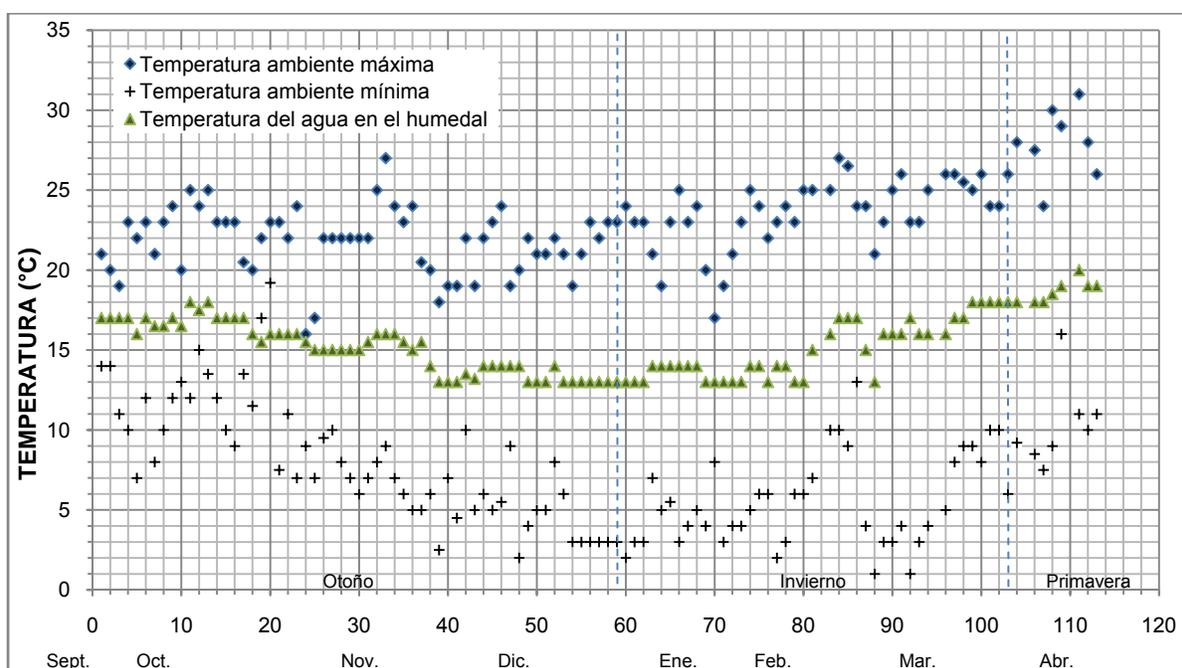


Figura 3.16 Temperatura ambiente máxima y mínima, y temperatura del agua en el HAFSS.

### 3.5.1.2 Temperatura mínima del ambiente

En la misma Figura 3.16, se da cuenta de lo ocurrido con la temperatura ambiente mínima en donde se observa de manera más notable los cambios estacionales. Durante la transición entre las



estaciones de otoño a invierno hubo un descenso gradual de los valores de temperatura mínima. Por ejemplo a principios del otoño, el termómetro en la escala de mínimos registró en la mayor parte de los días temperaturas  $<15^{\circ}\text{C}$ , y hacia el final llegó a valores por debajo de los  $5^{\circ}\text{C}$ ; durante este periodo el valor más alto de temperatura fue de  $19.2^{\circ}\text{C}$  y el mínimo de  $2^{\circ}\text{C}$ , con un promedio global de  $8.2 \pm 4^{\circ}\text{C}$ .

Como era de esperarse en invierno la temperatura se mantuvo en los niveles más bajos, con un registro máximo de  $13^{\circ}\text{C}$  y un mínimo de  $1^{\circ}\text{C}$ ; la media para esta estación fue de  $5.4 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Hacia el último periodo de operación del humedal, que abarcó a partir del 21 de marzo y principios de abril, la temperatura mínima fue aumentando gradualmente (datos 103-113), hasta alcanzar los niveles de  $16^{\circ}\text{C}$ .

### **3.5.1.3 Temperatura del agua**

La temperatura del agua dentro del humedal muestra una tendencia similar a la temperatura ambiente acorde a los cambios estacionales, aunque en este caso las mediciones presentaron un menor grado de dispersión como se puede observar en la gráfica de la Figura 3.16.

Al inicio de la operación del humedal la temperatura del agua, la cual fue medida con un termómetro de mercurio con cubierta de aluminio, registró un valor promedio de  $17^{\circ}\text{C}$  el cual se mantuvo durante los primeros 20 días, posteriormente empezó a descender en forma gradual hasta llegar a los  $13^{\circ}\text{C}$ . Esta última se mantuvo con mínimas variaciones ( $13.4 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) durante 85 días de operación, del 19 de noviembre al 11 febrero. Después de esta fecha comenzó a ascender nuevamente hasta alcanzar un valor máximo de  $20^{\circ}\text{C}$  y un promedio global de  $17 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ .

Los valores registrados de temperatura del agua no tuvieron cambios significativos o drásticos debido a que el material de soporte brinda hasta cierto punto protección térmica, y debido también a que el humedal utilizado en esta tesis, es de flujo sub-superficial y se encuentra cubierto con techo de láminas transparentes y cortinas de plástico translúcido que hace que el viento y los rayos solares no afecten directamente en la disminución o aumento, respectivamente de la temperatura del agua.

### **3.5.1.4 Luminosidad**

La intensidad de luz a lo largo del período de experimentación se comportó en término general de manera uniforme aunque con algunas fluctuaciones (Figura 3.17). Por ejemplo en otoño la mayor



incidencia de valores de luminosidad se encontró entre 1200 y 12690 luxes, en invierno entre 2007 y 19700 luxes y parte de primavera entre 7580 y 10360 luxes. Realmente fueron pocos los valores de luminosidad que se estuvieron dentro de estos límites, el más alto que se registró en otoño fue de 72700 luxes, en invierno de 68400 luxes y primavera 22410 luxes, en la Figura 3.17 se observa que en invierno la radiación emitida por el sol fue ligeramente superior a la registrada en otoño, en los últimos puntos de la serie se observa un crecimiento en la intensidad de este parámetro.

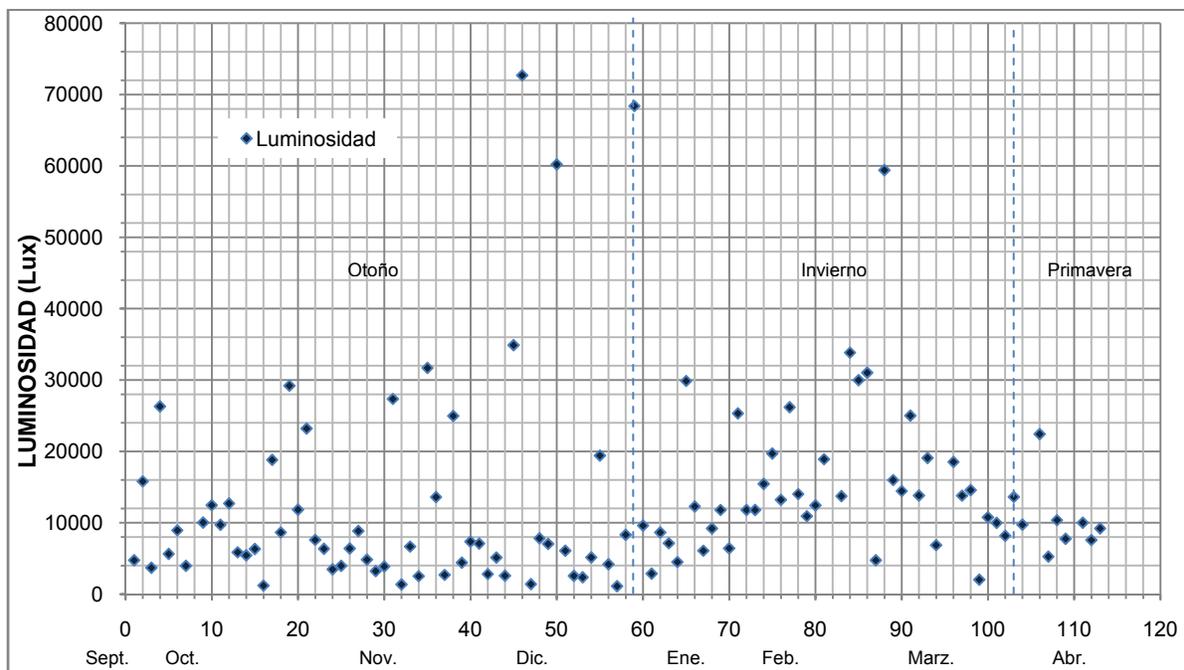


Figura 3.17 Luminosidad

### 3.5.1.5 Humedad relativa (HR)

La humedad relativa es una medida del contenido de humedad del aire y es útil como indicador de la evaporación, transpiración y probabilidad de lluvia convectiva. No obstante, los valores de humedad relativa dependen fuertemente de la temperatura del momento. En este trabajo la humedad relativa fue monitoreada únicamente como un parámetro ambiental de referencia y para establecer una posible relación con los niveles de transpiración de las plantas acuáticas. Se buscó que la mediciones se hicieran en un mismo intervalo de tiempo (entre 11:00 am y 15:00 pm).

Los resultados del monitoreo de este parámetro se resumen en la Figura 3.18. La humedad relativa registró niveles más altos (81%) al arranque de la operación del humedal y una tendencia a la baja



durante el tiempo que duró la experimentación, este parámetro cuyas mediciones manifestaron una alta variación, ya que como se mencionó es una variable que depende de la temperatura la cual mostró también una variabilidad importante (ver Figura 3.16).

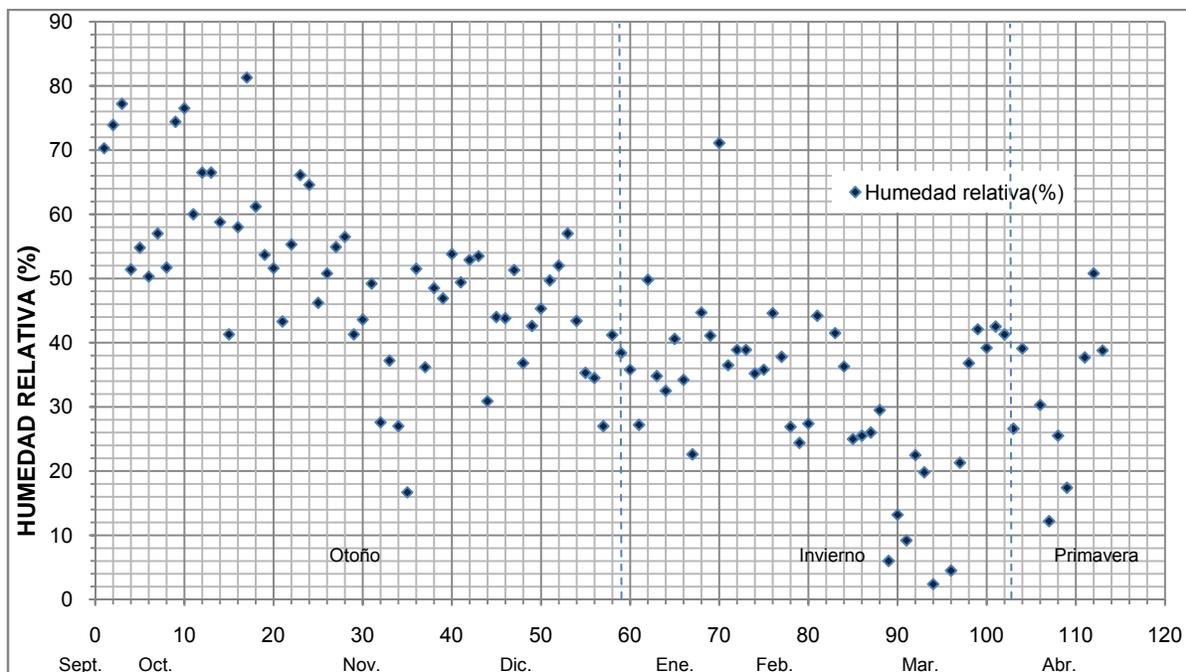


Figura 3.18 Humedad relativa.

En el periodo que comprende la estación de otoño (datos 1-58) se registró el valor máximo de humedad relativa (81.3%), con un mínimo de 16.7%; la media global fue de  $50.8 \pm 13.4\%$ . En invierno (datos 59-102) la humedad relativa descendió notablemente obteniéndose una máxima de 71.1% y una mínima de 2.4%; el promedio general para este periodo fue de  $32 \pm 13\%$ . Finalmente los valores más bajos de humedad relativa fueron registrados al final de la etapa de operación al inicio de la primavera. En esta etapa el humedal operó bajo condiciones de humedad relativa máxima de 50.8% y una mínima de 12.2%, el promedio  $30.9 \pm 12$ . Estas últimas condiciones de humedad relativa coinciden y se relacionan directamente con la mayor temperatura del ambiente y los máximos niveles de transpiración registrados durante toda la operación del humedal.



