



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y REMOCIÓN  
DE ESPECIES DE NITRÓGENO EN  
HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO  
VERTICAL ESCALA DE LABORATORIO**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**QUÍMICO**

**P R E S E N T A :**

**THALÍA HUANOSTA GUTIÉRREZ**

**MÉXICO, D.F.**

**2006**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**Jurado asignado:**

**Cargo**

Presidente

Vocal

Secretario

1er. Suplente

2do. Suplente

**Nombre**

M. en C. Raúl Genaro Aguilar Caballero

Dra. María del Carmen Durán Domínguez

M. en C. José Manuel Méndez Stivalet

M. en C. María Isabel Gracia Mora

Q.F.B. Ruth Edith Martín Fuente

**Sitio donde se realizó la investigación:**

La investigación se realizó dentro del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA) en los laboratorios 301, 302 y 303 del Conjunto E de la Facultad de Química, Ciudad Universitaria, UNAM, México D. F.

**Directora de tesis**

Dra. en Ing. María del Carmen Durán de Bazúa

\_\_\_\_\_

**Supervisor técnico**

M. en I. Amb. Alejandro Guido Zárate

\_\_\_\_\_

**Sustentante**

Thalía Huanosta Gutiérrez

\_\_\_\_\_

**Reconocimientos:**

A la Doctora Durán:

Por su apoyo incondicional, su tiempo y por sus enriquecedores comentarios a lo largo del desarrollo de la tesis, su asesoría fue valiosísima en todo momento para concluir este trabajo con éxito.

A Guido Zarate Alejandro:

Por su valioso apoyo técnico en la realización de este trabajo.

Al M. en C. Raúl Genaro Aguilar Caballero y M. en C. José Manuel Méndez Stivalet:

Por sus valiosas observaciones en la revisión de tesis, al colaborar con su trabajo y tiempo para mejorar este escrito.

## **Agradecimientos**

A mis padres:

Alfonso Huanosta Tera y Ma. Salud Gutiérrez Mejía. Gracias por la vida que juntos me dieron. Fueron la primera y más perdurable visión del mundo. Visión que rigió mi vida y forjo los sueños que me han traído hasta este punto, caminando lado a lado, puedo decir que la promesa está cumplida. Los amo a los dos.

A Areli:

Gracias hermana por ser una compañía perdurable, por las buenas peleas, por los buenos ratos y buenas carcajadas que juntas hemos gozado y sufrido. Estas en mi corazón y en mi mente a cada momento.

A E. Isarain Chávez Guerrero por estar en mi vida, gracias por tu compañía, no tengo palabras para agradecerte tu apoyo y confianza.

A mis compañeros y amigos del laboratorio: Amalia, Ricardo, Nadja, Cuquis, Ivonne, Ensueño, Violeta Alejandro, David, Sandra, Luis Alberto, gracias por su compañía.

A todo el personal que labora en los laboratorios del PIQAYQA:

Por el apoyo otorgado durante el desarrollo de este trabajo en los laboratorios de PIQAYQA.

Índice  
Índice de Figuras  
Índice de Tablas  
Glosario  
Abreviaciones  
Nomenclatura  
Resumen  
Capítulo 1  
Problemática  
Objetivos y metas  
Objetivo general  
Metas  
Hipótesis  
Alcances  
Capítulo 2  
Introducción  
Humedales artificiales de flujo vertical  
Humedales artificiales de flujo horizontal  
Factores que afectan el funcionamiento de los humedales artificiales  
Movimiento  
Valor de ph  
Potencial de oxidación-reducción o redox  
Oxígeno  
Compuestos orgánicos  
Compuestos inorgánicos  
Interacciones entre microorganismos y plantas  
Propiedades del agua  
Calidad del agua  
Especies de nitrógeno como contaminantes en el agua  
Nitratos como contaminantes del agua  
Nitritos como contaminantes del agua  
Ión amonio como contaminante del agua  
Materia orgánica como contaminante del agua  
Ciclo del nitrógeno  
Mecanismos de remoción de contaminantes en un humedal artificiales  
Amonificación como mecanismo de remoción de contaminantes en humedales artificiales  
Nitrificación como mecanismo de remoción de contaminantes en humedales artificiales  
Desnitrificación como mecanismo de remoción de contaminantes en humedales artificiales  
Capítulo 3  
Metodología  
Construcción de los reactores  
Montaje de cuatro reactores para conformar el humedal artificial de flujo vertical a escala de laboratorio  
Condiciones experimentales  
Iluminación  
Condiciones de temperatura ambiental  
Composición del agua residual sintética

Alimentación de los reactores  
Estabilización del sistema  
Primera etapa de alimentación de ARS  
Segunda etapa de alimentación de ARS  
Toma de muestras  
Métodos analíticos utilizados para determinar los parámetros de interés  
Detección de ión amonio  
Detección de nitrato  
Detección del nitrógeno orgánico  
Determinación de nitrógeno total  
Determinación de DQO  
Fundamentos de la determinación del ph  
Análisis estadísticos de los datos experimentales  
Capítulo 4  
Resultados, discusión y observaciones  
Resultados obtenidos, observaciones y discusión para nitrógeno amoniacal [ $\text{NH}_4^+$ ]  
Resultados obtenidos, observaciones y discusión para [ $\text{NO}_3^-$ ]  
Resultados obtenidos, observaciones y discusión para [ $\text{N-N}_{\text{org}}$ ]  
Resultados obtenidos, observaciones y discusión para [ $\text{N-N}_{\text{total}}$ ]  
Resultados, observaciones y discusión de remoción de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno, DQO  
Resultados de parámetros en el humedal artificial a escala de laboratorio  
Determinación de ph  
Determinación de temperatura  
Crecimiento y adaptación de la macrófita (*Phragmites australis*)  
Capítulo 5  
Conclusiones, sugerencias y perspectivas  
Conclusiones  
Sugerencias  
Perspectivas  
Anexos  
Bibliografía

## Glosario

**Aerénquima:** Palabra que no existe en el diccionario de la Real Academia Española, RAE, pero que viene de **parénquima**, del griego científico **παρηγχυμα**, sustancia de los órganos. Tejido vegetal constituido por células de forma aproximadamente esférica o cúbica y con espacios de separación y que sirve para “absorber” el CO<sub>2</sub> del aire y transformarlo en biomasa celular y oxígeno molecular (*aeros*, aire y *enchyma*, infusión). En inglés es aerenchyma (spongy tissue characteristic of aquatic plants)

**Afluente:** Agua que desemboca en otro cauce principal.

**Aguas naturales:** Se define como el agua cruda, subterránea, de lluvia, de tormenta y superficial.

**Aguas residuales:** Aguas cuya composición es variada, proveniente de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y, en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

**Aguas residual sintética: (ARS)** Agua de composición conocida preparada de manera artificial con reactivos de pureza conocida.

**Amonificación:** Descomposición bacteriana de nitrógeno orgánico a amonio.

**Anóxico:** Referente a la ausencia de oxígeno libre en un medio acuoso, pero pueden estar nitratos, nitritos y sulfatos presentes que actúan de la misma manera que el oxígeno en las reacciones de óxido-reducción.

**Contaminantes básicos:** Son aquellos compuestos que pueden ser removidos o estabilizados mediante procesos convencionales. En la Norma Oficial Mexicana sólo se consideran las grasas y aceites, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales.

**Demanda química de oxígeno (DQO):** Es una medida indirecta de los compuestos oxidantes requeridos para oxidar todas las posibles especies químicas presentes (como el permanganato de potasio o el dicromato de potasio, en presencia de ácido sulfúrico y catalizadores, por lo que de manera general se le conoce como demanda química de “oxígeno” aunque no es este elemento el que realiza la oxidación.

**Desnitrificación:** La transformación microbiana de los nitratos a nitrógeno gaseoso.

**Efluente:** En una planta de tratamiento de aguas residuales, se refiere al agua que se evacua después de haber sido tratada y en este caso particular es el agua de salida del reactor del sistema de humedales.



Heterótrofo: Organismo que se nutre a partir de compuestos orgánicos carbonosos por diferencia con los organismos autótrofos que pueden asimilar el  $\text{CO}_2$  del aire.

Influyente: En una planta de tratamiento de aguas residuales, se refiere al agua que se introduce al sistema y, para los humedales artificiales, se entiende como el agua que alimenta al sistema de humedales artificiales.

Lixiviación: Disolución preferente de uno ó más componentes (generalmente son sales minerales del suelo como ejemplo  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^+$ ) de una mezcla sólida por contacto con un disolvente líquido.

## Abreviaciones

ANOVA: Abreviatura en inglés (analysis of variance) y que es ANDEVA en español (análisis de varianza)

APHA: Siglas en inglés para la American Public Health Association, Asociación Americana de Salud Pública

ARS: Agua residual sintética

AWWA: Siglas en inglés para la American Water Works Association, Asociación Americana de Sistemas de Agua

DQO: Demanda química de oxígeno

D.E.: Desviación estándar

HA: Humedal Artificial

HAFH: Humedal artificial de flujo horizontal

HAFV: Humedal artificial de flujo vertical

LFD: Ley Federal de Derechos (de uso del agua)

LSD: Siglas en inglés para “Least Significant Differences”, diferencias mínimas significativas (estadística)

Máx.: Máximo

Mín.: Mínimo

N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Nitrógeno como ión amonio

N-N<sub>org</sub>: Nitrógeno en forma orgánica

N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitrógeno como nitrato

N-N<sub>total</sub>: La suma de todo el nitrógeno existente

PC: Siglas en inglés para computadora personal

pOR: Potencial de óxido reducción

Prom.: Promedio

PVC: Cloruro de polivinilo, por sus siglas en inglés

RA1: Reactor con planta

RA2: Reactor sin planta

RB1: Reactor con planta

RB2: Reactor sin planta

TRH: Tiempo de residencia hidráulica

WPCF: Siglas en inglés para la Water Pollution Control Federation, Federación para el Control de la Contaminación del Agua

## **Nomenclatura**

A: Absorbancia (ley de Lambert y Beer)

C: Concentración (ley de Lambert y Beer)

°C: Grados Celsius

l: Longitud de la celda en centímetros (ley de Lambert y Beer)

L: Litros

mL: Mililitros

mV: Milivolts

ppm: Partes por millón, miligramo por kilogramo o miligramo por litro

## **Caracteres griegos:**

$\epsilon$ : constante (ley de Lambert y Beer)

$\Phi$ : diámetro granular, en unidades de milímetros

## Resumen

A través de este estudio se busca generar más información sobre el comportamiento dinámico en la remoción de nitrógeno en humedales artificiales, cuando estos sistemas son sometidos a cambios en la concentración de materia orgánica. Para ello se construyeron y pusieron en marcha a régimen permanente 4 reactores de PVC a escala de laboratorio (cilíndricos; diámetro de 0.3 m; profundidad de 0.35 m; volumen de operación de 12.4 L) para el tratamiento de aguas residuales sintéticas a escala de laboratorio que siguen los principios de los sistemas naturales. Dichos reactores simulan la parte conocida como rizosfera (zona circundante a las raíces de las plantas) de un humedal artificial. Los reactores se empacaron con escoria volcánica de granulometría conocida (tezontle). En dos de ellos se colocaron plantas vasculares de carrizo (*Phragmites sp.*). Los otros dos reactores sirvieron como humedales testigo o control y no se colocó planta alguna. Los reactores se alimentaron con agua residual sintética (ARS), preparada en el laboratorio con reactivos grado analítico, utilizando como fuente de nitrógeno,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  en concentración conocida (6.36 ppm  $\text{N-NH}_4^+$ ). El tiempo de residencia hidráulica fue de  $40 \pm 6.6$  horas. Se realizaron dos etapas de experimentación de manera continua (4 semanas cada una) donde la variable fue la cantidad de contaminantes adicionada en el agua residual en forma de sacarosa de  $450 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $225 \text{ mg L}^{-1}$ . Fue medida como demanda química de oxígeno soluble DQO, donde el promedio medido experimentalmente fue, en promedio, de  $443 \text{ mg DQO L}^{-1}$ , para la primera etapa y de  $316 \text{ mg DQO L}^{-1}$ , para la segunda etapa. El diseño que se siguió para su construcción fue de flujo vertical manteniendo el sistema inundado hasta 2 cm antes de la superficie. Se llevó a cabo el estudio de la remoción de especies de nitrógeno ( $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N-N}_{\text{total}}$ ) en el agua residual sintética (ARS) considerando los datos a la entrada y a las salidas a 2 cm, 10 cm, 30 cm de profundidad, influente de las dos etapas experimentales. También se dio seguimiento al sistema en términos del contenido de materia orgánica disuelta, medida como demanda química de oxígeno, DQO, del potencial de óxido reducción pOR, así como otros parámetros (temperatura, pH, crecimiento de la planta). Se encontró que la presencia de la planta vascular promueve una mayor remoción de nitrógeno amoniacal y nitratos, debido principalmente a la generación de oxígeno molecular por las raíces de la planta, favoreciendo el desarrollo microbiano. El efecto del cambio en la carga orgánica, de manera general fue que los mecanismos de remoción de  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N-N}_{\text{total}}$ , se vieron favorecidos al disminuir la carga orgánica en la segunda etapa con  $225 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa. Se identificó la inmovilización del nitrógeno como un fenómeno adverso a la remoción de nitrógeno total. En términos generales se puede pensar que la presencia de cantidades de material disuelto total ( $443 \text{ mg DQO L}^{-1}$ ), similares a las que se utilizaron en estos experimentos desfavorecen la remoción de nitrógeno total debido a la inmovilización del nitrógeno. Los mecanismos de remoción para el ion amonio se ven ligeramente favorecidos por cargas grandes de material orgánico ( $450 \text{ mg DQO L}^{-1}$ ). Puede decirse, con base en los resultados de esta investigación, que los HAFV son sistemas que remueven con éxito nitrógeno amoniacal ( $< 50\%$ ) y nitratos ( $< 90\%$ ), en los primeros 30 cm de profundidad.

**Palabras clave:** Humedales artificiales, flujo vertical, nitrógeno, ion amonio, nitrato, *Phragmites sp*

## Capítulo 1

### 1.1 PROBLEMÁTICA

Los recursos hídricos juegan un papel muy importante en el desarrollo socioeconómico de México y de cualquier nación. Las diferentes actividades humanas traen consigo problemas como el deterioro de la calidad del agua. Su tratamiento debe ser una prioridad cuando se pretende alcanzar un desarrollo sustentable. En México, cerca del 12% del agua residual (del sector social, industrial y agropecuario) es tratada y el 88% de ésta es desechada a los cuerpos receptores (ríos, lagos, mares). Otra parte de esta agua se infiltra en el subsuelo hasta los mantos freáticos, contaminando las aguas subterráneas y la tierra a su paso (INEGI, 2003). Se calcula que el 57% de las aguas residuales en México que son generadas por la población, no reciben ningún tratamiento (INEGI, 2003). Parte de esta agua es utilizada para riego agrícola, por lo que existen riesgos sanitarios para la población que consume los productos de cosecha. Los países y comunidades rurales enfrentan no solamente el problema de la escasez del recurso, sino también la contaminación de los cuerpos de agua existentes, lo que pone a estas comunidades en situación de desventaja y en una condición vulnerable.

Es necesario que en México y en otros países con economías emergentes, se desarrollen e implementen tecnologías óptimas desde el punto de vista técnico y económico para hacer frente a dicho problema (Guido-Zárate, 2006). Una posibilidad para tratar las aguas residuales de origen doméstico son los humedales artificiales. Estos sistemas imitan los principios de los sistemas naturales, conocidos como humedales naturales o pantanos (Durán-de-Bazúa y col., 2005), representan una opción viable de tratamiento de aguas residuales. Los mecanismos de remoción de nutrientes son los que comúnmente ocurren en los sistemas naturales; además, son de fácil operación y mantenimiento. Los procesos fisicoquímicos y biológicos que se llevan a cabo en su interior intervienen en la remoción de los contaminantes dentro de un humedal.

El nitrógeno es uno de los nutrientes más importantes, tanto para las plantas como para los microorganismos. Este elemento puede venir en las aguas residuales debido a la descarga de sustancias orgánicas que se generan dentro de los hogares y que contienen este elemento. El nitrógeno debe ser removido de las aguas residuales debido a que una vez que se descargan éstas a los cuerpos receptores, sin ningún tratamiento previo, se promueve el crecimiento de microorganismos fotoautótrofos, como las algas las cuales al morir impiden el paso normal de la luz disminuyendo el proceso fotosintético. Esto impide que las propias algas aporten gran cantidad de oxígeno a la columna del agua indispensable para la existencia de peces y otras especies de animales. En la mayor parte de los procesos de remoción de nitrógeno presentes en estos sistemas participan los microorganismos en una relación simbiótica con la rizosfera de las plantas. Los contaminantes del agua residual que actúan como nutrientes, son removidos e incorporados a los esqueletos carbonados de los microorganismos y de las plantas. Los principales nutrientes inorgánicos que necesitan los microorganismos son: N, S, P, K, Mg, Ca, Fe y Na. Dentro de las interacciones que se dan entre los microorganismos y las plantas se encuentra la captura de los nutrientes minerales por los microorganismos y la producción microbiana, los cuales son importantes factores de crecimiento vegetal (Kneidinger, 1997; Rodríguez-Monroy, 2004).

El estudio a fondo de estos sistemas de tratamiento de agua arrojan información básica para ampliar y justificar su uso. La variación de la concentración de la materia orgánica de aguas residuales, urbanas y suburbanas, a lo largo del día y de los años, induce cambios bióticos y abióticos en el ecosistema de humedales artificiales. Es de gran interés conocer el comportamiento y cambios de estos sistemas, debido a la variación en la composición del agua que entra al humedal (influyente). En este caso particular se ha trabajado con dos contenidos de materia orgánica disuelta, para conocer los cambios dinámicos en la concentración de especies del nitrógeno. También se espera corroborar la importancia de la presencia de la planta al comparar los resultados de los reactores control con respecto del humedal con planta y su repetición.

## 1.2 Objetivos y metas

### 1.2.1 Objetivo general

Obtener, mediante un seguimiento sistemático de un reactor de laboratorio que simule humedales artificiales, información sobre el comportamiento dinámico de la remoción de nitrógeno en la rizosfera de organismos vegetales, cuando cambia la concentración de material biodegradable en el agua de alimentación del reactor en forma de sacarosa, sulfato de amonio y fosfato de sodio, dando seguimiento a la carga orgánica en términos de la variable conocida como demanda química de oxígeno soluble, DQO.

### 1.2.2 Metas

Estudio de la dinámica de remoción de las especies de nitrógeno  $N-NH_4^+$ ,  $N-NO_3^-$ ,  $N-N_{org}$ ,  $N-N_{total}$  a distintas profundidades del reactor en estudio de 2, 10 y 30 cm con un contenido de “contaminantes disueltos” medidos como DQO de  $443 \text{ mg L}^{-1}$  durante 4 semanas en una primera etapa y DQO de  $316 \text{ mg L}^{-1}$  durante 4 semanas en una segunda etapa.

## 1.3 Hipótesis

*A mayor carga orgánica, medida en términos de la DQO, la eficiencia será mayor en la remoción de especies de nitrógeno.*

## 1.4 Alcances

Los experimentos se limitan al montaje y estabilización del reactor con una planta *Phragmites sp* y su duplicado y de un reactor usado como control sin planta y su duplicado, que simulen la parte de la rizosfera de un humedal artificial de flujo vertical a escala de laboratorio.

Los experimentos se limitan a realizar la experimentación en dos etapas consecutivas durante 4 semanas, variando la “carga orgánica” al disminuir a la mitad el contenido de sacarosa.

En los experimentos se verán, tanto el comportamiento como los cambios dinámicos en la remoción de especies de nitrógeno, en las dos etapas consecutivas aún cuando no hayan alcanzado la estabilización, considerada como tal cuando las variaciones en la remoción de la materia orgánica tienen valores de  $\pm 10\%$  de la DQO eliminada.

Se corroborará el efecto de la presencia de una planta en el reactor en estudio y su repetición comparándolo con un reactor que no la tiene en su eficiencia de remoción de especies de nitrógeno.

## Capítulo 2

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Se puede conceptualizar a un humedal como una área de suelo saturada de agua, provista de plantas acuáticas superficiales submergentes o emergentes o flotantes, existiendo una zona de transición entre un sistema acuático y uno terrestre.

El grado de inundación en los humedales varía desde sistemas no inundados, pero sí saturados de agua bajo la superficie, hasta sistemas completamente inundados.

Un humedal artificial es una construcción que simula las condiciones de un humedal natural. Se emplea como tratamiento secundario o terciario para la limpieza de aguas residuales de tipo doméstico.

La estructura de un humedal artificial es muy variable y depende de:

- **Condiciones hidrológicas:**  
El tiempo de residencia hidráulica se refiere al tiempo que el agua permanece en el humedal. También se puede ver como el tiempo que tiene el ecosistema para entrar en contacto con el agua, activando los mecanismos que actúan en la remoción de nutrientes.
- **Empaque del reactor:**  
La estructura, propiedades químicas, porosidad y distribución del material de empaque de los humedales artificiales influencia la difusión del oxígeno, la difusión de los nutrientes y sirve como soporte para la biota del ecosistema.
- **La presencia de plantas:**  
Hablando de plantas macrófitas, se puede decir que éstas modifican la conductividad, las condiciones hidrológicas, la química de la tierra con el crecimiento de las raíces.
- **Otros factores que afectan al sistema son la calidad del agua, el clima y una maduración exitosa del sistema.**

La siguiente figura (Figura 1.1) es un diagrama de un humedal artificial de flujo horizontal. En la cámara de sedimentación se remueven todos los sólidos suspendidos sedimentables o flotantes y la grasa que flote en el agua. El agua clarificada es conducida a través del humedal artificial, el cual está provisto de una membrana impermeable soportada en una "alberca" de concreto. En este lecho de raíces y empaque "inerte", el agua residual clarificada se "limpia" por diversos mecanismos físicos, químicos y biológicos, permaneciendo un tiempo como residente del reactor. Después, el agua es colectada y conducida a una cámara de almacenamiento que sirve como depósito y, finalmente, es



vaciada a cuerpos receptores, ya sea sin tratamiento terciario o sujeta a algún tipo de tratamiento (desinfección, tratamiento de oxidación avanzada, etc.).

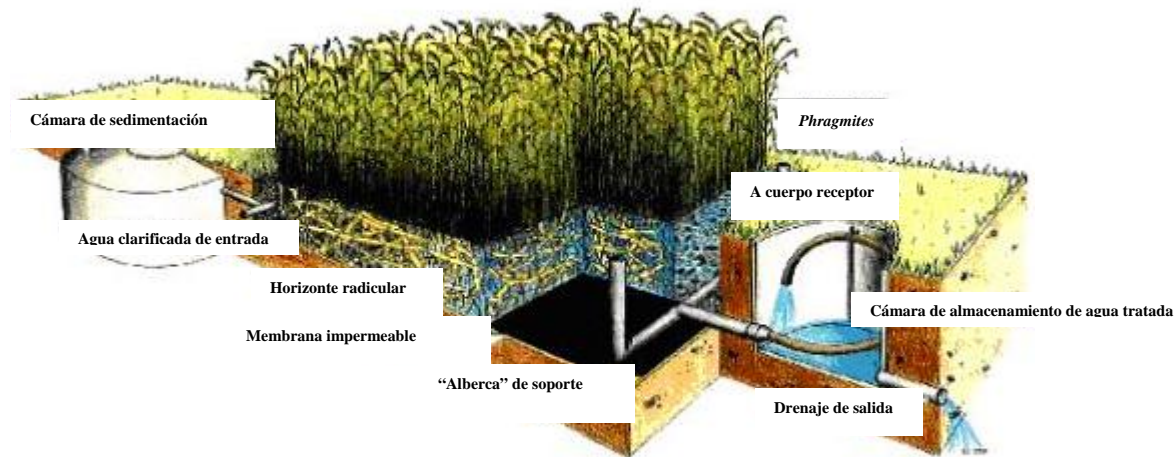


Figura. 1.1 Humedal artificial de flujo horizontal

Existen diversos diseños en humedales artificiales que dependen de las condiciones del lugar donde se instalen, del tipo de macrofitas, del tipo de agua a tratar y de muchos otros factores. En esta investigación sólo se explicarán dos tipos de diseños en humedales artificiales, los de flujo horizontal y los de flujo vertical.

## 2.2 Humedales artificiales de flujo vertical

Los humedales de flujo vertical varían en su diseño al tener la entrada de influente en toda la parte superior del reactor, donde el agua fluye por gravedad hacia la salida que se encuentra en la parte inferior del reactor donde es colectada. En su paso, el agua contaminada entra en contacto con las raíces y microorganismos del medio que participan en los procesos de remoción de los nutrientes.

Estos sistemas son muy útiles cuando se carece de espacio para instalar grandes humedales, pero requieren de instalaciones más complejas para su operación. Se cree que los HAFV son más eficientes en el proceso de desnitrificación que los sistemas de flujo horizontal debido a que, por su profundidad, poseen mayores zonas donde el oxígeno disuelto es escaso. (Watson y Danzing, 1993)

### **2.3 Humedales artificiales de flujo horizontal**

Los humedales de flujo horizontal varían en su diseño al tener la entrada de influente de forma lateral y el agua residual fluye a lo largo del sistema en forma horizontal, pasando por toda la zona de la rizosfera en donde se efectúa la remoción de los nutrientes, saliendo del lado opuesto al sitio de alimentación, donde es colectado. Por lo general, estos sistemas tienen una ligera pendiente que favorece el flujo de agua por gravedad.

### **2.4 Factores que afectan el funcionamiento de los humedales artificiales**

#### **2.4.1 Movimiento**

El movimiento del agua contribuye a la dispersión pasiva de los contaminantes y, por ende, de los microorganismos. La misma importancia tiene el movimiento para la obtención y distribución de los nutrientes necesarios para el desarrollo microbiano y la eliminación metabólica de los subproductos. Los humedales se caracterizan por un flujo relativamente continuo, confiriéndole una mayor capacidad de mezclado. También el movimiento del agua por evaporación y lixiviación contribuye en el desplazamiento de los nutrientes.

#### **2.4.2 Valor de pH**

Los microorganismos, en general, no pueden tolerar valores extremos de pH. La mayoría viven a valores de pH entre 5.6 a 7.6. El pH determina particularmente la solubilidad del  $\text{CO}_2$ , afectando la velocidad de fotosíntesis. Afecta también la disponibilidad de los nutrientes necesarios, como amonio y fosfatos, lo cual limita el desarrollo microbiano.

#### **2.4.3 Potencial de oxidación-reducción o redox**

La capacidad de un organismo para llevar a cabo una reacción, por ejemplo una reacción enzimática, depende del estado de oxidación-reducción del ambiente. En una disolución, la proporción de componentes oxidados en relación a los reducidos constituye el llamado potencial redox, pOR. Algunos microorganismos sólo pueden estar en ambientes oxidados y otros solamente en ambientes reducidos. Los microorganismos aerobios estrictos son metabólicamente activos a potenciales redox positivos, mientras que los anaerobios estrictos sólo son metabólicamente activos a potenciales redox negativos. Los anaerobios facultativos operan en un amplio margen de valores de pOR, utilizando oxígeno molecular como sumidero de electrones a potenciales redox positivos y otros aceptores de electrones a pOR negativos. El potencial redox está muy influido por la presencia o ausencia de oxígeno molecular. Bajo la superficie de los suelos inundados y de los sedimentos, los valores de los potenciales por lo general son negativos. Los potenciales redox negativos pueden deberse a una proliferación excesiva de organismos heterótrofos que agotan todo el oxígeno disponible. Éste es el caso de los ecosistemas muy contaminados, donde los microorganismos utilizan el oxígeno para los procesos de descomposición. Los sedimentos ricos en materia orgánica pueden tener valores de pOR tan bajos como  $-450 \text{ mV}$ . A estos valores puede producirse fácilmente la reducción de los sulfatos, con producción de  $\text{H}_2\text{S}$  y la reducción de  $\text{CO}_2$ , con producción de  $\text{CH}_4$ . Al medir el potencial con electrodos, son

frecuentes las fluctuaciones diurnas del potencial redox debido a la prevalencia del oxígeno fotosintético liberado durante el día y al consumo de oxígeno por procesos de respiración durante la noche.

#### **2.4.4 Oxígeno**

El oxígeno proveniente de la atmósfera, así como el oxígeno que es transportado por la planta, el cual es transferido a través de sus tejidos ó bien producto de la fotosíntesis, se difunde a través del lecho de un humedal. La zona circundante a la raíz se ve especialmente favorecida y esto promueve un ambiente propicio para la proliferación de microorganismos debidas al oxígeno molecular. Estas condiciones también favorecen las circunstancias oxidantes que estimulan la degradación aerobia de la materia orgánica y permiten el desarrollo de bacterias nitrificantes (Guido-Zárate, 2006). Se cree que el factor limitante para el proceso de remoción de ión amonio en humedales artificiales es el oxígeno disuelto, al utilizarse en el proceso de oxidación de la especie nitrogenada (Watson y Danzing, 1993).

#### **2.4.5 Compuestos orgánicos**

La materia orgánica de un ecosistema suele ser el factor limitante para la proliferación de los microorganismos heterótrofos. Los sustratos específicos a menudo favorecen el desarrollo de poblaciones con actividades catabólicas específicas. En los ecosistemas acuáticos, la demanda química de oxígeno (DQO) se utiliza a menudo como una medición indirecta de la cantidad de carbono orgánico disuelto. La mayoría de los ecosistemas naturales no tienen concentraciones elevadas de materia orgánica disponible. Los compuestos orgánicos son nutrientes potenciales, pero algunos de ellos pueden actuar como inhibidores o tóxicos en bajas o altas concentraciones dependiendo de su estructura química.

#### **2.4.6 Compuestos inorgánicos**

Muchos compuestos inorgánicos son nutrientes esenciales para los microorganismos como lo son: oxígeno, el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, los óxidos de nitrógeno y el sulfuro de hidrógeno, los cationes de amonio, hierro ferroso, hierro férrico, magnesio, calcio, sodio, nitratos, nitritos, cloruros, cloratos, bromuros, fluoruros, silicatos, selenio, molibdatos, entre otros.

#### **2.4.7 Interacciones entre microorganismos y plantas**

Las raíces de las plantas y sus alrededores son un hábitat propicio para la proliferación de una gran variedad de poblaciones microbianas. Su interacción satisface los requerimientos nutritivos básicos para la planta y las comunidades microbianas asociadas a ellas.

Las interacción entre las raíces y los microorganismos de la rizosfera se basan principalmente en la modificación interactiva del ambiente del suelo por procesos como: captación del agua por la planta, liberación de compuestos orgánicos e inorgánicos por

parte de la planta, liberación de compuestos orgánicos e inorgánicos por parte de los microorganismos, entre otros.

Entre los materiales orgánicos liberados por las raíces de las plantas están los aminoácidos, cetoácidos, azúcares, taninos, alcaloides y fosfolípidos. Estos nutrientes estimulan el desarrollo de microorganismos. Las poblaciones microbianas de la rizosfera benefician a las plantas, pues estimulan su crecimiento al aumentar el reciclado y la solubilidad de los nutrientes minerales; sintetizan vitaminas, aminoácidos, auxinas, citoquinonas y giberelinas. Las plantas que crecen en suelo y sedimentos inundados han desarrollado adaptaciones para la conducción de oxígeno desde los brotes hasta la raíz. Según la literatura consultada el oxígeno que es suministrado a los microorganismos nitrificantes proviene principalmente de los rizomas y raíces de las plantas.(Watson y Danzing, 1993)

## **2.5 Propiedades del agua**

El agua es un líquido incoloro, inodoro e insípido formado por dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno que, en grandes cantidades, adquiere una tonalidad azul por su refracción de la luz del sol. Constituye el componente principal de la materia viva y de allí su gran importancia. Debido a sus propiedades ionizantes se le conoce frecuentemente como el disolvente universal y, por esta razón, el agua pura casi no existe en la naturaleza.

Dentro de las sustancias que se encuentran disueltas en el agua de manera natural están: el dióxido de carbono presente en la atmósfera, los sulfatos, los cloruros, los bicarbonatos de sodio, potasio, los óxidos de calcio y magnesio provenientes del desgaste de las rocas subterráneas y sales sueltas en el suelo. Las aguas superficiales y subsuperficiales con frecuencia contiene sustancias orgánicas e inorgánicas contaminantes producto de la actividad humana.

### **2.5.1 Calidad del agua**

La calidad del agua está determinada por la cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas en ella. Dependiendo de su origen, existen normas que estipulan para cada una de estas sustancias un valor máximo permitido. Estas normas proporcionan la información necesaria que permite mantener un control de la calidad del agua. Dependiendo de las características específicas del agua residual se establece un criterio del tipo de tratamiento viable para reducir los contaminantes presentes en ella y volverle a dar un uso al valioso recurso.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (DGN, 1996), consultada de la página de las redes internacionales SEMARNAT 2001. Establece los límites permisibles de los contaminantes básicos en las descargas de aguas residuales, en aguas y bienes nacionales. La Tabla 2.1 fue extraída de dicha norma. Es de particular interés para el marco teórico de la tesis dar información suficiente sobre las especies nitrogenadas, su naturaleza e impacto en el medio ambiente, antes de entrar en detalle con el ciclo del nitrógeno.

## 2.5.2 Especies de nitrógeno como contaminantes en el agua

Aunque existen siete estados de oxidación del nitrógeno, los estados I, II y IV tienen poca significancia en los procesos biológicos. Los estados de oxidación relevantes para los procesos del medio ambiente son III (positivo y negativo) y V.

Estos cambios en el estado de oxidación son realizados por microorganismos presentes en el suelo que, dependiendo de las condiciones aerobias o anaerobias, realizan cambios positivos o negativos en los estados de oxidación.

Tabla 2.1 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos, embalses naturales y artificiales (modificada de DGN, 1996)

(mg L <sup>-1</sup> , excepto cuando se especifica)	RÍOS*				AGUAS COSTERAS*			
	Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Uso en riego agrícola		Uso público urbano	
	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.
<b>Temperatura (°C)</b>	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40
<b>Grasas y aceites</b>	15	25	15	25	15	25	15	25
<b>Materia flotante</b>	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
<b>Sólidos sedimentables (mL/L)</b>	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Sólidos suspendidos totales</b>	150	200	75	125	75	125	40	60
<b>Demanda bioquímica de oxígeno</b>	150	200	75	150	75	150	30	60
<b>Nitrógeno total</b>	40	60	40	60	40	60	15	25
<b>Fósforo total</b>	20	30	20	30	20	30	5	10

\* Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos, LFD

P.D. =Promedio diario

P.M. =Promedio mensual

La toxicidad de las especies de nitrógeno disueltas en agua varía de acuerdo a su concentración y la especie misma. De manera natural, se encuentran sustancias nitrogenadas disueltas en las aguas subterráneas como: amonio, amoníaco, nitrito, nitrato, óxido nitroso y nitrógeno orgánico incorporado a sustancias orgánicas (Pacheco-Ávila y col., 1993). El nitrógeno en el agua se puede encontrar de tres maneras diferentes:

- Como gas disuelto ( $\text{NH}_3$  a valores de pH mayores a 9)
- Formando parte de moléculas inorgánicas ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )
- Formando parte de moléculas orgánicas (proteínas, enzimas)

### **2.5.3 Nitratos como contaminantes del agua**

Ésta es la forma más estable que puede encontrarse de las especies de nitrógeno. Sólo alcanza niveles elevados en las aguas subterráneas. Es un nutriente esencial para muchos microorganismos autótrofos fotosintéticos. En algunos textos lo citan como el nutriente determinante del desarrollo de estos organismos. Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa de mayor mineralización de los compuestos nitrogenados. En las aguas de algunos pozos suelen encontrarse cantidades apreciables de nitratos, lo que es objetable desde el punto de vista sanitario, según la norma NMX-AA-079-SCFI (DNG,2001).

### **2.5.4 Nitritos como contaminantes del agua**

Los nitritos pueden estar presentes en las aguas procedentes de la oxidación del ión amonio o de la reducción del nitrato. Su presencia está asociada a una contaminación reciente aunque no esté en el medio otro compuesto nitrogenado. La gran capacidad de este compuesto, una vez reducido a ion amonio, de oxidar los pigmentos respiratorios de los animales acuáticos causándoles asfixia, es la razón de la gran toxicidad del amoniaco (Alonso, 2001).

### **2.5.5 Ión amonio como contaminante del agua**

Es la especie inorgánica más reducida de nitrógeno. A valores de pH mayores a nueve el ión amonio se convierte en la especie amoniaco y su toxicidad está asociada a su elevada solubilidad en lípidos que facilita su paso a través de las membranas biológicas, causando daño en las superficies respiratorias de especies acuáticas y terrestres en concentraciones mayores a 0.025 ppm de  $\text{N-NH}_4^+$ , considerándose no apta para la vida piscícola. En medio aerobio, el nitrógeno amoniacal se convierte en nitritos, que son arrastrados por lixiviación a las aguas subterráneas, representando un riesgo sanitario para las poblaciones que consuman este recurso (Alonso, 2001).