# CONCLUSIONES



## Conclusión general

Se comprueba la hipótesis planteada en este trabajo que, mediante el humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS) conteniendo *Phragmites spp* como planta acuática, es posible llevar a cabo la remoción del nitrógeno presente en una corriente de orina humana separada en un proceso continuo.

El nitrógeno contenido en la orina humana, en forma de nitrógeno orgánico (ureico), amoniacal ( $\text{NH}_3$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), es transformado dentro del humedal y es asimilado por *Phragmites spp*. Tomando en cuenta las eficiencias de remoción obtenidas y el nivel de transpiración que mantuvieron las plantas acuáticas durante la operación del humedal, se concluye que la orina humana no afectó el desempeño de *Phragmites spp* bajo las condiciones de carga y flujo experimentadas.

## Conclusiones específicas

1. La orina humana tiene las características fisicoquímicas de una corriente recolectada y almacenada bajo condiciones no estériles. Un pH alcalino de 9.5 el cual se atribuye a la hidrólisis de la urea a amoníaco promovida por la actividad microbiana. La mayor parte del nitrógeno en la muestra de orina se encontró en forma de nitrógeno amoniacal, cuya concentración fue aumentando con el tiempo de almacenamiento; después de 16 días de almacenada la orina, 82% de la urea había sido hidrolizada (4984 mg  $\text{NH}_3\text{-N/L}$ , 1036 mg N-orgánico/L, 6020 mg NTK/L). La concentración de nitrógeno estuvo dentro de lo reportado en la literatura para este tipo de corriente separada.

De acuerdo con los valores de  $\text{DBO}_5$  (4800 mg/L) y la relación  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  de 0.61, se concluye que más del 60% de la materia presente en la orina humana es biodegradable, lo cual justifica el uso de un sistema biológico para su tratamiento.

2. De la etapa de estabilización del modelo se concluye que, el HAFSS operó en modo continuo durante cuatro meses con disolución artificial (con urea) alcanzándose las condiciones de estabilidad del sistema. Con cargas de nitrógeno de  $2.79 \pm 0.4$  g NTK/m<sup>2</sup>·día, el humedal indicó un buen desempeño lográndose eficiencias de remoción de nitrógeno de 64.5%. Durante esta



etapa fue posible constatar la hidrólisis que experimenta la urea dentro del humedal y la asimilación del  $\text{NH}_3$  por *Phragmites spp.*

3. Para las pruebas de tratabilidad con orina humana se redujo la carga de nitrógeno a  $1.24 \pm 0.5$  g NTK/ $\text{m}^2$ -día ( $14.2 \pm 4.76$  mg NTK/L) para optimizar la operación del HAFSS. El humedal artificial tuvo un buen desempeño durante los 2 meses de operación con orina humana, de acuerdo con las remociones de nitrógeno y con los niveles de transpiración experimentados por las plantas acuáticas.
4. El desempeño del humedal durante la etapa de tratamiento de la orina humana se evaluó en términos de la carga removida por unidad de superficie del humedal (CR) y por el porcentaje de reducción de masa (%RM). Durante el primer mes de operación (6-27 febrero de 2009), se logró una remoción del 72% de la carga de nitrógeno ( $1 \pm 0.4$  g NTK/ $\text{m}^2$ -día). En el segundo mes de operación (2 marzo al 8 abril) las eficiencias de remoción promedio fueron hasta 89% de la carga de nitrógeno alimentado ( $1.42 \pm 0.4$  g NTK/ $\text{m}^2$ -día). En términos de reducción de masa, las remociones logradas fueron 68 y 89 %, respectivamente. Se obtuvieron mayores eficiencias de remoción al inicio de la primavera.
5. En cuanto a la distribución del contaminante (nitrógeno) en el perfil vertical y a lo largo de la sección del HAFSS, por el comportamiento observado de la conductividad eléctrica, se concluye que existe una buena distribución dentro del sistema y que la urea experimenta la reacción de hidrólisis en diferentes grados durante su paso por el humedal.

Finalmente, se concluye que los humedales artificiales de flujo sub-superficial (HAFSS) son una alternativa para dar tratamiento a corrientes de orina humana separada.



# ANEXO A



## A.1 Plantas de tratamiento de aguas residuales en México basadas en humedales artificiales

Tabla A.1 Plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación por estado (Tabla adaptada de CONAGUA, 2007).

Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad Instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)	Cuerpo receptor o Reúso	Observaciones
Asientos, Ags.	Pilotos	Pilotos	Humedal	4	2.5	Arroyo el Ranchito	Inició operación en 2002
Rincón de Romos, Ags.	Mar Negro	Mar Negro	Humedal	1.8	0.8	Río San Pedro	
San José de Gracia, Ags.	Congoja, LA	La Congoja I	Humedal	1.4	0.1	Arroyo sin nombre	
Trinitaria, LA, Chis.	Trinitaria, LA	La Trinitaria	Rafa, Wasb + Humedal	7.5	7.5	Sumidero San Francisco	
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	Jobo, EL	El Jobo	Humedal	5	5	Infiltración al subsuelo	En operación dos módulos
Allende, Chih.	Agua fría alfareña	Agua fría	Sedimentación + Humedal	1	1	Río Parral	Inició operación en 1995 / requiere rehabilitación
Allende, Chih.	Talamantes de abajo	Talamantes	Sedimentación + Humedal	1.1	1.1	Arroyo local	
Balleza, Chih.	Ranchito de San Juan	Ranchito de San Juan	Sedimentación + Humedal	0.5	0.5	Arroyo el Molino	
Bocoyna, Chih.	Bocoyna	Bocoyna	Sedimentación + Humedal	2.7	0.1	Río Bocoyna	
Chinipas, Chih.	Chinipas de Almada	Chinipas	Sedimentación + Humedal	3	2	Río Chinipas	
Guazapares, Chih.	Temoris	Temoris	Sedimentación + Humedal	2.5	1.5	Arroyo Camposanto	
Maguarichi, Chih.	Maguarichi	Maguarichi	Humedal	2	0.6	Río Oteros	
Namiquipa, Chih.	Adolfo Ruiz Cortínez (providencia)	Adolfo Ruiz Cortínez	Sedimentación + Humedal	1.1	1	Arroyo de Teseachi	
Rosales, Chih.	Exhacienda Delicias	Exhacienda de Delicias	Sedimentación + Humedal	2	1.5	Río San Pedro	
San Francisco de Borja, Chih.	San Francisco de borja	San francisco de Borja	Sedimentación + Humedal	2.5	2	Riego agrícola	
Santa Isabel, Chih.	San Miguel de los Anchondo	Santa Isabel	Sedimentación + Humedal	1.2	0.8	Río Santa Isabel	
Urique, Chih.	San Rafael	San Rafael "norte"	Sedimentación + Humedal	2.5	2.3	Arroyo local	Inició operación en 2005
Urique, Chih.	San Rafael	San Rafael "sur"	Sedimentación + Humedal	2.5	1.5	Arroyo local	Inició operación en 2005
Urique, Chih.	Urique	Urique	Sedimentación + Humedal	2.1	1.8	Río Urique	Inició operación en 2005
Uruachi, Chih.	Uruachi	Uruachi	Sedimentación + Humedal	1	0.9	Arroyo local	
Zapopan, Jal.	Primavera, LA	La Primavera	Humedal	2	2	Arroyo las Tortugas/Salado/ Ameca	
Teotihuacan, Méx.	Teotihuacan de Arista	Escuela secundaria "Justo Sierra"	Rafa, Wasb + Humedal	2	0.7		Reportada en 2005
Zacazonapan, Méx.	Zacazonapan	Zacazonapan	Humedal	7	5	Arroyo Zacazonapan	
Cuitzeo, Mich.	Cuitzeo del Porvenir	Cuitzeo	Humedal	25	25	Lago Cuitzeo	Requiere rehabilitación
Erongaricuario, Mich.	Erongaricuario	Erongaricuario	Humedal	6	6	Lago de Pátzcuaro	Proyecto de la planta se realizó con APAZU y la construyó el IMTA



Quiroga, Mich.	Santa Fe de la Laguna	Santa Fe	Humedal	3	2.5	Lago de Pátzcuaro	Planta construida por el IMTA
Tzintzuntzan, Mich.	Cucuchucho (San Pedro Cucuchucho)	Cucuchucho	Humedal	1	0.6	Lago de Pátzcuaro	Planta construida por el IMTA
Amatlán de cañas, Nay.	Estancia de los López	Estancia de los López	Humedal	4.7	2	Dren	Inició operación en 1999
Ixtlan del Río, Nayarit	Mexpan	Mexpan	Humedal	5.9	1.5	Arroyo	Inició operación en 1999
San blas, Nay.	Santa Cruz de Miramar	Santa Cruz de Miramar	Humedal	6.2	1.5	Estero	Construida en 2002
Linares, N.L.	Linares	Río verde	Humedal	5	5	Acequia de riego	
Abejones, Oax.	Abejones	San Miguel Abejones	Humedal	2	0.3	Río Abejones	Inició operación en 2004
Concepción Papalo, Oax.	Concepción Papalo	Concepción Papalo	Humedal	5	3		Inició operación en 2007
Espinal, Oax.	Espinal	El Espinal	Humedal	12	12	Río los Perros	En proceso segunda etapa para incrementar el gasto a 18 L/s.
Heroica ciudad de Ejutla de Crespo, Oax.	Heroica ciudad de Ejutla de Crespo	Ejutla	Humedal	5	2	Río Ejutla	Inició operación en 2003
Nazareno Etlá, Oax.	Nazareno Etlá	Nazareno	Humedal	4	4	Arroyo	Inició operación en 2003
Reforma, Oax.	Reforma	La Reforma	Humedal	5	2	Arroyo	Inició operación en 2003
San Andrés Huayapam, Oax.	San Andrés Huayapam	San Andrés Huayapam	Humedal	3.3	3.3	Río Huayapan	Inició operación en 2002
San Andrés Zautla, Oax.	San Andrés Zautla	San Andrés Zautla	Humedal	6	6	Río Atoyac	
San Blas Atempa, Oax.	Santa Rosa (Santa Rosa de lima)	Santa Rosa	Humedal	4.2	3		Inició operación en 2005
San Cristóbal Lachirioag, Oax.	San Cristóbal Lachirioag	Lachirioag	Humedal	5	3		Inició operación en 2007
San Dionisio Ocotepéc, Oax.	San Dionisio Ocotepéc	San Dionisio Ocotepéc	Humedal	6	6	Río San Dionisio	Inició operación en 2002
San Francisco Telixtlahuaca, Oax.	San Francisco	Telixtlahuaca	Humedal	4	4		
San Juan Bautista Cuicatlán, Oax.	San Juan Bautista Cuicatlán	San Juan Bautista Cuicatlán	Humedal	7	7	Río Chiquito	
San Lucas Quiavini, Oax.	San Lucas Quiavini	San Lucas	Humedal	3.5	3	Arroyo	
San Pablo Huitzo, Oax.	San Pablo Huitzo	San Pablo Huitzo	Humedal	3.6	1.5	Arroyo	
San Pablo Villa de Mitla, Oax.	San Pablo Villa de Mitla	Villa de Mitla	Humedal	9	9	Río Salado	Primera etapa
San Pedro Mixtepec - Distr. 22, Oax.	Puerto Escondido	Puerto Escondido	Humedal	15	7		Se rehabilitó
San Pedro Mixtepec - Distr. 22, Oax.	San Pedro Mixtepec - Distr. 22	San Pedro Mixtepec	Humedal	5	3		Inició operación en 2007
San Pedro Tapanatepec, Oax.	San Pedro Tapanatepec	San Pedro Tapanatepec	Humedal	3.3	3.3		Se rehabilitó en 2007 e inició operación en agosto de 2007
San Pedro Yolox, Oax.	San Pedro Yolox	San Pedro Yolox	Humedal	4	3		Inició operación en 2007
San Sebastián Tutla Oax.	San Sebastián Tutla	San Sebastián Tutla	Humedal	10	4	Riego / Río Salado	Requiere rehabilitación y ampliación



Santa Ana del Valle, Oax.	Santa Ana del Valle	Santa Ana del Valle	Humedal	5	3	Río Salado	Inició operación en 2004
Santa Lucía del Camino Oax.	San Francisco Tutla	San Francisco Tutla	Humedal	3	3	Río Tutla	Inició operación en 2002
Santa María Guelace, Oax.	Santa María Guelace	Santa María Guelace	Humedal	5	3		Inició operación en 2007
Santa María Huatulco, Oax.	Santa María Huatulco	Huatulco	Humedal	6	6	Río sin nombre	
Santiago Camotlán, Oax.	Santiago Camotlán	Santiago Camotlán	Humedal	1.1	1	Río Camotlán	
Santiago Chazumba, Oax.	Santiago Chazumba	Santiago Chazumba	Humedal	3.9	3	Río Grande	Inició operación en 2004
Santiago Tilantongo, Oax.	Santiago Tilantongo	Santiago Tilantongo	Humedal	5	2		Inició operación en 2007
Santo Domingo Tonalá, Oax.	Santo Domingo Tonalá	Santo Domingo Tonalá	Humedal	5	3		Inició operación en 2007
Santo Domingo Tonalá, Oax.	Yetla de Juárez	Yetla de Juárez	Humedal	3	3	Río Mixteco	Inició operación en 2004, se requiere nueva planta
Santo Tomas Mazaltepec, Oax.	Santo Tomas Mazaltepec	Santo Tomas Mazaltepec	Humedal	1	1	Río sin nombre	
Teotitlán del Valle, Oax.	Teotitlán del Valle	Teotitlán del Valle	Humedal	6	6	Río sin nombre	Inició operación en 2002
Tlaxiáctac de Cabrera, Oax.	Tlaxiáctac de Cabrera	Tlaxiáctac de Cabrera	Humedal	6	3	Río Salado	Reportada en 2005
Villa de Etla, Oax.	Villa de Etla	Villa de Etla	Humedal	11.5	9	Río Atoyac	
Villa de Tututepec de Melchor Ocampo, Oax.	Río Grande	Río Grande	Humedal	11.3	7		Reportada en 2005. Se construye ampliación de la red
Villa de Tututepec de Melchor Ocampo, Oax.	Santa Rosa de Lima	Santa Rosa de Lima	Humedal	3.3	3.3	Río sin nombre	Inició operación en 2002
Villa de Tututepec de Melchor Ocampo, Oax.	Villa de Tututepec de Melchor Ocampo	Villa de Tututepec de Melchor Ocampo	Humedal	3.3	1	Río San Pedro	Inició operación en 2002. Falta infraestructura de alcantarillado
Villa de Zaachila, Oax.	Villa de Zaachila	Trinidad Zaachila	Humedal	3.3	2		Reportada en 2005
Coatepec, Pue.	Coatepec	Coatepec	Fosa séptica + Humedal	1.1	1.1		Reportada en 2006
Huimilpan, Qro.	Milagro	El Milagro	Sedimentación + Humedal	1.5	1.3	Riego agrícola	Inició operación en 2005
Ahome, Sin.	Bacaporobampo	Bacaporobampo	Fosa séptica + Humedal	1.2	0.55	Dren agrícola	Inició operación en 2006
Ahome, Sin.	Felipe Ángeles	Felipe Ángeles	Fosa séptica + Humedal	2.5	1.97	Dren agrícola	Inició operación en 2006
Ahome, Sin.	Lázaro Cárdenas (Muellecito)	Muellecito	Fosa séptica + Humedal	1.8	0.65	Dren agrícola	Inició operación en 2006
Ahome, Sin.	Louisiana	Louisiana	Fosa séptica + Humedal	1.8	1.5	Dren calle 31	Inició operación en 2004
Ahome, Sin.	Nuevo San Miguel	Nuevo San Miguel	Fosa séptica + Humedal	5.8	4.2	Arroyo / Río fuerte	Inició operación en 2004
Ahome, Sin.	San Isidro	San Isidro	Fosa séptica + Humedal	2.5	2	Dren Ballena	Inició operación en 2002
Ahome, Sin.	Tozalibampo	Tozalibampo	Fosa séptica + Humedal	2.5	2	Dren agrícola	Inició operación en 2003
Angostura, Sin.	18 de diciembre	18 de diciembre	Fosa séptica + Humedal	1	0.8	Dren agrícola	Inició operación en 2006
Angostura, Sin.	Bruno Beltrán García	Bruno Beltrán García	Fosa séptica + Humedal	0.87	0.52	Dren agrícola	Inició operación en 2007



Angostura, Sin.	Campo el general	Campo el general	Fosa séptica + Humedal	0.9	0.6	Dren agrícola	Inició operación en 2004
Angostura, Sin.	Capomos	Capomos	Fosa séptica + Humedal	1.6	0.9	Dren Mocerito	Inició operación en 2006
Angostura, Sin.	Chumpilihuistle	Chumpilihuistle	Fosa séptica + Humedal	0.35	0.18	Dren agrícola	Inició operación en 2006
Angostura, Sin.	Colonia agrícola Sinaloa	Colonia agrícola Sinaloa	Fosa séptica + Humedal	1.3	1	Dren agrícola	Inició operación en 2002
Angostura, Sin.	Ejido independencia	Ejido independencia	Fosa séptica + Humedal	1.9	0.75	Dren agrícola	Inició operación en 2004
Angostura, Sin.	llama	La llama	Fosa séptica + Humedal	0.74	0.2	Dren agrícola	Inició operación en 2007
Angostura, Sin.	San Isidro	San Isidro	Fosa séptica + Humedal	2.2	0.95	Río Mocerito	Inició operación en 2004
Concordia, Sin.	Agua caliente de Garate	Agua caliente de Garate	Fosa séptica + Humedal	4	2.2	Arroyo sin nombre	Inició operación en 2002
Concordia, Sin.	Concepción	La Concepción	Fosa séptica + Humedal	1.8	1.3	Arroyo Concordia	Inició operación en 2006
Concordia, Sin.	Concordia	Concordia	Rafa, Wash + Humedal	36.7	21	Arroyo Concordia	Inició operación en 2002
Concordia, Sin.	Huajote	El Huajote	Fosa séptica + Humedal	1.9	1	Arroyo sin nombre	Inició operación en 2003
Concordia, Sin.	Malpica	Malpica	Fosa séptica + Humedal	1.1	1	Arroyo	Inició operación en 2004
Concordia, Sin.	Mesillas	Mesillas	Fosa séptica + Humedal	3.5	2.6	Arroyo	Inició operación en 2004
Concordia, Sin.	Zavala	Zavala	Fosa séptica + Humedal	1.89	1.6	Arroyo Concordia	Inició operación en 2007
Elota, Sin.	Potreriño del Norote	Potreriño del Norote	Fosa séptica + Humedal	4.1	1.05	Arroyo	Bajo caudal tratado
Elota, Sin.	El Saladito	El Saladito - Arroyitos	Fosa séptica + Humedal	4.7	1.35	Arroyo El Saladito	Inició operación en 2006
Elota, Sin.	Tanques	Tanques	Fosa séptica + Humedal	3.47	1.05	Arroyo sin nombre	Inició operación en 2007
Guasave, Sin.	Cinco de mayo (agua Blanca)	Cinco de mayo	Fosa séptica + Humedal	1.01	0.55	Dren agrícola	Inició operación en 2007
Guasave, Sin.	La Entrada Vieja	La Entrada	Fosa séptica + Humedal	1.8	0.8	Dren agrícola	Inició operación en 2005
Guasave, Sin.	Herculano de la Rocha	Herculano de la Rocha	Fosa séptica + Humedal	1.9	0.95	Dren La Coja	Inició operación en 2006, esta planta sirve a Herculano de la Rocha, Javier Cardoso y Choipa
Guasave, Sin.	Huitussi y anexos (el Huitussito)	Huitussi y anexos	Fosa séptica + Humedal	1.6	1.3	Dren agrícola	Inició operación en 2004
Guasave, Sin.	Roberto Barrios	Roberto Barrios	Fosa séptica + Humedal	1.1	0.6	Dren San Antonio	Inició operación en 2006
Guasave, Sin.	San Jose de Palos Blancos	Palos Blancos	Fosa séptica + Humedal	6.4	5	Dren el Gato	Inició operación en 2006, esta planta sirve a Palos blancos, Platanito y Terahuito.
Guasave, Sin.	San Rafael	San Rafael	Fosa séptica + Humedal	2.3	2	Dren San Rafael	Inició operación en 2004
Guasave, Sin.	Vicente Guerrero	Vicente Guerrero / El Pitahayal	Fosa séptica + Humedal	3.6	1.3	Dren agrícola	Inició operación en 2005
Mazatlán, Sin.	El Habal	El Habal	Fosa séptica + Humedal	2.8	2.53	Dren el Habal	Inició operación en 2006
Mazatlán, Sin.	Noria de San Antonio	La Noria	Fosa séptica + Humedal	2.7	1.62	Arroyo la Noria	Inició operación en 2006
Mazatlán, Sin.	Siqueros	Siqueros	Fosa séptica + Humedal	2.5	2.3	Río Presidio	Inició operación en 2006
Navolato, Sin.	Colonia Michoacana	La Michoacana	Fosa séptica + Humedal	1.03	0.58	Dren agrícola	Inició operación en 2006
Navolato, Sin.	Constituyentes de Sinaloa	Constituyentes	Fosa séptica + Humedal	0.54	0.28	Dren agrícola	Inició operación en 2006



Navolato, Sin.	El Molino	El Molino	Fosa séptica + Humedal	2.1	2	Dren agrícola	Inició operación en 2004
Navolato, Sin.	Potrero de Sataya	Potrero de Sataya	Fosa séptica + Humedal	2.5	2.2	Dren agrícola	Inició operación en 2004
Salvador Alvarado, Sin.	Benito Juárez	Benito Juárez	Humedal	12	7	Dren Santa Rita	Inició operación en 2007
Salvador Alvarado, Sin.	Colonia veintisiete de noviembre	Colonia veintisiete de noviembre	Fosa séptica + Humedal	1.3	0.55	Dren agrícola	Inició operación en 2006
Salvador Alvarado, Sin.	Rodolfo Sánchez Taboada (las Lagunitas)	Las Lagunitas	Fosa séptica + Humedal	2.4	1.4	Dren agrícola	Inició operación en 2004
San Ignacio, Sin.	Coyotitán	Coyotitán	Fosa séptica + humedal	3.76	3.7	Arroyo Coyotitán	Inició operación en 2006
Sinaloa, Sin.	Cubiri de la Loma	Cubiri de la Loma	Fosa séptica + Humedal	0.91	0.4	Dren agrícola	Inició operación en 2007
Sinaloa, Sin.	Santa Teresita	Santa Teresita	Fosa séptica + Humedal	1.1	0.45	Dren ramal del dren principal Bacaporobampo	Inició operación en 2006
Sinaloa, Sin.	Santiago de Ocoroni	Ocoroni	Fosa séptica + Humedal	3.3	1.4	Arroyo Ocoroni	Inició operación en 2004
Sinaloa, Sin.	Tepantita de Ocoroni	Tepantita	Fosa séptica + Humedal	0.91	0.35	Arroyo Ocoroni	Inició operación en 2007
Centro, Tab.	Macultepec	Villa de Macultepec-Ocuilzapotlán	Humedal	125	60	Arroyo Garduza	Inició operación en 2005
Huimanguillo, Tab.	Huimanguillo	Huimanguillo	Humedal	125	75	Río Mezcalapa	Inició operación en 2006
González, Tam.	Ursulo Galvan (Estación Manuel)	Estación Manuel	Humedal	8	5	Arroyo	
Atlangatepec, Tlax.	Fracción San Pedro Ecatepec	San Pedro Ecatepec	Fosa séptica + Humedal	5	0.56	Barranca sin nombre	
Atlangatepec, Tlax.	San Pedro Ecatepec	San Pedro Ecatepec	Fosa séptica + Humedal	5	0.56	Barranca sin nombre	
Carmen Tequexquitla, Tlax.	Tequexquitla	Tequexquitla	Humedal	20	9.31	Laguna Totolcingo	
Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlax.	Espíritu Santo	Espíritu Santo	Humedal	1.1	0.77	Barranca la Sabinera	Inició operación en 2005
Santa Cruz Quilehtla, Tlax.	Santa Cruz Quilehtla	Quilehtla	Humedal	3.8	4.02	Río Zahuapan	Requiere mantenimiento, bombas descompuestas del cárcamo de rebombeo.
Alvarado, Ver.	Anton Lizardo	Fracc. Buenavista	Rafa, Wash + Humedal	3	3	Infiltración	

## A.2 Conceptos básicos

### A.2.1 Parámetros fisicoquímicos

#### a) pH

El potencial de hidrógeno se define como el logaritmo negativo de la concentración molar de los iones hidrógeno, es una medida de la acidez ( $\text{pH} < 7$ ) o basicidad ( $\text{pH} > 7$ ) de una disolución acuosa. Se puede medir de forma precisa mediante un potenciómetro, un instrumento que mide la



diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (generalmente de plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ión hidrógeno.

*b) Conductividad eléctrica (CE).*

En un medio líquido la CE se relaciona con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica. Varía con la temperatura y la viscosidad, la unidad de medición utilizada es el Siemens/cm (S/cm), micro Siemens/cm ( $\mu\text{S/cm}$ ), o el mili Siemens (mS/cm). El conductímetro es el equipo utilizado para su medición.

*c) Nitrógeno en sus formas (N-total, N-orgánico,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ )*

El nitrógeno total Kjeldahl es un parámetro de importancia en el área de ingeniería ambiental y se refiere al contenido total de nitrógeno que está presente en un agua. Corresponde a la suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos, urea, aminas, etc.) y el ión amonio  $\text{NH}_4^+$  o amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). El nitrógeno orgánico se descompone en el suelo o en el agua, por acción de los microorganismos, para formar amoníaco en un primer paso, posteriormente éste se oxida formando iones nitrito y finalmente nitratos.