### **2.5.6 Materia orgánica como contaminante del agua**

La materia orgánica se conforma de proteínas, enzimas, aminoácidos, cetoácidos, taninos, alcaloides y fosfolípidos, entre otros, que a su vez poseen nitrógeno en los enlaces peptídicos de las proteínas y otras moléculas. En este estado se puede ver al nitrógeno como en un reservorio inactivo pues los microorganismos del medio no tienen acceso a esta especie a no ser que se encuentre en forma de sales inorgánicas como nitratos o nitritos y como materia orgánica. La materia orgánica presente en el agua es un contaminante muy importante, el cual se toma como parámetro en la calidad del agua, cuantificado en términos de DQO (que mide todo lo que está presente en la muestra de agua en estudio).

## 2.6 Ciclo del nitrógeno

La reserva más grande de nitrógeno se encuentra en la atmósfera como nitrógeno molecular, donde el 79% de su composición molar corresponde a dicho elemento. Pese a ello, la estabilidad termodinámica del nitrógeno molecular hace difícil la incorporación de este elemento a los organismos vivos pues sólo un grupo reducido de eubacterias y arqueobacterias tiene la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico. El nitrógeno funge como nutriente mineral del suelo cuando se encuentra en forma de sales de nitrógeno que son muy solubles en agua. Éstas se interconvierten por procesos de óxido-reducción, donde participan las plantas, animales y microorganismos. Desempeña funciones básicas en las células al formar parte de aminoácidos, ácidos nucleicos, azúcares aminados y polímeros de éstos. La fijación bacteriana del nitrógeno es impensable para el sustento de todos los hábitat que constituyen la fuente de nitrógeno fijado. La intervención humana modifica con fines agrícolas los hábitat a través de la introducción de nitrógeno, por medio de fertilizantes, obtenidos generalmente a partir del proceso Haber-Bosch. El curso de las transformaciones de óxido-reducción del nitrógeno, a través de los ambientes terrestres y acuáticos, conforman el ciclo del nitrógeno el cual se divide en etapas: fijación del nitrógeno molecular al amoniaco, asimilación de amoniaco, nitrificación-desnitrificación, reducción asimilativa del nitrato y desnitrificación.

La Figura 2.1 muestra los distintos estados de oxidación del nitrógeno y las etapas del ciclo del nitrógeno. La conversión de nitrógeno orgánico al estado más móvil, inorgánico, se conoce como mineralización del nitrógeno.

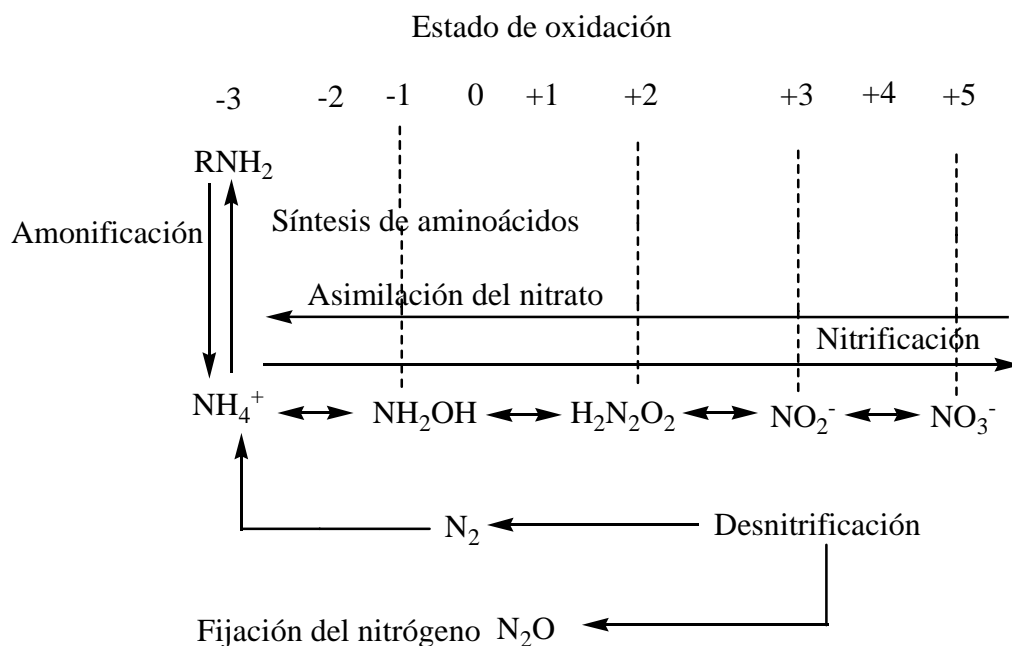


Figura 2.1 Reacciones bioquímicas en el ciclo del nitrógeno con cambios en el estado de oxidación de la especie nitrogenada (Alonso, 2001)

El ciclo del nitrógeno comienza con la fijación biótica del nitrógeno que se puede entender como la reducción del nitrógeno molecular ( $N_2$ ) a amonio por eubacterias (fototróficas y heterotróficas) y arqueobacterias, así como la asimilación del amoniaco producido en forma de aminoácidos y, finalmente, proteínas. Algunas de las bacterias fijadoras de nitrógeno están relacionadas a la rizosfera de las plantas en asociaciones mutualistas. Parte del amonio producido por este proceso es transportado por el suelo mediante lixiviación. El aporte de la fijación biótica del nitrógeno molecular se puede estimar en  $100$  a  $200 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Atlas y Bartha, 2001).

También en la atmósfera terrestre se fija el nitrógeno molecular mediante electrificación y reducción fotoquímica dando como producto principal a los nitratos. Este aporte de la fijación abiótica se puede estimar en  $8.9 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Atlas y Bartha, 2001).

El siguiente paso consiste en la oxidación del ión amonio o amoniaco al ión nitrito transformándose al ión nitrato en condiciones estrictamente aerobias, fenómeno conocido como nitrificación. Entre las bacterias más importantes en la nitrificación se encuentran las del género *Nitrosomonas*.

El amoniaco normalmente se oxida rápidamente por los microorganismos nitrificantes y el producto es captado por las plantas a través de sus raíces para asimilarlos en compuestos orgánicos (Rodríguez-Monroy, 2005).

La reducción asimilatoria del nitrato consiste en la incorporación de los iones nitrito del suelo a la materia orgánica, por una gran variedad de microorganismos como bacterias, algas y hongos. Así mismo, la desnitrificación es un proceso de degradación anaerobia donde el nitrato es utilizado como aceptor alternativo de electrones, en lugar del oxígeno, reduciéndose a óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $N_2O$ ) o nitrógeno molecular ( $N_2$ ). Este proceso es llevado a cabo exclusivamente por eubacterias como *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Cromobacterium*, *Micrococcus*, *Spirillum*. Con la desnitrificación se completa el ciclo del nitrógeno.

## **2.7 Mecanismos de remoción de contaminantes en un humedal artificiales**

Los principales procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la remoción de contaminantes de aguas residuales en los humedales son:

- \* Sedimentación, filtración y degradación de sólidos en suspensión
- \* Fijación de metales pesados en los sedimentos.
- \* Mineralización de la materia orgánica.
- \* Asimilación vegetal e inmovilización microbiana de compuestos inorgánicos.
- \* Adsorción y precipitación química del fosfato con Al, Fe, Ca y minerales de la arcilla de empaque del reactor.
- \* Eliminación de patógenos por: sedimentación, muerte gradual, radiación UV, excreción de antibióticos por otros microorganismos y por las raíces de las plantas .
- \* Amonificación, nitrificación y desnitrificación, como proceso de remoción de nitrógeno.
- \* Volatilización del amonio desde las capas superficiales del empaque o agua.



Los mecanismos de mayor importancia en la remoción de nitrógeno en secuencia son: amonificación, nitrificación y denitrificación.

A continuación se amplía un poco cada mecanismo.

### **2.7.1 Amonificación como mecanismo de remoción de contaminantes en humedales artificiales**

Es el proceso en el cual el nitrógeno orgánico es convertido a nitrógeno inorgánico. El rango de mineralización es mayor en las zonas aerobias que en las anaerobias. El pH óptimo se encuentra entre 6.5 y 8.5, así como la relación entre C:N afecta a la mineralización si existen suficientes nutrientes carbonados para el mantenimiento de los microorganismos.

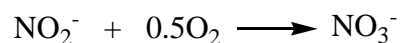
### **2.7.2 Nitrificación como mecanismo de remoción de contaminantes en humedales artificiales**

Se refiere a la oxidación biológica de ión amonio a nitrito y a nitrato. En condiciones donde el medio es rico en sustratos se promueve la mayor actividad por parte de las plantas así como una mayor acumulación de sedimentos y por lo tanto un mayor desarrollo microbiano favoreciendo la remoción de ión amonio. Existe una preferencia por parte de los microorganismos del medio hacia el ión amonio pues el costo de energía para su asimilación es menor (Tylova-Munzarova et al. 2005).

El primer paso de la oxidación de ión amonio a nitrito es un paso estrictamente aerobio. Regularmente, los microorganismos nitrificantes alcanzan concentraciones altas en el suelo o en aguas con altos contenidos de amoniaco, en particular, donde se lleva a cabo un proceso de descomposición de proteínas (amonificación).

Las condiciones óptimas de nitrificación se dan en aguas con concentraciones de oxígeno disuelto mayores a 0.3 mg/L; por otro lado, se requiere aproximadamente de 4.3 mg de O<sub>2</sub> por mg de nitrógeno amoniacal, para oxidar el ión amonio a nitrato. En este proceso el oxígeno funge como aceptor de electrones. Se requiere también de un pH (entre 7.5 y 8.6) neutro. Por el contrario, cantidades bajas de oxígeno disuelto y valores de pH ácidos inhiben la actividad de estos microorganismos nitrificantes (IWA, 2000).

A continuación se presenta los dos pasos para la oxidación del amonio a nitrato dilucidada por Wallace y Nicholas, en 1969 (IWA, 2000).



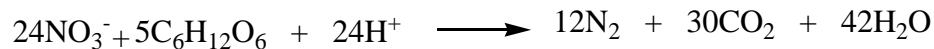
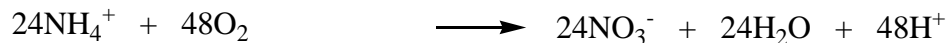
Los iones de nitratos y nitritos pueden ser arrastrados por lixiviación a las aguas subterráneas pues los iones cargados negativamente se difunden con facilidad en el agua del suelo por lo que la nitrificación puede verse como un proceso de movilización.

### 2.7.3 Desnitrificación como mecanismo de remoción de contaminantes en humedales artificiales

Se refiere a la reducción de nitrato a nitrógeno molecular o nitrógeno gaseoso. Las reacciones bioquímicas son irreversibles y ocurren en presencia de un sustrato orgánico accesible, en condiciones anaerobias o anóxicas con potenciales de pOR -350 a -100 mV donde el nitrato es utilizado como aceptor alternativo de electrones, en lugar del oxígeno, reduciéndose a óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) o nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>). No obstante se ha encontrado colonias de bacterias desnitrificantes que llevan a cabo el proceso en medios aerobios.

En condiciones de tierra saturada o inundada donde existen condiciones aerobias y anaerobias se lleva a cabo simultáneamente la nitrificación y desnitrificación.

A continuación se presenta la ecuación balanceada de lo que ocurre en una zona aerobia y anaerobia de un sistema inundado como los humedales artificiales extraída del texto ya citado (IWA, 2000):



## Capítulo 3

### METODOLOGÍA

A continuación se detalla la construcción, montaje del sistema, arranque y estabilización de los reactores que simulan un HAFV, empleados en esta investigación; así como las condiciones bajo las cuales se desarrolló la misma. El diagrama esquemático de las etapas se resume en la Figura 3.1.

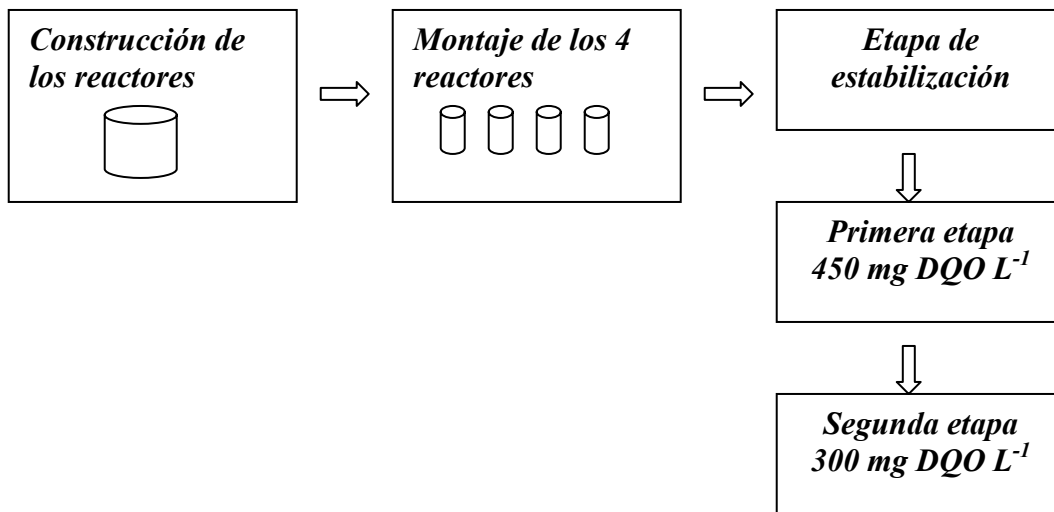


Figura 3.1 Diagrama esquemático de la metodología

#### 3.1 Construcción de los reactores

Se realizó la construcción de cuatro reactores que simulan la zona radicular del humedal artificial utilizando cilindros o cubetas de plástico. Las características de los reactores son: diámetro de 0.3 m, profundidad de 0.35 m, volumen total del reactor vacío de 20 L con un volumen de trabajo de 12.4 L. El diseño del reactor fue de flujo vertical. Este diseño se caracteriza porque se alimenta por la parte superior, fluyendo hacia las capas inferiores donde el agua residual tratada es colectada (Luna-Pabello y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 1998).

En el fondo del cilindro se instaló un tubo de PVC con perforaciones que conducen el efluente acuoso al exterior del reactor. Adicionalmente, se colocaron mangueras de plástico en forma horizontal, desde el centro del reactor hasta la parte externa con llaves o válvulas en el exterior. Estas mangueras sirvieron para la extracción de muestras y fueron colocadas a 2, 10 y 30 cm de profundidad desde la parte superior del reactor. Los materiales utilizados en su construcción se mencionan en la Tabla 3.1. y la Figura 3.2 representa el sistema en corte transversal antes de ser empacado.

Tabla 3.1 Piezas que integran cada uno de los reactores del humedal artificial de flujo vertical a escala de laboratorio

<p>Recipiente cilíndrico de 20 litros de capacidad con 30 cm de diámetro por 35 cm de alto</p> <p>Empaque: Tezontle de 3 tamaños de partícula diferentes (Mallas de 4-8mm, 0.5-4mm, 12-16mm)</p> <p>Un tubo de PVC y una manguera de plástico</p> <p>Dos brotes de planta <i>Phragmites sp.</i>, provenientes de una planta madre tomada del humedal artificial de la UNAM instalado en el “Vivero Forestal de Coyoacán”</p> <p>Tres llaves de paso para la toma de muestras</p> <p>Sistema tipo sifón para mantener el nivel de inundación del sistema 1 cm abajo del nivel superior</p>
---

El recipiente cilíndrico se empacó con escoria volcánica (tezontle), previamente lavada y esterilizada a 121°C por 30 minutos (Guido-Zárate, 2006), con cuatro capas de granulometría conocida (4-8 mm, 0.5-4 mm, 4-8 mm, 12-16 mm, respectivamente). La Tabla 3.2 muestra los estratos de material de soporte empleados en el sistema en estudio, el diámetro granular del soporte, el espesor del estrato así como las alturas de la parte inferior de la columna.

Se colocó dentro del reactor un brote de una macrófita vascular, conocida como carrizo (*Phragmites sp*) a 10 cm de profundidad. El brote de la planta se tomó de un humedal de flujo horizontal ubicado en los Viveros de Coyoacán, del cual se extrajo una misma planta madre y se tomó un solo brote del mismo tamaño para cada reactor (Figura 3.3). El brote previamente lavado con agua se situó en la pila de semillas que se tiene junto al Laboratorio 301 del Edificio E de la Facultad de Química (UNAM), para que se adaptara a las condiciones climáticas del área.

### 3.2 Montaje de cuatro reactores para conformar el humedal artificial de flujo vertical a escala de laboratorio

El sistema estuvo integrado por cuatro reactores contruidos de acuerdo a la descripción anterior y con las siguientes características:

<b>RA1</b>	<b>RA2</b>	<b>RB1</b>	<b>RB2</b>
<b>Reactor con planta</b>	<b>Reactor sin planta (control)</b>	<b>Reactor con planta (duplicado)</b>	<b>Reactor sin planta (duplicado)</b>

*R = Reactor*

*A, B = Letras con las que se designa el sistema de reactores.*

*1 = Reactor con planta*

*2 = Reactor sin planta (control)*

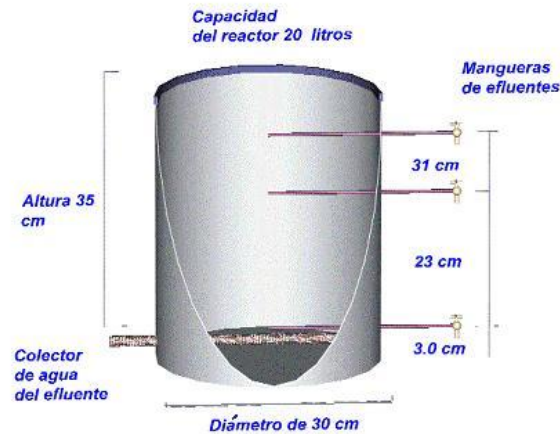


Figura 3.2 Diagrama esquemático de un corte transversal de uno de los reactores del humedal artificial

La Tabla 3.2 fue tomada y adaptada conforme a la literatura (Fenoglio-Limón, 2000). Se ensamblaron 4 reactores; 2 con planta y 2 sin planta. A estos dos últimos se les llama “reactores control” porque sirven como punto de comparación para conocer qué comportamiento tienen el reactor con planta y su duplicado sobre la remoción de nutrientes de tipo nitrogenado.

La Tabla 3.3 detalla las características de los dispositivos que se utilizaron para instalar el sistema en estudio, mismo que se ubicó en el Laboratorio 301 del PIQAYQA de la Facultad de Química de la UNAM, en su Conjunto E. La Figura 3.4 muestra el sistema de cuatro reactores (RA1 y RB1, reactor con planta y su duplicado; RA2 y RB2, reactor sin planta y su duplicado). Los cuatro fueron alimentados con una bomba peristáltica de cuatro vías con agua residual sintética, ARS.

Tabla 3.2 Estratos del material de soporte en las columnas de estudio

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

El agua que sale de los reactores fue colectada en un tanque común. Para medir los pOR se instalaron tres electrodos en cada reactor a 2, 10 y 30 cm de profundidad conectados a una

tarjeta de adquisición de datos para almacenar los valores leídos por los electrodos en una computadora personal (PC).

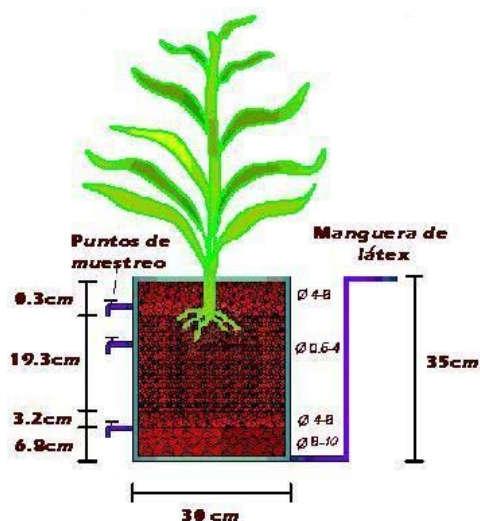


Figura 3.3 Diagrama esquemático de reactor del humedal artificial de flujo vertical a escala de laboratorio en estudio con la macrófita

Tabla 3.3 Dispositivos periféricos que integran el sistema en estudio

♠- <b>Luz:</b> 15 tubos fluorescentes de luz blanca de 15 Watts, marca Sylvania Daylight, modelo F15T810, colocados a una distancia de 1.5 m, desde la superficie de los reactores (casi en el techo)
♣- <b>Temperatura:</b> La temperatura ambiente se midió con un termómetro marca Brannan de 0-50°C
♠- <b>Bomba peristáltica:</b> Bomba peristáltica de cuatro vías marca Cole Palmer Instrument Company, modelo Master-Flex Console Drive, para alimentar el agua residual a los reactores
♣- <b>Electrodos:</b> 12 electrodos comerciales de Ag/AgCl-Pt “Rugged epoxy housing BNC”, con cables conectores de 0.9 m (3 ft)
♠- <b>Sistema de almacenamiento de datos:</b> Sistema de almacenamiento electrónico de datos marca ESEVE (Puebla, México), conectado a una computadora personal (PC), Gama 286 AT
♣- <b>Electrodos de pH:</b> Potenciómetro comercial, ORIÓN, Modelo 720A

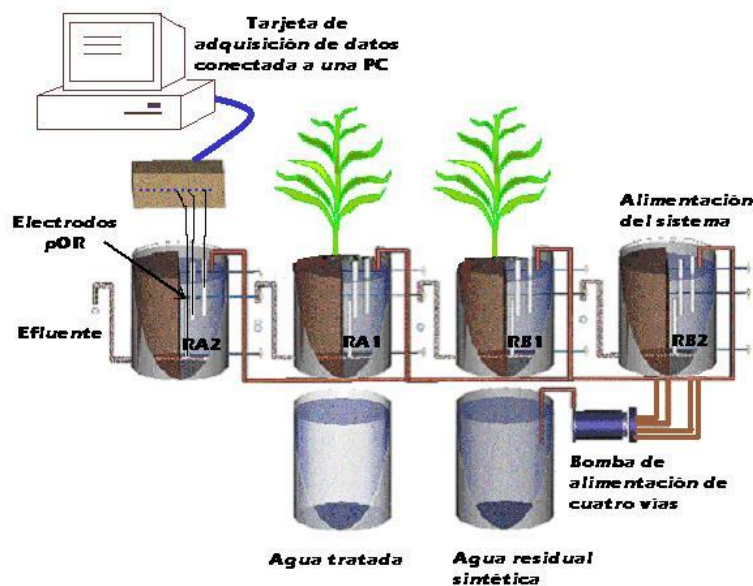


Figura 3.4 Diagrama esquemático del montaje del sistema de humedales artificiales de flujo vertical a escala de laboratorio

El sistema se instaló a escala de laboratorio para mantener el mayor número de variables relativamente constantes (temperatura, luz, humedad), aislándolo de las inclemencias del tiempo. Por ello, el sistema tuvo condiciones diferentes a las que se encuentran en los humedales artificiales a escala normal. El Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (PIQAYQA) de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México cuenta con dos humedales artificiales a escala prototipo. El primero es un sistema de flujo horizontal, HAFH, ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán, que recibe las aguas contaminadas del río Magdalena. El segundo es un sistema experimental de flujo vertical, HAFV, para el tratamiento de una pequeña parte de las aguas residuales generadas por las oficinas adyacentes al sitio donde está instalada la planta de “composta” o compost en el *campus* de la Ciudad Universitaria. Ambas fueron construidas y operadas en la década de los años 90 del siglo XX (Esponda, 2001; Fenoglio, 2000; García-Vázquez, 2005; Rodríguez-Cruz y Varela-Montellano, 2003).

### 3.3 Condiciones experimentales

A continuación se detallan las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo la experimentación.

#### 3.3.1 Iluminación

En una investigación previa se iluminó el sistema de manera artificial (cubriendo la ventana del laboratorio con papel de estraza y manteniendo la iluminación-oscuridad de 16-8 horas (Guido-Zárate, 2006). Debido a que se observó un amarilleamiento en las hojas de la planta que se atribuyó a la carencia de luz natural, se decidió quitar el papel de la ventana y llevar

a cabo todo el experimento con luz natural y luz artificial, esta última con un fotoperíodo constante de 16 h de luz artificial y 8 horas de oscuridad, regulado por un temporizador, lo cual garantizó que las dos plantas tuvieran un verde brillante durante todo el experimento.

### 3.3.2 Condiciones de temperatura ambiental

Durante el experimento, la temperatura ambiente del laboratorio fue medida con un termómetro de bulbo de mercurio, instalado en forma permanente. Cada quince días se registró la temperatura ambiental siempre a la misma hora.

### 3.3.3 Composición del agua residual sintética

El agua residual sintética, ARS (Fenoglio, 2000), se preparó con reactivos grado analítico, utilizando como disolvente agua de la llave. La Tabla 3.4 muestra las especies químicas utilizando los datos de procedencia, así como las cantidades de sacarosa empleadas para cada una de las etapas. Los demás reactivos ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) permanecieron invariables en ambas etapas.

Tabla 3.4 Composición del agua residual sintética

<b>Sacarosa cristal</b> $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	J.T. Baker P.M: 342.3 + 66.8° 4072-01	450 mg L <sup>-1</sup> Primera etapa
<b>Sacarosa cristal</b> $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	J.T. Baker P.M: 342.3 + 66.8° 4072-01	225 mg L <sup>-1</sup> Segunda etapa
<b>Sulfato de amonio</b> $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	J.T. Baker P.M: 132.14 99.0% 0792-01	30 mg/L
<b>Fosfato de sodio</b> $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	J.T. Baker P.M: 380.12 98.8% 3836-01	3 mg/L
<b>Agua de la llave</b>	Contiene “nitratos” en concentraciones variadas	30 litros*

\* Diariamente se prepararon 30 litros de la solución para alimentar los reactores, para evitar descomposición de los reactivos por organismos oportunistas y se disponía de los remanentes diarios

En los Anexos 5 y 7 se presentan los cálculos para obtener las relaciones C:N:P de las dos etapas, así como las evaluaciones teóricas de demanda teórica de oxígeno y las esperadas según la literatura de demanda química de oxígeno para compararlas con las que se obtengan experimentalmente (Durán-de-Bazúa, 1994).



### **3.3.4 Alimentación de los reactores**

Se prepararon diariamente 30 litros del agua residual sintética de acuerdo con la literatura (Fenoglio, 2000) y se alimentaron los reactores con mangueras que goteaban en el centro del reactor, usando una bomba peristáltica de cuatro vías con un flujo de  $5\pm 1$  mL/min o 7 litros por día aproximadamente. El tiempo de residencia hidráulica (TRH) en cada reactor fue de  $35\pm 5$  horas, dependiendo de la precisión de la bomba y del volumen real de trabajo de cada reactor. En el Anexo 6 se presentan las estimaciones hechas.

### **3.3.5 Estabilización del sistema**

Se alimentó el sistema de cuatro reactores con agua de la llave durante los primeros 20 días de estabilización de los brotes sembrados. El criterio para determinar la estabilización de los reactores fue el que menciona Soto-Esquivel (2003), donde se considera que cuando la variación de DQO a la salida de cada reactor sea de  $\pm 10\%$ , el sistema se encuentra estable en términos de la degradación de la DQO. Este tiempo de estabilización del reactor, se corroboró en una etapa experimental previa, midiendo la DQO de salida, encontrando que el reactor se estabiliza durante la primera semana (Guido-Zárate, 2006).

En términos generales se entiende como periodo de estabilización del sistema al tiempo que tardan el soporte, las plantas y los microbios en ajustarse a las condiciones hidrológicas (IWA, 2000). En este caso se seleccionó a la DQO como criterio de estabilización del sistema debido a que éste es un parámetro en la calidad del agua a nivel internacional (aún cuando en la normatividad de México es la DBO, ver Tabla 2.1) y posee un periodo de estabilización corto. En cambio, la estabilización de especies de nitrógeno puede tardar hasta un año según se reporta en la literatura (IWA, 2000).

Durante los siguientes 21 días, el sistema se alimentó con la mitad de la concentración del agua residual sintética y la otra mitad con agua de la llave, para adaptar a los brotes paulatinamente a las condiciones experimentales finales. Al término de los 21 días se inició con la primera etapa.

## **3.4 Primera etapa de alimentación de ARS**

Esta primera etapa tuvo una duración de 4 semanas a lo largo de las cuales se alimentó el sistema con ARS en concentraciones de  $450 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa. Se realizó la determinación de:

- Ión amonio por el método de Nessler en el agua residual sintética de alimentación y de salida, en los puntos de muestreo a 2, 10 y 30 cm
- Nitratos por el método de salicilato de sodio en el agua residual sintética de alimentación y de salida, en los puntos de muestreo a 2, 10 y 30 cm
- Nitrógeno orgánico por el método de Biuret-Lowry en el agua residual sintética de alimentación y de salida, en los puntos de muestreo a 2, 10 y 30 cm
- DQO a través de la oxidación de materia orgánica por dicromato de potasio en el agua residual sintética de alimentación y de salida

- Las determinaciones de potenciales de óxido-reducción a 2cm, 10 cm y 30 cm de profundidad con electrodos comerciales instalados en los reactores
- La determinación del pH en el agua residual sintética de alimentación y de salida
- La temperatura ambiente con un termómetro de bulbo de mercurio.

### **3.5 Segunda etapa de alimentación de ARS**

Fue consecutiva a la primera etapa. Se cambió la alimentación de ARS de 450 a 225 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa. Tuvo una duración de 4 semanas. Se continuó con las determinaciones de ión amonio, nitrato, nitrógeno orgánico, potenciales redox, pH y temperatura, como en la primera etapa.

### **3.6 Toma de muestras**

Se tomaron muestras de los cuatro reactores a tres distintas profundidades 2, 10 y 30 cm. Se extrajeron por el conducto (tubo de plástico) que se ubica desde la parte central del reactor hasta la parte externa, regulada por una llave de paso. Primero se purgó el conducto por 5 segundos para evacuar el contenido acuoso rezagado y posteriormente se tomó una muestra de 50 mL en un frasco de plástico etiquetado para transportarlo al laboratorio donde se realizaron las distintas pruebas. Las tomas de las muestras se llevaron a cabo por la mañana, siempre a la misma hora. En el laboratorio, al momento de realizar los distintos análisis, se tomó la muestra del sobrenadante para evitar acarrear sólidos desprendidos de las biopelículas de los reactores que sedimentaban rápidamente.

### **3.7 Métodos analíticos utilizados para determinar los parámetros de interés**

#### **3.7.1 Detección de ión amonio**

El método de Nessler fue escogido para la detección del ión amonio por ser un método espectrofotométrico, viable para medir concentraciones de ión amonio en el intervalo de 0.5 a 7 ppm, que es el intervalo de interés. Se realizó una micro-escala de la prueba de Nessler, que consistió en utilizar menos volumen de muestra y reactivos, pero en proporciones equivalentes. La metodología se encuentra en el Anexo 1 y la curva de calibración en el Anexo 9.

#### **3.7.2 Detección de nitrato**

El método que se seleccionó para la detección de nitratos fue la prueba de salicilato de sodio por ser un método colorimétrico sencillo. La metodología se encuentra en el Anexo 2. y la curva de calibración en el Anexo 9.

#### **3.7.3 Detección del nitrógeno orgánico**

El método elegido para la determinación de nitrógeno orgánico fue el de Biuret-Lowry. Es un método espectrofotométrico, rápido, sensible y tiene pocas interferencias, cuyo único equipo requerido es un espectrofotómetro. Este método se eligió con base en su versatilidad

para determinar el nitrógeno orgánico de 42 muestras en un mismo día. Es necesaria una curva de calibración de nitrógeno orgánico a partir de una proteína de alta pureza, como la caseína, donde se grafique la absorbancia  $A_{580}$  contra la concentración conocida de proteína. Esta curva puede consultarse en el Anexo 9. La metodología se encuentra en el Anexo 3.

### **3.7.4 Determinación de nitrógeno total**

Se consideró como nitrógeno total a la suma de:

$[\text{NH}_4^+] + [\text{NO}_3^-] + [\text{N-N}_{\text{org}}] = [\text{N-N}_{\text{total}}]$   
donde:  $[\text{NO}_2^-] < 0.2 \text{ mg N-NO}_2^- \text{ L}^{-1}$ , por lo que se considera despreciable.

### **3.7.5 Determinación de DQO**

Los métodos para la determinación de la DQO son validados por la APHA-AWWA-WPCF (1992). La demanda química de oxígeno, DQO, se utiliza como un indicador ambiental del contenido orgánico total de una muestra acuosa. Operacionalmente se determina midiendo espectrofotométricamente la cantidad del reactivo oxidante (dicromato de potasio) consumido durante la oxidación de la materia disuelta en la muestra acuosa. La coloración que desarrolla la prueba de acuerdo a la ley de Lambert y Beer que dice que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración, por la longitud de la celda, por una constante,  $A = \epsilon l C$  (APHA-AWWA-WPCF, 1992). La metodología se puede consultar en el Anexo 4. La curva de calibración se puede consultar en el Anexo 9. Se comparará con la determinación “teórica” de demanda de oxígeno.

### **3.7.6 Fundamentos de la determinación del pH**

El principio de la determinación de pH, es la medida de la actividad de los iones hidrógeno o bien del logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno. Se puede realizar potenciométricamente mediante un electrodo comercial. Es necesario calibrar el equipo mediante una serie de soluciones amortiguadoras a valores de pH conocido. En este caso se emplearon las de valores de pH de 4, 7 y 9 y con ellas se generó una ecuación en el potenciómetro y se determinó el parámetro en las muestras problema.

### **3.8 Análisis estadísticos de los datos experimentales**

Los datos fueron evaluados estadísticamente mediante un análisis de varianza para cada una de las especies de nitrógeno, con el software STATGRAPHICS, a partir de un diseño categórico multifactorial, donde se estimaron los efectos de tres factores. En el Anexo 10. se puede encontrar dicho análisis.

## Capítulo 4

### RESULTADOS, DISCUSIÓN Y OBSERVACIONES

Los fenómenos que participan en la remoción de especies de nitrógeno son físicos y químicos. El conjunto de todos ellos conforma un mosaico de complejo comportamiento, que se ve afectado por las variables del medio como la luz y la temperatura. Los datos encontrados sólo sirven para conocer el comportamiento dinámico de las especies de nitrógeno en las condiciones experimentales establecidas. Para poder visualizar los resultados; además del gráfico que arroja información visual, se obtuvieron los promedios en  $\text{mg L}^{-1}$  de nitrógeno presentes en el agua de entrada (influyente) y en la de salida (efluente). Se realizó un análisis multifactorial de varianzas que se puede encontrar en el Anexo 10 con el objeto de conocer las medias que eran significativamente diferentes de otras, así como el análisis de las interacciones significativas entre los factores. Los resultados presentados en esta parte corresponden al reactor con planta, su control (sin planta) y la réplica de ambos. En el Anexo 8 se presentan todos los datos experimentales obtenidos en esta investigación.

#### 4.1 Resultados obtenidos, observaciones y discusión para nitrógeno amoniacal $[\text{NH}_4^+]$

Las Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 muestran la dinámica en la remoción del ión amonio en los reactores con planta (RA1 y RB1) y en los reactores sin planta (RA2 y RB2) a las tres distintas profundidades. La Tabla 4.1 muestra el promedio en  $\text{mg L}^{-1}$  de ión amonio en el efluente a 2, 10, y 30 cm de profundidad para los reactores con planta (RA1 y RB1) y sin planta (RA2 y RB2) en las dos etapas, así como el porcentaje de remoción en cada caso. En dichas Figuras se observa que la concentración de ión amonio a la salida del reactor (efluente) no fue constante, por lo cual se sabe que el sistema no alcanzó la estabilización con respecto a este nutriente. En estos gráficos se puede ver el comportamiento de los humedales en la concentración del nutriente a las tres distintas profundidades y, hablando en términos generales, a medida que pasa el tiempo, como efecto de la carga orgánica, la concentración de ión amonio en el efluente va en aumento, es decir, la eficiencia del sistema en la remoción de ión amonio disminuye a través del tiempo. Este fenómeno se podría explicar por la disminución de la actividad de los organismos nitrificantes al disminuir la fuente carbonosa en la segunda etapa de la experimentación. Los pOR del sistema excepto en el área cercana a la raíz de la planta son negativos, esto es un indicador de cantidades bajas de oxígeno disuelto que también inhiben la actividad de estos microorganismos nitrificantes.

Al realizar el análisis estadístico a un 95% de confianza, se tiene que, el cambio en la concentración del ión amonio a las distintas profundidades, durante las dos etapas experimentales se explica por principalmente por el efecto de

- La carga orgánica ( $F = 31.64$ ,  $P = 0.001$ ) la Figura 4.8 muestra qué tan significativamente distintas son las medias en la concentración de ión amonio en relación las cargas orgánicas. Se aprecia que existe una mejor remoción de ión

amonio durante la primera etapa ( $450 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa) que en la segunda etapa ( $225 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa).