*Nitrógeno total por el método Kjeldahl.* Con este método los compuestos nitrogenados presentes en una muestra se descomponen con ácido sulfúrico concentrado y en presencia de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ . El sulfato de potasio aumenta el punto de ebullición del ácido sulfúrico de 330 a 390°C dependiendo de la relación sal-ácido. El sulfato de cobre es un catalizador que acelera la reacción de descomposición de la materia orgánica. Cuando la descomposición se ha completado la disolución se enfría, se diluye y se alcaliniza con hidróxido de sodio concentrado. El amoníaco liberado se destila y se adsorbe en una disolución de concentración conocida de ácido bórico. Los grupos amino y amido se convierten cuantitativamente a ión amonio.

*Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).* Los iones nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) son aniones inorgánicos de origen natural que forman parte del ciclo del nitrógeno.

*d) Demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ )*

Para poder oxidar la materia orgánica y obtener energía, los microorganismos requieren de oxígeno y durante las transformaciones bioquímicas estos producen dióxido de carbono como se ejemplifica



en la Figura A.1. El método respirométrico utiliza el  $\text{CO}_2$  y mide los cambios de presión, para ello se hace reaccionar con hidróxido de sodio y precipita en forma de carbonato de sodio, de esta manera el  $\text{CO}_2$  puede ser removido de la fase gaseosa resultando en una presión negativa debido a la respiración de oxígeno por los microorganismos.

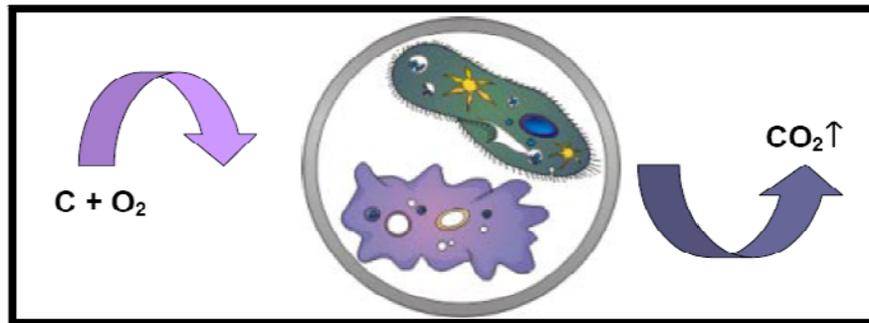


Figura A.1 Asimilación de oxígeno y liberación de dióxido de carbono durante la degradación de la materia orgánica

#### e) *Demanda Química de oxígeno (DQO)*

La demanda química de oxígeno (DQO) corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de oxidación a dicromato o permanganato, en medio ácido.

### A.2.2 Parámetros ambientales

#### a) *Transpiración de plantas acuáticas*

La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas liberan agua a la atmósfera. La circulación del agua en la planta es abierta, es decir, el agua penetra por la raíz, circula por la planta (toman una pequeña parte para su crecimiento) y gran parte de ella se elimina por las hojas (transpiración). La transpiración está en función de factores como tipo de planta, ciclo de crecimiento de la planta (inicial, vegetativo, medio, maduro), variaciones estacionales, tipo de suelo y humedad del suelo, radiación solar, temperatura del aire, viento, humedad atmosférica, presión atmosférica, etc.



*b) Humedad relativa*

La humedad relativa (HR) es una medida del contenido de agua en el aire y, es útil como indicador de la evaporación y la transpiración. Se define como el porcentaje de saturación del aire con vapor de agua, es decir, es el cociente entre la humedad absoluta (cantidad de vapor de agua contenido en un metro cúbico de aire a una temperatura y presión determinadas) y la cantidad máxima de agua que admite el aire por unidad de volumen a una temperatura y presión dada. Se expresa en %, la HR máxima posible es del 100%. El higrómetro es el instrumento utilizado para medir la HR, si además mide la temperatura se le llama termo-higrómetro.

*c) Luminosidad*

La luminosidad es la cantidad de energía por unidad de tiempo emitida en todas direcciones por un cuerpo celeste (sol). El lux es la unidad para medir el nivel de iluminación, equivale a un lumen/m<sup>2</sup>. Se usa en fotometría como medida de la intensidad luminosa, tomando en cuenta las diferentes longitudes de onda según la función de luminosidad.

*d) Temperatura del aire (máxima y mínima) y del agua*

La temperatura ambiente es la temperatura del aire registrada en el instante de la lectura (determina el ambiente actual), se mide con un termómetro.



# ANEXO B



## B.1 Factores de conversión de conductividad eléctrica

La conductividad es un parámetro que varía con la temperatura por lo que en esta tesis se hizo la corrección a condiciones estándar de 25°C utilizando los factores de conversión de la Tabla B.1.

Tabla B.1 Factores para convertir conductividad específica del agua a valores relativos a 25 °C					
°C	Factor de conversión	°C	Factor de conversión	°C	Factor de conversión
3	1.62	13	1.27	23	1.04
4	1.58	14	1.24	24	1.02
5	1.54	15	1.21	25	1.00
6	1.50	16	1.19	26	0.98
7	1.46	17	1.16	27	0.97
8	1.42	18	1.14	28	0.95
9	1.30	19	1.12	29	0.93
10	1.36	20	1.10	30	0.92
11	1.33	21	1.08	31	0.90
12	1.30	22	1.06	32	0.89

Datos tomados de Wetzel y Likens, 1990.

## B.2 Cálculos de los requerimientos de nutrientes

La relación B.1 fue utilizada para calcular la cantidad de urea requerida en la preparación de la disolución de urea tomando como base el contenido y la concentración de nitrógeno a utilizar en la carga de nutrientes al humedal (40 mg NTK/L).

$$M = \left[ (C_o * V_o * G_2 * K_1 * K_2) * \left( \frac{1}{G_1} \right) \right] \dots \dots \dots (B.1)$$

donde:

M: Cantidad de Urea (g)

C<sub>o</sub>: Concentración de nitrógeno en la carga (mg NTK/L)

V<sub>o</sub>: Volumen de solución preparada (L)

G<sub>1</sub>: Gasto de la solución en bomba (L/min)

G<sub>2</sub>: Gasto total de entrada al humedal, gasto de disolución artificial más gasto de agua de dilución (L/min)

K<sub>1</sub>: Relación en peso de nitrógeno contenido en la urea (60 mg urea / 28 mg N)

K<sub>2</sub>: Factor de conversión (1g urea = 1000 mg urea)



La relación B.2 se utilizó para calcular el volumen de orina humana requerido en la preparación de la carga de agua residual en estudio.

$$V1 = \left[ (V_o * C1 * G2) * \left( \frac{1}{G1} * \frac{1}{C_o} \right) \right] \dots\dots\dots (B.2)$$

donde:

V1: Volumen de orina (L)

Co: Concentración de nitrógeno en la orina (mg NTK/L)

Vo: Volumen de solución de orina (L)

G1: Gasto de inyección de la solución de orina (L/min)

C1: Concentración de NTK en la solución (mg NTK/L)

G2: Gasto de solución total del influente (L/min)



# ANEXO C



## C.1 Determinación de NTK y amoniacal

Cantidad de nitrógeno en la muestra (mg/L)	Volumen de la muestra (ml)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

### a) Reactivos y patrones para la determinación de NTK y amoniacal

Todos los productos químicos usados en este método son grado analítico

- Agua destilada
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ )
- Ácido bórico ( $H_3BO_3$ )
- Indicador rojo de metilo
- Indicador azul de metileno
- Alcohol etílico ( $CH_3CH_2OH$ )
- Sulfato de cobre (II) anhidro ( $CuSO_4$ )
- Sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ )
- Tiosulfato de sodio pentahidratado ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ )
- Carbonato de sodio anhidro ( $Na_2CO_3$ ), patrón primario

### b) Preparación de reactivos para la determinación de NTK y amoniacal

- Solución indicadora mixta. Pesar aproximadamente 200.0 mg de indicador rojo de metilo aforar a 100 ml con alcohol etílico o isopropílico. Pesar aproximadamente 100.0 mg de indicador azul de metileno y aforar a 50 ml con alcohol etílico o isopropílico. Mezclar las dos disoluciones en un frasco de vidrio. Preparar mensualmente.
- Solución indicadora de ácido bórico. Pesar 20.0 g de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) seco, disolver en 500 ml de agua (usando una parrilla de agitación). Verter la solución previamente preparada en un matraz aforado de 1 L, agregar 10 ml de la solución indicadora mixta y aforar a 1 L. Guardar la disolución en un envase de plástico o en un contenedor libre de boro, preparar mensualmente.



- Disolución valorada de ácido sulfúrico (0.02 N). Preparar una disolución de ácido sulfúrico (0.02 N) diluyendo 0.54 ml de ácido sulfúrico concentrado en 1 L de agua. Valorar el ácido sulfúrico aproximadamente 0.02 N con carbonato de sodio, pesando con precisión 0.031 g de carbonato de sodio anhidro, secado en horno a 140°C. Calcular la normalidad exacta de la disolución.
- Reactivo para la digestión. Pesar con precisión 134.0 g de sulfato de potasio y 5.023 g de sulfato de cobre (II) anhidro, disolver en 650 ml de agua destilada libre de amoníaco, agregar cuidadosamente 200 ml de ácido sulfúrico concentrado. Dejar enfriar a temperatura ambiente, aforar la mezcla a 1 L con agua destilada. Almacenar la disolución a una temperatura de 20°C para evitar la cristalización.
- Disolución reactivo de hidróxido de sodio - tiosulfato de sodio. Pesar 500.0 g de hidróxido de sodio y 25.0 g de tiosulfato de sodio pentahidratado, disolver en aproximadamente 800 ml de agua libre de amoníaco. Aforar a 1 L.



Figura C.1 Preparación de reactivos

### c) Equipo y materiales

#### Equipo:

- Equipo marca Büchi que consta de: digestor con sistema de extracción de gases y destilador con sistema de condensación (mantiene la temperatura por abajo de 29°C).
- Balanza analítica con precisión de 0.1 mg
- Balanza granataria con precisión de 0.1 g



## Materiales:

Todo el material que se uso en esta determinación es exclusivo para este procedimiento. Para el lavado del material se empleó una solución al 2% de detergente líquido libre de fosfatos.

## C.2 Determinación de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )

### Método:

Los iones  $\text{NO}_2^-$  se determinaron por el método colorimétrico basado en EPA 354.1 y métodos normalizados US 4500- $\text{NO}_2$ -B.

### Equipo y materiales:

- Espectrofotómetro Spectroquant Nova 60
- Celdas rectangulares de cuarzo de 10 mm
- Reactivos de la marca Merck

### Procedimiento:

1. Colocar 5.0 ml de la muestra en un tubo de ensayo.
2. Agregar una microcucharada del reactivo  $\text{NO}_2$ -1 y agitar vigorosamente hasta que el reactivo se disuelva completamente.
3. Dejar reposar la solución 10 min (tiempo de reacción), verter la solución a la celda de 10 mm, y medir la lectura en el fotómetro.

## C.3 Determinación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )

### Método:

Los iones  $\text{NO}_3^-$  se determinaron por el método colorimétrico basado en ISO 7890/1/DIN 38405 D9.

### Equipo y materiales:

- Espectrofotómetro Spectroquant Nova 60
- Celdas rectangulares de cuarzo de 10 mm
- Reactivos de la marca Merck



Procedimiento:

1. Colocar 4.0 ml del reactivo  $\text{NO}_3^-$ -1 en un tubo de ensayo.
2. Agregar 0.5 ml de la muestra.
3. Adicionar 0.5 ml del reactivo  $\text{NO}_3^-$ -2, y mezclar.
4. Dejar reposar la solución 10 min (tiempo de reacción), verter a la celda de 10 mm, y medir la lectura en el fotómetro.

#### C.4 Determinación de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Método:

Los  $\text{PO}_4^{3-}$  se determinaron por el método colorimétrico basado en EPA 365.2 y métodos normalizados US 4500-P E e ISO 6978/1.

Equipo y materiales:

- Espectrofotómetro Spectroquant Nova 60
- Celdas rectangulares de cuarzo de 10 mm
- Reactivos de la marca Merck

Procedimiento:

1. Colocar 5.0 ml de la muestra en un tubo de ensayo.
2. Agregar 5 gotas del reactivo  $\text{PO}_4^-$ -1 y mezclar.
3. Adicionar una microcucharada del reactivo  $\text{PO}_4^-$ -2 y agitar vigorosamente hasta que los reactivos se disuelvan completamente.
4. Dejar reposar la solución 5 min (tiempo de reacción), verter la solución a la celda de 10 mm, y medir la lectura en el fotómetro.