- La planta ( $F = 6.39$ ,  $P = 0.0359$ ), como se muestra en la Figura 4.7, define una diferencia significativa entre las medias de la concentración de ión amonio siendo favorecida su remoción por la presencia de ésta. La diferencia que se aprecia en la remoción del nutriente es apenas mayor para el reactor con planta que sin planta, que podría deberse a que las condiciones de la zona de la rizosfera de las plantas favorecen el proceso de remoción, al generarse oxígeno molecular a través de los poros de la raíz de la planta, detectado a partir del pOR positivo de esta zona. El oxígeno es consumido por estos microorganismos nitrificantes y, por ello, se tiene una mejor remoción del nutriente en esta parte del reactor con planta. Es importante mencionar que la nitrificación tiene como condición un ambiente aerobio de al menos  $0.3 \text{ mg}$  de oxígeno disuelto por litro (Atlas y Barthy, 2001). Debe resaltarse que, en los primeros  $10 \text{ cm}$  de profundidad, se tiene una remoción de por lo menos el  $66 \pm 2.5\%$  del total del nitrógeno amoniacal. Si bien la presencia de una sola planta favorece una remoción del nutriente inorgánico, que es estadísticamente significativa, aunque su valor numérico no parece ser mucho mayor que en el reactor sin ella, en condiciones reales, donde la densidad poblacional de organismos vegetales es mucho mayor, se esperaría una remoción más eficiente de ión amonio. Consecuentemente, en condiciones reales, las plantas tendrían una importancia significativa para la remoción de este ión.

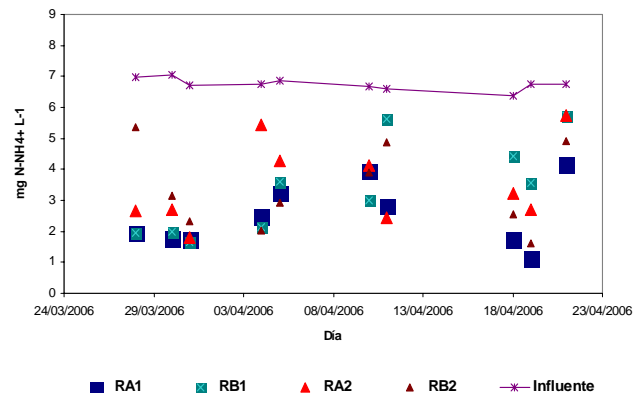
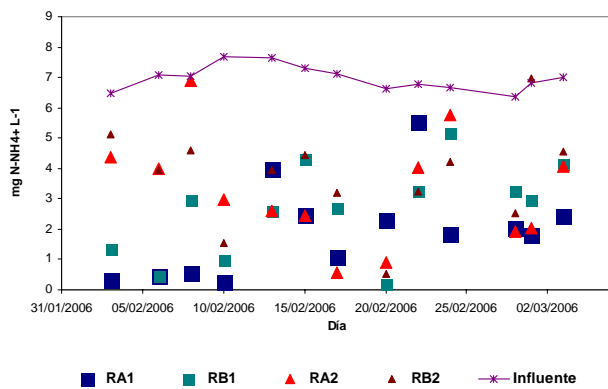


Figura 4.1 Dinámica de  $[\text{NH}_4^+]$  durante las cuatro semanas de estudio en la zona ubicada a los 2 cm de la parte superior de la superficie del agua, para los reactores con planta (cuadrados) y sin planta (triángulos) en la primera etapa, con una concentración de sacarosa de  $450 \text{ mg L}^{-1}$  (La concentración inicial de  $[\text{NH}_4^+]$  fue de  $6.97 \pm 0.41 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ )

Figura 4.2 Dinámica de  $[\text{NH}_4^+]$  durante las cuatro semanas de estudio en la zona ubicada a los 2 cm de la parte superior de la superficie del agua para los reactores con planta (cuadrados) y sin planta (triángulos) en la segunda etapa, con una concentración de sacarosa de  $225 \text{ mg L}^{-1}$  (La concentración inicial de  $[\text{NH}_4^+]$  fue de  $6.74 \pm 0.2 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ )

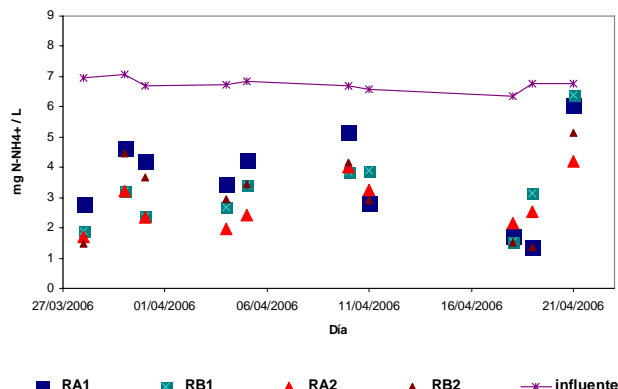
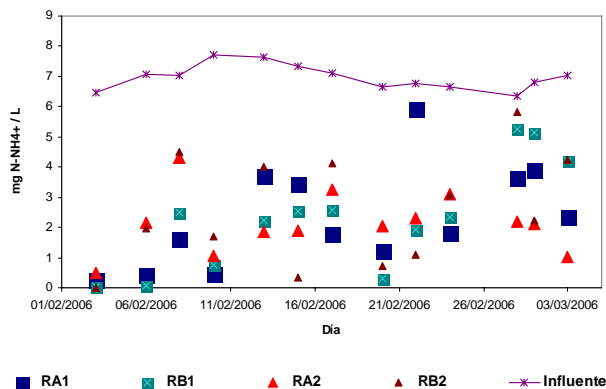


Figura 4.3 Dinámica de  $[\text{NH}_4^+]$  durante las cuatro semanas de estudio en la zona ubicada a los 10 cm de la parte superior de la superficie del agua, para los reactores con planta (cuadrados) y sin planta (triángulos) en la primera etapa, con una concentración de sacarosa de  $450 \text{ mg L}^{-1}$  (La concentración inicial de  $[\text{NH}_4^+]$  fue de  $6.97 \pm 0.41 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ )

Figura 4.4 Dinámica de  $[\text{NH}_4^+]$  durante las cuatro semanas de estudio en la zona ubicada a los 10 cm de la parte superior de la superficie del agua para los reactores con planta (cuadrados) y sin planta (triángulos) en la segunda etapa, con una concentración de sacarosa de  $225 \text{ mg L}^{-1}$  (La concentración inicial de  $[\text{NH}_4^+]$  fue de  $6.74 \pm 0.2 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ )

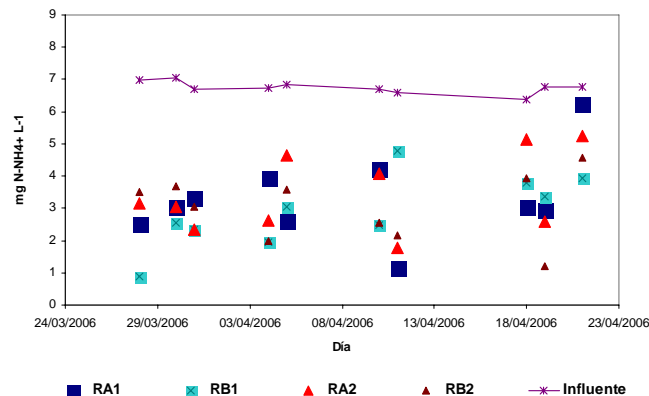
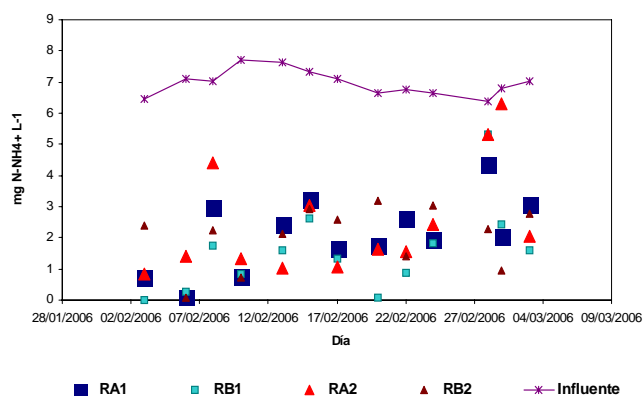


Figura 4.5 Dinámica de  $[\text{NH}_4^+]$  durante las cuatro semanas de estudio en la zona ubicada a los 30 cm de la parte superior de la superficie del agua, para los reactores con planta (cuadrados) y sin planta (triángulos) en la primera etapa, con una concentración de sacarosa de  $450 \text{ mg L}^{-1}$  (La concentración inicial de  $[\text{NH}_4^+]$  fue de  $6.97 \pm 0.41 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ )

Figura 4.6 Dinámica de  $[\text{NH}_4^+]$  durante las cuatro semanas de estudio en la zona ubicada a los 30 cm de la parte superior de la superficie del agua, para los reactores con planta (cuadrados) y sin planta (triángulos) en la segunda etapa, con una concentración de sacarosa de  $225 \text{ mg L}^{-1}$  (La concentración inicial de  $[\text{NH}_4^+]$  fue de  $6.74 \pm 0.2 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ )

En general, el porcentaje de remoción para la primera etapa en los reactores con planta fue de  $66 \pm 10\%$  y en la segunda etapa fue menor  $52 \pm 10\%$ , este cambio puede atribuírsele, según indica el análisis estadístico, principalmente a la carga orgánica ya que al haber un

menor contenido de carbono en la solución (fuente de energía), los microorganismos no pueden metabolizar este tipo de nitrógeno tan fácilmente.

Tabla 4.1 Promedio de reactores con planta RA1 y RB1 y reactores sin planta RA2 y RB2 para ión amonio

	<i>Reactores con planta</i>						<i>Reactores sin planta</i>					
	<i>RA1</i>			<i>RB1</i>			<i>RA2</i>			<i>RB2</i>		
	<i>Profundidades (cm)</i>			<i>Profundidades (cm)</i>			<i>Profundidades (cm)</i>			<i>Profundidades (cm)</i>		
	2	10	30	2	10	30	2	10	30	2	10	30
<b>Primera etapa</b>												
<b>mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> L<sup>-1</sup></b>	1.94	2.34	2.13	2.65	2.30	1.57	3.28	2.14	2.49	3.76	2.60	2.06
<b>% de remoción</b>	72.04	66.16	69.23	61.82	66.66	77.12	52.78	69.20	63.71	46.04	62.52	70.17
<b>Segunda etapa</b>												
<b>mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> L<sup>-1</sup></b>	2.49	3.65	3.30	3.36	3.24	2.91	3.51	2.78	3.46	3.36	3.10	3.02
<b>% de remoción</b>	63.08	46.13	51.02	49.85	52.00	56.60	47.93	58.80	48.55	50.22	54.13	55.23

#### 4.2 Resultados obtenidos, observaciones y discusión para [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran la dinámica en la remoción de nitratos para los reactores RA1, RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta), en las dos etapas experimentales y las Figuras 4.11 y 12 los resultados estadísticos. La Tabla 4.2 muestra el promedio en mg L<sup>-1</sup> de nitrato en el efluente a 2, 10, y 30 cm de profundidad para los reactores con planta (RA1 y RB1) y sin planta (RA2 y RB2) en las dos etapas, así como el porcentaje de la remoción en cada caso. En dichos gráficos se observa un panorama general del comportamiento de remoción. Se destaca la buena remoción de nitrato (alrededor de 90±8%) para todos los reactores durante las dos etapas de experimentación y a las tres distintas profundidades. Lo mismo sucede en investigaciones sobre estos sistemas en la literatura consultada (Crumpton et al., 1993). Este hecho se puede explicar porque en el humedal existen condiciones permanentemente inundadas que favorecen el ambiente anaerobio (condiciones reductoras).

La falta de oxígeno molecular como sumidero de electrones en la respiración de los microorganismos (eubacterias) los induce a usar al nitrato como fuente alternativa de aceptor de electrones, en vez del oxígeno, en el proceso de oxidación. Se produce la reducción del nitrato en óxido nítrico (NO), luego a óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y, finalmente, a nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>), que se desprende a la atmósfera. La desnitrificación es el mecanismo más rápido de remoción de nitratos en aguas contaminadas, por ello se puede pensar como el predominante según experimentos utilizando N<sup>15</sup>, donde se demuestra este hecho (Crumpton et al., 1993).

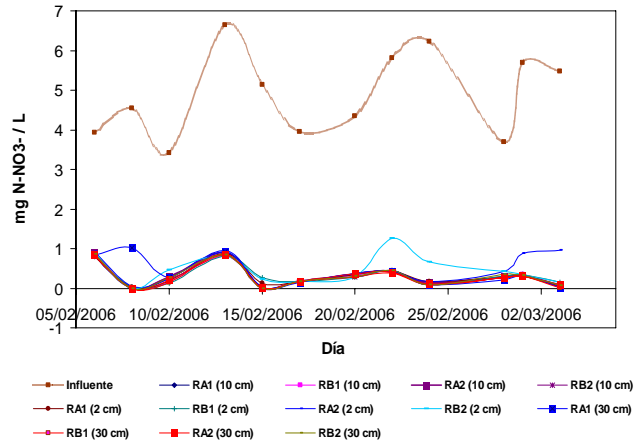


Figura 4.9 Dinámica de  $[\text{NO}_3^-]$  durante las cuatro semanas de estudio para los reactores con planta (RA1 y RB1) y sin planta (RA2 y RB2) en la primera etapa, con una concentración de sacarosa de  $450 \text{ mg L}^{-1}$  (La concentración inicial de  $[\text{NO}_3^-]$  fue de  $4.9 \pm 1.07 \text{ mg N- NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ )

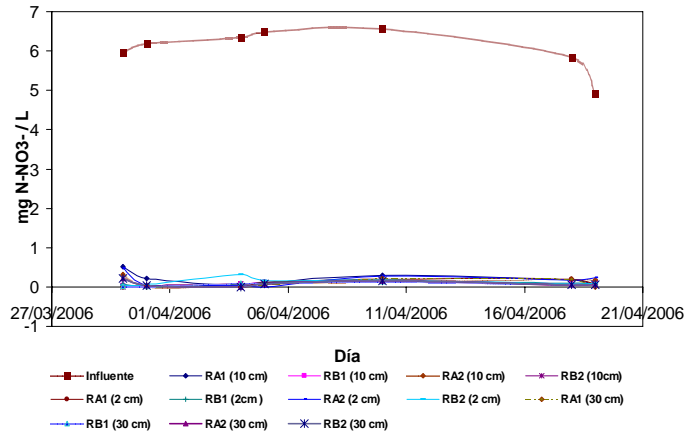


Figura 4.10 Dinámica de  $[\text{NO}_3^-]$  durante las cuatro semanas de estudio para los reactores con planta (RA1 y RB1) y sin planta (RA2 y RB2) en la segunda etapa, con una concentración de sacarosa de  $225 \text{ mg L}^{-1}$ . La concentración inicial de  $[\text{NO}_3^-]$  fue de  $6.04 \pm 0.56 \text{ mg N- NO}_3^- \text{ L}^{-1}$

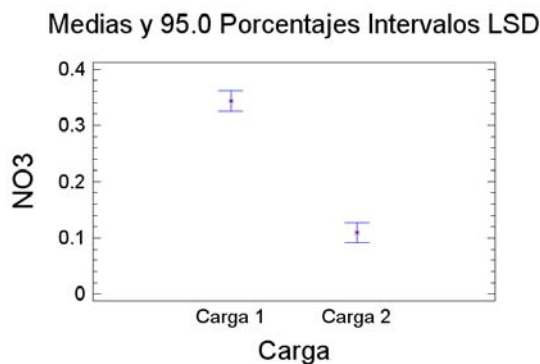


Figura 4.11 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) al cambiar la carga orgánica de la primera etapa a la segunda etapa para  $[\text{NO}_3^-]$

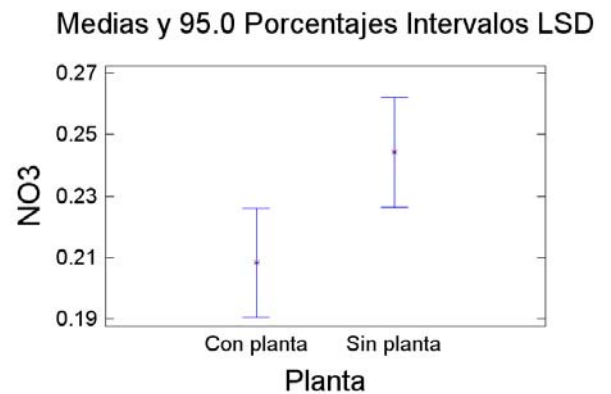


Figura 4.12 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para  $[\text{NO}_3^-]$

También puede deberse a la reducción asimilatoria del nitrato, proceso en el cual los nitratos son asimilados por las células de la planta y microorganismos asociados a ella. Se puede pensar que el HAFV se estabilizó con respecto a  $\text{NO}_3^-$  observándose una variación de  $96 \pm 3\%$  en el efluente del reactor.

El nitrato presente en el ARS del influente, se encuentra en el agua del grifo con la que se prepara. Es posible que el origen de los nitratos sea de las sales lixiviadas del suelo de



donde se extrae el agua o de trazas de materia orgánica genéricamente conocida como *humus* (ácidos húmicos, fúlvicos o huminas) que “contamina” el agua. Se observa una variación de la concentración del nitrato en el influente (Figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12) debido a que las concentraciones de los contaminantes que dan nitrógeno al agua presentan cambios en su concentración a través del tiempo.

Al realizar el análisis estadístico a un 95% de confianza, se tiene que, el cambio o variabilidad, en la concentración del ión amonio a las distintas profundidades, durante las dos etapas experimentales se explica principalmente por el efecto de

- La carga orgánica (F=199.54, P=0.0000). Éste fue el factor que más influyó en el cambio de la remoción del nitrato a lo largo de la experimentación. La Figura 4.11 muestra qué tan significativamente distintas son las medias en la concentración de nitrato en relación en las cargas orgánicas. En esta figura se observa una media de la concentración de nitrato en el agua de efluente significativamente mayor para la primer etapa (445mg L<sup>-1</sup> de sacarosa); es decir, la eficiencia de la remoción del nitrato es mejor para la segunda etapa (225mg L<sup>-1</sup> de sacarosa). Aunque no se encontraron estudios que indicaran esta tendencia en donde la remoción de nitrato fuera menor a mayor carga orgánica, tal vez pudiera deberse a una inhibición en el desarrollo los microorganismos desnitrificantes (aunque para corroborar esto deberá realizarse otra investigación).
- La planta (F=4.67, P=0.0485). La Figura 4.12 muestra qué tan significativamente distintas son las medias en la concentración de nitrato en relación a la planta. Se observa una mejor remoción de nutrientes en el reactor con planta. Esto se puede deber a la presencia de organismos desnitrificantes en la zona radicular de la planta o macrófita, lo que mejora la remoción del nutriente nitrogenado en esta zona, gracias a la liberación de nutrientes por parte de la planta.

Tabla 4.2 Promedio de concentraciones de nitratos en los reactores con planta RA1 y RB1 y reactores sin planta RA2 y RB2 y en eficiencia de remoción.

	<i>Reactores con planta</i>						<i>Reactores sin planta</i>					
	<i>RA1 Profundidades (cm)</i>			<i>RB1 Profundidades (cm)</i>			<i>RA2 Profundidades (cm)</i>			<i>RB2 Profundidades (cm)</i>		
<i>Primera etapa</i>	2	10	30	2	10	30	2	10	30	2	10	30
mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	0.32	0.31	0.39	0.32	0.29	0.28	0.47	0.33	0.31	0.48	0.31	0.31
% de remoción	93.44	93.60	91.77	93.27	93.95	94.20	90.45	93.18	93.64	90.26	93.55	93.49
<i>Segunda etapa</i>												
mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	0.09	0.20	0.07	0.08	0.08	0.07	0.18	0.14	0.11	0.13	0.07	0.09
% de remoción	98.49	96.74	98.83	98.60	98.73	98.80	96.62	97.50	98.09	97.85	98.92	98.56

### 4.3 Resultados obtenidos, observaciones y discusión para [N-N<sub>org</sub>]

Las concentraciones de nitrógeno orgánico presente en el agua de salida, ya que no se detectó nitrógeno orgánico en el flujo de alimentación, para las distintas profundidades se

pueden ver en las Figuras 4.13 a 4.18 Existe una cantidad de nitrógeno orgánico de hasta  $35\text{mg N-N}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$ . Respecto a su posible origen se puede comentar lo siguiente:

- A los materiales orgánicos nitrogenados liberados por las raíces de las plantas, según Zhu y Sikora (1995), es la principal fuente de nitrógeno orgánico.
- La asimilación por parte de los microorganismos del ión amonio contenido en el ARS transformándolo en nitrógeno orgánico.
- La asimilación reductiva de los nitratos que ingresan con el agua de la llave utilizada para preparar el ARS, a las células de los microorganismos contenida en el ARS transformándose después también en nitrógeno orgánico.
- A la materia orgánica degradada proveniente de los seres vivos (raíces de las macrofitas, organismos en descomposición) por los microorganismos.
- La fijación del nitrógeno y su incorporación al ecosistema que se da en menor medida pero no es menos importante.

Todas estas formas de asimilación de las especies inorgánicas de nitrógeno por parte de los microorganismos conforman un almacén o sumidero, donde la especie se encuentra en forma “amino-reducida” en la materia orgánica, según se informa en la prueba de Biuret-Lowry empleada. Este fenómeno es conocido como inmovilización del nitrógeno y es adverso a la remoción de la especie al no encontrarse el nitrógeno en forma inorgánica libre.

Cuando existe nitrógeno libre es usado en la síntesis de nuevas proteínas, en el crecimiento de las colonias residentes del humedal o bien para su remoción a la atmósfera a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación. Otro factor que contribuye a la inmovilización del nitrógeno es el nivel bajo de oxígeno disuelto ya que disminuye la actividad microbiana y, como consecuencia, la descomposición orgánica (IWA, 2000). Cabe destacar que el reactor se mantuvo inundado todo el tiempo, por lo que siempre fue escaso el oxígeno disuelto, con excepción de la zona cercana a la raíz, donde durante el día había transporte de oxígeno (pero que, muy probablemente, fue rápidamente metabolizado por los microorganismos aerobios responsables de la degradación de los compuestos carbonosos).

El reactor sin planta también presenta cantidades de nitrógeno orgánico del orden de  $14$  a  $24 \text{ mg N-N}_{\text{org}} \text{L}^{-1}$  que se deben a la presencia de colonias de microorganismos formando una biopelícula sobre el material de origen volcánico que les sirve como soporte y que también liberan materia orgánica como producto de sus funciones metabólicas o muerte.

Al realizar el análisis estadístico a un 84% de confianza, se tiene que el cambio o variabilidad en la concentración del nitrógeno orgánico a las distintas profundidades durante las dos etapas experimentales se explica principalmente por un factor:

- Carga orgánica ( $F = 2.22$ ,  $P = 0.1582$ ). Este dato indica que se le puede atribuir la mejor remoción de nitrógeno orgánico durante la segunda etapa al cambio de la carga orgánica. En la Figura 4.13, se observa una media significativamente mayor en la carga orgánica para la primera etapa (sacarosa de  $450 \text{ mg L}^{-1}$ ) que para la segunda etapa (sacarosa de  $225 \text{ mg L}^{-1}$ ).

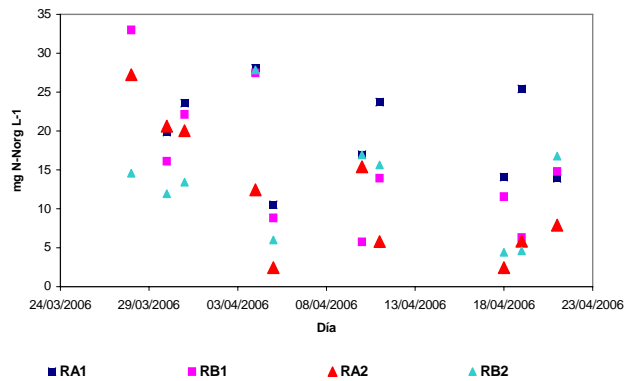


Figura 4.13 Dinámica de  $N-N_{org}$  durante las cuatro semanas de estudio de la primera etapa (sacarosa  $450 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 2 cm medidos a partir de la superficie del agua

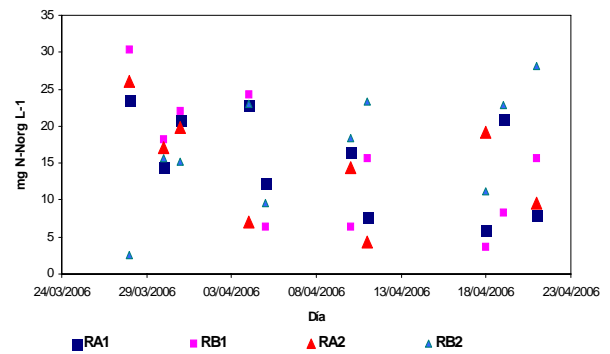


Figura 4.14 Dinámica de  $N-N_{org}$  durante las cuatro semanas de estudio de la segunda etapa (sacarosa  $225 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 30 cm medidos a partir de la superficie del agua

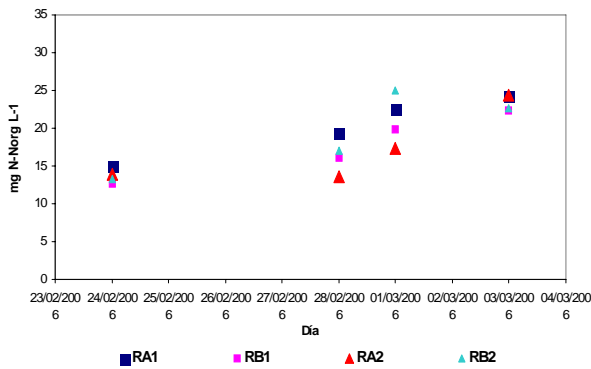


Figura 4.15 Dinámica de  $N-N_{org}$  durante las cuatro semanas de estudio de la primera etapa (sacarosa  $450 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 10 cm medidos a partir de la superficie del agua

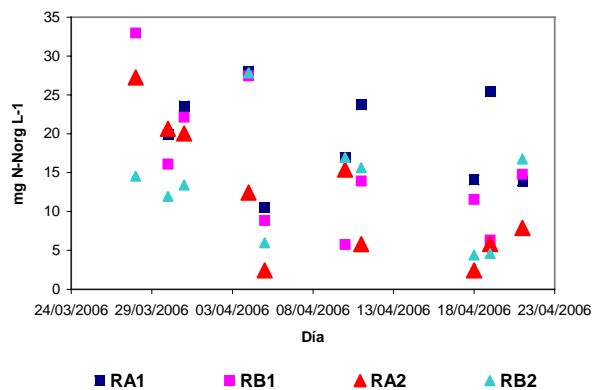


Figura 4.16 Dinámica de  $N-N_{org}$  durante las cuatro semanas de estudio de la segunda etapa (sacarosa  $225 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 30 cm medidos a partir de la superficie del agua

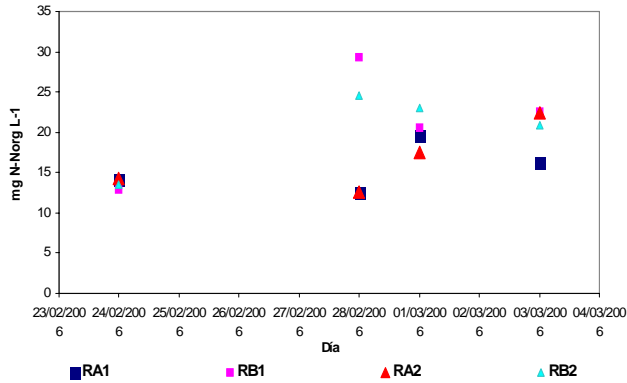


Figura 4.17 Dinámica de N-N<sub>org</sub> durante las cuatro semanas de estudio de la primera etapa (sacarosa 450 mg L<sup>-1</sup>) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 30 cm medidos a partir de la superficie del agua

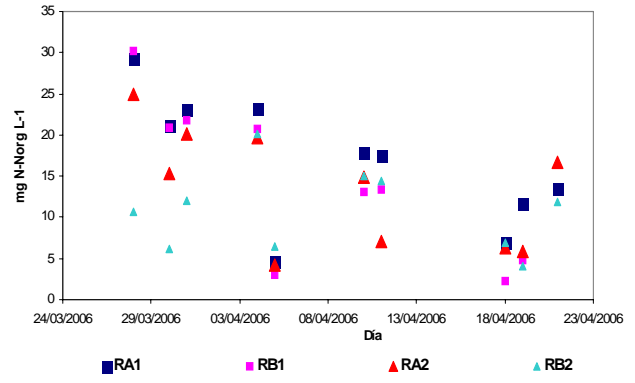


Figura 4.18 Dinámica de N-N<sub>org</sub> durante las cuatro semanas de estudio de la segunda etapa (sacarosa 225 mg L<sup>-1</sup>) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 30 cm medidos a partir de la superficie del agua

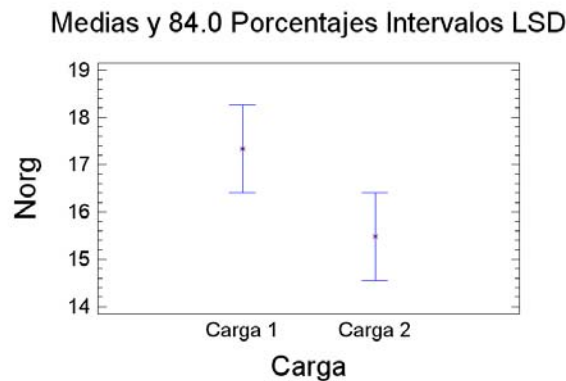


Figura 4.19 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para nitrógeno orgánico a un 84% de confianza al cambiar la carga orgánica de la primera etapa (450 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa) a la segunda etapa (225 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa)

- En otras palabras, las condiciones de carga orgánica en la primera etapa favorecen más a la inmovilización del nitrógeno que la segunda etapa. Esto se explica por la menor disponibilidad de fuentes de carbono en la segunda etapa, al estar alimentando al reactor con ARS con la mitad de la sacarosa. Se puede pensar que al no existir suficiente fuente de carbono, los microorganismos toman el carbono de la materia orgánica disuelta para suplir sus necesidades de este nutriente y, por ello, disminuye la concentración de nitrógeno orgánico en la segunda etapa. Al menos

para las condiciones experimentales establecidas, la menor carga orgánica favorece la remoción de los compuestos orgánicos nitrogenados del HAFV. Los datos obtenidos se pueden consultar en el Anexo 8.

#### **4.4 Resultados obtenidos, observaciones y discusión para [N-N<sub>total</sub>]**

El nitrógeno total se consideró como la suma de todas las especies que se detectaron en concentraciones mayores a 0.2 mg L<sup>-1</sup> (ión amonio, nitratos, nitrógeno orgánico). No se detectaron cantidades suficientes de nitritos (eran menores a 0.2 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>).

Las Figuras 4.20 a 4.25 muestran la dinámica del nitrógeno total durante las dos etapas para los reactores con planta, sin planta y sus duplicados. En la primera etapa, con una concentración de sacarosa de 450 mg L<sup>-1</sup> y en la segunda etapa, con una concentración de sacarosa de 225 mg L<sup>-1</sup>, se observan valores de nitrógeno total con concentraciones por arriba de las que contenía el ARS alimentada, fluctuando entre 15 y 35 mg N-N<sub>total</sub> L<sup>-1</sup> para la primera etapa y de 40 a 5 mg N-N<sub>total</sub> L<sup>-1</sup> en la segunda etapa, esta fluctuación muestra que el reactor no se estabilizó con respecto a las concentraciones de salida de nitrógeno total. El nitrógeno orgánico es la especie que aportó más a la sumatoria de especies de nitrógeno para dar el nitrógeno total debido al fenómeno de inmovilización discutido en la sección de nitrógeno orgánico.

Al realizar el análisis estadístico a un 84% de confianza, se tiene que el cambio o variabilidad en la concentración del nitrógeno orgánico a las distintas profundidades, durante las dos etapas experimentales, se explica principalmente por un factor:

- El factor de carga orgánica (F = 22.61, P = 0.003). Este dato indica que el cambio en la remoción de nitrógeno total se le puede atribuir al cambio de la carga orgánica. En la Figura 4.26 se observa una diferencia significativamente mayor para la carga orgánica de la primera etapa (450 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa), con respecto a la segunda etapa (225mg L<sup>-1</sup> de sacarosa). Es decir, existe una mayor remoción de nitrógeno total en la segunda etapa que en la primera. Tomando en cuenta que la mayor aportación de nitrógeno total proviene del nitrógeno orgánico se puede pensar que, al disminuir la carga orgánica, los microorganismos toman su fuente de nitrógeno y carbono de la materia orgánica disuelta y, por ello, disminuye la concentración de nitrógeno total en la segunda etapa.

La Figura 4.27 muestra las medias para la remoción de nitrógeno total a las distintas profundidades y su intervalo LSD a un 95% de confianza. En ésta se aprecia una media estadísticamente mayor para la cantidad de nitrógeno total a 2 cm de profundidad que a 30 cm. La cantidad de nitrógeno total a la entrada del influente oscila entre 12.06 ± 1.29 mg N-N<sub>total</sub> L<sup>-1</sup> para la primera etapa y 12.9 ± 0.78 mg N-N<sub>total</sub> L<sup>-1</sup> para la segunda etapa. Se puede pensar que pese a que el nitrógeno total sufre un proceso de inmovilización acumulándose en el reactor, a medida que se avanza en la columna empacada del humedal aumenta la remoción.

Es importante resaltar que durante el tiempo que duró la investigación, no fue posible alcanzar la estabilización en la remoción nitrógeno total y, por ello, se obtiene una

fluctuación en los valores de los resultados obtenidos. Los datos obtenidos se pueden consultar en el Anexo 8.

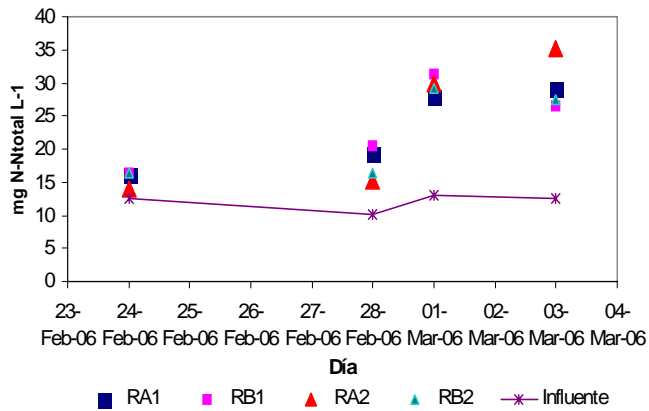


Figura 4.20 Dinámica de  $N-N_{total}$  durante las cuatro semanas de estudio de la primera etapa (sacarosa  $450 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 2 cm medidos a partir de la superficie del agua

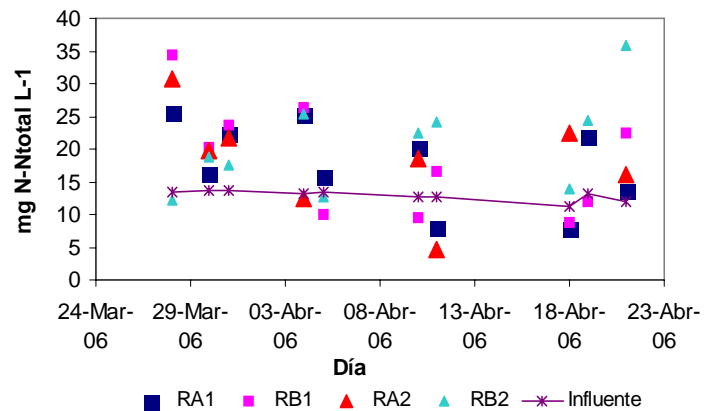


Figura 4.21 Dinámica de  $N-N_{total}$  durante las cuatro semanas de estudio de la segunda etapa (sacarosa  $225 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 2 cm medidos a partir de la superficie del agua

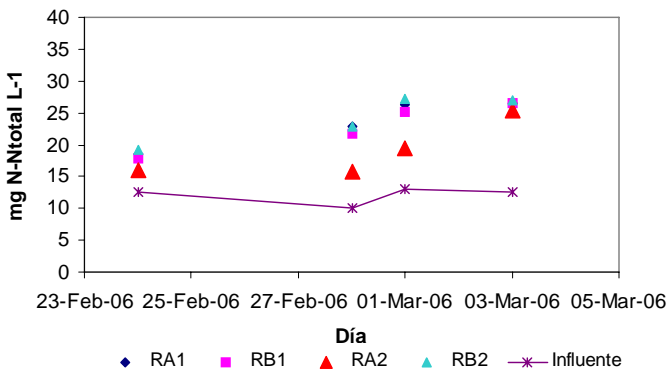


Figura 4.22 Dinámica de  $N-N_{total}$  durante las cuatro semanas de estudio de la primera etapa (sacarosa  $450 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 10 cm medidos a partir de la superficie del agua

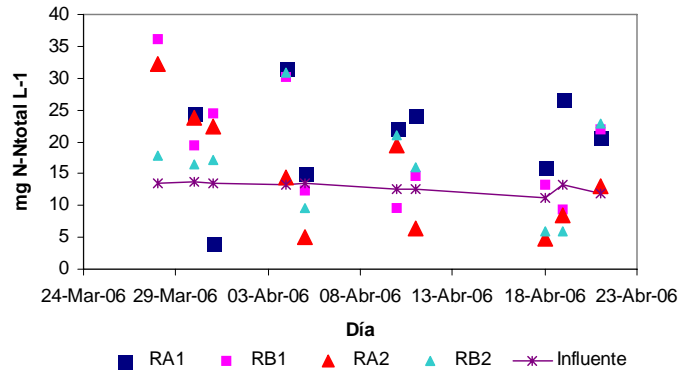


Figura 4.23 Dinámica de  $N-N_{total}$  durante las cuatro semanas de estudio de la segunda etapa (sacarosa  $225 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 10 cm medidos a partir de la superficie del agua

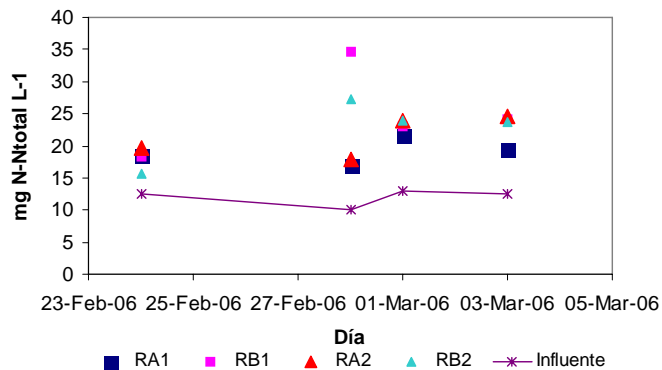


Figura 4.24 Dinámica de  $N-N_{total}$  durante las cuatro semanas de estudio de la primera etapa (sacarosa  $450 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 30 cm medidos a partir de la superficie del agua

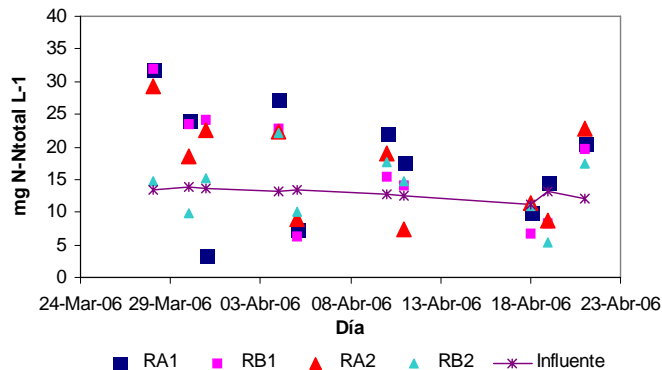


Figura 4.25 Dinámica de  $N-N_{total}$  durante las cuatro semanas de estudio de la segunda etapa (sacarosa  $225 \text{ mg L}^{-1}$ ) para los reactores con planta (RA1 y RB1) y los reactores sin planta (RA2 y RB2) a una profundidad de 30 cm medidos a partir de la superficie del agua

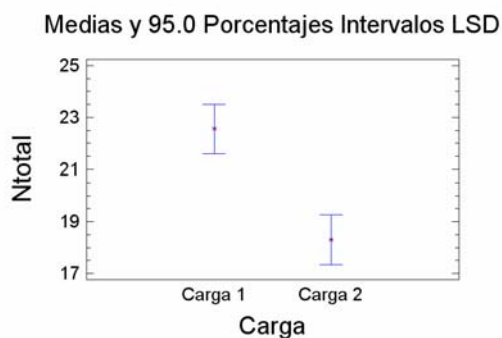


Figura 4.26 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para nitrógeno total a un 95% de confianza al cambiar la carga orgánica de la primera etapa ( $450 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa) a la segunda etapa ( $225 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa)

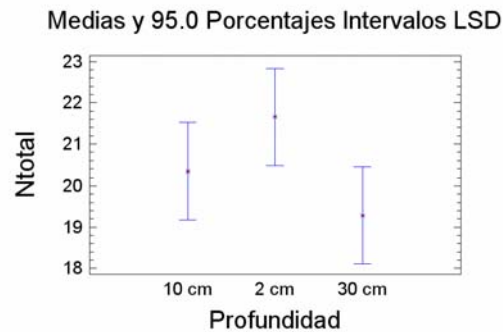


Figura 4.27 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) a través de las profundidades 2, 10 y 30 cm, medidas desde la parte superior del reactor para nitrógeno total a un 95% de confianza

#### 4.5 Resultados, observaciones y discusión de potenciales de óxido-reducción, pOR

El potencial redox está muy influido por la presencia o ausencia de oxígeno molecular. Un potencial negativo significa que el medio es reductor e, indirectamente, que la concentración de oxígeno es baja. Un potencial positivo significa que el medio es oxidante. Bajo la superficie de los suelos inundados los potenciales generalmente son negativos debido a las concentraciones bajas de oxígeno (Atlas y Bartha, 2001). El potencial para RA1 y RA2, a las distintas alturas, es negativo debido al consumo de oxígeno por los microorganismos del medio. A excepción del potencial para RA1 en la zona de la raíz de la

planta, que presenta potenciales positivos debido a que por la raíz se introduce oxígeno proveniente de la fotosíntesis, además del oxígeno que es transportado por la planta desde la atmósfera a través de sus tejidos, favoreciendo un medio oxidante con valores de pOR positivos. Los datos obtenidos se pueden consultar en el Anexo 7. La Tabla 4.5 muestra los promedios para pOR en la primera etapa en RA1 y RA2 a las diferentes profundidades (Reyes-Luz, 2006).

Tabla 4.5 Valores promedio del pOR para las diferentes profundidades (sistema RA)

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

#### 4.6 Resultados, observaciones y discusión de remoción de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno, DQO

Las Figuras 4.28 y 4.29 muestran los valores para la demanda química de oxígeno en la primera etapa de experimentación. El valor promedio del influente fue de 443 mg DQO L<sup>-1</sup>, para la primera etapa y de 316 mg DQO L<sup>-1</sup>, para la segunda. Los valores promedio de DQO en los efluentes para los cuatro reactores durante la primera etapa se encuentran comprendidos entre 167 a 215 mg DQO L<sup>-1</sup> y los valores para la segunda etapa se ubican entre 103 a 112 mg DQO L<sup>-1</sup>. A partir de estos datos se puede aseverar que los humedales artificiales sí remueven los materiales disueltos adicionados que se cuantificaron como DQO. La remoción es realizada por medio de los microorganismos que proliferan como una biopelícula sobre el medio de soporte y sobre las raíces de las hidrofítas.

La Figura 4.22 muestra las medias de la DQO para el ARS de entrada y de salida. Con un 95% de confianza, se observa que sí existe una diferencia ligeramente mayor entre los reactores que tienen planta (RA1 y RB1) y los reactores que no tienen planta (RA2 y RB2) en la remoción de la DQO. Esto quiere decir que en el reactor con planta existe una ligera mejor remoción de la materia orgánica en términos de DQO. Se explica porque la raíz de la planta en el reactor, produce oxígeno y nutrientes que favorecen el desarrollo poblacional de los microorganismos (como se observó en los valores de los pOR de la Tabla 4.5) y estos durante su proliferación, consumen la materia orgánica del medio para suplir sus necesidades metabólicas disminuyendo la materia orgánica disuelta detectada posteriormente como DQO. La respuesta en la remoción de este contaminante por parte del humedal con planta puede aumentar conforme la densidad poblacional de organismos vegetales aumente. Esto es lo que sucede a escala real.



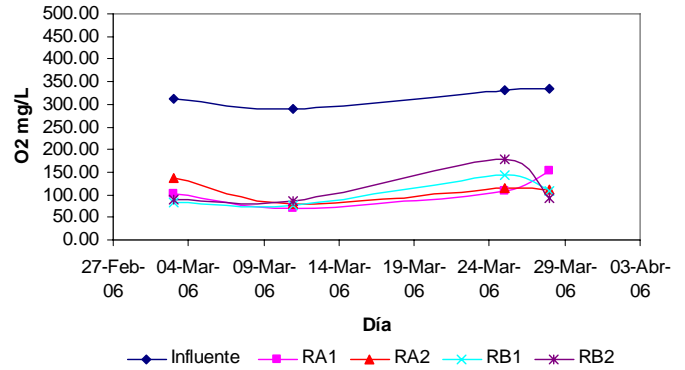
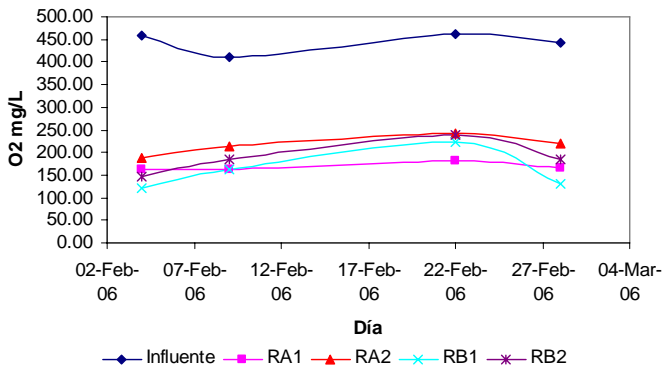


Figura 4.28 Valores de DQO en la primera etapa para los reactores con planta (RA1 y RB1) y sin planta (RA2 y RB2)

Figura 4.29 Valores de DQO en la segunda etapa para los reactores con planta (RA1 y RB1) y sin planta (RA2 y RB2)

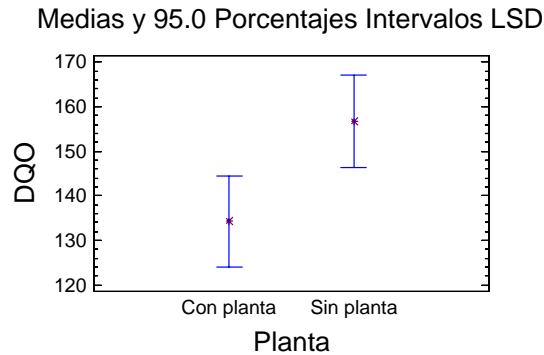


Figura 4.30 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para DQO

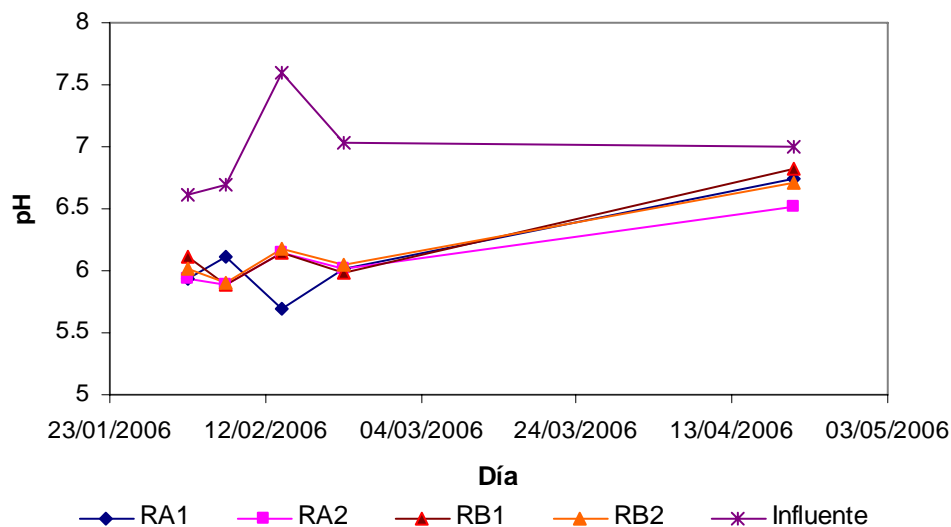
## 4.7 Resultados de parámetros en el humedal artificial a escala de laboratorio

### 4.7.1 Determinación de pH

En la Figura 4.31 se muestran los valores de pH para el agua influente y para el agua efluente en los cuatro reactores. Se observa que las condiciones internas del reactor son ligeramente ácidas, con valores alrededor de 6. Los valores de pH ácido son normales en humedales en ciclos de crecimiento, muerte y descomposición de la materia orgánica (IWA, 2000), por la formación de ácidos orgánicos derivados de la degradación de compuestos carbonosos por bacterias acidogénicas. Los resultados de pOR muestran valores relativamente bajos, de -171 mV y, a estos potenciales, puede producirse fácilmente la reducción de sulfatos, con producción de  $H_2S$  y la reducción de  $CO_2$  con producción de  $CH_4$  (Atlas y Bartha, 2001). El fenómeno de la acidogénesis, que consiste en la reducción de los sulfatos a ácido sulfhídrico o de la sacarosa a ácido acético, entre muchas otras reacciones, por parte de las bacterias sulfato-reductoras o acidogénicas, que viven en

condiciones anaerobias, favoreció la ligera acidez durante el experimento. Existen condiciones favorables para estas bacterias en el reactor permanentemente inundado donde el medio es principalmente anaerobio (Guido-Zarate, 2005).

Figura 4.31 Variación de pH durante la experimentación para los reactores con planta (RA1



y RB1) y sin planta (RA2 y RB2)

#### 4.7.2 Determinación de temperatura

Como se muestra en la Figura 4.32 el valor promedio para la temperatura en la primera etapa fue de 22°C durante el mes de febrero y principios de marzo. Para la segunda etapa fue de 23°C a principios de marzo y finales de abril. Se puede decir que la temperatura durante el tiempo de duración del experimento se mantuvo relativamente constante, incrementándose en este lapso en 1°C, debido a la época del año en la que se llevó a cabo.

#### 4.7.3 Crecimiento y adaptación de la macrófita (*Phragmites australis*)

La Figura 4.33 muestra el crecimiento de las plantas en los dos reactores RA1 y su control RB1. Se observa que en el comportamiento de crecimiento de la fase aérea de las plantas existen etapas de mayor crecimiento que otras, donde la macrófita disminuyó sus procesos metabólicos para seguir creciendo, por lo que la forma del gráfico semeja escalones.

En los primeros días se pudo ver el desarrollo de nuevas raíces (removiendo ligeramente el material de soporte). El promedio de crecimiento para RA1 fue de 1.08 cm y para RB1 fue de 0.83 cm por día, se puede inferir que la planta RA1 tuvo una mejor capacidad de adaptación al aprovechar de mejor manera las condiciones del lugar a pesar de provenir de la misma planta “madre”.

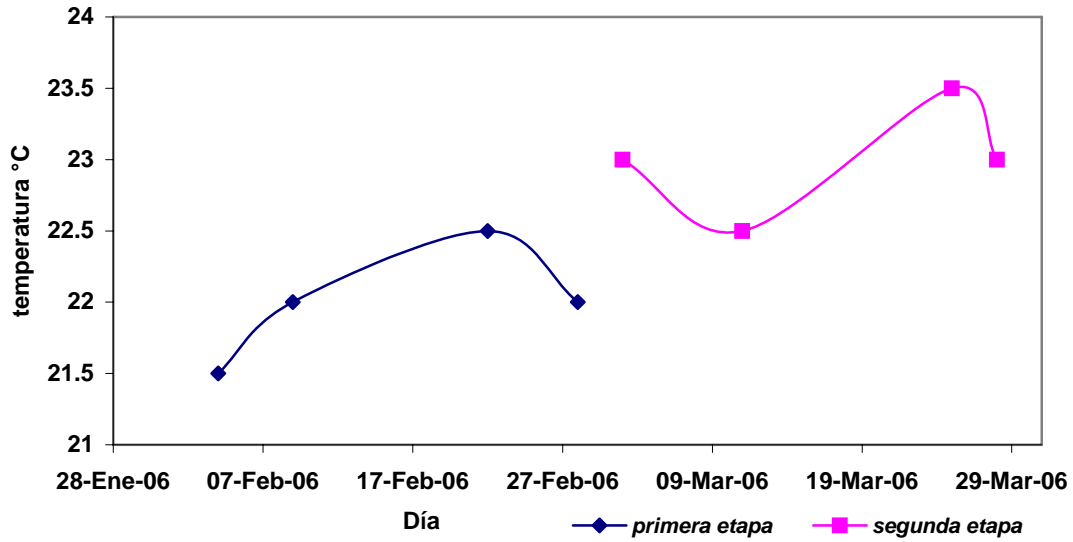


Figura 4.32 Valores de temperatura del cuarto donde se instaló el sistema de humedales artificiales durante las dos etapas de experimentación.

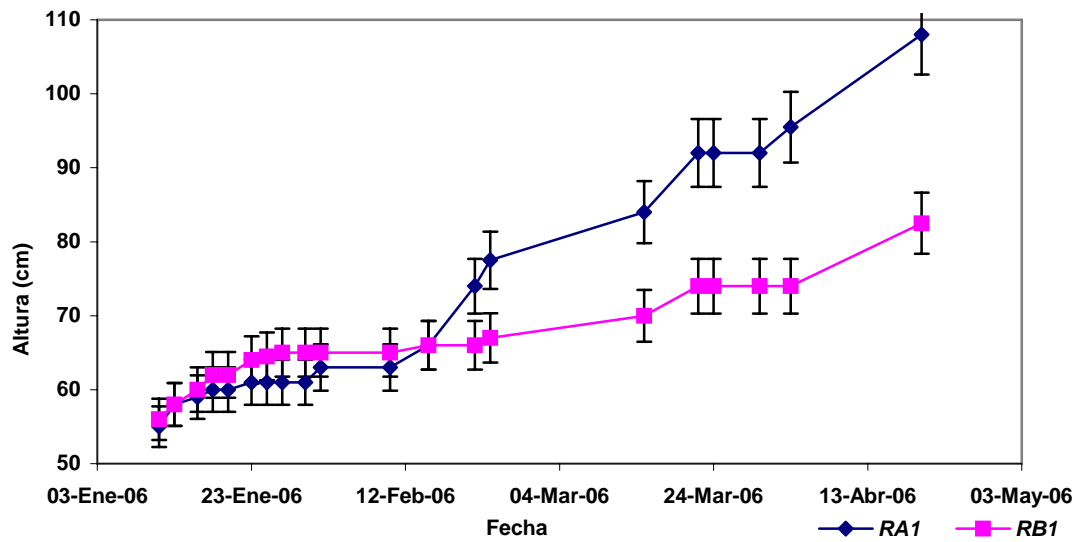


Figura 4.33 Crecimiento de la hidrófita (*Phragmites sp*) durante un periodo de 4 meses

## Capítulo 5

### CONCLUSIONES, SUGERENCIAS Y PERSPECTIVAS

#### 5.1 Conclusiones

El cambio en la carga orgánica tuvo distintos efectos en la remoción de los compuestos nitrogenados ( $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N-N}_{\text{total}}$ ). Apoyándose en el análisis estadístico de los resultados obtenidos, se puede afirmar que éste es el principal factor por el que se da la variación en la remoción a lo largo del experimento. Para  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-N}_{\text{org}}$ , y  $\text{N-N}_{\text{total}}$ , el cambio en la carga orgánica de  $450 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa a  $225 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa tuvo un efecto benéfico al aumentar el porcentaje de remoción de las especies. Se puede pensar que al no existir suficiente fuente de carbono, los microorganismos toman el carbono de la materia orgánica disuelta para suplir sus necesidades de este nutriente y, por ello, disminuye la concentración de nitrógeno orgánico en la segunda etapa, así como de nitrógeno total, por ser el nitrógeno orgánico la principal fuente de nitrógeno total. La hipótesis planteada para  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-N}_{\text{org}}$ , y  $\text{N-N}_{\text{total}}$  no se cumplió al menos en las condiciones experimentales establecidas. Será necesario seguir investigando esto para dilucidar los fenómenos que causan este comportamiento.

Para  $\text{NH}_4^+$ , el cambio en la carga orgánica tuvo como consecuencia que los mecanismos de remoción del ión amonio se vieron mejorados por contenidos mayores de compuestos carbonosos, correspondientes a la primera etapa con una concentración de sacarosa de  $450 \text{ mg L}^{-1}$ , como se planteó en la hipótesis. La mayor disponibilidad de sustratos carbonosos favorecieron un mejor desarrollo microbiano, beneficiando la remoción del nutriente en el HAFV.

Debido a la mejor remoción del nitrato con respecto al amonio, que fue de  $90 \pm 5\%$  (para nitratos), se infiere que el nutriente nitrogenado inorgánico, que prefieren los microorganismos en el HAFV manejado es el nitrato. Este fenómeno puede deberse a las condiciones reductoras que prevalecen en el humedal (con pOR negativos) ya que los microorganismos sustituyen al  $\text{O}_2$  por el  $\text{NO}_3^-$  como aceptor de electrones, reduciendo dichas especies. Con base en lo anterior puede decirse que el reactor de flujo vertical posee una buena eficiencia en la remoción de especies inorgánicas nitrogenadas. Se encontró una diferencia significativamente mayor en la remoción de ión amonio y nitratos para los reactores que tenían planta, lo que corrobora la importancia de los organismos vegetales en la estructura de un humedal artificial, para la remoción de especies inorgánicas nitrogenadas, atribuida a que la raíz de la planta favorece la generación de oxígeno molecular, producto de la fotosíntesis y, esto a su vez, favorece el desarrollo microbiano, responsable de la remoción.

Se encontró una acumulación de nitrógeno en el reactor y su duplicado detectada en forma de nitrógeno orgánico. Éste puede provenir de los productos de desecho de los microorganismos del medio al asimilarse el nitrógeno inorgánico en la descomposición de materia orgánica lixiviada. A este fenómeno se le conoce como “inmovilización del nitrógeno”. Se conceptúa como un proceso adverso a la remoción del nitrógeno total,

cuando se tienen condiciones de carga orgánica similares a las utilizadas en la primera etapa. Es interesante notar que, en las condiciones de carga orgánica de la segunda etapa, se tiene una disminución en la concentración de nitrógeno orgánico atribuida a la mineralización y flujo de nitrógeno total, siendo un proceso favorable para su remoción, al menos en este sistema.

El potencial redox en el seno del humedal indica condiciones reductoras (con pOR negativos), debido al estado permanentemente inundado del reactor y ligeramente ácidas, atribuido al fenómeno de la acidogénesis. Los electrodos ubicados en el área de la raíz presentaron potenciales positivos atribuidos al oxígeno producido por la planta debido a la fotosíntesis y al transporte del oxígeno molecular a través de las aerénquimas de la planta de carrizo.

El conjunto de reactores mostró comportamientos variables para las especies de nitrógeno en estudio, por lo que se sabe que el sistema no alcanzó la estabilidad en las cuatro semanas que fue el lapso de estudio para cada carga orgánica. A través de la literatura consultada (IWA, 2000), se encontró que al trabajar con humedales artificiales para estudiar la remoción de nitrógeno, se tienen períodos de estabilización de hasta un año, lo que significa que deberá continuarse esta investigación para evaluar de manera integral el destino del nitrógeno en los sistemas de humedales artificiales.

Es importante resaltar que el sistema representa la zona de la raíz de una sola planta y no de un humedal artificial, por lo que los resultados obtenidos en esta investigación sirven justamente para iniciar el estudio y la comprensión del fenómeno de asimilación del nitrógeno que venga como contaminante en aguas residuales. Posteriormente, con los resultados que se obtengan de estas investigaciones se escalarán a los sistemas de campo, cuyas dimensiones y densidad de población de plantas permitirán muy probablemente eliminar los contaminantes que tienen las aguas residuales que se viertan en ellos.

## **5.2 Sugerencias**

Durante la etapa de experimentación, se observaron detalles en el montaje y operación del sistema experimental que no favorecieron el correcto desarrollo de los experimentos. Por ello, se proponen mejoras con la finalidad de hacer más eficiente el sistema para la continuidad de estas investigaciones. Las sugerencias son las siguientes:

- Las lámparas de luz de día de 15 Watts no fueron suficientes como única fuente de luz ya que limitan el crecimiento de las plantas, por lo que tuvo que suplementarse la energía UV con luz natural de una ventana que tenía el laboratorio donde se encontraba el sistema y que estaba originalmente bloqueada con papel oscuro. Si se desea tener un control de esta variable será necesario colocar lámparas de mayor energía.
- Estos experimentos se realizaron manteniendo los reactores inundados con objeto de no favorecer la solubilización del oxígeno molecular y ver el efecto del oxígeno fotosintético de las plantas de carrizo. En sistemas reales de flujo vertical esto no ocurre, ya que la alimentación se hace, no en forma continua sino intermitente, lo

que permite la inclusión de aire al sistema y el oxígeno no es un parámetro limitante. Por ello, es que se conceptualizan por los ingenieros como reactores de flujo pistón. En un sistema real no se espera que haya fenómenos de acidogénesis ni problemas de limitación de oxígeno molecular, favoreciéndose las reacciones deseables del sistema de humedales artificiales. Se sugiere que los experimentos siguientes se realicen imitando las condiciones reales (alimentación intermitente), que permitan la inclusión de aire al sistema, (Fenoglio-Limón, 2003).

- La distancia de los puntos de recolección de la muestra a lo largo de la columna empacada del reactor debe ser de, por lo menos, 30 cm de diferencia para que los resultados arrojen información significativa en la concentración de especies de nitrógeno.

### 5.3 Perspectivas

Existen varias alternativas para el tratamiento de aguas residuales. Una de las propuestas en boga es el tratamiento especializado e inmediato del efluente a tratar, es decir, que se trate el agua residual *in situ*, esto es, en el sitio donde se genera, sin permitir que aguas domésticas e industriales se junten en una mezcla más compleja y difícil de tratar.

Los humedales artificiales también se pueden utilizar para el tratamiento de aguas residuales domésticas *in situ*. En estos casos, se presentan grandes ventajas desde el punto de vista económico ya que pueden ser utilizados en áreas rurales donde los costos de las tierras son bajos y donde se tienen más problemas para instalar sistemas tradicionales que requieren de equipos costosos y altos consumos energéticos.

Una forma de solucionar la instalación de humedales, cuando la disponibilidad de espacio es pobre y caro, como sucede en las grandes ciudades, es la construcción de sistemas híbridos: Un sistema de discos rotatorios (compacto y eficiente), acoplado con un humedal en serie, dispuestos para que el agua tratada por el primer sistema sea tratada y mejorada por la segunda sección, que es la del humedal artificial, que actúa como pulimento y para retener los microorganismos patógenos que no se eliminan en el reactor de biodiscos, así como los compuestos nitrogenados que se generan en el mismo. Esta propuesta está basada en datos experimentales, que muestran una eficiencia de remoción de especies inorgánicas de nitrógeno de más del 50% en los primeros 30 cm de profundidad en el humedal artificial de flujo vertical. Se tienen también eficiencias de remoción en términos de DQO de al menos 95% (Guido-Zárate, 2006).

## **Anexos**

### **Anexo 1 Determinación de nitrógeno amoniacal por el método de Nessler directo**

#### **A.1.1 Principios**

El método Nessler (Julius Nessler, 1856), se utiliza para determinar ión amonio, principalmente en aguas potables purificadas, naturales y diluyentes residuales muy depurados. El principio consiste en que el reactivo de Nessler ( $K_2HgI_4$ ) reacciona en medio acuoso alcalino con el ión amonio para dar un coloide café-rojizo ( $NH_2Hg_2I_3$ ) que se determina espectrofotométricamente, para esta técnica en concentraciones bajas de nitrógeno amoniacal de 0.2 ppm a 9 ppm, se puede medir ión amonio con buena sensibilidad en un rango de longitud de onda de 400-425 nm, cuando se tiene el ión amonio presente en el medio acuoso.

#### **A.1.2 Interferencias**

En general, las interferencias se pueden presentar de dos maneras: como una coloración amarilla o verde y como turbidez. Algunas aminas alifáticas y aromáticas dan una coloración amarilla. Los aldehídos, acetonas, alcoholes y cloraminas orgánicas, como otros compuestos orgánicos dan turbidez. Algunos iones insolubles en soluciones alcalinas que precipitan con yodo o mercurio, pueden también causar turbidez. Es necesario el tratamiento preliminar antes de la “nesslerización” directa con sulfato de zinc y álcali, para precipitar calcio, hierro y sulfuro que producen turbidez cuando se trata con el reactivo de Nessler. Para evitar la precipitación de calcio o magnesio en muestras no destiladas, se puede utilizar un agente estabilizador como lo es EDTA o sal de Rochelle tras la adición de reactivo de Nessler.

#### **A.1.3 Método convencional de Nessler directo**

La metodología que se encontró en el manual APHA-AWWA-WPCF (1992) además del apoyo en el texto de Boltz (1958). Este requería de una muestra de 50 mL y 2 mL del Reactivo de Nessler. A continuación se presenta la propuesta para el método a micro-escala.

#### **A.1.4 Método Nessler directo a micro-escala para determinar ión amonio**

Con el objetivo de reducir la cantidad de residuos provenientes de la prueba Nessler, además de abatir los costos de la prueba, debido a que se utilizan menos reactivos; se realizó una micro-escala del orden 1:10 de la prueba Nessler. Ésta consistió en utilizar menos volumen de muestra y reactivos, pero en proporciones equivalentes, de tal manera que la prueba siguiera siendo viable para medir concentraciones de ión amonio en el rango de 0.5 a 7 ppm, que es de rango de interés, en esta investigación.

En el siguiente cuadro (Tabla A.1), se muestran las cantidades del método convencional versus el de micro-escala.

Tabla A.1.1 Comparación de los métodos Nessler convencional y micro-escala

<i>Método Convencional</i>		<i>Método micro-escala</i>	
Muestra	50 mL	Muestra	5 mL
Reactivo Nessler	2 mL	Reactivo Nessler	0.2 mL

### **Material**

- 1- Espectrofotómetro: SPECTRONIC 21D MILTON ROY
- 2- Potenciómetro con electrodo de pH o bien tiras de indicador universal
- 3- Centrífuga
- 4- Tubos de ensayo 13\*150
- 5- Celda de cuarzo de 10 mm para espectrofotómetro
- 6- Tubos para centrífuga
- 7- Micropipeta de 100 a 1000  $\mu$ L

### **Reactivos**

- 1- Sulfato de zinc ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ )
- 2- Hidróxido de sodio (NaOH)
- 3- Ioduro de potasio (KI)
- 4- Cloruro de mercurio ( $\text{HgCl}_2$ )
- 5- Sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )
- 6- Ácido etilendiamintetracético (EDTA)

### ***Procedimiento***

#### ***Preparación de las soluciones***

- a) Solución de sulfato de zinc  
Disolver 12.5 g de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  en 1 L de agua bidestilada.
- b) Solución de NaOH 2N  
Disolver 40g de NaOH en 1L de agua bidestilada.
- c) Reactivo Nessler  
Disolver 61.75 g de KI en 250 mL de agua bidestilada. Preparar 450 mL de una solución saturada de  $\text{HgCl}_2$  (la solubilidad del  $\text{HgCl}_2$  es 7 g en cada 100 mL a 25 °C) calentando la solución hasta que no se observe mayor disolución de la sal; después enfriar la solución. Añadir poco a poco la solución de  $\text{HgCl}_2$  a la solución de yoduro de potasio, hasta que el precipitado rojo ya no se disuelva; en este punto añadir 0.75 g de KI para disolver el precipitado rojo. Se requerirá un poco más de 400 mL de solución saturada de  $\text{HgCl}_2$  para alcanzar este punto. Disolver los 150 g de NaOH en 250 mL de agua bidestilada y adicionar a la mezcla anterior; aforar hasta 1 L con agua bidestilada.



- d)* Solución madre patrón de sulfato de amonio  
Disolver 0.4720 g de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  en 1 litro de agua bidestilada para dar una solución 100 ppm de  $\text{N-NH}_4^+$ .
- e)* Agente estabilizador (sólo si es requerido) EDTA  
Disolver 50 g de EDTA en 60 mL de agua bidestilada.  
Disolver 10 g de NaOH en la solución anterior y aforar a 100mL.

***Preparación de la curva de calibración de N-NH4+***

- a)* Añadir 5 mL de muestra en un tubo de ensayo 13 por 150.
- b)* Posteriormente, añadir 0.2 mL de solución de sulfato de zinc.
- c)* Llevar a un pH de 10.5 mediante una solución 2N de NaOH, (aproximadamente 0.1 mL) midiendo con un pH-metro, ó bien, con papel indicador universal. En este paso se transforma el ión amonio en amoniaco libre.
- d)* Dejar reaccionar durante unos minutos para que se forme un precipitado blanco, floculante y denso. Para clarificar la solución, centrifugar por lo menos 1min y precipitarlo; es necesario trabajar rápido en esta etapa para evitar que se evapore el amoníaco.
- e)* Añadir 0.2 mL del reactivo de Nessler y dejar reaccionar por un espacio de 15 minutos; medir las muestras “nesslerizadas” en el espectrofotómetro a 415 nm.

Tabla A.1.2 Diluciones para la curva de calibración de ión amonio por el método de Nessler

Número de matraz (50 mL)	Mililitros a adicionar solución patrón	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , ppm
1	0	0
2	0.25	0.5
3	0.5	1
4	1.5	3.0
5	3.0	6.0
6	4.0	8.0

Tabla A.1.3 Volúmenes adicionados en la prueba Nessler

Muestra necesaria (mL)	Solución de sulfato de zinc (mL)	Sosa (mL)	Reactivo de Nessler (mL)	Volumen total (mL)
5	0.2	0.1	0.2	5.5

**NOTA:** La curva de calibración debe prepararse en condiciones idénticas a las adoptadas para las muestras experimentales, a partir de una solución 0.4720 g de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  por litro, para dar una solución de  $100 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{N-NH}_4^+$ .

Para la curva de calibración se preparan las soluciones de manera individual y, posteriormente, se realiza la prueba Nessler para cada una de las diluciones. La solución de Nessler permanece estable hasta 1 año si se almacena a temperaturas en el intervalo de 15-25 °C.

### **A.1.5 Cálculos**

Los resultados son interpretados a partir de la curva de calibración por medio de la ecuación de la recta, que se puede encontrar en el Anexo A.9. Sólo es necesario de esta curva para conocer la concentración de  $N-NH_4^+$ .

Ecuación de la recta

$$y = mx + b$$

donde

$$y = mg \text{ N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$$

$x = \text{absorbancia}$

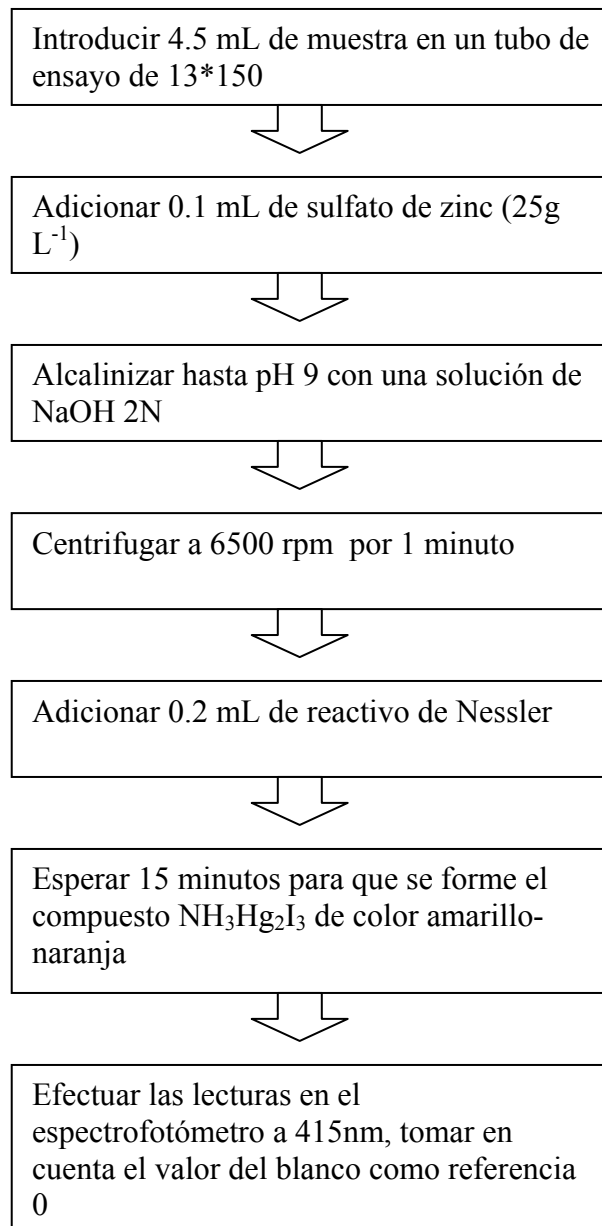
### **A.1.6 Observaciones**

Se debe tener cuidado al momento de trasvasar la muestra nesslerizada a la celda del espectrofotómetro, procurando tomar sólo el líquido amarillo-anaranjado y evitar mezclar el precipitado blanco. Se observa que el color permanece por espacio de 24 horas por lo que se pueden realizar las lecturas al siguiente día, previniendo la evaporación del solvente al meter la muestra al refrigerador y tapar los tubos.