# ANEXO D



**Tabla D.1 Datos de parámetros fisicoquímicos**

Datos	Fecha	ENTRADA				SALIDA				Tasa de transpiración (L/min)	
		Hora	Q.prom. (L/min)	Q. bomba (L/min)	pH	Conductividad (μS/cm)	Hora	Q.prom. (L/min)	pH		Conductividad (μS/cm)
<b>ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO</b>											
16	16-oct-08.	13:45	0.2650	0.0326	7.54	489.50	13:32	0.1694	7.10	773.30	0.0956
17	17-oct-08.	12:45	0.2683	0.0371	7.49	508.44	12:30	0.2084	6.83	770.64	0.0599
18	20-oct-08.	14:18	0.2717	0.0363	7.33	496.16	14:03	0.0930	6.73	590.42	0.1787
20	22-oct-08.	13:20	0.2680	0.0380	7.43	509.58	13:04	0.0876	6.70	624.80	0.1804
22	24-oct-08.	13:25	0.2647	0.0347	7.45	500.64	13:12	0.0722	6.70	622.08	0.1925
23	27-oct-08.	13:30	0.2573	0.0373	7.44	567.63	13:12	0.1550	6.64	690.20	0.1023
25	29-oct-08.	13:00	0.2603	0.0353	7.42	584.29	12:51	0.1240	6.70	664.68	0.1363
27	31-oct-08.	12:07	0.2550	0.0346	7.37	556.80	11:53	0.1064	6.62	679.44	0.1486
28	03-nov-08.	13:25	0.2483	0.0359	7.36	511.84	13:20	0.0900	6.70	668.80	0.1583
30	05-nov-08.	13:40	0.2643	0.0375	7.31	510.72	13:30	0.1120	6.66	662.20	0.1523
31	10-nov-08.	11:50	0.2587	0.0407	7.34	507.30	11:34	0.1640	6.79	642.40	0.0947
33	12-nov-08.	14:10	0.2583	0.0369	7.36	491.70	13:56	0.1700	6.78	620.10	0.0883
35	14-nov-08.	11:50	0.2567	0.0351	7.30	501.60	11:35	0.1750	6.71	636.90	0.0817
36	17-nov-08.	11:50	0.2483	0.0325	7.32	517.36	11:40	0.1424	6.63	648.44	0.1059
38	19-nov-08.	11:46	0.2690	0.0332	7.37	555.52	11:40	0.2034	6.69	667.92	0.0656
40	21-nov-08.	13:45	0.2673	0.0323	7.34	517.36	13:38	0.1494	6.79	620.60	0.1179
41	24-nov-08.	12:16	0.2690	0.0352	7.35	536.69	12:10	0.1220	6.65	609.00	0.1470
43	26-nov-08.	13:00	0.2713	0.0389	7.47	533.12	12:50	0.1870	6.66	606.48	0.0843
45	28-nov-08.	11:18	0.2667	0.0389	7.19	531.93	11:10	0.1510	6.65	624.08	0.1157
46	01-dic-08.	11:35	0.2623	0.0371	7.31	529.55	11:20	0.1494	6.63	636.84	0.1129
48	03-dic-08.	12:58	0.2630	0.0380	7.34	551.80	12:50	0.1884	6.77	656.88	0.0746
50	05-dic-08.	11:25	0.2620	0.0386	7.47	540.87	11:16	0.1620	6.77	647.36	0.1000
51	08-dic-08.	12:36	0.2610	0.0388	7.39	517.36	12:30	0.1384	6.68	631.04	0.1226
53	10-dic-08.	12:10	0.2530	0.0390	7.28	503.88	12:10	0.1510	6.51	628.14	0.1020
55	12-dic-08.	11:34	0.2553	0.0383	7.22	553.04	12:24	0.1170	6.78	655.82	0.1383
56	15-dic-08.	13:23	0.2550	0.0380	7.34	502.88	13:10	0.1670	6.64	596.20	0.0880
57	17-dic-08.	15:00	0.2633	0.0403	7.36	504.36	14:50	0.1850	6.69	619.02	0.0783
58	19-dic-08.	12:06	0.2537	0.0387	7.52	575.96	11:56	0.1708	6.78	633.84	0.0829
59	22-dic-08.	11:45	0.2450	0.0292	7.41	577.17	11:30	0.1664	6.87	693.77	0.0786



60	24-dic-08.	13:07	0.2640	0.0402	7.54	590.48	13:00	0.1566	6.84	694.96	0.1074
61	26-dic-08.	15:50	0.2633	0.0355	7.44	607.62	15:40	0.1810	6.76	560.74	0.0823
62	29-dic-08.	13:16	0.2590	0.0364	7.45	603.20	13:10	0.1702	6.81	687.88	0.0888
63	31-dic-08.	13:40	0.2587	0.0407	7.50	582.54	13:30	0.1716	6.83	679.44	0.0871
64	02-ene-09.	14:40	0.2600	0.0340	7.48	565.40	14:30	0.1506	6.74	653.40	0.1094
65	05-ene-09.	11:50	0.2700	0.0504	7.45	606.90	11:42	0.1390	6.84	693.12	0.1310
66	07-ene-09.	12:15	0.2573	0.0367	7.51	549.48	12:05	0.1688	6.88	690.84	0.0885
67	09-ene-09.	13:45	0.2590	0.0376	7.40	488.66	13:38	0.2104	6.79	610.48	0.0486
70	16-ene-09.	12:50	0.2623	0.0467	7.43	565.15	12:43	0.2584	6.78	668.02	0.0039
71	19-ene-09.	11:00	0.2623	0.0477	7.52	556.60	10:50	0.1758	6.90	687.28	0.0865
72	21-ene-09.	12:20	0.2633	0.0477	7.48	548.13	12:10	0.1572	6.84	661.20	0.1061
73	26-ene-09.	12:40	0.2407	0.0275	7.46	498.30	12:30	0.1324	6.76	586.44	0.1083
<b>ETAPA DE OPERACIÓN CON ORINA HUMANA</b>											
77	06-feb-09.	12:08	0.2613	0.0291	7.80	577.84	12:00	0.2404	6.66	580.80	0.0209
78	09-feb-09.	13:20	0.2640	0.0228	7.89	546.06	13:10	0.1556	6.68	546.56	0.1084
79	10-feb-09.	13:32	0.2640	0.0316	7.91	545.44	13:20	0.1466	7.74	622.72	0.1174
80	11-feb-09.	16:30	0.2630	0.0290	7.93	530.88	16:25	0.1556	6.54	497.00	0.1074
81	12-feb-09.	14:00	0.2667	0.0307	7.92	527.04	14:20	0.1978	8.06	562.24	0.0689
82	16-feb-09.	-	0.2580	0.0302	8.32	572.00	-	0.1100	6.65	571.32	0.1480
83	17-feb-09.	13:07	0.2547	0.0301	8.39	544.68	13:00	0.1164	6.87	560.74	0.1383
84	18-feb-09.	12:30	0.2523	0.0347	8.25	564.98	12:20	0.1032	6.72	553.32	0.1491
85	19-feb-09.	12:10	0.2507	0.0331	8.22	575.30	12:00	0.0854	6.73	589.60	0.1653
86	20-feb-09.	15:35	0.2533	0.0361	8.23	572.00	15:35	0.2496	6.71	563.76	0.0037
87	23-feb-09.	15:45	0.2620	0.0244	8.64	657.44	15:30	0.1736	6.72	542.16	0.0884
88	24-feb-09.	12:20	0.2667	0.0311	8.02	574.56	12:10	0.1856	6.68	513.06	0.0811
89	25-feb-09.	14:50	0.2653	0.0263	8.10	544.84	14:08	0.1026	6.77	516.12	0.1627
90	26-feb-09.	13:30	0.2667	0.0315	8.06	545.90	13:00	0.1108	6.64	523.26	0.1559
91	27-feb-09.	17:00	0.2680	0.0324	7.98	556.20	16:51	0.1752	6.69	523.32	0.0928
92	02-mar-09.	12:51	0.2787	0.0511	8.26	605.92	12:44	0.0874	6.61	605.92	0.1913
93	03-mar-09.	13:10	0.2537	0.0253	8.13	565.60	13:01	0.0622	6.70	587.52	0.1915
94	04-mar-09.	14:12	0.2700	0.0400	8.40	584.06	14:00	0.0900	6.79	593.60	0.1800
95	05-mar-09.	13:42	0.2797	0.0517	8.43	579.82	13:30	0.0594	6.85	557.94	0.2203
96	06-mar-09.	15:35	0.2687	0.0399	8.12	561.60	15:15	0.1084	6.68	565.00	0.1603
98	12-mar-09.	15:10	0.2730	0.0404	8.59	658.56	15:01	0.2070	6.63	624.24	0.0660



99	13-mar-09.	17:00	0.2430	0.0393	7.85	595.84	16:44	0.1702	6.29	602.08	0.0728
100	16-mar-09.	12:35	0.2587	0.0393	8.30	577.80	12:32	0.0258	6.71	581.00	0.2329
102	18-mar-09.	14:20	0.3050	0.0425	7.92	564.98	14:12	0.0856	6.78	591.76	0.2194
103	23-mar-09.	13:00	0.3667	0.0417	7.75	547.80	13:05	0.1094	6.45	606.96	0.2573
104	24-mar-09.	13:05	0.3693	0.0431	7.96	561.60	12:45	0.1044	6.72	601.80	0.2649
105	26-mar-09.	15:38	0.3707	0.0447	-	-	15:20	0.2114	-	-	0.1593
106	27-mar-09.	12:40	0.3717	0.0442	8.12	543.92	12:10	0.0878	6.89	559.52	0.2839
107	30-mar-09.	14:30	0.3883	0.0418	7.69	531.44	14:20	0.0518	6.52	610.56	0.3365
108	31-mar-09.	13:25	0.3693	0.0449	7.79	557.56	13:09	0.0804	6.80	586.00	0.2889
109	02-abr-09.	16:20	0.5107	0.0413	8.24	498.00	16:00	0.2362	7.05	572.30	0.2745
110	04-abr-09.	13:18	0.4807	0.0340	7.51	486.54	13:04	0.1717	6.78	544.17	0.3090
112	07-abr-09.	14:45	0.4750	0.0300	7.47	541.08	14:31	0.2333	7.05	556.50	0.2417
113	08-abr-09.	15:08	0.4793	0.0363	7.56	556.64	14:50	0.1767	6.85	549.72	0.3027



**Tabla D.2 Datos de parámetros fisicoquímicos (concentraciones)**

Dato	Fecha	ENTRADA				SALIDA			
		Hora	NTK (mg/L)	NH <sub>3</sub> (mg/L)	N-org (mg/L)	Hora	NTK (mg/L)	NH <sub>3</sub> (mg/L)	N-org (mg/L)
<b>ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO</b>									
16	16-oct-08.	13:45	40.60	2.03	38.57	13:32	30.86	27.61	3.25
17	17-oct.	12:45	37.35	1.62	35.73	12:30	47.10	34.10	13.00
18	20-oct.	14:18	38.98	1.62	37.36	14:03	27.61	21.92	5.69
20	22-oct.	13:20	30.86	-	30.86	13:04	24.36	17.86	6.50
22	24-oct.	13:25	32.48	1.22	31.26	13:12	24.36	13.40	10.96
23	27-oct.	13:30	34.10	2.44	31.66	13:12	21.11	15.43	5.68
25	29-oct.	13:00	38.98	2.03	36.95	12:51	21.11	14.62	6.49
27	31-oct.	12:07	37.35	1.22	36.13	11:53	22.74	12.99	9.75
28	03-nov.	13:25	40.60	1.22	39.38	13:20	19.49	11.37	8.12
30	05-nov.	13:40	42.22	1.22	41.00	13:30	19.49	11.37	8.12
31	10-nov.	11:50	38.98	1.02	37.96	11:34	21.11	11.37	9.74
33	12-nov.	14:10	38.98	1.22	37.76	13:56	19.49	10.96	8.53
35	14-nov.	11:50	40.60	1.22	39.38	11:35	22.74	10.56	12.18
36	17-nov.	11:50	35.73	1.22	34.51	11:40	21.11	10.56	10.55
38	19-nov.	11:46	30.86	1.22	29.64	11:40	22.74	10.56	12.18
40	21-nov.	13:45	56.84	0.81	56.03	13:38	19.49	10.15	9.34
41	24-nov.	12:16	30.86	0.81	30.05	12:10	16.24	9.34	6.90
43	26-nov.	13:00	42.22	0.81	41.41	12:50	27.61	8.93	18.68
45	28-nov.	11:18	35.73	0.81	34.92	11:10	25.98	9.74	16.24
46	01-dic.	11:35	30.86	0.81	30.05	11:20	19.49	10.56	8.93
48	03-dic.	12:58	38.98	0.81	38.17	12:50	19.49	8.12	11.37
50	05-dic.	11:25	34.10	0.81	33.29	11:16	21.11	10.96	10.15
51	08-dic.	12:36	38.98	0.81	38.17	12:30	21.11	12.18	8.93
53	10-dic.	12:10	40.60	0.81	39.79	12:10	19.49	12.18	7.31
55	12-dic.	11:34	32.48	0.81	31.67	12:24	21.11	14.21	6.90
56	15-dic.	13:23	45.47	0.41	45.06	13:10	19.49	11.37	8.12
57	17-dic.	15:00	45.47	0.81	44.66	14:50	24.36	11.37	12.99
58	19-dic.	12:06	42.22	1.22	41.00	11:56	19.49	11.77	7.72
59	22-dic.	11:45	37.35	0.81	36.54	11:30	21.11	10.96	10.15