### **A.1.7 Toxicidad de los reactivos**

Para toda la prueba es indispensable utilizar la bata como equipo de seguridad, así como pantalón y zapato cerrado. El reactivo de Nessler es muy tóxico debido al ión  $Hg^{2+}$ . Este ión se acumula en los tejidos del cuerpo, por lo cual es importante trabajar con guantes y evitar ingerirlo. Durante la prueba se utiliza sosa cáustica que es tóxica y corrosiva. Mantener el reactivo Nessler lejos del fuego porque podría causar una explosión.

### A.1.8 Diagrama de flujo de determinación del ión amonio por el método de Nessler



## Anexo 2 Determinación de nitrato por el método de salicilato de sodio micro-escala

### A.2.1 Principio

En medio ácido y en presencia de salicilato de sodio, los nitratos dan el paranitrosalicilato de sodio de color amarillo mismo que es susceptible de una determinación colorimétrica. Este método fue consultado en el trabajo de tesis de Rodríguez-Monroy 2005 donde se

llevó a cabo un micro-escalamiento de la técnica original de orden de 5:1 en las proporciones de las soluciones utilizadas en relación del procedimiento experimental.

### **A.2.2 Determinación de nitrato**

#### **Material**

- 1- Espectrofotómetro: *SPECTRONIC 21D MILTON ROY*
- 2- Horno de calentamiento para usar a 80-90 °C (estufa de secado)
- 3- Celda de cuarzo de 10 mm para espectrofotómetro
- 4- Cápsulas de porcelana
- 5- Pipeta graduada de 5mL

#### **Reactivos**

- 1- Ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ )
- 2- Hidróxido de sodio (NaOH)
- 3- Tartrato doble de sodio y potasio ( $C_4H_4O_6NaK$ )
- 4- Nitrato de potasio ( $KNO_3$ )
- 5- Cloroformo

#### ***Procedimiento***

##### ***Preparación de las soluciones***

- a) Solución de hidróxido de sodio y tartrato doble de sodio y potasio  
Disolver 400 g de hidróxido de sodio, 60 g de tartrato doble de sodio y potasio y aforar a un litro.
- b) Solución de salicilato de sodio al 5% preparada cada 24 horas.
- c) Solución madre patrón de  $N-NO_3^-$ .
- d) Disolver 0.361g de nitrato de potasio en un litro de agua destilada para dar una solución de  $50 \text{ mg } N-NO_3^- \text{ L}^{-1}$ .

##### ***Preparación de la curva de calibración de $N-NH_4^+$***

- a) En una serie de cápsulas de 10 mL introducir los volúmenes que muestra la Tabla (A.2.1).
- b) Evaporar a sequedad en un baño maría o en estufa a 75-80°C (no calentar durante mucho tiempo ni a temperatura superior a la indicada. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
- c) Tratar el residuo blanco con 0.4 mL de ácido sulfúrico concentrado, procurar que quede impregnado completamente y esperar 10 min.

- d) Añadir 3 mL de agua bidestilada y 3 mL de solución de hidróxido de sodio y de tartrato doble de sodio y potasio que desarrolla una coloración amarilla.
- e) Efectuar las lecturas en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 420 nm.

***Preparación de la muestra problema***

- a) Introducir 2 mL de muestra en una cápsula de 10 mL (para contenidos de nitrógeno nítrico superiores a 10 mg L<sup>-1</sup>).
- b) Alcalinizar débilmente con una cuarta parte de una gota de la solución de hidróxido de sodio.
- c) Añadir 0.2 mL de solución de salicilato de sodio al 5%.
- d) Evaporar a sequedad en un baño maría o en estufa a 75-80°C (no calentar durante mucho tiempo ni a temperatura superior a la indicada. Dejar enfriar a temperatura ambiente).
- e) Tratar el residuo blanco con 0.4 mL de ácido sulfúrico concentrado, procurar que quede impregnado completamente y esperar 10 min.
- f) Añadir 3 mL de agua bidestilada y 3 mL de solución de hidróxido de sodio y de tartrato doble de sodio y potasio que desarrolla una coloración amarilla.
- g) Añadir 3 mL de agua bidestilada y 3 mL de solución de hidróxido de sodio y de tartrato doble de sodio y potasio que desarrolla una coloración amarilla.
- h) Efectuar las lecturas en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 420 nm.

Tabla A.2.1 Curva de calibración para N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> por el método de salicilato de sodio

Número de cápsula	T	I	II	III	IV
Solución patrón de nitrógeno nítrico (mL)	0.0	0.2	0.4	1.0	2.0
Agua destilada (mL)	2.0	1.8	1.6	1.0	0.0
Correspondencia en mg/L de nitrógeno nítrico	0.0	0.5	1.0	2.5	5.0
Solución de salicilato de sodio (mL)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Volumen total a evaporar (mL)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2

**NOTA:** Para alcanzar una temperatura en el líquido entre 75-80°C se requirió una temperatura dentro de la estufa de 130°C (aire caliente), medida con termómetro de bulbo de mercurio. Utilizar como testigo una muestra de 2mL de agua destilada.

**A.2.3 Cálculos**

Los resultados son interpretados a partir de la curva de calibración por medio de la ecuación de la recta, que se puede encontrar en el Anexo A.9. Sólo es necesario de esta curva para conocer la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Ecuación de la recta

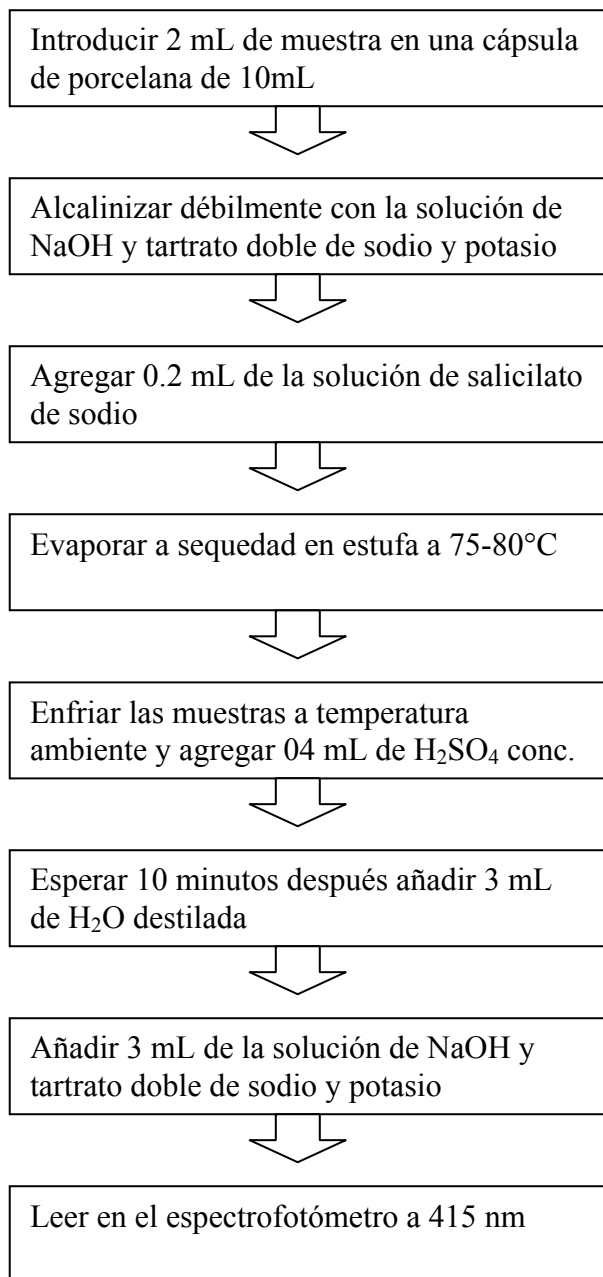
$$y = mx + b$$

donde

$$y = \text{mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$$

$$x = \text{absorbancia}$$

#### A.2.4 Diagrama de flujo de determinación de nitratos por el método de salicilato de sodio



## **Anexo 3 Determinación de nitrógeno orgánico por el método de Biuret-Lowry**

### **A.3.1 Principio**

Este método se extrajo del texto (Boyer, 1993) es uno de los más utilizados para determinar proteína. Su principio es el mismo que el del método de Biuret sólo que se utiliza un segundo reactivo (Folin-Ciocalteu) para aumentar el color. Se da cuando las sustancias que poseen dos ó más enlaces peptídicos reaccionan con el reactivo de Biuret (sulfato de cobre alcalino) para formar un complejo púrpura. El producto colorido es el resultado de los nitrógenos de los péptidos coordinados con el  $\text{Cu}^{2+}$ . Posteriormente, el reactivo de Lowry, Folin-Ciocalteu (fosfomolibdato-fosfotungstato) se reduce debido a la tripsina y triptofano residuales de la proteína, dando una coloración azul. La cantidad del producto formado depende de la concentración de la proteína. La sensibilidad del método es alta, por arriba de 5  $\mu\text{g}$  a una longitud de onda de 580 nm.

### **A.3.2 Interferencia**

Pueden interferir especies como mercaptanos, glicinas, sulfato de amonio con concentraciones mayores al 0.15%, EDTA, fenol y ácido úrico.

NOTA: la solución que se maneja está al 0.003% de sulfato de amonio.

### **A.3.3 Determinación de nitrógeno orgánico**

#### **Material**

- 1- Espectrofotómetro: SPECTRONIC 21D MILTON ROY
- 2- Tubos de ensayo
- 3- Celda de cuarzo de 10 mm para espectrofotómetro
- 4- Micropipeta de 100 a 1000  $\mu\text{L}$

#### **Reactivos**

- 1- Carbonato de sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
- 2- Hidróxido de sodio  $\text{NaOH}$
- 3- Sulfato de cobre  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- 4- Reactivo comercial Folin-Ciocalteu
- 5- Caseína

#### **Procedimiento**

##### **Preparación de las soluciones**

- a) Reactivo A (  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  2%,  $\text{NaOH}$  0.1M)  
Disolver 20 g de carbonato de sodio en 250 mL, después disolver 4 g de  $\text{NaOH}$  en la solución anterior y llevar a 1 litro.

- b)** Reactivo B ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  al 1%)  
Disolver 10 g de la sal de cobre en 250 mL de agua destilada y llevar a 1 litro.
- c)** Reactivo C de tartrato de sodio y potasio al 2%  
Disolver 20 g de tartrato de sodio potasio en 250 mL y llevar a 1 litro.
- d)** Reactivo base (A, B y C)  
Mezclar los reactivos A, B, C en proporciones 50:0.5:0.5 (en volumen).
- e)** Reactivo Folin-Ciocalteu  
Diluir el reactivo comercial a  $\frac{1}{4}$  en volumen.
- f)** Solución patrón de caseína  
Disolver 0.1266 g de caseína en 1 litro de agua.

***Preparación de la curva de calibración de N-N orgánico***

- a) Añadir 5 mL del reactivo base (A,B,C) en un tubo de ensayo de 13 por 150; añadir 1 mL de la muestra problema, revolver en el vortex para homogeneizar la mezcla.
- b) Dejar que la reacción ocurra en la oscuridad y a temperatura ambiente por espacio de 10 minutos, pues el reactivo es sensible a la luz.
- c) Añadir 0.5 mL del reactivo Folin-Ciocalteu y homogeneizar en el vortex, dejándolo en la oscuridad y a temperatura ambiente por espacio de 20 minutos para que se desarrolle completamente la reacción coloreada.
- d) Pasado ese tiempo, es necesario medir la muestra inmediatamente. El límite de detección es 30 minutos; posteriormente, medir la muestra en el espectrofotómetro a 415 nm, tomando como referencia el blanco como valor cero.

**NOTA:** Se debe utilizar una proteína de alta pureza para realizar la curva de calibración, como lo es la caseína, ó bien, la albúmina bovina y se toma un 15.8% del peso total de proteína como nitrógeno orgánico. El blanco será agua destilada con el reactivo de Biuret – Lowry (Tabla A.3.1).



Tabla A.3.1 Curva de calibración de nitrógeno orgánico por el método de Biuret-Lowry

Número de matraz (50 mL)	Mililitros a adicionados	Ppm de N-N <sub>org</sub>
0	0	0
1	2.5	1
2	12.5	5
3	15	6
4	25	10
5	27.5	11
6	42.5	17
7	45	18
8	47.5	19
9	50	20

Tabla A.3.2 Volúmenes a adicionar en la prueba de Biuret-Lowry

Muestra necesaria(mL)	Solución Reactivo Base(mL)	Reactivo Folin- Ciocalteau(mL)	Volumen total de prueba Lowry(mL)
1	5	0.5	6.5

### A.3.4 Cálculos

Cálculos de la concentración de nitrógeno orgánico para preparar una solución 20 ppm de N-N<sub>org</sub>.

Si se tiene una solución de nitrógeno proteico de 20 mg L<sup>-1</sup> que es el 15.8% del peso total, el 100% del peso de la proteína en 1 litro, se determina por la siguiente operación:

$$\frac{20 \frac{mg}{L} N - N_{org} * 100\% * 1L}{15.8\%} = 126.58 mg N - N_{org}$$

Una solución 126.58 g de caseína equivale a una solución 20 ppm de nitrógeno proteico. Los resultados son interpretados a partir de la curva de calibración por medio de la ecuación de la recta, que se puede encontrar en el Anexo A.9. Sólo es necesario el uso de esta curva para conocer la concentración de N-N<sub>org</sub>.

Ecuación de la recta

$$y = mx + b$$

donde

$$y = mg N - N_{org} L^{-1}$$

$$x = absorbancia$$

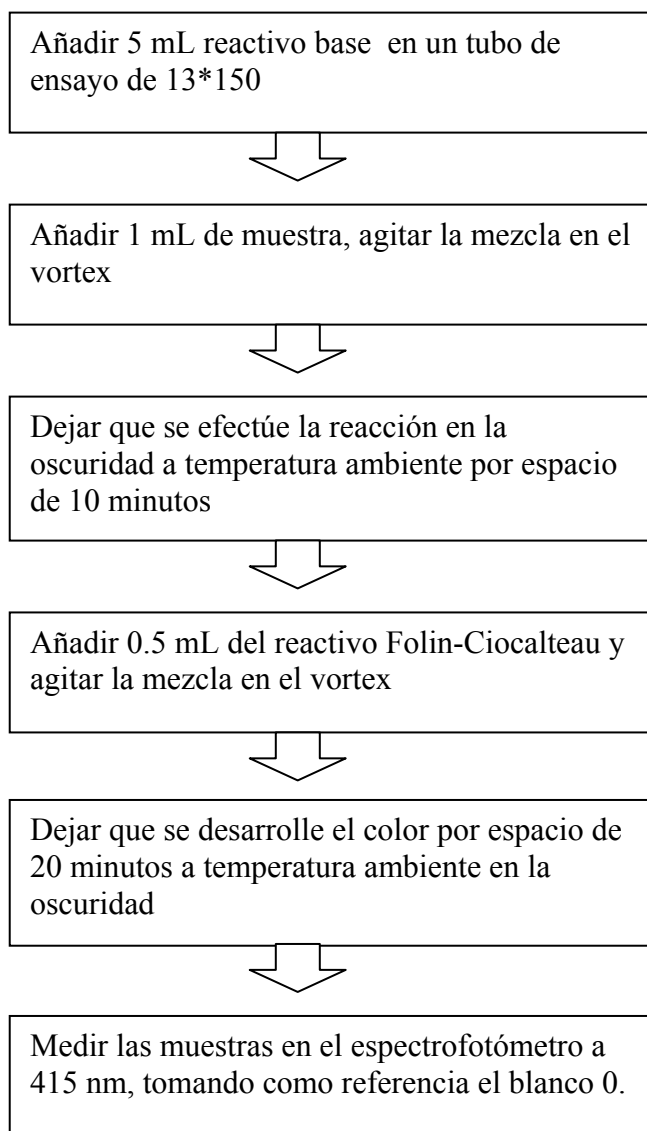
### A.3.5 Observaciones

Este método requiere que se respeten los tiempos de reacción una vez iniciada la prueba. El color de la solución puede variar de proteína a proteína. Cuando los intervalos de concentración de proteína son muy altos la curva de calibración ya no es lineal.

### A.3.6 Toxicidad

El reactivo Folin-Ciocalteu es tóxico y cancerígeno; se adsorbe vía cutánea, por lo que es indispensable utilizar bata y guantes protectores durante la prueba.

### A.3.7 Diagrama de flujo de determinación de nitrógeno orgánico por el método de Biuret-Lowry



## **Anexo 4 Determinación del contenido de materia orgánica medido como demanda química de oxígeno (DQO)**

### **A.4.1 Principio**

Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte. La técnica fue consultada en el trabajo de tesis de Guido- Zárate 2006.

La DQO es una cuantificación química de la cantidad de sustancias fuertemente oxidantes, requeridas para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible al dicromato o permanganato en medio ácido.

### **A.4.2 Determinación de DQO**

#### **Material**

- 1.- Espectrofotómetro UV-Vis GBC-911
- 2.- Horno de calentamiento para usar a 165°C (estufa de secado)
- 3.- Centrífuga
- 4.- Tubos de reacción (micro)
- 5.- Celda de cuarzo de 10 mm para espectrofotómetro
- 6.- Tubos para centrífuga

#### **Reactivos**

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

#### ***Procedimiento***

##### ***Preparación de las soluciones de digestión***

- a) Solución de digestión 0.21 N, solución de digestión A  
Disolver en agua destilada 10.216 g de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), previamente secado a 103 °C durante 2 horas; 167 mL de ácido sulfúrico concentrado y 33.3 g de sulfato de mercurio; aforar a un litro con agua destilada.
- b) Reactivo ácido sulfúrico, solución de digestión B  
Pesar 10.12 g de sulfato de plata y adicionar un litro de ácido sulfúrico concentrado (El sulfato de plata tarda de uno a dos días en disolverse).

- c) Hidrógenoftalato de potasio ( $C_8H_5KO_4$ , HFP)  
Se disuelve 0.68 g de ( $C_8H_5KO_4$ ) en agua destilada, previamente secado a 120 °C durante una hora, y se afora a un litro. El (HFP) tiene una DQO teórica de 1.176 mg  $O_2 L^{-1}$  y esta solución tiene una DQO teórica de 800 mg  $O_2 L^{-1}$ .
- d) Preparación de la curva de calibración  
Se prepara una serie de patrones con una solución de hidrógenoftalato de potasio con una DQO equivalentes que oscilen entre 20 y 800 mg  $O_2 L^{-1}$  completando el volumen con agua destilada. Utilizando los mismos volúmenes de reactivos, los mismos tubos y el mismo procedimiento de digestión que para las muestras problema.

***Método a reflujo cerrado/ método espectrofotométrico***

- a. Precalentar el horno para digerir la muestra a 165°C.
- b. Tomar cuidadosamente 2 mL de muestra previamente homogeneizada dentro de los tubos de reacción.
- c. Colocar en los tubos de reacción 1 mL de la disolución de digestión A y 3 mL de solución de digestión B. Agitar los tubos vigorosamente con un vortex. La temperatura que alcanza la solución es alta debido a la reacción exotérmica por lo que se recomienda tener precaución.
- d. Colocar todos los tubos en el horno previamente calentado a 165°C y refluja por 30 minutos.
- e. Retirar los tubos del digestor y dejar que los tubos se enfríen a temperatura ambiente, permitiendo que cualquier precipitado se sedimente.
- f. Centrifugar a 360 r.p.m en caso de que algunos sólidos no sedimenten.
- g. Medir la absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600 nm y determinar la concentración de la muestra (mg  $O_2 L^{-1}$ ) con la curva de calibración (Tabla A.4.1).

Tabla A.4.1 Curva de calibración para la determinación de la DQO

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

**NOTA.-** La disolución es fuertemente ácida y el tubo se calienta en este proceso, trabajar con guantes aislantes y bajo una campana de extracción. La solución patrón de hidrogenoftalato de potasio es estable hasta 3 meses cuando se mantiene a 4°C.

#### A.4.3 Cálculos

Calcular la DQO en la muestra en miligramos por litro (mg/L) directamente de la curva de calibración o con la ecuación 1.

$$y = mx + b$$

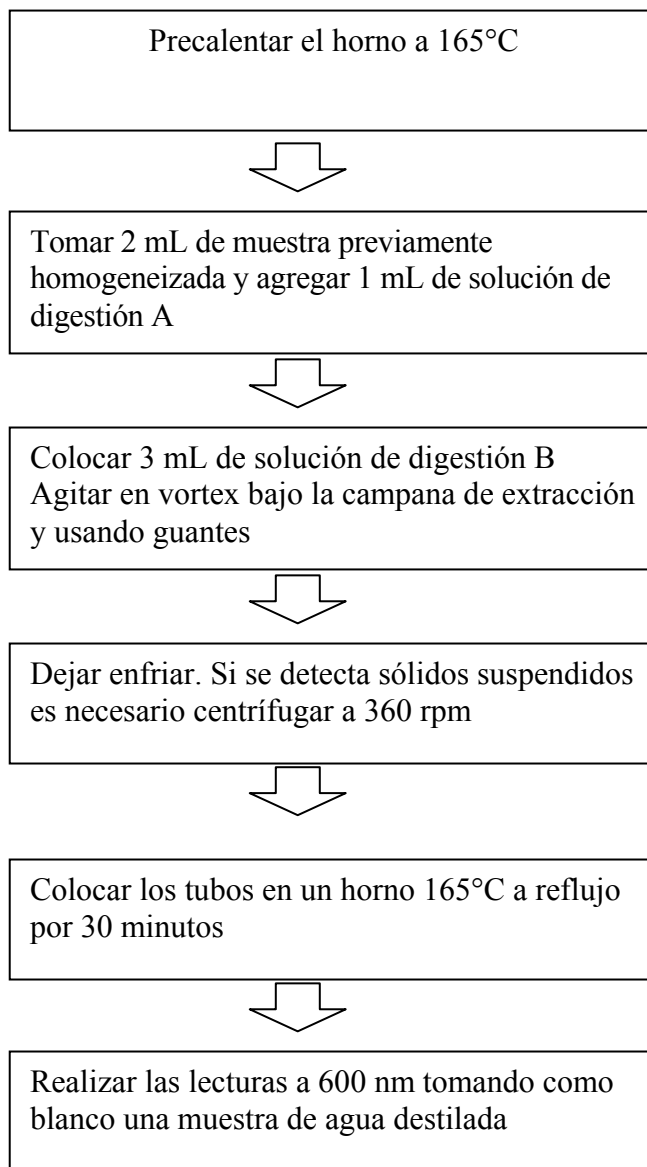
donde

$$y = DQO, \text{ mg } O_2 \text{ L}^{-1}$$

$$x = \text{absorbancia}$$

Reportar los resultados en mg de O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>

#### A.4.5 Diagrama de flujo de determinación de materia orgánica medido como demanda química de oxígeno (DQO)



## Anexo 5 Cálculo de la relaciones C:N:P

Concentración de sales para la preparación diaria del agua residual sintética,

Primera etapa $C_{12}H_{22}O_{11}$	450 mg L <sup>-1</sup>
Segunda etapa $C_{12}H_{22}O_{11}$	225 mg L <sup>-1</sup>
$(NH_4)_2SO_4$	30 mg L <sup>-1</sup>
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	3 mg L <sup>-1</sup>
Pesos molar de la sal	

$C_{12}H_{22}O_{11}$	342.3 g mol <sup>-1</sup>
$(NH_4)_2SO_4$	132.14 g mol <sup>-1</sup>
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	308.12 g mol <sup>-1</sup>

Cálculos

$$450 \frac{mg}{L} * \frac{1mmol \text{ } C_{12}H_{22}O_{11}}{342.3mg \text{ } C_{12}H_{22}O_{11}} * \frac{12mmol \text{ } carbono}{1mmol \text{ } C_{12}H_{22}O_{11}} * \frac{12mg}{1mol \text{ } carbono} = 189.3 \frac{mg}{L} \text{ } carbono$$

$$225 \frac{mg}{L} * \frac{1mmol \text{ } C_{12}H_{22}O_{11}}{342.3mg \text{ } C_{12}H_{22}O_{11}} * \frac{12mmol \text{ } carbono}{1mmol \text{ } C_{12}H_{22}O_{11}} * \frac{12mg}{1mol \text{ } carbono} = 94.65 \frac{mg}{L} \text{ } carbono$$

$$30 \frac{mg}{L} * \frac{1mmol \text{ } (NH_4)_2SO_4}{132.14mg \text{ } (NH_4)_2SO_4} * \frac{2mmol \text{ } nitrógeno}{1mmol \text{ } (NH_4)_2SO_4} * \frac{14mg}{1mol \text{ } nitrógeno} = 6.36 \frac{mg}{L} \text{ } nitrógeno$$

$$3 \frac{mg}{L} * \frac{1mmol \text{ } Na_3PO_4 \cdot 12H_2O}{308.12mg \text{ } Na_3PO_4 \cdot 12H_2O} * \frac{1mmol \text{ } fósforo}{1mmol \text{ } Na_3PO_4 \cdot 12H_2O} * \frac{30.97mg}{1mmol \text{ } fósforo} = 0.3 \frac{mg}{L} \text{ } fósforo$$

La relación C:N:P, se refiere al cociente de  $\frac{C}{N}$  y  $\frac{P}{N}$  donde al nitrógeno se le considera la unidad.

Primera etapa

C	N	P
30	1	0.05

Segunda etapa

C	N	P
15	1	0.05

## Anexo 6 Estimación del tiempo de residencia hidráulica

El tiempo de residencia hidráulica puede variar dependiendo del volumen real de trabajo que se tenga y del tiempo de residencia hidráulica real. Existen pequeños cambios en estas variables debido a la diferente porosidad del tezontle con el que se empacó cada reactor y al crecimiento de algas en los conductos para el ARS. Para ilustrar estos cambios en el tiempo de residencia hidráulica debida a una variación sutil de las variables dependientes se muestran los siguientes cálculos.

Primero definiremos el flujo cuyo valor teórico era de  $5 \pm 1 \text{ mL min}^{-1}$

$$\text{Flujo} = 5 \pm 1 \frac{\text{mL}}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{1} * \frac{1 \text{ L}}{10^3 \text{ mL}} = 0.3 \pm 0.06 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

El tiempo de residencia hidráulica se define como

$$TRH = \frac{V_t}{\text{Flujo}}$$

$V_t$  = volumen total

Flujo = flujo de entrada dado como litros por hora.

Si

$V_t = 12 \pm 0.4$  litros

Flujo =  $0.3 \pm 0.06 \text{ L h}^{-1}$

$$TRH = \frac{12 \pm 0.4 \text{ L}}{0.3 \pm 0.06 \frac{\text{L}}{\text{h}}} = 40 \pm 6.6 \text{ h}$$



## Anexo 7 Cálculo de la demanda química de oxígeno teórica DQO

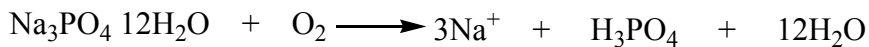
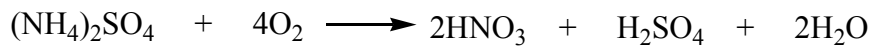
La demanda química de oxígeno teórica se calcula en base a las sustancias contenidas en el ARS de entrada.

Concentración de sales en ARS

Primera etapa $C_{12}H_{22}O_{11}$	450 mg L <sup>-1</sup>
Segunda etapa $C_{12}H_{22}O_{11}$	225 mg L <sup>-1</sup>
$(NH_4)_2SO_4$	30 mg L <sup>-1</sup>
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	3 mg L <sup>-1</sup>
Peso molar de la sal	

$C_{12}H_{22}O_{11}$	342.3 g mol <sup>-1</sup>
$(NH_4)_2SO_4$	132.14 g mol <sup>-1</sup>
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	308.12 g mol <sup>-1</sup>

Ecuación balanceada de oxidación de las especies en solución



Cálculos

$$0.450 \frac{g}{L} \left[ \frac{1 \text{ mol } C_{12}H_{22}O_{11}}{342.3 g} \right] * \left[ \frac{12 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } C_{12}H_{22}O_{11}} \right] * \left[ \frac{32 g}{1 \text{ mol } O_2} \right] = 0.504 \frac{g-O_2}{L} = 504 \frac{mg-O_2}{L}$$

$$0.03 \frac{g}{L} \left[ \frac{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4}{132.14 g} \right] * \left[ \frac{4 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4} \right] * \left[ \frac{32 g}{1 \text{ mol } O_2} \right] = 0.029 \frac{g-O_2}{L} = 29 \frac{mg-O_2}{L}$$

$$DQO_{TEÓRICA} = 504 \text{ mg L}^{-1} + 29 \text{ mg L}^{-1} = 533 \text{ mg L}^{-1}$$

Según la Figura A.7.1 la relación entre los parámetros teóricos y experimentales de la demanda química de oxígeno es que la  $DQO_{EXPERIMENTAL}$  es un 80% la  $DQO_{TEÓRICA}$

$$533 \left[ \frac{mg-O_2}{L} \right] * 0.8 = 426 \frac{mg-O_2}{L}$$

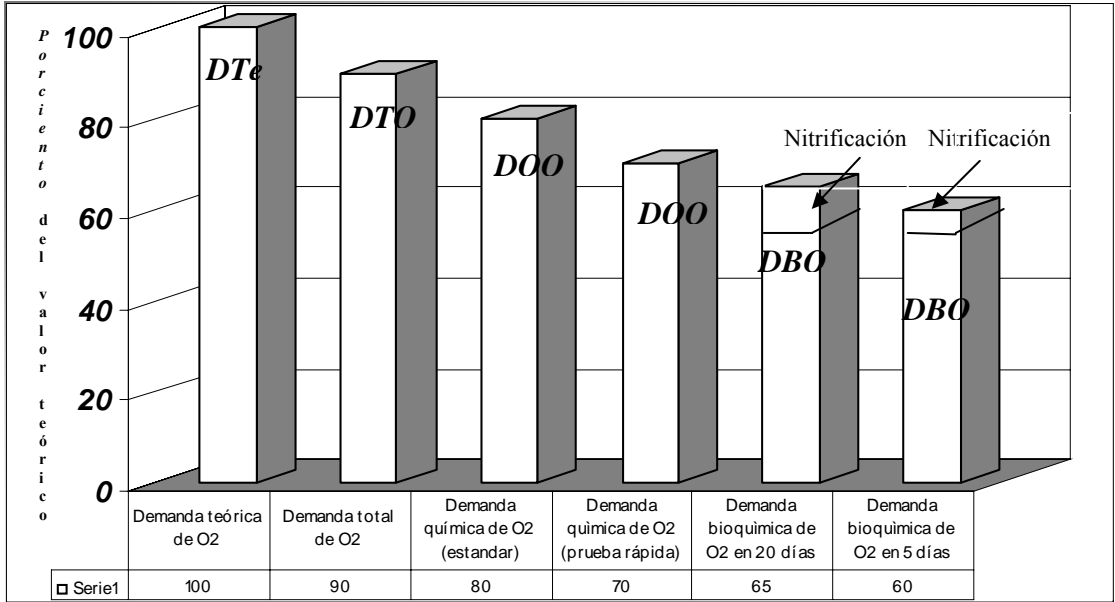


Figura A.7.1 Relación entre los parámetros de determinación de oxígeno (Durán-de-Bazúa, 1994)

## Anexo 8 Resultados para la remoción de especies de nitrógeno

Tabla A.8.1 Resultados para remoción de ión amonio para el reactor RA1 (con planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

Tiempo	2 cm	10 cm	30 cm	2 cm	10 cm	30 cm	Influyente
	[N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ] (ppm)	[N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ] (ppm)	[N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ] (ppm)	% de Rem.	% Rem.	% Rem.	
03/02/2006	0.35	0.25	0.71	94.63	96.12	89.06	6.47
06/02/2006	0.44	0.42	0.06	93.78	94.14	99.09	7.09
08/02/2006	0.58	1.64	2.95	91.82	76.77	58.12	7.04
10/02/2006	0.26	0.46	0.74	96.69	94.02	90.34	7.70
13/02/2006	4.00	3.69	2.44	47.55	51.65	68.02	7.63
15/02/2006	2.48	3.43	3.25	66.14	53.21	55.67	7.32
17/02/2006	1.11	1.77	1.66	84.41	75.12	76.72	7.12
20/02/2006	2.30	1.21	1.76	65.35	81.80	73.53	6.64
22/02/2006	5.55	5.95	2.61	17.94	12.06	61.46	6.76
24/02/2006	1.86	1.83	1.92	72.01	72.42	71.07	6.65
28/02/2006	2.05	3.62	4.39	67.81	43.11	31.14	6.37
01/03/2006	1.82	3.88	2.06	73.31	43.00	69.65	6.80
03/03/2006	2.45	2.34	3.08	65.10	66.63	56.11	7.02
<b>Mínimos</b>	<b>0.26</b>	<b>0.25</b>	<b>0.06</b>	<b>17.94</b>	<b>12.06</b>	<b>31.14</b>	<b>6.37</b>
<b>Máximos</b>	<b>5.55</b>	<b>5.95</b>	<b>4.39</b>	<b>96.69</b>	<b>96.12</b>	<b>99.09</b>	<b>7.70</b>
<b>D.E.</b>	<b>1.53</b>	<b>1.68</b>	<b>1.18</b>	<b>22.00</b>	<b>24.68</b>	<b>17.80</b>	<b>0.41</b>
<b>Promedio</b>	<b>1.94</b>	<b>2.34</b>	<b>2.13</b>	<b>72.04</b>	<b>66.16</b>	<b>69.23</b>	<b>6.97</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	1.95	2.79	2.53	71.96	59.89	63.64	6.97
30/03/2006	1.76	4.65	3.05	75.13	34.22	56.91	7.07
31/03/2006	1.71	4.19	3.34	74.44	37.52	50.22	6.71
04/04/2006	2.46	3.42	3.94	63.52	49.19	41.57	6.74
05/04/2006	3.22	4.24	2.61	53.03	38.12	61.96	6.85
10/04/2006	3.93	5.19	4.20	41.23	22.46	37.22	6.69
11/04/2006	2.82	2.85	1.14	57.24	56.71	82.72	6.59
18/04/2006	1.74	1.75	3.06	72.72	72.51	51.94	6.36
19/04/2006	1.13	1.34	2.95	83.31	80.13	56.36	6.76
21/04/2006	4.18	6.04	6.24	38.18	10.55	7.69	6.76
<b>Mínimos</b>	<b>1.13</b>	<b>1.34</b>	<b>1.14</b>	<b>38.18</b>	<b>10.55</b>	<b>7.69</b>	<b>6.36</b>
<b>Máximos</b>	<b>4.18</b>	<b>6.04</b>	<b>6.24</b>	<b>83.31</b>	<b>80.13</b>	<b>82.72</b>	<b>7.07</b>
<b>D.E.</b>	<b>1.02</b>	<b>1.49</b>	<b>1.33</b>	<b>15.23</b>	<b>21.78</b>	<b>19.74</b>	<b>0.19</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.49</b>	<b>3.65</b>	<b>3.30</b>	<b>63.08</b>	<b>46.13</b>	<b>51.02</b>	<b>6.75</b>

Tabla A.8.2 Resultados para remoción de ión amonio para el reactor RA2 (sin planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

<i>Tiempo</i>	<i>2 cm</i> [N-NH4+] (ppm)	<i>10 cm</i> [N-NH4+] (ppm)	<i>30 cm</i> [N-NH4+] (ppm)	<i>2 cm</i> % de Rem.	<i>10 cm</i> % Rem.	<i>30 cm</i> % Rem.
03/02/2006	4.37	0.49	0.82	32.56	92.44	87.37
06/02/2006	3.98	2.15	1.40	43.89	69.60	80.24
08/02/2006	6.89	4.29	4.41	2.10	39.00	37.36
10/02/2006	2.97	1.05	1.33	61.39	86.36	82.69
13/02/2006	2.61	1.85	1.02	65.82	75.78	86.67
15/02/2006	2.47	1.89	3.05	66.31	74.14	58.31
17/02/2006	0.57	3.24	1.07	91.98	54.46	84.95
20/02/2006	0.89	2.03	1.64	86.65	69.49	75.27
22/02/2006	4.01	2.32	1.55	40.63	65.65	77.14
24/02/2006	5.77	3.11	2.42	13.17	53.18	63.58
28/02/2006	1.92	2.20	5.31	69.87	65.49	16.68
01/03/2006	2.05	2.12	6.30	69.84	68.77	7.41
03/03/2006	4.08	1.03	2.06	41.87	85.27	70.60
<b>Mínimos</b>	<b>0.57</b>	<b>0.49</b>	<b>0.82</b>	<b>2.10</b>	<b>39.00</b>	<b>7.41</b>
<b>Máximos</b>	<b>6.89</b>	<b>4.29</b>	<b>6.30</b>	<b>91.98</b>	<b>92.44</b>	<b>87.37</b>
<b>D.E.</b>	<b>1.82</b>	<b>1.01</b>	<b>1.77</b>	<b>26.75</b>	<b>14.64</b>	<b>26.83</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.28</b>	<b>2.14</b>	<b>2.49</b>	<b>52.78</b>	<b>69.20</b>	<b>63.71</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	2.67	1.70	3.16	61.67	75.54	54.65
30/03/2006	2.69	3.21	3.06	61.89	54.54	56.73
31/03/2006	1.82	2.33	2.33	72.90	65.26	65.32
04/04/2006	5.45	1.96	2.63	19.11	70.85	61.04
05/04/2006	4.26	2.43	4.66	37.74	64.49	32.01
10/04/2006	4.14	4.02	4.08	38.18	39.94	38.98
11/04/2006	2.45	3.26	1.77	62.84	50.55	73.08
18/04/2006	3.21	2.15	5.13	49.58	66.24	19.39
19/04/2006	2.69	2.52	2.57	60.30	62.71	62.01
21/04/2006	5.74	4.20	5.25	15.12	37.83	22.30
<b>Mínimos</b>	<b>1.82</b>	<b>1.70</b>	<b>1.77</b>	<b>15.12</b>	<b>37.83</b>	<b>19.39</b>
<b>Máximos</b>	<b>5.74</b>	<b>4.20</b>	<b>5.25</b>	<b>72.90</b>	<b>75.54</b>	<b>73.08</b>
<b>D.E.</b>	<b>1.33</b>	<b>0.85</b>	<b>1.23</b>	<b>19.70</b>	<b>12.70</b>	<b>18.94</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.51</b>	<b>2.78</b>	<b>3.46</b>	<b>47.93</b>	<b>58.80</b>	<b>48.55</b>

Tabla A.8.3 Resultados para remoción de ión amonio para el reactor RB1 (con planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

	<i>2 cm</i>	<i>10 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>2 cm</i>	<i>10 cm</i>	<i>30 cm</i>
	<i>[N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>]</i>	<i>[N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>]</i>	<i>[N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>]</i>	<i>% de Rem.</i>	<i>% Rem.</i>	<i>% Rem.</i>
<i>Tiempo</i>	(ppm)	(ppm)	(ppm)			
03/02/2006	1.36	0.04	0.01	79.01	99.35	99.90
06/02/2006	0.46	0.07	0.25	93.55	98.96	96.41
08/02/2006	2.98	2.49	1.75	57.66	64.65	75.08
10/02/2006	0.97	0.77	0.84	87.42	89.98	89.11
13/02/2006	2.59	2.23	1.61	66.08	70.80	78.90
15/02/2006	4.33	2.54	2.60	40.90	65.30	64.47
17/02/2006	2.70	2.56	1.31	62.06	64.05	81.57
20/02/2006	0.20	0.30	0.07	96.99	95.44	98.90
22/02/2006	3.26	1.94	0.87	51.75	71.24	87.14
24/02/2006	5.17	2.34	1.81	22.22	64.74	72.81
28/02/2006	3.27	5.27	5.31	48.70	17.32	16.68
01/03/2006	2.96	5.15	2.42	56.53	24.29	64.42
03/03/2006	4.16	4.18	1.60	40.80	40.50	77.20
<b>Mínimos</b>	<b>0.20</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>	<b>22.22</b>	<b>17.32</b>	<b>16.68</b>
<b>Máximos</b>	<b>5.17</b>	<b>5.27</b>	<b>5.31</b>	<b>96.99</b>	<b>99.35</b>	<b>99.90</b>
<b>D.E.</b>	<b>1.52</b>	<b>1.76</b>	<b>1.39</b>	<b>22.32</b>	<b>26.54</b>	<b>21.66</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.65</b>	<b>2.30</b>	<b>1.57</b>	<b>61.82</b>	<b>66.66</b>	<b>77.12</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	1.93	1.89	0.89	72.27	72.89	87.28
30/03/2006	1.97	3.22	2.54	72.09	54.48	64.01
31/03/2006	1.64	2.38	2.34	75.62	64.56	65.20
04/04/2006	2.12	2.67	1.96	68.49	60.34	70.98
05/04/2006	3.60	3.41	3.05	47.38	50.21	55.47
10/04/2006	3.00	3.85	2.47	55.12	42.51	63.14
11/04/2006	5.62	3.91	4.79	14.67	40.58	27.22
18/04/2006	4.43	1.55	3.78	30.35	75.62	40.57
19/04/2006	3.56	3.14	3.35	47.35	53.57	50.46
21/04/2006	5.73	6.40	3.94	15.18	5.21	41.71
<b>Mínimos</b>	<b>1.64</b>	<b>1.55</b>	<b>0.89</b>	<b>14.67</b>	<b>5.21</b>	<b>27.22</b>
<b>Máximos</b>	<b>5.73</b>	<b>6.40</b>	<b>4.79</b>	<b>75.62</b>	<b>75.62</b>	<b>87.28</b>
<b>D.E.</b>	<b>1.51</b>	<b>1.36</b>	<b>1.12</b>	<b>23.26</b>	<b>20.12</b>	<b>17.32</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.36</b>	<b>3.24</b>	<b>2.91</b>	<b>49.85</b>	<b>52.00</b>	<b>56.60</b>

Tabla A.8.4 Resultados para remoción de ión amonio para el reactor RB2 (sin planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

<i>Tiempo</i>	<i>2 cm</i> <i>[N-NH4+]</i> (ppm)	<i>10 cm</i> <i>[N-NH4+]</i> (ppm)	<i>30 cm</i> <i>[N-NH4+]</i> (ppm)	<i>2 cm</i> <i>% de Rem.</i>	<i>10 cm</i> <i>% Rem.</i>	<i>30 cm</i> <i>% Rem.</i>
03/02/2006	5.11	0.01	2.41	21.12	99.80	62.80
06/02/2006	3.94	1.97	0.09	44.34	72.19	98.73
08/02/2006	4.61	4.51	2.22	34.52	35.98	68.40
10/02/2006	1.54	1.69	0.74	79.99	78.07	90.43
13/02/2006	3.97	4.00	2.14	47.97	47.59	71.90
15/02/2006	4.46	0.35	2.94	39.14	95.21	59.89
17/02/2006	3.19	4.11	2.58	55.19	42.25	63.69
20/02/2006	0.53	0.70	3.19	91.95	89.40	52.00
22/02/2006	3.25	1.10	1.41	51.94	83.68	79.17
24/02/2006	4.22	3.08	3.04	36.52	53.66	54.28
28/02/2006	2.51	5.83	2.27	60.63	8.43	64.34
01/03/2006	6.95	2.25	0.94	0.00	67.00	86.21
03/03/2006	4.55	4.25	2.79	35.15	39.43	60.33
<b>Mínimos</b>	<b>0.53</b>	<b>0.01</b>	<b>0.09</b>	<b>0.00</b>	<b>8.43</b>	<b>52.00</b>
<b>Máximos</b>	<b>6.95</b>	<b>5.83</b>	<b>3.19</b>	<b>91.95</b>	<b>99.80</b>	<b>98.73</b>
<b>D.E.</b>	<b>1.62</b>	<b>1.83</b>	<b>0.97</b>	<b>23.68</b>	<b>27.17</b>	<b>14.39</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.76</b>	<b>2.60</b>	<b>2.06</b>	<b>46.04</b>	<b>62.52</b>	<b>70.17</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	5.38	1.47	3.51	22.76	78.93	49.69
30/03/2006	3.16	4.45	3.68	55.33	37.05	47.92
31/03/2006	2.32	3.66	3.05	65.48	45.49	54.51
04/04/2006	2.01	2.93	1.98	70.21	56.45	70.66
05/04/2006	2.92	3.42	3.56	57.33	50.00	47.97
10/04/2006	3.90	4.15	2.53	41.71	38.02	62.11
11/04/2006	4.86	2.92	2.17	26.24	55.67	67.08
18/04/2006	2.56	1.50	3.95	59.76	76.42	37.94
19/04/2006	1.62	1.38	1.21	76.08	79.61	82.17
21/04/2006	4.92	5.16	4.58	27.26	23.63	32.27
<b>Mínimos</b>	<b>1.62</b>	<b>1.38</b>	<b>1.21</b>	<b>22.76</b>	<b>23.63</b>	<b>32.27</b>
<b>Máximos</b>	<b>5.38</b>	<b>5.16</b>	<b>4.58</b>	<b>76.08</b>	<b>79.61</b>	<b>82.17</b>
<b>D.E.</b>	<b>1.33</b>	<b>1.33</b>	<b>1.03</b>	<b>19.43</b>	<b>19.27</b>	<b>15.33</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.36</b>	<b>3.10</b>	<b>3.02</b>	<b>50.22</b>	<b>54.13</b>	<b>55.23</b>

Tabla A.8.5 Resultados para remoción de nitrato para el reactor RA1 (con planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

Fecha	2 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	10 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	30 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	2 cm % de Rem.	10 cm % de Rem.	30 cm % de Rem.	Influente ppm N-NO <sub>3</sub> -
06/02/2006	0.80	0.80	0.84	79.68	79.73	78.51	3.93
08/02/2006	0.03	0.00	1.02	99.27	100.00	77.67	4.55
10/02/2006	0.18	0.25	0.26	94.68	92.66	92.40	3.42
13/02/2006	0.89	0.93	0.92	86.62	86.01	86.20	6.64
15/02/2006	0.12	0.02	0.02	97.67	99.59	99.66	5.14
17/02/2006	0.17	0.17	0.16	95.60	95.63	95.99	3.94
20/02/2006	0.34	0.35	0.36	92.08	91.83	91.63	4.35
22/02/2006	0.45	0.43	0.42	92.24	92.55	92.82	5.81
24/02/2006	0.16	0.11	0.10	97.39	98.30	98.42	6.22
28/02/2006	0.28	0.26	0.22	92.48	92.96	94.16	3.68
01/03/2006	0.31	0.34	0.32	94.60	93.98	94.29	5.69
03/03/2006	0.05	0.02	0.03	99.01	99.62	99.46	5.48
<b>Máximo</b>	<b>0.89</b>	<b>0.93</b>	<b>1.02</b>	<b>99.27</b>	<b>100.00</b>	<b>99.66</b>	<b>6.64</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.03</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>	<b>79.68</b>	<b>79.73</b>	<b>77.67</b>	<b>3.42</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.27</b>	<b>0.30</b>	<b>0.35</b>	<b>5.61</b>	<b>6.02</b>	<b>7.40</b>	<b>1.07</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.32</b>	<b>0.31</b>	<b>0.39</b>	<b>93.44</b>	<b>93.60</b>	<b>91.77</b>	<b>4.90</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

30/03/2006	0.02	0.51	0.00	99.71	91.42	100.21	5.97
31/03/2006	0.02	0.22	0.03	99.72	96.49	99.52	6.18
04/04/2006	0.00	0.03	0.03	99.98	99.53	99.56	6.34
05/04/2006	0.12	0.09	0.06	98.21	98.56	99.08	6.48
10/04/2006	0.20	0.29	0.21	96.88	95.59	96.78	6.57
18/04/2006	0.20	0.18	0.19	96.56	96.95	96.71	5.84
19/04/2006	0.08	0.07	0.00	98.39	98.64	99.94	4.91
<b>Máximo</b>	<b>0.20</b>	<b>0.51</b>	<b>0.21</b>	<b>99.98</b>	<b>99.53</b>	<b>100.00</b>	<b>6.57</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.00</b>	<b>0.03</b>	<b>0.00</b>	<b>96.56</b>	<b>91.42</b>	<b>96.71</b>	<b>4.91</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.09</b>	<b>0.17</b>	<b>0.09</b>	<b>1.39</b>	<b>2.72</b>	<b>1.47</b>	<b>0.56</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.09</b>	<b>0.20</b>	<b>0.07</b>	<b>98.49</b>	<b>96.74</b>	<b>98.83</b>	<b>6.04</b>

Tabla A.8.6 Resultados para remoción de nitrato para el reactor RA2 (sin planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

Fecha	2 cm ppm N-NO <sub>3</sub>	10 cm ppm N-NO <sub>3</sub>	30 cm ppm N-NO <sub>3</sub>	2 cm % de Rem.	10 cm % de Rem.	30 cm % de Rem.
06/02/2006	0.91	0.91	0.87	76.81	76.90	77.88
08/02/2006	0.05	0.00	0.00	99.00	100.00	100.00
10/02/2006	0.25	0.29	0.21	92.61	91.63	93.75
13/02/2006	0.96	0.91	0.87	85.48	86.30	86.92
15/02/2006	0.03	0.00	0.00	99.42	99.90	99.97
17/02/2006	0.16	0.16	0.16	95.87	95.96	95.84
20/02/2006	0.37	0.37	0.37	91.55	91.47	91.51
22/02/2006	0.45	0.42	0.40	92.18	92.70	93.07
24/02/2006	0.17	0.15	0.10	97.34	97.56	98.33
28/02/2006	0.43	0.28	0.26	88.35	92.43	92.91
01/03/2006	0.89	0.34	0.31	84.35	94.10	94.48
03/03/2006	0.96	0.08	0.09	82.42	98.49	98.30
<b>Máximo</b>	<b>0.96</b>	<b>0.91</b>	<b>0.87</b>	<b>99.42</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.03</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>76.81</b>	<b>76.90</b>	<b>77.88</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.37</b>	<b>0.30</b>	<b>0.29</b>	<b>7.11</b>	<b>6.58</b>	<b>6.31</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.47</b>	<b>0.33</b>	<b>0.31</b>	<b>90.45</b>	<b>93.18</b>	<b>93.64</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

30/03/2006	0.47	0.33	0.31	90.45	93.18	93.64
31/03/2006	0.07	0.00	0.00	98.92	100.00	100.00
04/04/2006	0.03	0.04	0.03	99.53	99.39	99.56
05/04/2006	0.01	0.07	0.05	99.90	98.89	99.24
10/04/2006	0.28	0.13	0.11	95.70	97.99	98.28
18/04/2006	0.19	0.19	0.19	96.80	96.71	96.68
19/04/2006	0.24	0.19	0.05	95.04	96.19	99.00
<b>Máximo</b>	<b>0.47</b>	<b>0.33</b>	<b>0.31</b>	<b>99.90</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>90.45</b>	<b>93.18</b>	<b>93.64</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.17</b>	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<b>3.32</b>	<b>2.37</b>	<b>2.26</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.18</b>	<b>0.14</b>	<b>0.11</b>	<b>96.62</b>	<b>97.50</b>	<b>98.09</b>



Tabla A.8.7 Resultados para remoción de nitrato para el reactor RB1 (con planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

Fecha	2 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	10 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	30 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	2 cm % de Rem.	10 cm % de Rem.	30 cm % de Rem.
06/02/2006	0.85	0.82	0.82	78.47	79.23	79.19
08/02/2006	0.04	0.00	0.00	99.15	100.24	100.44
10/02/2006	0.13	0.17	0.16	96.08	94.94	95.46
13/02/2006	0.82	0.83	0.83	87.66	87.53	87.45
15/02/2006	0.26	0.00	0.00	94.95	100.25	99.94
17/02/2006	0.17	0.16	0.17	95.75	95.87	95.75
20/02/2006	0.28	0.32	0.29	93.46	92.61	93.42
22/02/2006	0.45	0.43	0.39	92.34	92.64	93.31
24/02/2006	0.08	0.09	0.09	98.67	98.59	98.53
28/02/2006	0.32	0.29	0.28	91.42	92.05	92.48
01/03/2006	0.35	0.34	0.30	93.92	94.07	94.72
03/03/2006	0.15	0.03	0.02	97.33	99.36	99.68
<b>Máximo</b>	<b>0.85</b>	<b>0.83</b>	<b>0.83</b>	<b>99.15</b>	<b>100.25</b>	<b>100.44</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.04</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>78.47</b>	<b>79.23</b>	<b>79.19</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.26</b>	<b>0.28</b>	<b>0.29</b>	<b>5.66</b>	<b>6.03</b>	<b>6.03</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.32</b>	<b>0.29</b>	<b>0.28</b>	<b>93.27</b>	<b>93.95</b>	<b>94.20</b>
Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)						
30/03/2006	0.08	0.03	0.01	98.66	99.49	99.81
31/03/2006	0.01	0.01	0.02	99.89	99.87	99.70
04/04/2006	0.08	0.07	0.09	98.78	98.92	98.56
05/04/2006	0.11	0.12	0.10	98.39	98.12	98.53
10/04/2006	0.14	0.15	0.15	97.56	97.40	97.50
18/04/2006	0.10	0.08	0.05	98.03	98.42	98.89
19/04/2006	0.07	0.07	0.09	98.87	98.87	98.65
<b>Máximo</b>	<b>0.14</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>99.89</b>	<b>99.87</b>	<b>99.81</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>97.56</b>	<b>97.40</b>	<b>97.50</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.74</b>	<b>0.83</b>	<b>0.78</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.08</b>	<b>0.08</b>	<b>0.07</b>	<b>98.60</b>	<b>98.73</b>	<b>98.80</b>

Tabla A.8.8 Resultados para remoción de nitrato para el reactor RB2 (sin planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

Fecha	2 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	10 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	30 cm ppm N-NO <sub>3</sub> -	2 cm % de Rem.	10 cm % de Rem.	30 cm % de Rem.
06/02/2006	0.89	0.86	0.85	77.26	78.24	78.29
08/02/2006	0.00	0.00	0.00	100.28	100.82	100.75
10/02/2006	0.46	0.29	0.26	86.61	91.53	92.46
13/02/2006	0.83	0.84	0.85	87.50	87.34	87.26
15/02/2006	0.22	0.00	0.00	95.68	99.97	100.18
17/02/2006	0.18	0.18	0.17	95.54	95.36	95.57
20/02/2006	0.30	0.28	0.31	93.18	93.50	92.77
22/02/2006	1.26	0.45	0.45	78.30	92.28	92.18
24/02/2006	0.67	0.12	0.09	89.27	98.02	98.56
28/02/2006	0.43	0.28	0.34	88.35	92.53	90.80
01/03/2006	0.35	0.33	0.33	93.82	94.23	94.17
03/03/2006	0.14	0.07	0.06	97.36	98.78	98.91
<b>Máximo</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>77.26</b>	<b>78.24</b>	<b>78.29</b>
<b>Mínimo</b>	<b>1.26</b>	<b>0.86</b>	<b>0.85</b>	<b>100.28</b>	<b>100.82</b>	<b>100.75</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.37</b>	<b>0.29</b>	<b>0.29</b>	<b>7.18</b>	<b>6.21</b>	<b>6.31</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.48</b>	<b>0.31</b>	<b>0.31</b>	<b>90.26</b>	<b>93.55</b>	<b>93.49</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

30/03/2006	0.04	0.00	0.22	99.32	100.55	96.43
31/03/2006	0.05	0.03	0.05	99.20	99.53	99.25
04/04/2006	0.32	0.08	0.00	95.04	98.81	100.36
05/04/2006	0.15	0.09	0.08	97.66	98.61	98.71
10/04/2006	0.17	0.16	0.16	97.04	97.31	97.25
18/04/2006	0.08	0.05	0.06	98.35	99.07	98.86
19/04/2006	0.11	0.09	0.06	98.35	98.57	99.04
<b>Máximo</b>	<b>0.32</b>	<b>0.16</b>	<b>0.22</b>	<b>99.32</b>	<b>100.55</b>	<b>100.36</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.04</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>95.04</b>	<b>97.31</b>	<b>96.43</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.08</b>	<b>1.47</b>	<b>0.99</b>	<b>1.31</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.13</b>	<b>0.07</b>	<b>0.09</b>	<b>97.85</b>	<b>98.92</b>	<b>98.56</b>

Tabla A.8.9 Resultados para remoción de nitrógeno orgánico para el reactor RA1 (con planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

Tiempo	2cm	10cm	30 cm
	ppm N-N <sub>org</sub>	ppm N-N <sub>org</sub>	ppm N-N <sub>org</sub>
24/02/2006	13.83	15.01	14.19
28/02/2006	17.27	19.32	12.66
01/03/2006	26.02	22.47	19.63
03/03/2006	26.81	24.24	16.26
<b>Máximo</b>	<b>26.81</b>	<b>24.24</b>	<b>19.63</b>
<b>Mínimo</b>	<b>13.83</b>	<b>15.01</b>	<b>12.66</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>6.43</b>	<b>4.05</b>	<b>3.02</b>
<b>Promedio</b>	<b>20.98</b>	<b>20.26</b>	<b>15.68</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	23.53	38.12	29.32
30/03/2006	14.51	19.87	21.18
31/03/2006	20.74	23.58	23.11
04/04/2006	22.87	28.07	23.26
05/04/2006	12.33	10.52	4.62
10/04/2006	16.40	16.95	17.82
11/04/2006	7.71	23.72	17.55
18/04/2006	5.93	14.08	6.92
19/04/2006	20.91	25.42	11.65
21/04/2006	8.07	13.91	13.48
<b>Máximo</b>	<b>23.53</b>	<b>38.12</b>	<b>29.32</b>
<b>Mínimo</b>	<b>5.93</b>	<b>10.52</b>	<b>4.62</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>6.62</b>	<b>8.17</b>	<b>7.76</b>
<b>Promedio</b>	<b>15.30</b>	<b>21.42</b>	<b>16.89</b>

Tabla A.8.10 Resultados para remoción de nitrógeno orgánico para el reactor RA2 (sin planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

	<i>2cm</i>	<i>10cm</i>	<i>30 cm</i>
Tiempo	ppm N-N <sub>org</sub>	ppm N-N <sub>org</sub>	ppm N-N <sub>org</sub>
24/02/2006	11.86	13.91	14.30
28/02/2006	12.93	13.64	12.60
01/03/2006	26.87	17.36	17.53
03/03/2006	30.03	24.35	22.44
<b>Máximo</b>	<b>30.03</b>	<b>24.35</b>	<b>22.44</b>
<b>Mínimo</b>	<b>11.86</b>	<b>13.64</b>	<b>12.60</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>9.37</b>	<b>4.99</b>	<b>4.33</b>
<b>Promedio</b>	<b>20.42</b>	<b>17.32</b>	<b>16.72</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	26.04	27.25	25.01
30/03/2006	17.03	20.63	15.39
31/03/2006	19.81	20.05	20.15
04/04/2006	7.08	12.44	19.65
05/04/2006	44.73	2.44	4.13
10/04/2006	14.38	15.42	14.81
11/04/2006	4.32	5.80	7.00
18/04/2006	19.10	2.44	6.26
19/04/2006	38.37	5.83	5.83
21/04/2006	9.54	7.90	16.70
<b>Máximo</b>	<b>44.73</b>	<b>27.25</b>	<b>25.01</b>
<b>Mínimo</b>	<b>4.32</b>	<b>2.44</b>	<b>4.13</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>13.12</b>	<b>8.56</b>	<b>7.24</b>
<b>Promedio</b>	<b>20.04</b>	<b>12.02</b>	<b>13.49</b>

Tabla A.8.11 Resultados para remoción de nitrógeno orgánico para el reactor RB1 (con planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

	<i>2cm</i>	<i>10cm</i>	<i>30 cm</i>
Tiempo	ppm N-N <sub>org</sub>	ppm N-N <sub>org</sub>	ppm N-N <sub>org</sub>
24/02/2006	13.20	12.66	12.93
28/02/2006	16.92	16.04	29.32
01/03/2006	28.35	19.90	20.56
03/03/2006	22.27	22.38	22.60
<b>Máximo</b>	<b>28.35</b>	<b>22.38</b>	<b>29.32</b>
<b>Mínimo</b>	<b>13.20</b>	<b>12.66</b>	<b>12.93</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>6.59</b>	<b>4.28</b>	<b>6.75</b>
<b>Promedio</b>	<b>20.18</b>	<b>17.75</b>	<b>21.35</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	30.42	32.98	30.14
30/03/2006	18.17	16.10	20.91
31/03/2006	22.11	22.13	21.82
04/04/2006	24.24	27.46	20.80
05/04/2006	6.37	8.83	3.04
10/04/2006	6.45	5.74	13.01
11/04/2006	15.63	13.94	13.31
18/04/2006	3.69	11.56	2.27
19/04/2006	8.29	6.32	4.84
21/04/2006	15.72	14.79	14.73
<b>Máximo</b>	<b>30.42</b>	<b>32.98</b>	<b>30.14</b>
<b>Mínimo</b>	<b>3.69</b>	<b>5.74</b>	<b>2.27</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>8.85</b>	<b>9.03</b>	<b>9.17</b>
<b>Promedio</b>	<b>15.11</b>	<b>15.99</b>	<b>14.49</b>

Tabla A.8.12 Resultados para remoción de nitrógeno orgánico para el reactor RB2 (sin planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

	<i>2cm</i>	<i>10cm</i>	<i>30 cm</i>
Tiempo	ppm N-N <sub>org</sub>	ppm N-N <sub>org</sub>	ppm N-N <sub>org</sub>
24/02/2006	13.15	13.26	13.48
28/02/2006	13.42	16.97	24.57
01/03/2006	22.30	25.04	22.96
03/03/2006	22.77	22.66	20.85
<b>Máximo</b>	<b>22.77</b>	<b>25.04</b>	<b>24.57</b>
<b>Mínimo</b>	<b>13.15</b>	<b>13.26</b>	<b>13.48</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>5.35</b>	<b>5.35</b>	<b>4.90</b>
<b>Promedio</b>	<b>17.91</b>	<b>19.48</b>	<b>20.46</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	2.60	14.57	10.63
30/03/2006	15.72	11.95	6.15
31/03/2006	15.17	13.42	12.07
04/04/2006	23.04	27.85	20.20
05/04/2006	9.65	5.99	6.48
10/04/2006	18.42	16.95	15.03
11/04/2006	23.34	15.63	14.38
18/04/2006	11.23	4.40	6.97
19/04/2006	22.80	4.60	4.11
21/04/2006	28.17	16.75	11.89
<b>Máximo</b>	<b>28.17</b>	<b>27.85</b>	<b>20.20</b>
<b>Mínimo</b>	<b>2.60</b>	<b>4.40</b>	<b>4.11</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>7.72</b>	<b>7.10</b>	<b>4.96</b>
<b>Promedio</b>	<b>17.01</b>	<b>13.21</b>	<b>10.79</b>

Tabla A.8.13 Resultados para remoción de nitrógeno total para el reactor RA1 (con planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

<i>Fecha</i>	2 cm ppm N-N <sub>total</sub>	10cm ppm N-N <sub>total</sub>	30cm ppm N-N <sub>total</sub>	Influente ppm N-N <sub>total</sub>
24/02/2006	16.04	18.63	18.57	12.59
28/02/2006	19.32	22.95	17.04	10.15
01/03/2006	27.84	26.35	21.69	12.98
03/03/2006	29.26	26.58	19.34	12.51
<b>Máximo</b>	<b>29.26</b>	<b>26.58</b>	<b>21.69</b>	<b>12.98</b>
<b>Mínimo</b>	<b>16.04</b>	<b>18.63</b>	<b>17.04</b>	<b>10.15</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>6.44</b>	<b>3.72</b>	<b>1.94</b>	<b>1.29</b>
<b>Promedio</b>	<b>23.12</b>	<b>23.63</b>	<b>19.16</b>	<b>12.06</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	25.50	41.43	31.86	13.43
30/03/2006	16.27	24.52	24.23	13.75
31/03/2006	22.46	4.22	3.37	13.54
04/04/2006	25.45	31.58	27.19	13.22
05/04/2006	15.75	15.05	7.44	13.42
10/04/2006	20.33	22.13	22.02	12.65
11/04/2006	8.15	24.16	17.72	12.59
18/04/2006	7.75	15.89	9.98	11.28
19/04/2006	22.04	26.76	14.60	13.16
21/04/2006	13.72	20.90	20.56	11.97
<b>Máximo</b>	<b>25.50</b>	<b>41.43</b>	<b>31.86</b>	<b>13.75</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.75</b>	<b>4.22</b>	<b>3.37</b>	<b>11.28</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>6.51</b>	<b>10.01</b>	<b>9.06</b>	<b>0.78</b>
<b>Promedio</b>	<b>17.74</b>	<b>22.67</b>	<b>17.90</b>	<b>12.90</b>

Tabla A.8.14 Resultados para remoción de nitrógeno total para el reactor RA2 (sin planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

<i>Fecha</i>	2 cm	10cm	30cm
	ppm N-N <sub>total</sub>	ppm N-N <sub>total</sub>	ppm N-N <sub>total</sub>
24/02/2006	13.95	16.11	19.60
28/02/2006	15.28	15.84	17.91
01/03/2006	29.81	19.49	23.83
03/03/2006	35.08	25.47	24.60
<b>Máximo</b>	<b>35.08</b>	<b>25.47</b>	<b>24.60</b>
<b>Mínimo</b>	<b>13.95</b>	<b>15.84</b>	<b>17.91</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>10.53</b>	<b>4.48</b>	<b>3.24</b>
<b>Promedio</b>	<b>23.53</b>	<b>19.23</b>	<b>21.48</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	30.63	32.23	29.18
30/03/2006	19.79	23.85	18.45
31/03/2006	21.66	22.42	22.50
04/04/2006	12.53	14.47	22.28
05/04/2006	49.28	5.00	8.90
10/04/2006	18.51	19.43	18.90
11/04/2006	4.70	6.30	7.28
18/04/2006	22.56	4.77	11.39
19/04/2006	41.05	8.35	8.61
21/04/2006	16.18	12.99	22.81
<b>Máximo</b>	<b>49.28</b>	<b>32.23</b>	<b>29.18</b>
<b>Mínimo</b>	<b>4.70</b>	<b>4.77</b>	<b>7.28</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>13.31</b>	<b>9.30</b>	<b>7.51</b>
<b>Promedio</b>	<b>23.69</b>	<b>14.98</b>	<b>17.03</b>



Tabla A 8.15 Resultados para remoción de nitrógeno total para el reactor RB1 (con planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

<i>Fecha</i>	2 cm ppm N-N <sub>total</sub>	10cm ppm N-N <sub>total</sub>	30cm ppm N-N <sub>total</sub>
24/02/2006	16.47	17.92	18.23
28/02/2006	20.50	21.60	34.63
01/03/2006	31.30	25.05	22.98
03/03/2006	26.58	26.56	24.20
<b>Máximo</b>	<b>16.47</b>	<b>17.92</b>	<b>18.23</b>
<b>Mínimo</b>	<b>31.30</b>	<b>26.56</b>	<b>34.63</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>6.55</b>	<b>3.85</b>	<b>6.91</b>
<b>Promedio</b>	<b>23.71</b>	<b>22.78</b>	<b>25.01</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	34.32	36.20	31.91
30/03/2006	20.23	19.32	23.45
31/03/2006	23.74	24.51	24.18
04/04/2006	26.44	30.14	22.85
05/04/2006	10.08	12.36	6.18
10/04/2006	9.46	9.59	15.48
11/04/2006	16.51	14.55	14.06
18/04/2006	8.81	13.36	6.64
19/04/2006	11.85	9.46	8.19
21/04/2006	22.36	22.05	19.56
<b>Máximo</b>	<b>34.32</b>	<b>36.20</b>	<b>31.91</b>
<b>Mínimo</b>	<b>8.81</b>	<b>9.46</b>	<b>6.18</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>8.52</b>	<b>9.03</b>	<b>8.62</b>
<b>Promedio</b>	<b>18.38</b>	<b>19.15</b>	<b>17.25</b>

Tabla A.8.16 Resultados para remoción de nitrógeno total para el reactor RB2 (sin planta)

Primera etapa (450 mg sacarosa / L)

<i>Fecha</i>	2 cm ppm N-N <sub>total</sub>	10cm ppm N-N <sub>total</sub>	30cm ppm N-N <sub>total</sub>
24/02/2006	16.32	19.09	15.75
28/02/2006	16.36	22.80	27.18
01/03/2006	29.26	27.28	23.90
03/03/2006	27.46	26.91	23.64
<b>Máximo</b>	<b>29.26</b>	<b>27.28</b>	<b>27.18</b>
<b>Mínimo</b>	<b>16.32</b>	<b>19.09</b>	<b>15.75</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>6.98</b>	<b>3.86</b>	<b>4.85</b>
<b>Promedio</b>	<b>22.35</b>	<b>24.02</b>	<b>22.62</b>

Segunda etapa (225 mg sacarosa / L)

28/03/2006	12.29	17.74	14.83
30/03/2006	18.87	16.39	9.83
31/03/2006	17.54	17.11	15.17
04/04/2006	25.37	30.86	22.17
05/04/2006	12.73	9.51	10.04
10/04/2006	22.32	21.09	17.57
11/04/2006	24.09	16.09	14.71
18/04/2006	13.88	5.90	10.98
19/04/2006	24.41	5.98	5.31
21/04/2006	35.79	22.78	17.40
<b>Máximo</b>	<b>35.79</b>	<b>30.86</b>	<b>22.17</b>
<b>Mínimo</b>	<b>12.29</b>	<b>5.90</b>	<b>5.31</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>7.24</b>	<b>7.75</b>	<b>4.84</b>
<b>Promedio</b>	<b>20.73</b>	<b>16.34</b>	<b>13.80</b>

Tabla A.8.17 Valores de pH para el sistema de 4 reactores

	02/02/2006	07/02/2006	14/02/2006	22/02/2006	21/04/2006
<b>RA1</b>	5.932	6.118	5.695	6.015	6.75
<b>RA2</b>	5.94	5.889	6.145	6.023	6.51
<b>RB1</b>	6.107	5.891	6.151	5.984	6.83
<b>RB2</b>	6.011	5.904	6.179	6.043	6.71
<b>Inf</b>	6.607	6.696	7.597	7.03	7

Tabla A.8.18 Valores de DQO para la primera etapa

<i>Día</i>	<i>INFLUENTE</i>	<i>RA1</i>	<i>RA2</i>	<i>RB1</i>	<i>RB2</i>
<b>04-Feb-06</b>	458.33	161.67	188.33	121.67	145.00
<b>09-Feb-06</b>	411.67	161.67	211.89	161.67	185.00
<b>22-Feb-06</b>	461.67	181.67	243.33	221.67	238.33
<b>28-Feb-06</b>	441.67	165.00	219.44	130.56	183.89

Tabla A.8.19 Valores de DQO para la segunda etapa

<i>Día</i>	<i>INFLUENTE</i>	<i>RA1</i>	<i>RA2</i>	<i>RB1</i>	<i>RB2</i>
<b>03-Mar-06</b>	311.67	101.67	138.33	83.89	90.56
<b>11-Mar-06</b>	288.33	70.56	78.33	75.00	87.22
<b>25-Mar-06</b>	331.67	108.33	116.11	143.89	178.33
<b>28-Mar-06</b>	335.00	151.6667	110.5556	108.3333	92.7778

Tabla A.8.20 Valores de potencial de óxido-reducción para los reactores con planta (RA1 y RB1)

<i>Hora</i>	RA1-2	RA1-10	RA1-30	RB1-2	RB1-10	RB1-30
12:00	0.05	0.017	0.008	-0.27305	-0.22	0.45766
	-0.1823	-0.029355	-0.16186	-0.24217	-0.18598	0.70298
	-0.20742	0.028585	-0.1798	-0.25505	-0.20648	0.69342
12:30	-0.22111	0	-0.17961	-0.26042	-0.21049	0.6826
	-0.2378	0.039273	-0.18511	-0.26342	-0.21467	0.64
	-0.252	0.004	-0.18361	-0.27086	-0.22405	0.56823
13:00	-0.25099	0.0020214	-0.19036	-0.28155	-0.2233	0.66
	-0.25505	0.013334	-0.19186	-0.41918	-0.2263	0.57791
	-0.26111	0.018209	-0.19786	-0.29924	-0.23161	0.44666
13:30	-0.26742	0.015897	-0.20317	-0.30674	-0.23692	0.62
	-0.27249	0.011	-0.20692	-0.31068	-0.2448	0.55
	-0.27474	0.005709	-0.2108	-0.31368	-0.24455	0.70148
14:00	-0.27605	0.017834	-0.21442	-0.31524	-0.24417	0.70561
	-0.28211	0.016459	-0.21736	-0.3153	-0.24736	0.58035
	-0.30861	0.013084	-0.21955	-0.31536	-0.24967	0.66
14:30	-0.30299	0.016397	-0.22199	-0.3153	-0.25086	0.70186
	-0.29605	0.004084	-0.22555	-0.31455	-0.25367	0.64
	-0.2898	0.016647	-0.22992	-0.31411	-0.25786	0.58454
15:00	-0.2983	0.017522	-0.23374	-0.31418	-0.25905	0.81717
	-0.31618	0.02	-0.23874	-0.31286	-0.25892	0.69848
	-0.32474	0.0088966	-0.24055	-0.31474	-0.26042	0.69773
15:30	-0.32905	0.010459	-0.25661	-0.31693	-0.26042	0.70417
	-0.3313	-0.017	-0.25911	-0.31655	-0.26255	0.70342
	-0.33705	0.014834	-0.2503	-0.3158	-0.26992	0.70117
16:00	-0.33899	0.017709	-0.25167	-0.31174	-0.3973	0.57829
	-0.3398	0.014209	-0.25405	-0.31774	-0.2738	0.69798
	-0.34074	0	-0.25611	-0.3218	-0.27761	0.59104
16:30	-0.33818	-0.017	-0.26999	-0.32405	-0.40437	0.70698
	-0.33968	0.0076466	-0.26024	-0.32593	-0.28349	0.58948
	-0.33968	0.02	-0.26192	-0.32649	-0.28261	0.70304
17:00	-0.34105	0.0063966	-0.26349	-0.32843	-0.28599	0.58141
	-0.33805	0.014772	-0.2648	-0.32961	-0.28849	0.69548
	-0.3383	0.015	-0.2773	-0.32855	-0.29374	0.5861
17:30	-0.33786	0.027	-0.27011	-0.3293	-0.29618	0.57341