60	24-dic.	13:07	32.48	0.41	32.07	13:00	19.49	11.37	8.12							
61	26-dic.	15:50	32.48	0.41	32.07	15:40	17.86	10.56	7.30							
62	29-dic.	13:16	36.54	0.41	36.13	13:10	19.49	11.37	8.12							
Dato	Fecha	Hora	NTK (mg/L)	NH <sub>3</sub> (mg/L)	N-org (mg/L)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	Hora	NTK (mg/L)	NH <sub>3</sub> (mg/L)	N-org (mg/L)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	
63	31-dic.	13:40	35.73	0.81	34.92	0.02	2.8	-	13:30	19.49	11.37	8.12	0.02	4.1	-	
63	31-dic.	13:40	35.73	0.81	34.92	0.02	2.8	-	13:30	19.49	11.37	8.12	0.02	4.1	-	
64	02-ene-09.	14:40	38.98	0.81	38.17	-	-	-	14:30	19.49	11.37	8.12	-	-	-	
65	05-ene.	11:50	35.73	0.2	35.53	0.02	2.8	-	11:42	19.49	12.18	7.31	0.03	4.4	-	
66	07-ene.	12:15	34.10	0.81	33.29	0.02	3.6	-	12:05	16.24	10.35	5.89	0.03	4.8	-	
67	09-ene.	13:45	30.86	0.81	30.05	0.02	6	-	13:38	16.24	10.15	6.09	0.02	5	-	
70	16-ene.	12:50	27.61	0.81	26.80	0.02	6.3	-	12:43	24.36	12.99	11.37	0.03	7.5	-	
71	19-ene.	11:00	32.48	0.81	31.67	-	-	-	10:50	19.49	12.99	6.50	-	-	-	
72	21-ene.	12:20	32.48	1.22	31.26	-	-	-	12:10	17.86	12.59	5.27	-	-	-	
73	26-ene.	12:40	45.47	0.81	44.66	-	-	-	12:30	21.11	15.43	5.68	-	-	-	
ETAPA DE OPERACIÓN CON ORINA HUMANA																
77	06-feb.	12:08	9.74	3.25	6.49	0.02	6.9	-	12:00	8.12	4.47	3.65	0.03	6.7	-	
78	09-feb.	13:20	11.37	4.06	7.31	0.05	6.6	-	13:10	6.50	1.22	5.28	0.02	4.5	-	
79	10-feb.	13:32	9.74	5.28	4.46	0.03	6.3	-	13:20	8.12	3.65	4.47	0.04	6.1	-	
80	11-feb.	16:30	-	2.77	2.16	0.02	6.9	-	16:25	3.70	1.23	2.47	0.03	6.2	-	
81	12-feb.	14:00	10.84	3.70	7.14	0.03	6.7	-	14:20	9.86	5.39	4.47	0.02	4.2	-	
82	16-feb.	-	12.32	7.85	4.47	0.02	4	-	-	6.16	0.92	5.24	0.02	1.7	-	
83	17-feb.	13:07	11.70	7.24	4.46	0.02	7.4	-	13:00	7.39	1.23	6.16	0.02	1.1	-	
84	18-feb.	12:30	13.80	8.32	5.48	0.02	6.10	-	12:20	4.93	1.23	3.70	0.02	1	-	
85	19-feb.	12:10	11.70	7.39	4.31	0.02	6.40	-	12:00	3.08	0.92	2.16	0.02	1.5	-	
86	20-feb.	15:35	11.09	7.70	3.39	0.02	6.40	-	15:35	3.70	0.92	2.78	0.02	1	-	
87	23-feb.	15:45	12.32	6.16	6.16	0.03	6.30	-	15:30	4.93	0.92	4.01	0.02	1.9	-	
88	24-feb.	12:20	12.32	6.16	6.16	0.02	-	-	12:10	8.62	0.92	7.70	0.02	-	-	
89	25-feb.	14:50	30.80	8.62	22.18	0.02	3.80	-	14:08	3.70	1.23	2.47	0.02	3.6	-	
90	26-feb	13:30	10.58	7.70	2.88	0.02	6.60	-	13:00	3.70	1.23	2.47	0.02	4.2	-	
91	27-feb.	17:00	17.25	8.32	8.93	0.02	6.10	-	16:51	4.31	0.92	3.39	0.02	3.6	-	
92	02-mar.	12:51	13.55	10.47	3.08	-	-	-	12:44	3.70	2.46	1.24	-	-	-	
93	03-mar.	13:10	25.87	9.24	16.63	0.03	6.20	-	13:01	3.70	1.54	2.16	0.02	2.6	-	



94	04-mar.	14:12	10.58	8.32	2.26	0.02	5.70	-	14:00	2.46	0.62	1.84	0.02	1.9	-
95	05-mar.	13:42	13.55	10.16	3.39	0.02	6.20	-	13:30	3.70	0.62	3.08	0.02	2.2	-
96	06-mar.	15:35	14.78	6.16	8.62	0.02	5.9	-	15:15	3.70	-	3.70	0.02	2.6	-
98	12-mar.	15:10	19.71	13.55	6.16	0.03	6.30	-	15:01	3.70	0.62	3.08	0.02	0.5	-
99	13-mar.	17:00	14.78	8.62	6.16	0.03	6.90	-	16:44	8.62	0.62	8.00	0.02	0.5	-
100	16-mar.	12:35	18.48	8.62	9.86	0.03	6.30	-	12:32	7.39	0.92	6.47	0.02	0.6	-
102	18-mar.	14:20	12.32	8.16	4.16	0.52	7.20	1.12	14:12	2.46	1.08	1.38	0.01	-	0.51
103	23-mar.	13:00	9.86	7.70	2.16	0.03	5.90	4.97	13:05	1.76	0.62	1.14	0.02	2.1	0.54
104	24-mar.	13:05	11.09	6.78	4.31	0.03	5.90	0.61	12:45	3.70	0.92	2.78	0.02	1.5	0.28
105	26-mar.	15:38	12.32	8.62	3.70	-	-	-	15:20	2.46	1.39	1.07	-	-	-
106	27-mar.	12:40	20.94	8.16	12.78	0.04	6.20	0.63	12:10	3.70	1.23	2.47	0.01	1.7	0.04
107	30-mar.	14:30	12.32	7.08	5.24	0.03	6.30	0.45	14:20	4.93	1.23	3.70	0.01	1.2	0.08
108	31-mar.	13:25	18.48	7.70	10.78	0.03	6.30	0.51	13:09	3.70	0.62	3.08	0.01	1.5	0.23
109	02-abr.	16:20	11.09	5.85	5.24	0.03	-	0.54	16:00	7.39	0.92	6.47	0.01	-	0.49
110	04-abr.	13:18	-	1.85	1.85	0.02	9.00	0.16	13:04	1.23	0.62	0.61	0.02	4.2	0.07
112	07-abr.	14:45	14.17	5.85	8.32	0.02	6.60	0.69	14:31	2.35	0.62	1.73	0.02	4.1	0.02
113	08-abr.	15:08	13.55	4.62	8.93	0.03	6.20	0.50	14:50	7.39	0.92	6.47	0.02	3.0	0.09



**Tabla D.3 Datos de carga y de remoción de masa**

Datos	Fecha	Carga de entrada (g/m <sup>2</sup> ·d)	Carga de salida (g/m <sup>2</sup> ·d)	Carga removida (g/m <sup>2</sup> ·d)	Eficiencia de remoción de masa (%)	Datos	Fecha	Carga de entrada (g/m <sup>2</sup> ·d)	Carga de salida (g/m <sup>2</sup> ·d)	Carga removida (g/m <sup>2</sup> ·d)	Eficiencia de remoción de masa (%)
<b>ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO</b>											
16	16-oct-08.	3.10	1.51	1.59	51.41	50	05-dic-08.	2.57	0.98	1.59	61.72
18	20-oct-08.	3.05	0.74	2.31	75.76	53	10-dic-08.	2.96	0.85	2.11	71.35
20	22-oct-08.	2.38	0.61	1.77	74.20	55	12-dic-08.	2.39	0.71	1.68	70.21
22	24-oct-08.	2.48	0.51	1.97	79.54	56	15-dic-08.	3.34	0.94	2.40	71.93
23	27-oct-08.	2.53	0.94	1.58	62.71	57	17-dic-08.	3.45	1.30	2.15	62.36
25	29-oct-08.	2.92	0.75	2.17	74.20	58	19-dic-08.	3.08	0.96	2.13	68.92
27	31-oct-08.	2.74	0.70	2.05	74.60	59	22-dic-08.	2.64	1.01	1.62	61.61
28	03-nov-08.	2.90	0.51	2.40	82.60	60	24-dic-08.	2.47	0.88	1.59	64.41
30	05-nov-08.	3.21	0.63	2.59	80.44	61	26-dic-08.	2.46	0.93	1.53	62.20
31	10-nov-08.	2.90	1.00	1.91	65.67	62	29-dic-08.	2.73	0.96	1.77	64.95
33	12-nov-08.	2.90	0.95	1.95	67.09	63	31-dic-08.	2.66	0.96	1.70	63.82
35	14-nov-08.	3.00	1.15	1.86	62.32	64	02-ene-09.	2.92	0.85	2.07	71.04
36	17-nov-08.	2.56	0.87	1.69	66.12	65	05-ene-09.	2.78	0.78	2.00	71.92
38	19-nov-08.	2.39	1.33	1.06	44.28	66	07-ene-09.	2.53	0.79	1.74	68.76
40	21-nov-08.	4.38	0.84	3.54	80.83	67	09-ene-09.	2.30	0.98	1.32	57.25
41	24-nov-08.	2.39	0.57	1.82	76.13	70	16-ene-09.	2.09	1.81	0.27	13.09
43	26-nov-08.	3.30	1.49	1.81	54.92	71	19-ene-09.	2.45	0.99	1.47	59.59
45	28-nov-08.	2.74	1.13	1.61	58.83	72	21-ene-09.	2.46	0.81	1.65	67.17
46	01-dic-08.	2.33	0.84	1.49	64.03	73	26-ene-09.	3.15	0.80	2.35	74.46
48	03-dic-08.	2.95	1.06	1.89	64.18						
<b>ETAPA DE OPERACIÓN CON ORINA HUMANA</b>											
77	06-feb-09.	0.73	0.56	0.17	23.31	82	16-feb-09.	0.92	0.20	0.72	78.68
78	09-feb-09.	0.86	0.29	0.57	66.31	83	17-feb-09.	0.86	0.25	0.61	71.13
79	10-feb-09.	0.74	0.34	0.40	53.71	84	18-feb-09.	1.00	0.15	0.86	85.39
80	11-feb-09.	-	0.17	-	-	85	19-feb-09.	0.84	0.08	0.77	91.03
81	12-feb-09.	0.83	0.56	0.27	32.53	86	20-feb-09.	0.81	0.27	0.54	67.13
87	23-feb-09.	0.93	0.25	0.68	73.49	100	16-mar-09.	1.38	0.05	1.32	96.01
88	24-feb-09.	0.95	0.46	0.49	51.30	102	18-mar-09.	1.08	0.06	1.02	94.40



89	25-feb-09.	2.35	0.11	2.24	95.35	103	23-mar-09.	1.04	0.06	0.99	94.67
90	26-feb-09.	0.81	0.12	0.69	85.47	104	24-mar-09.	1.18	0.11	1.07	90.57
91	27-feb-09.	1.33	0.22	1.11	83.67	105	26-mar-09.	1.32	0.15	1.17	88.61
92	02-mar-09.	1.09	0.09	0.99	91.44	106	27-mar-09.	2.24	0.09	2.15	95.83
93	03-mar-09.	1.89	0.07	1.82	96.49	107	30-mar-09.	1.38	0.07	1.30	94.66
94	04-mar-09.	0.82	0.06	0.76	92.25	108	31-mar-09.	1.97	0.09	1.88	95.64
95	05-mar-09.	1.09	0.06	1.03	94.20	109	02-abr-09.	1.63	0.50	1.13	69.18
96	06-mar-09.	1.14	0.12	1.03	89.90	110	04-abr-09.	-	0.06	-	-
98	12-mar-09.	1.55	0.22	1.33	85.77	112	07-abr-09.	1.94	0.16	1.78	91.85
99	13-mar-09.	1.03	0.42	0.61	59.15	113	08-abr-09.	1.87	0.38	1.49	79.89