	-0.33855	0.010959	-0.27074	-0.45587	-0.29736	0.82373
	-0.33811	0.015	-0.27211	-0.32724	-0.3008	0.70354
18:00	-0.33955	0.013084	-0.27305	-0.3283	-0.30405	0.59085
	-0.3393	0.010334	-0.28074	-0.32911	-0.3058	0.70473
	-0.33843	-0.010666	-0.27624	-0.32936	-0.30736	0.5816
18:30	-0.33761	0.012584	-0.274	-0.33024	-0.30961	0.70423
	-0.33911	0.010084	-0.28349	-0.33118	-0.31049	0.70117
	-0.33993	0.0038965	-0.27849	-0.33136	-0.31186	0.57923
19:00	-0.3388	-0.045168	-0.27924	-0.3303	-0.31343	0.59416
	-0.3398	-0.004	-0.27992	-0.33249	-0.31468	0.82273
	-0.3398	0.0092717	-0.29961	-0.33424	-0.31611	0.5866
19:30	-0.33861	0.0085216	-0.28336	-0.3348	-0.31699	0.82498
	-0.33761	0.010147	-0.28261	-0.33555	-0.31793	0.70442
	-0.33805	-0.0096039	-0.28255	-0.33543	-0.31893	0.57941
20:00	-0.33749	0.013584	-0.28261	-0.33686	-0.31874	0.70342
	-0.33824	0.012647	-0.28311	-0.33793	-0.31961	0.58029
	-0.33893	0.012084	-0.28349	-0.33893	-0.32043	0.58116
20:30	-0.33943	0.012834	-0.2933	-0.33974	-0.32018	0.57498
	-0.33993	-0.009	-0.28542	-0.33993	-0.32118	0.69679
	-0.34005	0.011709	-0.29886	-0.33986	-0.3213	0.56785
21:00	-0.34086	0.006	-0.29249	-0.34061	-0.32205	0.70648
	-0.34118	0.0082716	-0.28774	-0.34118	-0.32243	0.58198
	-0.34105	0.010084	-0.30536	-0.34155	-0.3228	1.0804
21:30	-0.34086	0.016209	-0.2893	-0.34149	-0.32293	0.6
	-0.33986	0.013022	-0.29243	-0.34111	-0.32349	0.81873
<i>Hora</i>	RA1-2	RA1-10	RA1-30	RB1-2	RB1-10	RB1-30
	-0.33993	0.0076466	-0.2898	-0.34118	-0.32361	0.70304
22:00	-0.3388	0.010397	-0.30124	-0.34161	-0.32368	0.69923
	-0.3383	-0.0082289	-0.29293	-0.3418	-0.32411	0.57073
	-0.33718	-0.0012912	-0.29349	-0.34155	-0.3243	0.69773
22:30	-0.3393	0.006	-0.29374	-0.3413	-0.32518	0.82117
	-0.33505	0.0074591	-0.29405	-0.34174	-0.32486	0.8198
	-0.33368	0.0058966	-0.29418	-0.34236	-0.32511	0.57135
23:00	-0.33455	0.012334	-0.29405	-0.34274	-0.32549	0.8188
	-0.33324	0.02	-0.29418	-0.34205	-0.32599	0.4591
	-0.3328	0.010459	-0.289	-0.34243	-0.3258	0.70442
23:30	-0.33286	0.0087091	-0.29574	-0.34255	-0.32586	0.70011
	-0.33255	0.0079591	-0.29449	-0.34286	-0.32568	0.94786
	-0.3318	0.012584	-0.30424	-0.34268	-0.32605	0.70786
00:00	-0.33061	0.035	-0.2963	-0.34268	-0.32611	0.69729
	-0.33024	0.013209	-0.29549	-0.34299	-0.32618	0.45935
	-0.33005	0.012709	-0.30049	-0.34324	-0.32649	0.70336
00:30	-0.33024	0.017	-0.29961	-0.3433	-0.32649	0.69942
	-0.3298	0.011397	-0.29674	-0.3438	-0.32636	0.57523
	-0.32955	0.010147	-0.29624	-0.3438	-0.32661	0.45304
01:00	-0.33093	0.0070841	-0.29636	-0.47206	-0.32711	0.96911
	-0.33043	0.011834	-0.30155	-0.34368	-0.32693	0.58854
	-0.33043	0.014834	-0.29749	-0.34411	-0.32711	0.5741

01:30	-0.33105	0.006	-0.2973	-0.3438	-0.3273	0.69686
	-0.33211	0.015584	-0.29705	-0.3438	-0.32686	0.44053
	-0.33118	0.012522	-0.29693	-0.3433	-0.32736	0.70248
02:00	-0.33105	0.013209	-0.31036	-0.34349	-0.32736	0.57816
	-0.33255	0.0062716	-0.29911	-0.34349	-0.32805	0.58835
	-0.33211	-0.0027287	-0.29818	-0.34343	-0.32755	0.69604
02:30	-0.33149	0.014272	-0.30905	-0.34355	-0.32749	1.0894
	-0.33143	-0.032042	-0.2998	-0.34386	-0.32736	0.70211
	-0.33124	0	-0.2988	-0.47199	-0.32736	0.70623
03:00	-0.33124	0.016334	-0.30418	-0.34324	-0.32724	0.5751
	-0.33118	0.014522	-0.29886	-0.34293	-0.3273	0.57598
	-0.33149	0.010209	-0.3033	-0.34224	-0.32743	0.70179
03:30	-0.33149	-0.005	-0.29905	-0.34211	-0.45593	0.58391
	-0.33111	0.0090216	-0.2988	-0.34193	-0.32724	0.58841
	-0.33086	0.010772	-0.29818	-0.3413	-0.3273	0.70523
04:00	-0.33036	0	-0.31043	-0.34105	-0.45556	0.96486
	-0.3308	-0.00035364	-0.30074	-0.34124	-0.32736	0.56979
	-0.33099	0.013	-0.30405	-0.34068	-0.32755	0.32847
04:30	-0.33274	0.0062091	-0.2993	-0.34093	-0.32755	0.70392
	-0.33149	0.0097092	-0.30518	-0.34055	-0.32799	0.64
	-0.33155	-0.007	-0.3128	-0.34061	-0.45574	0.70429
05:00	-0.33199	0.012709	-0.30186	-0.34099	-0.58368	0.82223
	-0.33286	0.004	-0.30086	-0.34043	-0.32799	0.58848
	-0.33286	0.02	-0.29974	-0.33955	-0.3273	0.57604
05:30	-0.3328	0.02	-0.3113	-0.3393	-0.32711	0.69911
	-0.33505	0.012022	-0.3023	-0.3393	-0.32711	0.56816
	-0.33311	0.013709	-0.30524	-0.33855	-0.32655	0.9603
06:00	-0.33274	0.012209	-0.30011	-0.33861	-0.32618	0.82586
	-0.33261	0.012209	-0.29949	-0.33818	-0.32605	0.82567
	-0.33468	0.015897	-0.29961	-0.33718	-0.32611	0.57504
06:30	-0.33318	0.014834	-0.29968	-0.33699	-0.32599	0.70879
	-0.33249	0.010709	-0.29968	-0.3363	-0.32593	0.56873
	-0.33243	0.02	-0.30005	-0.33555	-0.32586	0.9563
07:00	-0.33611	0.005459	-0.30024	-0.33536	-0.32549	0.57823
	-0.33293	0.015709	-0.30499	-0.33511	-0.32549	0.66
	-0.33161	0.002584	-0.30136	-0.33399	-0.32524	0.57479
07:30	-0.33061	0.02	-0.30136	-0.33355	-0.32511	0.58048
	-0.33036	-0.007	-0.32536	-0.33368	-0.32524	0.96524
	<i>Hora</i>	RA1-2	RA1-10	RA1-30	RB1-2	RB1-10
08:00	-0.32999	-0.0039162	-0.30699	-0.33305	-0.32511	0.5836
	-0.3308	0.015647	-0.3158	-0.33218	-0.32574	0.70511
	-0.3313	0.013522	-0.3058	-0.33205	-0.32468	0.57473
08:30	-0.33149	0.010959	-0.3043	-0.33218	-0.32424	0.44185
	-0.33174	0.0068341	-0.31	-0.3323	-0.32436	0.57066
	-0.33349	0.010272	-0.3033	-0.33186	-0.32405	0.57448
09:00	-0.33499	0.011834	-0.30311	-0.33118	-0.32355	0.58023
	-0.33349	0.008	-0.30818	-0.33061	-0.32343	0.57616
	-0.3338	0.013834	-0.30418	-0.33049	-0.32349	0.55

	-0.33368	0.0081466	-0.30349	-0.32961	-0.32324	0.57866
09:30	-0.33349	0.0067091	-0.30361	-0.32924	-0.32286	0.57666
	-0.33368	-0.005	-0.30324	-0.32855	-0.32286	0.70179
	-0.33499	-0.0011037	-0.30343	-0.58368	-0.32274	0.57385
10:00	-0.33386	0.0092717	-0.30343	-0.3273	-0.32274	0.57635
	-0.33386	0.0088341	-0.30511	-0.32655	-0.32261	0.83423
	-0.33368	0.0086466	-0.30474	-0.32618	-0.32243	0.58104
10:30	-0.33393	0.0070841	-0.29	-0.32543	-0.3223	0.68892
	-0.3353	0.004	-0.294	-0.32524	-0.32236	0.64
	-0.33399	0.008	-0.3	-0.3248	-0.32205	0.69336
11:00	-0.3338	-0.005	-0.3	-0.32461	-0.3223	0.96074
	-0.33599	-0.0092914	-0.3	-0.32393	-0.32255	0.57841
	-0.33449	0.013334	-0.30218	-0.32386	-0.32168	0.69517
11:30	-0.33461	0.014959	-0.30236	-0.32374	-0.32124	0.70198
	-0.33386	0.017022	-0.30286	-0.32311	-0.3213	0.96193
	-0.3338	0.02	-0.30605	-0.32355	-0.32205	0.70142
12:00	-0.33386	0.017	-0.30493	-0.32368	-0.32111	0.56966
	-0.33305	0.013209	-0.30324	-0.32249	-0.32074	0.70329
	-0.33268	0.011084	-0.30343	-0.32205	-0.32043	0.57685
12:30	-0.33424	0.010209	-0.30286	-0.32149	-0.32049	0.81292
	-0.3328	-0.024729	-0.30349	-0.32261	-0.31993	0.57623
	-0.33268	0.015959	-0.30149	-0.32143	-0.32005	0.69142
13:00	-0.33243	0.0099592	-0.30243	-0.32136	-0.31993	0.69192
	-0.33255	0.019959	-0.30318	-0.32199	-0.31968	0.69361
	-0.33218	0.022335	-0.30324	-0.3213	-0.31936	0.68
13:30	-0.33249	0.013959	-0.30368	-0.32161	-0.31911	0.82436
	-0.33305	0.027	-0.30861	-0.32205	-0.31911	0.6
	-0.3338	0.020272	-0.30499	-0.3223	-0.31918	0.70373
14:00	-0.33474	0.004	-0.30543	-0.32211	-0.31911	0.69286
	-0.33605	-0.004	-0.30755	-0.32249	-0.31886	0.69836
	-0.33724	0.008	-0.30536	-0.32243	-0.31886	0.58054
14:30	-0.34099	0.010272	-0.3048	-0.32286	-0.31868	0.69986
	-0.34118	0.006	-0.30755	-0.32199	-0.31843	0.70354
	-0.34268	0.0020839	-0.32036	-0.32211	-0.31824	0.96143
15:00	-0.34443	0.012209	-0.31218	-0.32193	-0.31818	0.44916
	-0.34849	0.0087716	-0.30655	-0.32236	-0.3183	0.69911
	-0.34755	0	-0.30636	-0.3223	-0.31861	0.5836
15:30	-0.3478	0.0081466	-0.30624	-0.32243	-0.31799	0.56704
	-0.34836	0.013	-0.294	-0.32336	-0.31805	0.57379
	-0.34943	0.018709	-0.29218	-0.32399	-0.31786	0.96518
16:00	-0.35124	0.020585	-0.28961	-0.32474	-0.31793	0.31647
	-0.35243	0.0087091	-0.2918	-0.3248	-0.31768	0.57585
	-0.35349	-0.005	-0.29586	-0.3253	-0.3178	0.59
16:30	-0.3548	0.012459	-0.32668	-0.32555	-0.31786	0.70461
	-0.35586	0.011772	-0.3018	-0.32605	-0.3183	0.1899
	-0.35755	0.014772	-0.29849	-0.32655	-0.31768	0.44635
17:00	-0.35811	0.010084	-0.29655	-0.32655	-0.3178	0.58148
	-0.35868	0.011	-0.29511	-0.32674	-0.31811	0.44335

	-0.35861	0.010459	-0.2948	-0.32824	-0.31793	0.69779
17:30	-0.36199	0.015397	-0.2943	-0.32843	-0.31786	0.9588
	-0.36068	0.012022	-0.30411	-0.45599	-0.31786	1.0884
<i>Hora</i>	RA1-2	RA1-10	RA1-30	RB1-2	RB1-10	RB1-30
	-0.36074	0	-0.30174	-0.32824	-0.31761	0.45016
18:00	-0.36211	0.010647	-0.29455	-0.45637	-0.3178	0.81367
	-0.36255	-0.0029162	-0.29499	-0.32799	-0.31768	0.71023
	-0.36505	0.018397	-0.29361	-0.3283	-0.31786	0.70723
18:30	-0.36555	0	-0.29899	-0.32874	-0.31818	0.96368
	-0.36699	0.017	-0.315	-0.32836	-0.31849	0.58491
	-0.36886	-0.022354	-0.30024	-0.32874	-0.31849	0.5801
19:00	-0.36899	0.0085216	-0.30124	-0.32855	-0.31811	0.58848
	-0.3703	0	-0.3018	-0.32968	-0.31799	0.70567
	-0.36999	0.006	-0.30224	-0.3303	-0.31843	0.44491
19:30	-0.37136	0.0092717	-0.3033	-0.3308	-0.3183	0.70992
	-0.37043	0.011	-0.30461	-0.33174	-0.31874	0.96643
	-0.36936	0.0096467	-0.3053	-0.3318	-0.3188	1.0891
20:00	-0.36849	-0.014	-0.31168	-0.33243	-0.31861	0.57866
	-0.36855	0.012834	-0.30836	-0.33243	-0.31836	0.82773
	-0.36768	-0.004	-0.30855	-0.33343	-0.31811	0.82123
20:30	-0.3653	0.013	-0.31574	-0.33399	-0.31886	0.57935
	-0.36355	0.0008964	-0.31136	-0.33518	-0.31861	0.5886
	-0.3608	0.016647	-0.31136	-0.3353	-0.31868	0.58691
21:00	-0.35786	0.010897	-0.31149	-0.33586	-0.31855	0.32941
	-0.35505	0.0083341	-0.31174	-0.33636	-0.31886	1.0841
	-0.35168	-0.027	-0.3123	-0.33711	-0.31918	0.70361
21:30	-0.35236	0.012209	-0.31818	-0.33755	-0.31955	0.71192
	-0.35286	-0.025792	-0.33699	-0.33768	-0.31974	0.33259
	-0.35468	-0.004	-0.33068	-0.33824	-0.3198	0.82523
22:00	-0.3543	0.015334	-0.31924	-0.33836	-0.32011	0.57941
	-0.3538	0.012709	-0.3153	-0.33918	-0.32024	0.82648
	-0.35368	0.013897	-0.31336	-0.33893	-0.32061	0.58235
22:30	-0.35324	-0.004	-0.31405	-0.34005	-0.32055	0.58079
	-0.35243	0.015522	-0.31524	-0.34061	-0.32086	0.58391
	-0.35205	0.010084	-0.31661	-0.3403	-0.32168	0.45885
23:00	-0.35205	0.016772	-0.3128	-0.34093	-0.32118	0.96643
	-0.35193	0.0078966	-0.30693	-0.34105	-0.32118	0.70711
	-0.35205	0.010647	-0.30768	-0.34186	-0.32155	0.70029
23:30	-0.35255	0.016959	-0.30924	-0.34143	-0.32224	0.82755
	-0.35386	0.012897	-0.31155	-0.34218	-0.32274	0.69748
	-0.35468	0.0093342	-0.31311	-0.34255	-0.32336	0.5871
0:00:00	-0.35524	0.010897	-0.31399	-0.34261	-0.32324	0.70317
	-0.35643	0.011834	-0.31493	-0.34236	-0.32393	0.57854
	-0.3573	0.012772	-0.31505	-0.34274	-0.32468	0.58479
00:30	-0.35799	0.010897	-0.31586	-0.34318	-0.32468	0.70504
	-0.35	0.0073966	-0.31743	-0.3428	-0.32536	0.70911
	-0.35968	0.014334	-0.31955	-0.34311	-0.32568	0.69648
01:00	-0.35999	0.0065216	-0.32093	-0.34311	-0.32636	0.57979

	-0.36111	0.010522	-0.32199	-0.34293	-0.32643	0.70742
	-0.36155	0.015772	-0.32311	-0.34274	-0.32674	0.58216
01:30	-0.36211	0.006	-0.32436	-0.34218	-0.32705	0.70661
	-0.36286	0.016084	-0.32511	-0.34211	-0.3273	0.58423
	-0.36343	0.0098342	-0.32574	-0.34224	-0.45606	0.82986
02:00	-0.36436	0.013334	-0.32618	-0.34274	-0.32874	0.58466
	-0.36511	-0.037355	-0.3263	-0.34293	-0.32868	0.58129
	-0.36543	0.011959	-0.32655	-0.34286	-0.32918	0.58835
02:30	-0.36618	0.010147	-0.32674	-0.3433	-0.32955	0.32022
	-0.36605	0.011209	-0.32643	-0.34299	-0.33024	0.70179
	-0.36536	0.015209	-0.32611	-0.34305	-0.3303	0.57098
03:00	-0.36568	0.015584	-0.32555	-0.34286	-0.33068	0.44891
	-0.36705	0.010334	-0.32511	-0.34268	-0.33074	0.82117
	-0.36749	0.004209	-0.32524	-0.34274	-0.33099	0.57516
03:30	-0.36774	0.011084	-0.32474	-0.34286	-0.3313	1.0856
	-0.36711	0.014709	-0.32393	-0.34218	-0.33036	0.69729
Hora	RA1-2	RA1-10	RA1-30	RB1-2	RB1-10	RB1-30
	-0.36655	0.0095217	-0.32293	-0.34168	-0.33049	0.69748
04:00	-0.36593	0.011084	-0.3213	-0.34086	-0.33086	0.69361
	-0.36455	0.012522	-0.31936	-0.34061	-0.3308	1.0835
	-0.3633	0.010772	-0.3178	-0.34011	-0.33105	0.56904
04:30	-0.36243	0.016647	-0.31668	-0.34005	-0.33136	0.69442
	-0.3608	0.014647	-0.31536	-0.33918	-0.33124	0.18421
	-0.366	0.0074591	-0.31424	-0.33824	-0.33086	0.57504
05:00	-0.35705	0.011897	-0.31361	-0.33843	-0.33105	0.57241
	-0.35555	0.0095217	-0.31336	-0.3373	-0.33118	0.57623
	-0.35493	0.015709	-0.31286	-0.33718	-0.3308	1.2046
05:30	-0.35361	0.019772	-0.31286	-0.3373	-0.33061	0.56854
	-0.3538	0.013834	-0.31236	-0.3363	-0.33049	0.57785
	-0.35299	-0.0090414	-0.31193	-0.3363	-0.33049	1.2031
06:00	-0.35118	0.016459	-0.31374	-0.33586	-0.33049	1.1993
	-0.3478	0.0074591	-0.31543	-0.33561	-0.33061	0.56716
	-0.34643	0.0045215	-0.31624	-0.33568	-0.33099	1.0744
06:30	-0.34561	0.020459	-0.31561	-0.33561	-0.3308	1.0816
	-0.34736	0.016209	-0.31536	-0.33511	-0.33068	0.56335
	-0.34899	0.016147	-0.31555	-0.33474	-0.3303	1.0771
07:00	-0.3513	-0.033355	-0.31643	-0.33399	-0.33036	0.68504
	-0.35324	0.019397	-0.31674	-0.33411	-0.33036	0.57879
	-0.3548	0.0088966	-0.31649	-0.33374	-0.33024	0.57391
07:30	-0.3558	0.0087716	-0.3168	-0.33299	-0.32974	1.0749
	-0.35736	0.016022	-0.31718	-0.33349	-0.33011	1.0798
	-0.35818	0.011459	-0.31699	-0.33299	-0.3298	0.57473
08:00	-0.3593	0.011897	-0.31768	-0.33299	-0.32974	0.56891
	-0.36018	0.017022	-0.31799	-0.33218	-0.32949	0.82298
	-0.36099	-0.0017287	-0.31805	-0.33174	-0.32924	0.57185
08:30	-0.3618	0.017022	-0.31749	-0.33186	-0.32918	0.56841
	-0.36293	0.012897	-0.31724	-0.33155	-0.32899	0.57429
	-0.36405	0.013772	-0.31724	-0.33136	-0.3288	0.57723



09:00	-0.36524	0.017272	-0.31699	-0.33074	-0.32886	0.4466
	-0.36586	-0.015542	-0.31661	-0.33105	-0.32855	0.95393
	-0.36686	0.011397	-0.31605	-0.33018	-0.32855	1.0879
09:30	-0.36718	0.017647	-0.3158	-0.33055	-0.32824	0.95499
	-0.36774	0.015397	-0.31543	-0.32993	-0.3283	0.95168
	-0.36768	0.011772	-0.31486	-0.32968	-0.45593	0.69423
10:00	-0.36743	0.011459	-0.31461	-0.3293	-0.58375	1.2098
	-0.36836	0.013	-0.3143	-0.32943	-0.32743	0.58135
	-0.36824	0.010959	-0.31361	-0.3293	-0.3268	0.56879
10:30	-0.36843	0.013459	-0.31336	-0.32924	-0.32699	0.8238
	-0.36824	0.017459	-0.31249	-0.3288	-0.3268	0.8228
	-0.36786	0.011022	-0.3123	-0.32918	-0.32649	0.96349
11:00	-0.36649	0.0099592	-0.31168	-0.32843	-0.32618	0.69067
	-0.36693	0.012897	-0.289	-0.32886	-0.32568	0.58341
	-0.36568	0.019022	-0.31074	-0.32855	-0.32555	0.69273
11:30	-0.36593	0.018959	-0.294	-0.32824	-0.32518	0.9588
	-0.36561	0.014959	-0.3093	-0.32805	-0.32499	0.57004
	-0.36561	0.019209	-0.30849	-0.45581	-0.32418	0.96899
12:00	-0.36424	0.020084	-0.30774	-0.32736	-0.32386	0.70154
	-0.36418	0.023522	-0.30668	-0.3268	-0.32293	0.57591
	-0.36468	0.00027138	-0.30561	-0.32586	-0.32261	1.0802
12:30	-0.3638	0.019897	-0.3043	-0.32574	-0.32218	0.56804
	-0.36461	0.02121	-0.3	-0.3258	-0.32193	1.0709
	-0.36355	0.012084	-0.3023	-0.32518	-0.32155	0.68979
13:00	-0.36268	0.012772	-0.30086	-0.32449	-0.32118	0.43503
	-0.36349	-0.021479	-0.30005	-0.32474	-0.3208	0.94993
	-0.36349	0.016272	-0.29924	-0.3243	-0.32024	0.68779
13:30	-0.36349	0.018397	-0.2988	-0.32361	-0.3198	0.56698
	-0.36293	-0.016854	-0.29818	-0.3238	-0.31955	0.8178
	<i>Hora</i>	RA1-2	RA1-10	RA1-30	RB1-2	RB1-10
14:00	-0.36268	0.0077716	-0.29824	-0.32355	-0.31968	0.70573
	-0.36286	0.019647	-0.29843	-0.32361	-0.31961	0.70154
	-0.36286	0.026772	-0.29724	-0.32343	-0.31943	0.5741
14:30	-0.36261	0.012022	-0.29761	-0.32318	-0.31936	0.56941
	-0.36255	0.02771	-0.2963	-0.3233	-0.31918	0.57416
	-0.36224	0.02921	-0.29574	-0.32274	-0.31893	1.0809
15:00	-0.36218	0.0063341	-0.29536	-0.32286	-0.31899	0.95574
	-0.36168	0.02621	-0.29493	-0.32293	-0.31886	1.0797
	-0.36118	-0.0081664	-0.29461	-0.32268	-0.31874	0.70092
15:30	-0.36111	0.011709	-0.29418	-0.32261	-0.31855	0.56454
	-0.36068	0.011834	-0.29374	-0.32268	-0.31899	0.9558
	-0.36036	0.011897	-0.29299	-0.32218	-0.31849	1.087
16:00	-0.36055	0.018272	-0.29243	-0.3223	-0.31868	0.69098
	-0.3603	0.011772	-0.29211	-0.32193	-0.31849	0.56766
	-0.36043	0.02196	-0.29168	-0.32236	-0.31843	0.57704
16:30	-0.3603	0.02746	-0.2913	-0.32243	-0.31811	0.68317
	-0.36068	0.018709	-0.284	-0.32286	-0.31874	1.0838
	-0.35999	0.018022	-0.29105	-0.32205	-0.31836	0.69898

	-0.35949	-0.00097866	-0.28	-0.3218	-0.31805	0.69767
17:00	-0.35961	0.004209	-0.284	-0.32186	-0.31824	0.81642
	-0.3598	0.011772	-0.289	-0.32205	-0.31793	0.69348
	-0.35936	0.026522	-0.29043	-0.32224	-0.31811	0.68504
17:30	-0.35943	0.0092092	-0.274	-0.32243	-0.31818	0.64
	-0.35936	0.017647	-0.29011	-0.32199	-0.31811	0.9473
	-0.35943	0.025147	-0.294	-0.32224	-0.31811	1.0729
18:00	-0.35968	0.02646	-0.28986	-0.32236	-0.31836	0.69798
	-0.35918	0.0077716	-0.28899	-0.32224	-0.31805	0.9448
	-0.35868	0.02621	-0.28824	-0.32218	-0.3178	0.30984
18:30	-0.36	0.0077091	-0.28755	-0.32255	-0.31755	1.0704
	-0.35861	0.025397	-0.28761	-0.32211	-0.31749	0.94061
	-0.35861	0.017647	-0.28749	-0.32268	-0.31749	1.0665
19:00	-0.355	0.019959	-0.28642	-0.32205	-0.31755	0.6
	-0.35849	0.008	-0.28649	-0.32224	-0.31749	0.70161
	-0.35849	0.016647	-0.28617	-0.32186	-0.31749	0.70329
19:30	-0.35874	0.02821	-0.2858	-0.32193	-0.31755	0.56116
	-0.35874	0.008	-0.2858	-0.32261	-0.31768	0.57148
	-0.355	0.0080216	-0.28586	-0.3228	-0.31768	0.82442
20:00	-0.35893	0.010459	-0.28574	-0.32261	-0.31768	0.56023
	-0.371	-0.005	-0.28561	-0.32255	-0.31736	1.061
	-0.35874	0.019459	-0.2853	-0.3228	-0.31743	0.5736
20:30	-0.35868	0.011459	-0.28542	-0.32249	-0.31743	0.55141
	-0.36	0.03271	-0.28517	-0.32255	-0.31736	0.69986
	-0.35861	0.023397	-0.28499	-0.32218	-0.31736	0.44103
21:00	-0.366	0.027	-0.28449	-0.3223	-0.31743	0.68292
	-0.38	0.017334	-0.28399	-0.32261	-0.31755	0.44153
	-0.35899	0.028522	-0.28367	-0.32268	-0.31749	1.0597
21:30	-0.35899	0.031	-0.28255	-0.32236	-0.31755	1.0585
	-0.3593	0.029335	-0.28199	-0.32286	-0.3178	1.0448
	-0.35943	0.005709	-0.28155	-0.32305	-0.31799	0.68335
22:00	-0.35961	-0.0082289	-0.28074	-0.32349	-0.31843	1.0496
	-0.35986	0.019772	-0.28117	-0.32393	-0.31861	1.1809
	-0.3603	0.0092717	-0.28167	-0.3243	-0.31886	1.3124
22:30	-0.36043	0.023397	-0.28161	-0.32436	-0.31911	1.1816
	-0.36074	0.016584	-0.28192	-0.32411	-0.3193	1.1806
	-0.36086	0.0067716	-0.28199	-0.32449	-0.31936	1.0439
23:00	-0.36093	0.0098967	-0.28199	-0.32418	-0.31968	1.0546
	-0.36111	0.016147	-0.28205	-0.3243	-0.31986	0.53891
	-0.36124	0.027085	-0.28217	-0.32474	-0.32005	0.92617
23:30	-0.36118	0.008	-0.2823	-0.32493	-0.32036	1.4262
	-0.3613	-0.028917	-0.28236	-0.32518	-0.32055	0.66067
<i>Hora</i>	RA1-2	RA1-10	RA1-30	RB1-2	RB1-10	RB1-30
	-0.36136	0.004	-0.28242	-0.32568	-0.32055	0.52635
0:00:00	-0.36111	0.012459	-0.28211	-0.32518	-0.32043	1.2979
	-0.36174	0.016459	-0.28249	-0.32624	-0.32086	1.1704
	-0.36136	0.0073966	-0.28174	-0.32605	-0.32074	0.9208
00:30	-0.36111	0.023835	-0.28149	-0.32555	-0.32055	0.78467

	-0.36061	0.013209	-0.28086	-0.32599	-0.3203	0.53516
	-0.36061	0.0046465	-0.28067	-0.32593	-0.32005	0.53648
01:00	-0.35986	-0.005	-0.28049	-0.32661	-0.31986	1.4204
	-0.38	0.020647	-0.28024	-0.32643	-0.31974	1.0501
	-0.357	0.021335	-0.28042	-0.32561	-0.31818	1.0506
01:30	-0.36	0.020209	-0.28024	-0.3268	-0.31674	0.54798
	-0.357	0.014522	-0.2798	-0.32718	-0.31518	1.0479
	-0.371	0.018647	-0.28024	-0.32761	-0.31443	1.2956
02:00	-0.353	0.028522	-0.28049	-0.58368	-0.31443	1.0461
	-0.375	0.02146	-0.28161	-0.32886	-0.31443	0.92255
	-0.28161	0.0047715	-0.28374	-0.3298	-0.31461	0.91592
02:30	-0.30736	0.023772	-0.28486	-0.3303	-0.3148	0.53791
	-0.29636	0.012522	-0.28636	-0.33124	-0.31536	1.4266
	-0.29336	0.02	-0.28892	-0.3313	-0.3158	1.0531
03:00	-0.29105	0.015272	-0.29224	-0.33218	-0.31618	0.64335
	-0.28767	0.021085	-0.2938	-0.33243	-0.31686	0.66417
	-0.28767	0.024397	-0.29355	-0.33274	-0.31711	0.78173
03:30	-0.28899	0.015022	-0.29461	-0.33174	-0.31724	1.0402
	-0.28699	0.015709	-0.29643	-0.33211	-0.31768	0.5286
	-0.366	0.013334	-0.29849	-0.3328	-0.31818	1.043
	-0.29036	0.008	-0.3008	-0.3333	-0.31818	0.6616
<b>Máximo</b>	<b>0.05</b>	<b>0.039273</b>	<b>0.008</b>	<b>-0.24217</b>	<b>-0.18598</b>	<b>1.4266</b>
<b>Mínimo</b>	<b>-0.38</b>	<b>-0.045168</b>	<b>-0.33699</b>	<b>-0.58368</b>	<b>-0.58375</b>	<b>0.18421</b>
<b>Desv. Es.</b>	<b>0.03234872</b>	<b>0.0109923</b>	<b>0.02997734</b>	<b>0.02770948</b>	<b>0.0335408</b>	<b>0.20633401</b>
<b>Promedio</b>	<b>-0.34341384</b>	<b>0.01044236</b>	<b>-0.29380231</b>	<b>-0.33318229</b>	<b>-0.31965055</b>	<b>0.71939094</b>

Tabla A.8.21 Valores de potencial de óxido-reducción para los reactores sin planta (RA2 y RB2)

Hora	RA2-2	RA2-10	RA2-30	RB2-2	RB2-10	RB2-30
12:00	-0.24	-0.306	-0.233	0.58479	-0.11	-0.048
	-0.264	-0.2773	-0.22167	0.65	-0.0027912	-0.03
	-0.21961	-0.29305	-0.25455	0.68	-0.14911	-0.050043
12:30	-0.24167	-0.30224	-0.2708	0.652	-0.035855	-0.016667
	-0.2608	-0.3083	-0.27792	0.661	-0.02998	-0.012417
	-0.27336	-0.31236	-0.28511	0.6896	-0.051355	-0.036355
13:00	-0.28192	-0.31568	-0.28805	0.65	-0.15917	-0.03423
	-0.28267	-0.31993	-0.28992	0.69473	-0.05	-0.056668
	-0.28774	-0.32355	-0.29255	0.57504	-0.078544	-0.054168
13:30	-0.29168	-0.32593	-0.29399	0.57185	-0.057855	-0.042667
	-0.30411	-0.32749	-0.29493	0.65	-0.04	-0.04
	-0.29968	-0.32993	-0.29555	0.69823	-0.051855	-0.03973
14:00	-0.30249	-0.33199	-0.29755	0.62	-0.056105	-0.034417
	-0.3053	-0.33361	-0.3003	0.56679	-0.065543	-0.055105
	-0.31086	-0.33561	-0.30505	0.57585	-0.077043	-0.046043
14:30	-0.32011	-0.33674	-0.30486	0.57729	-0.063106	-0.060168
	-0.31924	-0.33824	-0.3043	0.58398	-0.09	-0.072293

	-0.31599	-0.3393	-0.30786	0.69342	-0.068168	-0.04
15:00	-0.31705	-0.33943	-0.3098	0.55	-0.056418	-0.041292
	-0.32105	-0.3393	-0.3108	0.5801	-0.10029	-0.06
	-0.32074	-0.3413	-0.31193	0.63	-0.11	-0.14523
15:30	-0.32161	-0.34174	-0.31293	0.57073	-0.067918	-0.052105
	-0.3253	-0.34249	-0.31268	0.70454	-0.064293	-0.04598
	-0.33349	-0.34343	-0.31086	0.58598	-0.05623	-0.041355
16:00	-0.32543	-0.3443	-0.31243	0.70842	-0.08	-0.092481
	-0.32686	-0.34455	-0.3148	0.634	-0.059355	-0.055293
	-0.3308	-0.34524	-0.31668	0.69629	-0.053543	-0.034917
16:30	-0.33224	-0.34549	-0.31874	0.70136	-0.05623	-0.04848
	-0.33293	-0.34618	-0.32068	0.58898	-0.073106	-0.080731
	-0.33486	-0.34618	-0.32218	0.57173	-0.063231	-0.051543
17:00	-0.34055	-0.34724	-0.32418	0.69961	-0.060168	-0.044042
	-0.33518	-0.34718	-0.3253	0.57891	-0.059168	-0.045105
	-0.33461	-0.34755	-0.32593	0.57935	-0.055855	-0.050855
17:30	-0.33543	-0.34793	-0.32574	0.5786	0	-0.06
	-0.33593	-0.34874	-0.32674	0.70848	-0.10392	-0.052605
	-0.33624	-0.34918	-0.33	0.58998	-0.058918	-0.052105
18:00	-0.34205	-0.34949	-0.32968	0.70486	-0.068981	-0.063356
	-0.34393	-0.35036	-0.33074	0.70498	-0.1	-0.11
	-0.34005	-0.35024	-0.33155	0.58773	-0.065856	-0.052543
18:30	-0.34005	-0.35055	-0.33255	0.70879	-0.058168	-0.048
	-0.34074	-0.35143	-0.33299	0.68	-0.08	-0.08
	-0.34124	-0.35124	-0.33311	0.652	-0.066418	-0.051855
19:00	-0.34486	-0.35224	-0.33393	0.5966	-0.075293	-0.056293
	-0.34211	-0.35224	-0.33349	0.69904	-0.10117	-0.062293
	-0.34211	-0.35199	-0.3343	0.59204	-0.071	-0.058293
19:30	-0.34293	-0.35193	-0.33505	0.69798	-0.05448	-0.05248
	-0.34243	-0.35143	-0.3338	0.65	-0.062981	-0.048293
	-0.34561	-0.35255	-0.33255	0.65	-0.05798	-0.04123
20:00	-0.344	-0.35261	-0.32836	0.69667	-0.079544	-0.05173
	-0.34443	-0.35236	-0.32274	0.652	-0.070856	-0.060105
	-0.34505	-0.35268	-0.31899	0.58673	-0.065356	-0.051355
20:30	-0.34586	-0.35299	-0.32049	0.69448	-0.048605	0.05
	-0.34674	-0.35349	-0.32093	0.70154	-0.051355	-0.039792
	-0.3488	-0.35411	-0.31999	0.58129	-0.076731	-0.044042
21:00	-0.34993	-0.3543	-0.3188	0.69811	-0.059105	-0.08
	-0.34849	-0.35411	-0.31943	0.70186	-0.054043	-0.05148
	-0.34836	-0.35443	-0.3193	0.70242	-0.11	-0.20373
21:30	-0.34793	-0.35411	-0.31968	0.57948	-0.05973	-0.052418
	-0.35036	-0.35355	-0.31893	0.6906	-0.083481	-0.063981
<i>Hora</i>	RA2-2	RA2-10	RA2-30	RB2-2	RB2-10	RB2-30
	-0.3493	-0.35493	-0.32018	0.68867	-0.087044	-0.061168
22:00	-0.34943	-0.35568	-0.32068	0.59	-0.062543	-0.065106
	-0.35036	-0.35524	-0.32218	0.69842	-0.08	-0.10642
	-0.336	-0.3553	-0.32236	0.58048	-0.054168	-0.051418
22:30	-0.35368	-0.35605	-0.3213	0.58004	-0.061668	-0.077043