**Tabla D.4 Datos de conductividad eléctrica**

Sección	Profundidad (cm)	Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), distribución del contaminante durante el período de estabilización del HAFSS											
		08 oct 08.	15 oct.	20 oct.	28 oct.	05 nov.	11 nov.	25 nov.	03 dic.	11 dic.	15 dic.	26 dic.	05 ene 09.
1	5	584.82	531.3	554.48	626.78	598.57	572.28	593.96	586.85	627.38	623.72	689.61	669.13
1	10	603.20	552.16	574.77	625.57	592.62	574.20	593.96	608.84	627.38	617.52	685.80	667.92
1	15	609.00	566.58	574.77	625.57	591.43	571.88	591.48	611.32	627.38	627.38	683.26	684.48
1	20	613.64	567.72	574.77	624.36	603.79	564.92	592.72	612.56	629.92	627.38	680.72	684.48
1	25	613.64	570.00	574.77	624.36	608.63	581.91	592.72	628.65	629.92	631.19	679.45	686.96
1	30	611.32	570.00	574.77	623.15	609.84	585.48	591.48	627.38	631.19	633.73	696.80	690.68
1	35	606.68	570.00	574.77	623.15	611.05	586.67	591.48	612.56	631.19	632.46	696.80	690.68
1	40	605.52	571.14	574.77	623.15	611.05	587.86	592.72	627.38	632.46	633.73	696.80	690.68
2	5	676.28	678.72	573.04	666.71	635.46	656.88	634.88	543.56	664.21	655.32	682.00	721.68
2	10	680.92	703.38	586.67	660.66	653.40	655.69	636.12	669.29	665.48	659.13	707.39	721.68
2	15	680.92	702.24	587.86	658.24	660.66	653.31	654.05	668.02	665.48	660.40	697.23	721.68
2	20	682.08	705.66	589.05	658.24	663.08	653.31	657.86	669.29	669.29	660.40	720.20	721.68
2	25	679.76	706.80	589.05	658.24	665.5	653.31	659.13	669.29	666.75	662.94	708.66	721.68
2	30	678.60	706.80	589.05	657.03	664.29	650.93	657.86	668.02	665.48	662.94	703.58	721.68
2	35	679.76	705.66	589.05	657.03	664.29	653.31	657.86	668.02	666.75	661.67	708.66	720.44
2	40	678.60	706.80	591.43	657.03	664.29	650.93	660.40	666.75	666.75	661.67	709.93	722.92
3	5	742.40	742.14	602.04	694.54	681.87	655.40	646.04	701.04	684.53	664.64	713.00	741.52
3	10	742.40	741.00	599.72	689.70	687.28	649.60	648.52	695.96	684.53	664.64	728.98	740.28
3	15	743.56	737.58	603.20	686.07	687.28	647.28	647.28	673.32	684.53	680.72	722.63	737.80
3	20	742.40	734.16	618.80	684.86	686.07	655.69	644.80	677.04	684.53	680.72	725.17	737.80
3	25	741.24	734.16	618.80	684.86	687.28	654.50	644.80	675.80	685.80	679.45	731.52	735.32
3	30	738.92	733.02	616.42	684.86	686.07	658.07	646.04	674.56	684.53	680.72	722.63	734.08
3	35	740.08	734.16	616.42	683.65	682.44	656.88	648.52	673.32	684.53	681.99	722.63	732.84
3	40	741.24	733.02	615.23	683.65	678.81	661.64	647.28	669.60	681.99	678.18	725.17	732.84
4	5	770.24	767.22	619.44	695.75	690.20	660.04	649.76	704.85	683.26	663.40	713.00	747.72
4	10	767.92	763.80	618.28	693.33	689.01	654.24	648.52	685.72	684.53	664.64	713.00	746.48
4	15	767.92	764.94	618.28	690.91	701.80	672.35	648.52	682.00	685.80	679.45	727.71	744.00
4	20	767.92	763.80	618.28	679.49	703.01	672.35	648.52	679.52	685.80	678.18	727.71	744.00
4	25	767.92	766.08	617.12	678.30	703.01	673.54	649.76	678.28	685.80	678.18	726.44	744.00
4	30	766.76	767.22	618.28	678.30	703.01	673.54	651.00	677.04	685.80	679.45	725.17	744.00



4	35	766.76	767.22	619.44	677.11	701.80	672.35	652.24	675.80	684.53	679.45	726.44	744.00
4	40	766.76	766.08	619.44	675.92	703.01	673.54	651.00	674.56	684.53	678.18	743.60	744.00

**Tabla D.5 Datos de distribución del contaminante**

Sección	Profundidad (cm)	Distribución del contaminante durante la etapa de operación con orina humana del HAFSS								
		pH					Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ )			
		26/feb/09.	06/mar/09.	16/mar/09.	27/mar/09.	07/abr/09.	05/mar/09.	17/mar/09.	02/abr/09.	08/abr/09.
1	5	6.62	6.85	6.86	7.00	6.34	541.72	576.52	525.8	530.20
1	10	6.59	6.79	6.83	7.13	6.35	547.52	585.80	544.32	551.04
1	15	6.63	6.77	6.80	7.11	6.33	570.01	593.92	547.68	551.04
1	20	6.59	6.74	6.79	7.12	6.31	572.39	599.72	551.04	552.16
1	25	6.60	6.74	6.77	7.17	6.29	587.86	600.88	551.04	552.16
1	30	6.63	6.72	6.75	7.19	6.28	604.52	602.04	551.04	554.40
1	35	6.64	6.71	6.75	7.20	6.27	608.09	602.04	551.04	565.44
1	40	6.65	6.71	6.74	7.20	6.28	610.47	600.88	548.80	566.58
2	5	6.56	6.73	6.70	6.90	6.4	619.52	612.48	555.18	545.44
2	10	6.60	6.71	6.67	7.00	6.39	619.52	613.64	556.32	547.68
2	15	6.59	6.68	6.65	7.01	5.99	619.52	614.80	557.46	551.04
2	20	6.62	6.68	6.63	7.01	5.96	620.73	617.12	560.88	553.28
2	25	6.60	6.68	6.59	6.99	5.97	620.73	617.12	562.02	554.40
2	30	6.59	6.66	6.58	6.98	6	620.73	619.44	560.88	554.40
2	35	6.60	6.65	6.58	6.98	5.98	620.73	622.92	559.74	555.52
2	40	6.59	6.63	6.56	6.98	5.95	621.94	621.76	559.74	553.28
3	5	6.54	6.86	6.66	6.84	6.56	615.23	613.64	590.24	548.80



3	10	6.55	6.80	6.65	6.95	6.57	615.23	614.80	609.90	548.80
3	15	6.56	6.76	6.64	6.97	6.53	625.57	615.96	608.76	549.92
3	20	6.56	6.73	6.63	6.99	6.52	626.78	617.12	612.18	549.92
3	25	6.55	6.72	6.62	6.98	6.53	626.78	618.28	609.90	549.92
3	30	6.58	6.70	6.61	6.98	6.54	627.99	618.28	608.76	549.92
3	35	6.58	6.67	6.58	6.98	6.54	626.78	618.28	604.20	549.92
3	40	6.61	6.64	6.54	6.99	6.55	626.78	619.44	604.20	549.92
4	5	6.62	6.63	6.63	7.01	6.47	616.42	622.92	628.14	552.16
4	10	6.60	6.62	6.62	6.99	6.46	619.99	624.08	630.42	552.16
4	15	6.57	6.62	6.59	6.98	6.45	631.62	625.24	631.56	552.16
4	20	6.55	6.61	6.56	6.97	6.45	632.83	628.72	632.70	552.16
4	25	6.53	6.60	6.54	6.96	6.45	632.83	631.04	633.84	552.16
4	30	6.52	6.59	6.51	6.96	6.44	634.04	631.04	633.84	552.16
4	35	6.52	6.58	6.49	6.96	6.44	632.83	629.88	631.56	552.16
4	40	6.51	6.57	6.47	6.95	6.43	632.83	629.88	631.56	552.16



<b>D.6 Datos de parámetros ambientales</b>							
<b>Datos</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Tamb.máx. (°C)</b>	<b>Tamb.mín. (°C)</b>	<b>Tagua en el humedal (°C)</b>	<b>Luminosidad</b>	<b>% Humedad relativa (HR)</b>
<b>ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO</b>							
1	24-sep-08	11:07	21.0	14.0	17.0	4730	70.3
2	25-sep-08	12:00	20.0	14.0	17.0	15800	73.9
3	26-sep-08	14:20	19.0	11.0	17.0	3680	77.2
4	30-sep-08	11:47	23.0	10.0	17.0	26300	51.4
5	01-oct-08.	11:35	22.0	7.0	16.0	5630	54.8
6	02-oct-08.	13:00	23.0	12.0	17.0	8940	50.3
7	03-oct-08.	12:00	21.0	8.0	16.5	3957	57.0
8	06-oct-08.	11:50	23.0	10.0	16.5	-	51.7
9	07-oct-08.	11:07	24.0	12.0	17.0	10020	74.4
10	08-oct-08.	12:00	20.0	13.0	16.5	12460	76.5
11	09-oct-08.	12:53	25.0	12.0	18.0	9710	60.0
12	10-oct-08.	12:15	24.0	15.0	17.5	12690	66.5
13	13-oct-08.	12:15	25.0	13.5	18.0	5860	66.5
14	14-oct-08.	13:15	23.0	12.0	17.0	5420	58.8
15	15-oct-08.	11:35	23.0	10.0	17.0	6320	41.3
16	16-oct-08.	13:00	23.0	9.0	17.0	1200	58.0
17	17-oct-08.	12:00	20.5	13.5	17.0	18800	81.3
18	20-oct-08.	13:35	20.0	11.5	16.0	8650	61.2
19	21-oct-08.	11:04	22.0	17.0	15.5	29200	53.7
20	22-oct-08.	12:40	23.0	19.2	16.0	11820	51.6
21	23-oct-08.	12:06	23.0	7.5	16.0	23200	43.3
22	24-oct-08.	12:50	22.0	11.0	16.0	7600	55.3
23	27-oct-08.	13:00	24.0	7.0	16.0	6340	66.1
24	28-oct-08.	12:25	16.0	9.0	15.5	3458	64.6
25	29-oct-08.	12:40	17.0	7.0	15.0	3960	46.2
26	30-oct-08.	12:40	22.0	9.5	15.0	6380	50.8
27	31-oct-08.	11:45	22.0	10.0	15.0	8840	54.9
28	03-nov-08.	13:05	22.0	8.0	15.0	4830	56.5
29	04-nov-08.	15:03	22.0	7.0	15.0	3224	41.3
30	05-nov-08.	13:12	22.0	6.0	15.0	3860	43.6
31	10-nov-08.	11:10	22.0	7.0	15.5	27350	49.2



32	11-nov-08.	16:40	25.0	8.0	16.0	1340	27.6
33	12-nov-08.	13:40	27.0	9.0	16.0	6660	37.2
34	13-nov-08.	11:50	24.0	7.0	16.0	2518	27.0
35	14-nov-08.	11:10	23.0	6.0	15.5	31690	16.7
36	17-nov-08.	11:20	24.0	5.0	15.0	13590	51.5
37	18-nov-08.	13:05	20.5	5.0	15.5	2693	36.2
38	19-nov-08.	11:10	20.0	6.0	14.0	24960	48.5
39	20-nov-08.	12:55	18.0	2.5	13.0	4400	46.9
40	21-nov-08.	13:30	19.0	7.0	13.0	7350	53.8
41	24-nov-08.	11:40	19.0	4.5	13.0	7080	49.4
42	25-nov-08.	14:10	22.0	10.0	13.5	2803	52.9
43	26-nov-08.	12:40	19.0	5.0	13.2	5110	53.5
44	27-nov-08.	14:18	22.0	6.0	14.0	2578	30.9
45	28-nov-08.	11:00	23.0	5.0	14.0	34880	44.0
46	01-dic-08.	11:08	24.0	5.5	14.0	72700	43.8
47	02-dic-08.	14:12	19.0	9.0	14.0	1387	51.3
48	03-dic-08.	12:32	20.0	2.0	14.0	7810	36.8
49	04-dic-08.	11:40	22.0	4.0	13.0	7030	42.6
50	05-dic-08.	11:05	21.0	5.0	13.0	60200	45.3
51	08-dic-08.	12:00	21.0	5.0	13.0	6070	49.7
52	09-dic-08.	11:40	22.0	8.0	14.0	2555	52.0
53	10-dic-08.	12:00	21.0	6.0	13.0	2344	57.0
54	11-dic-08.	11:40	19.0	3.0	13.0	5130	43.4
55	12-dic-08.	11:20	21.0	3.0	13.0	19400	35.3
56	15-dic-08.	12:57	23.0	3.0	13.0	4180	34.5
57	17-dic-08.	14:40	22.0	3.0	13.0	1100	27.0
58	19-dic-08.	11:48	23.0	3.0	13.0	8300	41.2
59	22-dic-08.	11:10	23.0	3.0	13.0	68400	38.4
60	24-dic-08.	12:34	24.0	2.0	13.0	9590	35.8
61	26-dic-08.	15:30	23.0	3.0	13.0	2867	27.2
62	29-dic-08.	13:03	23.0	3.0	13.0	8630	49.8
63	31-dic-08.	13:18	21.0	7.0	14.0	7130	34.8
64	02-ene-09.	14:00	19.0	5.0	14.0	4500	32.5
65	05-ene-09.	11:30	23.0	5.5	14.0	29870	40.6
66	07-ene-09.	11:55	25.0	3.0	14.0	12270	34.2



67	09-ene-09.	13:22	23.0	4.0	14.0	6080	22.6
68	12-ene-09.	12:20	24.0	5.0	14.0	9190	44.7
69	14-ene-09.	12:15	20.0	4.0	13.0	11790	41.1
70	16-ene-09.	12:35	17.0	8.0	13.0	6410	71.1
71	19-ene-09.	10:40	19.0	3.0	13.0	25320	36.5
72	21-ene-09.	12:00	21.0	4.0	13.0	11780	38.9
73	26-ene-09.	12:10	23.0	4.0	13.0	11780	38.9
74	28-ene-09.	12:00	25.0	5.0	14.0	15430	35.2
75	02-feb-09	12:00	24.0	6.0	14.0	19700	35.8
76	04-feb-09.	12:45	22.0	6.0	13.0	13220	44.6
<b>ETAPA DE OPERACIÓN CON ORINA HUMANA</b>							
77	06-feb-09.	11:50	23.0	2.0	14.0	26180	37.8
78	09-feb-09.	12:30	24.0	3.0	14.0	14020	26.9
79	10-feb-09.	13:15	23.0	6.0	13.0	10920	24.4
80	11-feb-09.	16:20	25.0	6.0	13.0	12430	27.4
81	12-feb-09.	11:50	25.0	7.0	15.0	18900	44.2
83	17-feb-09.	12:20	25.0	10.0	16.0	13720	41.5
84	18-feb-09.	11:20	27.0	10.0	17.0	33840	36.3
85	19-feb-09.	11:35	26.5	9.0	17.0	29970	25.0
86	20-feb-09.	13:40	24.0	13.0	17.0	31020	25.5
87	23-feb-09.	14:25	24.0	4.0	15.0	4730	26.0
88	24-feb-09.	12:00	21.0	1.0	13.0	59400	29.5
89	25-feb-09.	11:30	23.0	3.0	16.0	15980	6.0
90	26-feb-09.	12:50	25.0	3.0	16.0	14440	13.2
91	27-feb-09.	13:40	26.0	4.0	16.0	25000	9.2
92	02-mar-09.	12:20	23.0	1.0	17.0	13810	22.5
93	03-mar-09.	12:50	23.0	3.0	16.0	19070	19.8
94	04-mar-09.	13:50	25.0	4.0	16.0	6860	2.4
96	06-mar-09.	15:12	26.0	5.0	16.0	18520	4.5
97	11-mar-09.	12:00	26.0	8.0	17.0	13800	21.3
98	12-mar-09.	11:04	25.5	9.0	17.0	14560	36.8
99	13-mar-09.	16:40	25.0	9.0	18.0	2007	42.1
100	16-mar-09.	12:25	26.0	8.0	18.0	10760	39.2
101	17-mar-09.	14:05	24.0	10.0	18.0	9980	42.5
102	18-mar-09.	13:50	24.0	10.0	18.0	8170	41.3



103	23-mar-09.	12:00	26.0	6.0	18.0	13620	26.6
104	24-mar-09.	12:20	28.0	9.2	18.0	9730	39.1
106	27-mar-09.	11:40	27.5	8.5	18.0	22410	30.3
107	30-mar-09.	14:04	24.0	7.5	18.0	5250	12.2
108	31-mar-09.	12:53	30.0	9.0	18.5	10360	25.5
109	02-abr-09.	12:26	29.0	16.0	19.0	7740	17.4
111	06-abr-09.	14:00	31.0	11.0	20.0	9990	37.7
112	07-abr-09.	14:18	28.0	10.0	19.0	7580	50.8
113	08-abr-09.	14:08	26.0	11.0	19.0	9190	38.8

**Tabla D.7 Censo de plantas**

No. de sección	Brotos verdes	Brotos secos	Plantas verdes delgadas	Plantas verdes gruesas	Total
<b>15 de octubre de 2008</b>					
1	11	8	15	34	68
2	6	3	17	37	63
3	12	7	20	14	53
4	13	1	23	45	82
5	9	4	32	50	95
total	51	23	107	180	361
<b>09 de enero de 2009</b>					
1	21	19	25	38	103
2	19	11	24	44	98
3	14	10	12	21	57
4	8	13	32	36	89
5	7	11	50	51	119
total	69	64	143	190	466



<b>09 de febrero de 2009</b>					
1	15	11	27	39	92
2	12	3	43	44	102
3	8	7	19	21	55
4	11	11	34	36	92
5	5	7	46	51	109
total	51	39	169	191	450
<b>27 de marzo de 2009</b>					
1	7	12	28	56	103
2	4	5	19	49	77
3	5	11	13	17	46
4	7	12	13	31	63
5	6	0	48	34	88
total	29	40	121	187	377
<b>05 de abril de 2009</b>					
1	7	12	28	56	103
2	4	5	19	49	77
3	4	11	15	7	37
4	9	12	5	13	39
5	-	-	-	-	-
total	24	40	67	125	256
<b>17 de abril de 2009</b>					
1	6	6	5	25	42
2	5	4	2	15	26
3	4	7	1	11	23
4	10	10	2	9	31
5	5	15	6	10	36
total	30	42	16	70	158



## GLOSARIO

DQO: Demanda química de oxígeno  
DBO: Demanda bioquímica de oxígeno  
HAFSS: Humedal artificial de flujo sub-superficial  
HAFSL: Humedal artificial de flujo superficial libre  
Q.prom: Flujo promedio total  
Q. bomba: Flujo en bomba  
ST: Sólidos totales  
SST: Sólidos suspendidos totales  
SS: Sólidos suspendidos  
SDT: Sólidos disueltos totales  
SVT: Sólidos volátiles totales  
SFT: Sólidos fijos totales  
NH<sub>3</sub>: Nitrógeno amoniacal  
N-orgánico: Nitrógeno orgánico  
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitratos  
NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: Nitritos  
N-total: Nitrógeno total  
NTK: Nitrógeno total Kjeldahl  
Tamb.máx: Temperatura máxima del ambiente  
Tamb.mín: Temperatura mínima del ambiente



# BIBLIOGRAFÍA



1. An O.S., Uchiyama K., Inadama D. & Yamagiwa K. (2008). *Simultaneous removal of color, organic compounds, nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland*. Journal of hazardous materials, pp:1-29.
2. American Public Health Association (APHA), AWWA & WPCF, 1995. *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Washington DC: American Public Health Association.
3. Behrendt J., Arevalo E., Gulyas H., Niederste H.J., Niemiec A., Zhou J. & Otterpohl R. (2001), *Production of value added products from separately collected urine*.
4. Beltrán M.M.G. (2010). *Remoción de nitrógeno ureico en un humedal artificial de flujo sub-superficial (HAFSS): Adaptación y evaluación del proceso continuo*. Tesis para obtener el grado de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).
5. Calheiros C.S.C., Rangel A.O.S.S & Castro P.M.L. (2007). *Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater*. Water research, Vol.41, pp: 1790-1798.
6. Celis H. J, Junod M.J y Sandoval E. M. (2005), *Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. Theoría, Vol.14 (1), pp: 19.
7. Ciria M.P., Solano M.L. & Soriano P. (2005). *Role of Macrophyte Typha latifolia in a Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Assessment of Its Potential as a Biomass Fuel*. Biosystems Engineering 92 (4), pp: 535–544.
8. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007. *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. México, D.F., pp: 1-259.
9. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2008. *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales. México, D.F., pp: 1-358.
10. De Feo G., Belgiorno V. & Napoli R.M.A. *Vertical flow reed bed systems: a feasible solution for small wastewater treatment plants*.
11. Drangert J.O. (1998). *Urine blindness and the use of nutrients from human excreta in urban agriculture*. Geo Journal, Vol 45, pp: 201–208.
12. Farahbakhshzad N & Morrison G. (1997). *Ammonia removal processes for urine in an upflow macrophyte system*. Environmental Science and Technology, Vol. 31, pp: 3314-3317.
13. Guntenspergen G. R., Stearns F. & Kadlec J.A. (1989). *Wetland ecosystems: Natural water purifiers?*. In D. A. Hammer (ed). *Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural*. Lewis Publishers, pp: 74.



14. Hammer D. A. & Bastian R. K. (1989). *Wetland ecosystems: Natural water purifiers?*. In D. A. Hammer (ed). *Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural*. Lewis Publishers, pp: 5, 12-13.
15. Huang J., Reneau R.B. & Hagedorn C. (2000), *Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater*, *Water Research*, Vol 34, No.9, pp: 2582-2588.
16. Instituto mexicano de tecnología del agua (IMTA), 2009. *Los humedales, recurso barato y eficaz para combatir la contaminación del agua*. <http://www.imta.mx>
17. Jönsson H, Stenström T, Svensson J & Sundin A. (1997). *Source separated urine- nutrient and heavy metal content, water saving and faecal contamination*. *Water Science and Technology*, Vol. 35, No 9, pp: 145–152.
18. Kadlec R.H. & Knight R.L. (1996). *Treatment wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, EUA.
19. Kadlec R.H, Bastiacens W. & Urban D. T. (1993). *Hidrological design of free water surface treatment wetlands*. In G. Moshiri, G.A. (Ed). *Constructed wetlands for water quality improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, EUA, pp: 77-86.
20. Keffala C. & Ghrabi A. (2005), *Nitrogen and bacterial removal in constructed wetlands treating domestic waste water*. *Desalination*, Vol.185, pp: 383-389.
21. Kirchmann H. & Pettersson S. (1995). *Human urine- Chemical composition and fertilizer use efficiency*. *Fertilizer Research*, Vol. 40, pp: 149-154.
22. Lahora A. (2002). *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los gallardos (almería)*, pp: 99-112.
23. Lara B.J.A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*, Universidad Politécnica de Cataluña, Instituto Catalán de tecnología. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental ICT-UPC. España, pp: 7,8.
24. Li L., Li Y., Kumar B.D., Nian Y. & Jiang G. (2008). *Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: Evidence from Taihu Lake of China*, *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp: 1656-1663.
25. Lind B.B., Ban Z. & Bydén S. (2000). *Nutrient recovery from human urine by struvite crystallization with ammonia adsorption on zeolite and wollastonite*, *Bioresource Technology*, Vol. 73, pp: 169-174.
26. Llagas C.W.A. y Gómez E.G. (2006), *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*, *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, Vol. 15, N° 17, pp: 85.
27. Lord R.D. (1982). *Uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales*.



28. Lot A. y Novelo A. (2004). *Iconografía y estudio de plantas acuáticas de la ciudad de México y sus alrededores*, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología, pp:36.
29. Maurer M., Pronk W. & Larsen T.A. (2006). *Treatment processes for source-separated urine*. Water research, Vol.40, pp: 3151-3166.
30. Novotny V. (2003). *Water quality: diffuse pollution and watershed management*. John Wiley and Sons, Inc. EUA, pp: 288.
31. Otto S., Groffman P.M., Findlay E.S.E. & Arreola, A.E. (1999). *Invasive plant species and microbial processes in a tidal freshwater marsh*. Journal of Environmental Quality, Vol. 28, pp: 1252-1257.
32. Ran N, Agamib M. & Oron M. (2004). *A pilot study of constructed wetlands using duckweed (Lemna gibba L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel*. Water Research, Vol. 38, pp: 2241-2248.
33. Sim C.H, Yusoff M.K, Shutes B, Ho S.C & Mansor M. (2008). *Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia*. Journal of environmental management 88, pp: 307-317.
34. Surrency, D. (1993). *Evaluation of aquatic plants for constructed wetlands*. In: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for water quality improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, EUA, pp. 349–357.
35. Tanner C.C., Clayton J.S. & Upsdell M.P. (1995), *Effect of loading rate and planting on Treatment of dairy farm wastewater in constructed wetlands. II. Removal of nitrogen and phosphorus*. Water Research, Vol. 29, pp: 27–34.
36. Udert K.M., Larsen T.A., Biebow M. & Gujer W. (2003). *Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system*. Water Research, Vol. 37, pp: 2571–2582.
37. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 1993a. *Constructed wetlands for wastewater treatment and wildlife habitat, 17 case studies*. EPA832-R-93-005.
38. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 1993b. *Constructed Wetlands Handbooks (Vol. 1): A Guide to Creating Wetlands for Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage and Stormwater in the Mid-Atlantic Region*. <http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/hand.pdf>
39. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2000. *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA/625/R-99/010. Office of Research and Development Cincinnati, OH, pp: 12-15.
40. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2004. *Constructed treatment wetland*. EPA 843-F-03-013.



41. Vinneras B. & Jönsson H. (2002). *The performance and potential of faecal separation and urine diversion to recycle plant nutrients in household wastewater*. Bioresource Technology, Vol. 84, pp: 275-282.
42. Vymazal J., Brix H., Cooper P.F., Green M. & Haberl R. (1998). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Leiden: Backhuys Publishers.
43. Vymazal J. (2007). *Removal of nutrients in various types of constructed wetlands*. Science of the total environment, Vol. 380, pp: 48–65.



## Alcances

1. Experimentar en modo continuo la capacidad de un humedal artificial de flujo sub-superficial como alternativa para tratar una corriente de orina humana separada.
2. Evaluar la remoción de nitrógeno en sus formas (N-total,  $\text{NH}_3$ , N-orgánico,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) en el HAFSS durante dos etapas: la primera con una duración de cuatro meses para lograr un periodo de adaptación y acondicionamiento, alimentando con una disolución de urea; la segunda etapa evaluándose durante dos meses de operación con orina humana.
3. Monitorear y analizar el comportamiento de parámetros ambientales durante el período de experimentación.