	-0.35261	-0.35643	-0.32168	0.58354	-0.071106	-0.14
	-0.35255	-0.35618	-0.32161	0.61	-0.12	-0.04
23:00	-0.35249	-0.35624	-0.31961	0.57604	-0.066668	-0.064856
	-0.35755	-0.3568	-0.32036	0.69286	-0.083794	-0.04148
	-0.35336	-0.35811	-0.32836	0.69942	-0.09	-0.08
23:30	-0.35336	-0.35949	-0.3328	0.70217	-0.12	-0.11723
	-0.35274	-0.35974	-0.33511	0.69811	-0.069043	-0.08
	-0.35293	-0.36068	-0.33718	0.68873	-0.053668	-0.064
00:00	-0.35511	-0.36243	-0.33818	0.64	-0.11	-0.075043
	-0.35468	-0.3638	-0.33943	0.69548	-0.18848	-0.062418
	-0.35505	-0.36543	-0.34074	0.58935	-0.067981	-0.044105
00:30	-0.35749	-0.36668	-0.34193	0.70298	-0.063481	-0.050855
	-0.35624	-0.3683	-0.34255	0.625	-0.062543	-0.05998
	-0.36699	-0.36905	-0.3438	0.70486	-0.075293	-0.066168
01:00	-0.36336	-0.37099	-0.34524	0.66	-0.061981	-0.04273
	-0.36068	-0.375	-0.3458	0.66	-0.066668	-0.05173
	-0.35943	-0.37318	-0.34661	0.69661	-0.068856	-0.060293
01:30	-0.36749	-0.37462	-0.34793	0.58935	-0.08	-0.052605
	-0.36061	-0.37562	-0.3483	0.69979	-0.057168	0.05
	-0.36018	-0.3763	-0.3493	0.69486	-0.11398	-0.073731
02:00	-0.3603	-0.37812	-0.35024	0.57991	-0.064543	-0.050043
	-0.3608	-0.37843	-0.35036	0.70642	-0.073856	-0.062043
	-0.36193	-0.37949	-0.3508	0.5836	-0.05673	-0.039355
02:30	-0.36161	-0.38037	-0.35174	0.57579	-0.075481	-0.061668
	-0.36418	-0.3808	-0.35218	0.58	-0.069293	-0.04823
	-0.36205	-0.38187	-0.35268	0.59116	-0.047293	-0.031917
03:00	-0.36174	-0.38224	-0.35305	0.70373	-0.08	-0.065918
	-0.36136	-0.38262	-0.3538	0.6	-0.08	-0.04
	-0.36168	-0.38299	-0.35418	0.57798	-0.05348	-0.045918
03:30	-0.36374	-0.3828	-0.35436	0.58698	-0.085169	-0.062918
	-0.36211	-0.38299	-0.35493	0.70229	-0.069918	-0.033
	-0.36174	-0.38305	-0.35524	0.67	-0.081419	-0.050918
04:00	-0.36155	-0.38343	-0.35574	0.65	-0.13	-0.084544
	-0.3613	-0.38312	-0.35693	0.70754	-0.062418	-0.049043
	-0.36674	-0.38337	-0.35661	0.65	-0.073356	-0.05798
04:30	-0.36686	-0.38318	-0.35661	0.68	-0.063043	-0.04598
	-0.36736	-0.38324	-0.35699	0.70423	-0.08	-0.058168
	-0.36343	-0.38374	-0.3573	0.57754	-0.062668	-0.052605
05:00	-0.3623	-0.38362	-0.35786	0.69879	-0.14	-0.033
	-0.36799	-0.38443	-0.35855	0.69698	-0.086919	-0.071
	-0.36293	-0.38393	-0.35793	0.70392	-0.033	-0.11
05:30	-0.36249	-0.38349	-0.35768	0.58329	-0.064	-0.14
	-0.36274	-0.3838	-0.35818	0.57985	-0.062668	-0.057918
	-0.36193	-0.3833	-0.35755	0.62	-0.15	-0.10698
06:00	-0.36161	-0.38374	-0.35774	0.58535	-0.067543	-0.04373
	-0.36124	-0.38337	-0.35705	0.57535	-0.062293	0
	-0.36193	-0.3838	-0.35686	0.70467	-0.058043	-0.048168
06:30	-0.36418	-0.38337	-0.3568	0.58048	-0.059918	-0.08

	-0.36255	-0.3838	-0.35674	0.69723	-0.05723	-0.05123
	-0.36555	-0.38355	-0.35636	0.57898	-0.13673	-0.060355
07:00	-0.36986	-0.3838	-0.35636	0.57704	-0.060543	-0.036667
	-0.36555	-0.38487	-0.35643	0.66	-0.12	0.07
	-0.36549	-0.3848	-0.35624	0.7	-0.045793	-0.034917
07:30	-0.36561	-0.415	-0.35611	0.69842	-0.072418	-0.05523
	-0.36868	-0.3858	-0.35593	0.65	-0.067168	-0.1
<i>Hora</i>	RA2-2	RA2-10	RA2-30	RB2-2	RB2-10	RB2-30
	-0.36655	-0.38687	-0.3558	0.70286	-0.08	-0.042167
08:00	-0.36649	-0.38699	-0.3558	0.57641	-0.09	-0.064918
	-0.36599	-0.38643	-0.3553	0.70592	-0.07	-0.12886
	-0.36586	-0.38599	-0.35543	0.63	-0.19348	-0.072918
08:30	-0.3658	-0.392	-0.35411	0.57416	-0.05023	-0.071
	-0.3663	-0.38493	-0.3533	0.56298	-0.066481	-0.046793
	-0.36686	-0.386	-0.35236	0.69448	-0.053418	-0.044917
09:00	-0.36693	-0.38499	-0.35155	0.74	-0.14	-0.070418
	-0.36761	-0.38462	-0.35068	0.6	-0.17267	-0.070793
	-0.36749	-0.38355	-0.34955	0.57516	-0.063356	-0.042167
09:30	-0.36855	-0.3838	-0.34874	0.7	-0.09	-0.062293
	-0.36924	-0.38368	-0.34818	0.57848	-0.041417	-0.03823
	-0.37412	-0.38349	-0.34668	0.57385	-0.16	-0.16617
10:00	-0.375	-0.38255	-0.34518	0.661	-0.09	-0.081481
	-0.38	-0.38199	-0.3443	0.57298	-0.061668	-0.062481
	-0.37393	-0.38212	-0.34274	0.70367	-0.03623	-0.021979
10:30	-0.37724	-0.38162	-0.34143	0.70798	-0.04	-0.067418
	-0.37368	-0.3818	-0.33999	0.58604	-0.053793	-0.047105
	-0.37368	-0.38143	-0.33893	0.58229	-0.060355	-0.03073
11:00	-0.39093	-0.38099	-0.33799	0.56804	-0.058855	-0.040355
	-0.38087	-0.38087	-0.33711	0.69667	-0.095544	-0.054105
	-0.37855	-0.38118	-0.33643	0.7	-0.09	-0.04
11:30	-0.37699	-0.3808	-0.33561	0.57898	-0.058543	-0.11
	-0.37593	-0.38093	-0.33536	0.652	-0.16	-0.08
	-0.37637	-0.38093	-0.33524	0.58148	-0.14	-0.08
12:00	-0.37618	-0.3808	-0.33486	0.70173	-0.053418	-0.03948
	-0.37574	-0.38037	-0.33474	0.62	-0.046355	-0.04023
	-0.37712	-0.38037	-0.33393	0.58035	-0.054043	-0.14
12:30	-0.37587	-0.38037	-0.33336	0.57235	-0.08	-0.04
	-0.37549	-0.38018	-0.33293	0.66	-0.16	-0.08
	-0.37468	-0.37974	-0.3328	0.58316	-0.12	-0.08
13:00	-0.37455	-0.37937	-0.33311	0.62	-0.071106	0
	-0.37449	-0.37993	-0.33318	0.70154	-0.04598	-0.026667
	-0.37405	-0.37962	-0.33249	0.57935	-0.062481	-0.036542
13:30	-0.38199	-0.37993	-0.33224	0.56385	-0.076168	-0.049105
	-0.35586	-0.37999	-0.33236	0.58598	-0.047668	-0.071606
	-0.35449	-0.38024	-0.33268	0.70179	-0.072293	-0.046418
14:00	-0.36674	-0.37962	-0.3323	0.58435	-0.14	0.05
	-0.36699	-0.3803	-0.33268	0.70386	-0.11104	-0.05398
	-0.37993	-0.37987	-0.33243	0.66	-0.10542	-0.057543

14:30	-0.37493	-0.37968	-0.33243	0.70823	-0.070418	-0.042605
	-0.36999	-0.37768	-0.33211	0.625	-0.071543	-0.033
	-0.37674	-0.37418	-0.33161	0.56823	-0.03973	-0.030167
15:00	-0.37893	-0.3728	-0.33155	0.6	-0.056105	-0.055605
	-0.38299	-0.37355	-0.33186	0.62	-0.039855	-0.03
	-0.38324	-0.37405	-0.33193	0.56616	-0.057543	-0.035355
15:30	-0.386	-0.37555	-0.33349	0.57835	-0.027417	-0.042167
	-0.38905	-0.37605	-0.33368	0.58266	-0.05873	-0.04848
	-0.38643	-0.37699	-0.33693	0.56504	-0.061918	-0.05698
16:00	-0.38605	-0.37818	-0.34249	0.57873	-0.1	-0.019104
	-0.38637	-0.37855	-0.34636	0.57016	-0.10523	-0.060168
	-0.38855	-0.37993	-0.35018	0.652	-0.13	-0.081481
16:30	-0.38962	-0.38018	-0.35168	0.69836	-0.1	-0.04
	-0.39093	-0.38105	-0.3533	0.71	-0.05	-0.1
	-0.39224	-0.38124	-0.35455	0.5806	-0.082856	-0.03
17:00	-0.3928	-0.38187	-0.35593	0.70111	-0.044292	-0.075918
	-0.3963	-0.3823	-0.35724	0.64	-0.062481	-0.040542
	-0.39493	-0.38299	-0.35843	0.5766	-0.076106	-0.14
17:30	-0.39562	-0.38343	-0.35943	0.69904	-0.056105	-0.040292
	-0.39712	-0.38362	-0.36018	0.70911	-0.060918	-0.046855
	<i>Hora</i>	RA2-2	RA2-10	RA2-30	RB2-2	RB2-10
18:00	-0.39974	-0.38368	-0.36136	0.59066	-0.064	-0.066731
	-0.3973	-0.38455	-0.36224	0.66	-0.046168	-0.039605
	-0.39	-0.392	-0.36224	0.70873	-0.048	0.05
18:30	-0.39737	-0.39	-0.36224	0.5821	-0.077106	-0.053418
	-0.40712	-0.38587	-0.36349	0.58429	-0.093669	-0.044917
	-0.40062	-0.3863	-0.36343	0.69279	-0.062168	-0.047668
19:00	-0.40093	-0.38712	-0.36399	0.57854	-0.054918	-0.042292
	-0.40174	-0.38749	-0.36455	0.57323	-0.064	0.02
	-0.40049	-0.38749	-0.36455	0.56916	-0.04	0.03
19:30	-0.40299	-0.38843	-0.36474	0.71179	-0.070606	-0.04
	-0.40199	-0.3883	-0.36499	0.70517	-0.03	0
	-0.40212	-0.38924	-0.36555	0.72	-0.080169	-0.044605
20:00	-0.40224	-0.39005	-0.36605	0.57554	-0.065856	-0.04873
	-0.413	-0.39055	-0.36574	0.70179	-0.071481	0.03
	-0.40393	-0.39062	-0.36593	0.62	-0.12	-0.03
20:30	-0.41255	-0.39049	-0.36624	0.57373	-0.04	0.01
	-0.40537	-0.39055	-0.36649	0.69886	-0.077731	-0.053105
	-0.40812	-0.39062	-0.36674	0.69667	-0.068543	-0.043917
21:00	-0.40574	-0.39124	-0.3668	0.70617	-0.071	-0.084231
	-0.40512	-0.39093	-0.36711	0.67	-0.04898	0
	-0.40537	-0.39162	-0.36749	0.58104	-0.067918	-0.099419
21:30	-0.40543	-0.39105	-0.36749	0.65	-0.04	-0.093981
	-0.40499	-0.3923	-0.36755	0.57923	-0.1	-0.056
	-0.40518	-0.39243	-0.36805	0.58373	-0.058418	-0.08
22:00	-0.40574	-0.39324	-0.36836	0.67	-0.067981	-0.046793
	-0.40574	-0.39374	-0.36874	0.70423	-0.048043	-0.047105
	-0.40537	-0.39418	-0.36943	0.58923	-0.058668	-0.044355

	-0.4048	-0.39349	-0.36968	0.68	-0.055605	-0.043855
22:30	-0.40493	-0.39374	-0.37018	0.625	-0.054105	-0.050668
	-0.40468	-0.39399	-0.37043	0.57366	-0.059855	-0.02973
	-0.40468	-0.39399	-0.37086	0.57691	-0.064418	-0.048418
23:00	-0.40474	-0.3943	-0.3713	0.58223	-0.064668	-0.04623
	-0.40499	-0.39399	-0.37186	0.58016	-0.064356	-0.063293
	-0.4053	-0.39393	-0.37205	0.68	-0.065356	-0.05673
23:30	-0.40512	-0.39362	-0.37199	0.58741	-0.056	-0.033
	-0.40455	-0.39293	-0.37168	0.58648	-0.078544	-0.045543
	-0.4038	-0.39193	-0.37105	0.5886	-0.047105	-0.040417
0:00:00	-0.40243	-0.39205	-0.37118	0.69729	-0.075168	-0.06123
	-0.4013	-0.39212	-0.37149	0.70667	-0.066293	-0.048793
	-0.39974	-0.3928	-0.37149	0.69942	-0.068981	-0.049793
00:30	-0.39893	-0.39199	-0.37186	0.71554	-0.066543	-0.05623
	-0.39793	-0.39237	-0.37205	0.58173	-0.063981	-0.060418
	-0.409	-0.39262	-0.37218	0.58266	-0.063793	-0.04248
01:00	-0.39643	-0.39337	-0.37199	0.58698	-0.063356	-0.084669
	-0.39574	-0.39374	-0.37199	0.57716	-0.057543	-0.052543
	-0.3958	-0.39368	-0.37143	0.70567	-0.062793	-0.04323
01:30	-0.39537	-0.3938	-0.37199	0.70567	-0.062231	-0.018354
	-0.39549	-0.39412	-0.3718	0.69773	-0.066043	-0.047168
	-0.39593	-0.39449	-0.37199	0.69917	-0.066356	-0.061043
02:00	-0.39605	-0.3948	-0.37168	0.70717	-0.068356	-0.072293
	-0.39618	-0.39437	-0.37124	0.70554	-0.063918	-0.066543
	-0.39643	-0.39468	-0.3713	0.71117	-0.079669	-0.077043
02:30	-0.39643	-0.39462	-0.37155	0.58154	-0.064668	-0.054355
	-0.3963	-0.3943	-0.37161	0.64	-0.0068538	-0.052355
	-0.39624	-0.39405	-0.37149	0.581	-0.071793	-0.04698
03:00	-0.3963	-0.39405	-0.37155	0.66	-0.064418	-0.046105
	-0.39655	-0.39418	-0.37161	0.61	-0.064731	-0.15098
	-0.39605	-0.39349	-0.37143	0.69436	-0.059605	-0.11767
03:30	-0.39618	-0.39368	-0.37118	0.5796	-0.067606	-0.048668
	-0.39568	-0.39249	-0.37055	0.56854	-0.063356	-0.059543
<i>Hora</i>	RA2-2	RA2-10	RA2-30	RB2-2	RB2-10	RB2-30
	-0.39524	-0.39224	-0.36993	0.56679	-0.040417	-0.073793
04:00	-0.39493	-0.3918	-0.36949	0.6	-0.076231	-0.05523
	-0.39487	-0.39112	-0.36936	0.57873	-0.064981	-0.05448
	-0.39499	-0.39255	-0.36955	0.69673	-0.056293	-0.04
04:30	-0.39549	-0.39274	-0.36993	0.57248	-0.065856	-0.04373
	-0.3953	-0.39343	-0.37018	0.69923	-0.047855	-0.041667
	-0.39549	-0.3938	-0.37043	0.61	-0.060043	-0.080106
05:00	-0.39518	-0.39343	-0.37055	0.7	-0.049293	-0.041417
	-0.39493	-0.39337	-0.3708	0.69035	-0.046855	-0.039667
	-0.39449	-0.39305	-0.37093	0.72	-0.075293	-0.04823
05:30	-0.39437	-0.39287	-0.37118	0.7	-0.069043	-0.062231
	-0.39368	-0.39299	-0.37143	0.57048	-0.10167	-0.035605
	-0.39312	-0.39243	-0.3713	0.62	-0.054105	-0.043855
06:00	-0.39255	-0.39224	-0.37099	0.64	-0.056355	-0.043792



	-0.39199	-0.39199	-0.3708	0.69586	-0.08	-0.12
	-0.39174	-0.39193	-0.37118	0.61	-0.062106	-0.047418
06:30	-0.39112	-0.39049	-0.37105	0.56991	-0.05198	-0.036292
	-0.39062	-0.39087	-0.37124	0.66	-0.05023	-0.05123
	-0.39043	-0.39162	-0.37161	0.68	-0.035792	-0.044417
07:00	-0.39012	-0.39149	-0.37186	0.70104	-0.054668	-0.045605
	-0.38955	-0.39199	-0.37205	0.617	-0.05698	-0.055605
	-0.38893	-0.39368	-0.37236	0.56991	-0.044042	-0.047168
07:30	-0.38843	-0.39493	-0.37224	0.70461	-0.12	-0.04
	-0.38849	-0.39618	-0.3728	0.57404	-0.056	-0.045543
	-0.38737	-0.39662	-0.363	0.56516	-0.060918	-0.030792
08:00	-0.38655	-0.392	-0.37224	0.57435	-0.064	-0.025854
	-0.38555	-0.39774	-0.37236	0.65	-0.075856	-0.050168
	-0.38449	-0.39818	-0.382	0.56791	-0.070293	-0.064
08:30	-0.38412	-0.39868	-0.382	0.68	-0.04948	-0.033792
	-0.38293	-0.39905	-0.37274	0.69673	-0.056293	-0.05173
	-0.38262	-0.39968	-0.37274	0.57385	-0.056355	-0.073731
09:00	-0.3823	-0.40012	-0.375	0.69948	-0.04823	-0.04098
	-0.3818	-0.40037	-0.37211	0.6	-0.050293	-0.04923
	-0.38062	-0.40105	-0.37193	0.68629	-0.10354	-0.044292
09:30	-0.3798	-0.40112	-0.37168	0.68998	-0.05273	-0.03448
	-0.37893	-0.40168	-0.37149	0.57623	-0.071	-0.058168
	-0.3783	-0.40162	-0.37124	0.57504	-0.068043	-0.045168
10:00	-0.37743	-0.40205	-0.37068	0.71	-0.069918	-0.084169
	-0.37687	-0.40199	-0.37024	0.6	-0.058543	-0.052855
	-0.37693	-0.40224	-0.36993	0.69523	-0.064731	-0.061105
10:30	-0.37643	-0.40243	-0.36918	0.66	-0.078731	-0.04648
	-0.37605	-0.40312	-0.36868	0.69636	-0.074981	-0.033
	-0.3758	-0.4033	-0.36811	0.69604	-0.077606	-0.064856
11:00	-0.37568	-0.40393	-0.36736	0.69873	-0.076043	-0.05123
	-0.37555	-0.40374	-0.36686	0.70823	-0.057793	-0.035105
	-0.37562	-0.4033	-0.36593	0.7	-0.051418	-0.039667
11:30	-0.3753	-0.40355	-0.36505	0.68	-0.055605	-0.070106
	-0.37487	-0.40355	-0.36405	0.69129	-0.060855	-0.058605
	-0.37424	-0.40274	-0.36299	0.61	-0.10786	-0.056293
12:00	-0.37368	-0.40205	-0.3618	0.71	-0.054793	-0.027979
	-0.37305	-0.40187	-0.36036	0.69273	-0.062293	-0.089044
	-0.3728	-0.40168	-0.36	0.57323	-0.046105	-0.056418
12:30	-0.38	-0.40262	-0.35749	0.65	-0.12	0
	-0.37211	-0.40143	-0.35524	0.68	-0.051105	-0.037667
	-0.37143	-0.40055	-0.35243	0.65	-0.025604	-0.028167
13:00	-0.37099	-0.40074	-0.34999	0.634	-0.04873	-0.059043
	-0.37105	-0.40049	-0.34849	0.57223	-0.061606	-0.038917
	-0.37099	-0.40149	-0.34705	0.69542	-0.047105	-0.037167
13:30	-0.37155	-0.40093	-0.34593	0.6	-0.04498	-0.020479
	-0.37099	-0.40124	-0.34505	0.57023	-0.058043	-0.056668
Hora	RA2-2	RA2-10	RA2-30	RB2-2	RB2-10	RB2-30
	-0.37093	-0.40124	-0.34493	0.57329	-0.043355	-0.023667

14:00	-0.37168	-0.4008	-0.3448	0.68873	-0.088606	-0.044917
	-0.38	-0.40093	-0.34461	0.65	-0.041292	-0.026167
	-0.37305	-0.40118	-0.34449	0.68548	-0.061481	-0.04373
14:30	-0.37374	-0.40199	-0.34455	0.73	-0.041105	-0.042417
	-0.37405	-0.40205	-0.34443	0.69573	-0.028917	-0.17073
	-0.37437	-0.40255	-0.34474	0.71	-0.044355	-0.047605
15:00	-0.3743	-0.40168	-0.34461	0.72	-0.048605	-0.043792
	-0.37418	-0.4018	-0.34486	0.71	-0.089606	-0.043105
	-0.37455	-0.40149	-0.34511	0.70104	-0.03798	-0.014542
15:30	-0.37499	-0.4013	-0.34511	0.64	-0.03548	-0.023667
	-0.3748	-0.40174	-0.34536	0.7	-0.071168	-0.04448
	-0.37368	-0.40174	-0.34549	0.70017	-0.023979	-0.046418
16:00	-0.37268	-0.40187	-0.34536	0.65	-0.05598	-0.032042
	-0.37161	-0.4018	-0.34574	0.617	-0.044917	-0.019667
	-0.37074	-0.40212	-0.34561	0.66	-0.14	-0.04
16:30	-0.37093	-0.40293	-0.34643	0.7	-0.073481	-0.076543
	-0.37086	-0.40237	-0.34661	0.63	-0.021979	-0.023167
	-0.37086	-0.40212	-0.34661	0.66	-0.069418	-0.065106
17:00	-0.37049	-0.4023	-0.34668	0.57323	-0.015667	-0.021854
	-0.36968	-0.40212	-0.34699	0.69811	-0.024667	-0.022917
	-0.36974	-0.40124	-0.34705	0.67	-0.063856	-0.028792
17:30	-0.3703	-0.40124	-0.3473	0.58	-0.056355	-0.026479
	-0.3708	-0.4008	-0.34749	0.6851	-0.089356	-0.025104
	-0.37086	-0.40055	-0.34768	0.63	-0.1	-0.08
18:00	-0.37155	-0.4008	-0.34836	0.69579	-0.03348	-0.078294
	-0.37224	-0.39962	-0.34799	0.64	-0.0051038	-0.0066663
	-0.38	-0.39905	-0.34793	0.56566	-0.068481	-0.038355
18:30	-0.37324	-0.39855	-0.3478	0.625	-0.038292	-0.030605
	-0.37412	-0.39787	-0.3478	0.56979	-0.054043	-0.04223
	-0.37487	-0.3973	-0.34793	0.61	-0.048355	-0.038792
19:00	-0.3758	-0.39593	-0.3478	0.70098	-0.082606	-0.05173
	-0.37574	-0.39612	-0.34793	0.55998	-0.058793	-0.017729
	-0.37674	-0.39543	-0.34786	0.54879	-0.064	-0.031167
19:30	-0.37555	-0.39424	-0.34811	0.62	-0.05323	-0.036542
	-0.37574	-0.39324	-0.34799	0.57198	-0.04773	-0.03673
	-0.37599	-0.39324	-0.34818	0.65	-0.056605	-0.048
20:00	-0.37605	-0.3928	-0.34811	0.56879	-0.070918	-0.05223
	-0.37562	-0.39262	-0.34811	0.56048	-0.068731	-0.021792
	-0.37355	-0.39249	-0.3483	0.68654	-0.060793	-0.056
20:30	-0.35849	-0.39149	-0.34824	0.61	-0.072168	-0.03198
	-0.35918	-0.39155	-0.34811	0.5651	-0.072731	-0.061731
	-0.35443	-0.39155	-0.34811	0.62	-0.042542	-0.072106
21:00	-0.34274	-0.3908	-0.34818	0.608	0.003084	-0.10648
	-0.34193	-0.39118	-0.34849	0.63	-0.034417	-0.031167
	-0.34011	-0.39049	-0.34843	0.66	-0.0073539	-0.020479
21:30	-0.34061	-0.39118	-0.34874	0.53304	-0.04448	-0.056
	-0.33711	-0.39187	-0.34893	0.65	-0.056605	-0.029605
	-0.3358	-0.39193	-0.34918	0.625	-0.024792	-0.048

22:00	-0.33005	-0.39187	-0.34936	0.61	-0.063668	-0.05048
	-0.357	-0.39293	-0.34974	0.61	-0.05448	-0.05223
	-0.354	-0.39305	-0.35018	0.62	-0.046543	-0.029292
22:30	-0.37399	-0.39305	-0.35043	0.68	-0.076231	-0.078294
	-0.357	-0.39268	-0.35061	0.53466	-0.057918	-0.056668
	-0.357	-0.3933	-0.35105	0.66	-0.076293	-0.033
23:00	-0.36	-0.39349	-0.35124	0.68	-0.22024	-0.042292
	-0.366	-0.39362	-0.35136	0.67642	-0.05123	-0.041792
	-0.363	-0.39393	-0.35155	0.66	-0.067418	-0.05048
23:30	-0.357	-0.39349	-0.35155	0.617	-0.059605	-0.038792
	-0.338	-0.39474	-0.35199	0.65	-0.054855	-0.083044
<i>Hora</i>	RA2-2	RA2-10	RA2-30	RB2-2	RB2-10	RB2-30
	-0.36	-0.3943	-0.35205	0.62	-0.048543	-0.065981
0:00:00	-0.35	-0.39468	-0.35193	0.65673	-0.12	-0.1
	-0.354	-0.39512	-0.35243	0.63	-0.094169	-0.069293
	-0.3553	-0.39493	-0.35236	0.66	-0.057668	-0.03598
00:30	-0.34	-0.39555	-0.35243	0.52904	-0.069918	-0.13911
	-0.34749	-0.37	-0.35224	0.66	-0.21424	-0.056043
	-0.357	-0.39618	-0.3523	0.64	-0.069356	-0.067168
01:00	-0.357	-0.39455	-0.35199	0.67	-0.04373	-0.032292
	-0.344	-0.33849	-0.34755	0.52954	-0.04	0.01
	-0.354	-0.35018	-0.34755	0.53598	-0.075668	-0.047668
01:30	-0.347	-0.398	-0.34011	0.61	-0.05123	-0.022354
	-0.35	-0.363	-0.33861	0.6	-0.042542	-0.03298
	-0.35	-0.389	-0.3383	0.66723	-0.059605	-0.048
02:00	-0.397	-0.363	-0.3388	0.625	-0.076293	-0.04148
	-0.354	-0.38	-0.33949	0.68	-0.024042	-0.023979
	-0.369	-0.385	-0.33999	0.66	-0.069418	-0.035167
02:30	-0.36	-0.33911	-0.34111	0.73	-0.03898	-0.039105
	-0.354	-0.3473	-0.34224	0.7	-0.073731	-0.041792
	-0.35	-0.35286	-0.34343	0.7	-0.03373	-0.045042
03:00	-0.363	-0.35711	-0.35	0.66	-0.060293	-0.043355
	-0.363	-0.36011	-0.34474	0.52697	-0.063418	-0.026542
	-0.35	-0.3623	-0.34518	0.64	-0.032167	-0.04073
03:30	-0.347	-0.36449	-0.34568	0.67	-0.061918	-0.03973
	-0.354	-0.3668	-0.34636	0.53235	-0.04973	-0.04573
	-0.31705	-0.34486	-0.34524	0.64	-0.032292	-0.027854
	-0.32343	-0.34199	-0.34536	0.68	-0.039292	-0.025167
<b>Máximo</b>	<b>-0.21961</b>	<b>-0.2773</b>	<b>-0.22167</b>	<b>0.74</b>	<b>0.003084</b>	<b>0.07</b>
<b>Mínimo</b>	<b>-0.413</b>	<b>-0.415</b>	<b>-0.382</b>	<b>0.52697</b>	<b>-0.22024</b>	<b>-0.20373</b>
<b>Desv. Es.</b>	<b>0.028164477</b>	<b>0.02175426</b>	<b>0.02178239</b>	<b>0.05495584</b>	<b>0.02941455</b>	<b>0.02975883</b>
<b>Promedio</b>	<b>-0.367425766</b>	<b>-0.37998236</b>	<b>-0.34735075</b>	<b>0.6390379</b>	<b>-0.06790873</b>	<b>-0.05122006</b>

Anexo 9

Curvas de calibración de los métodos para detección de las especies de interés utilizados durante la experimentación de humedales artificiales de flujo vertical

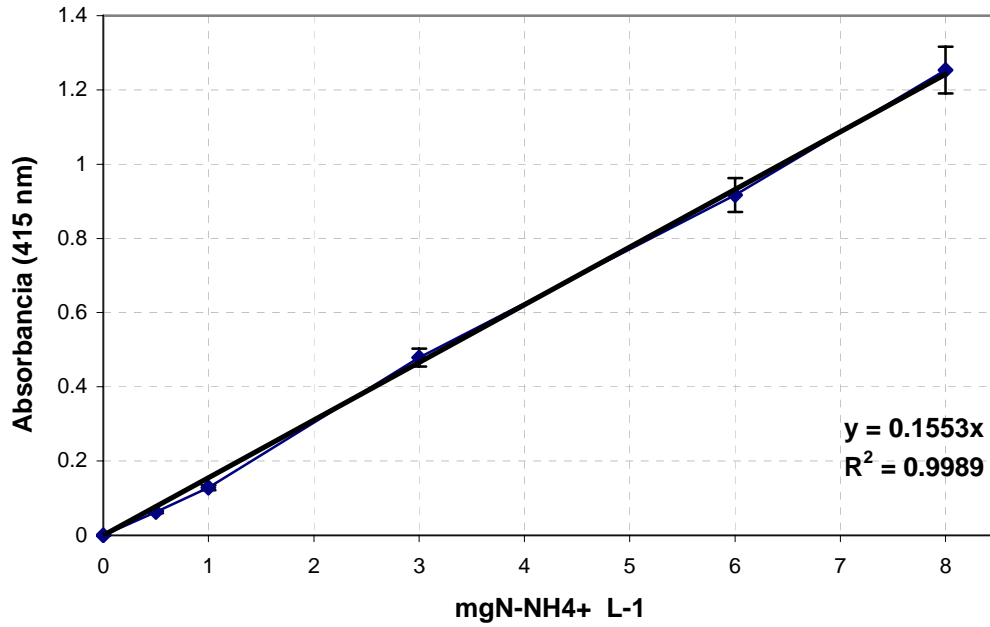


Figura A.9.1 Curva de calibración de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> por método de Nessler

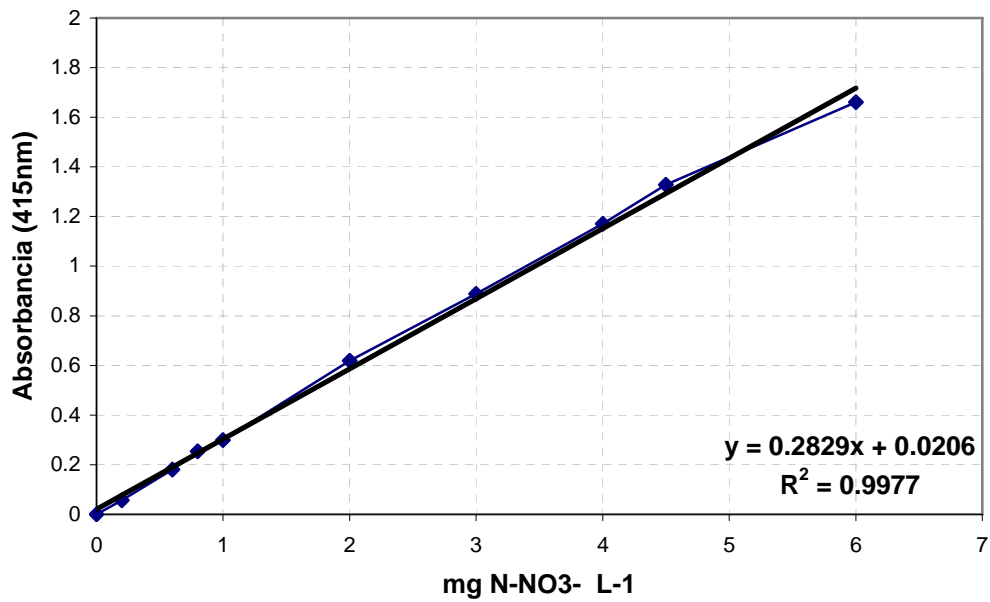


Figura A.9.2 Curva de calibración de nitrato por el método de salicilato de sodio

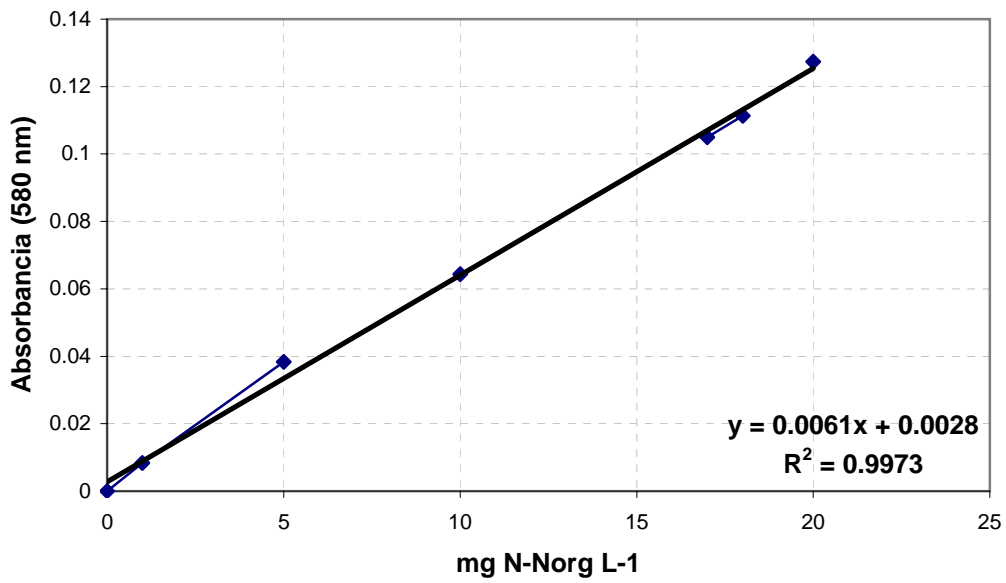


Figura A.9.3 Curva de calibración de nitrógeno orgánico por el método de Biuret-Lowry

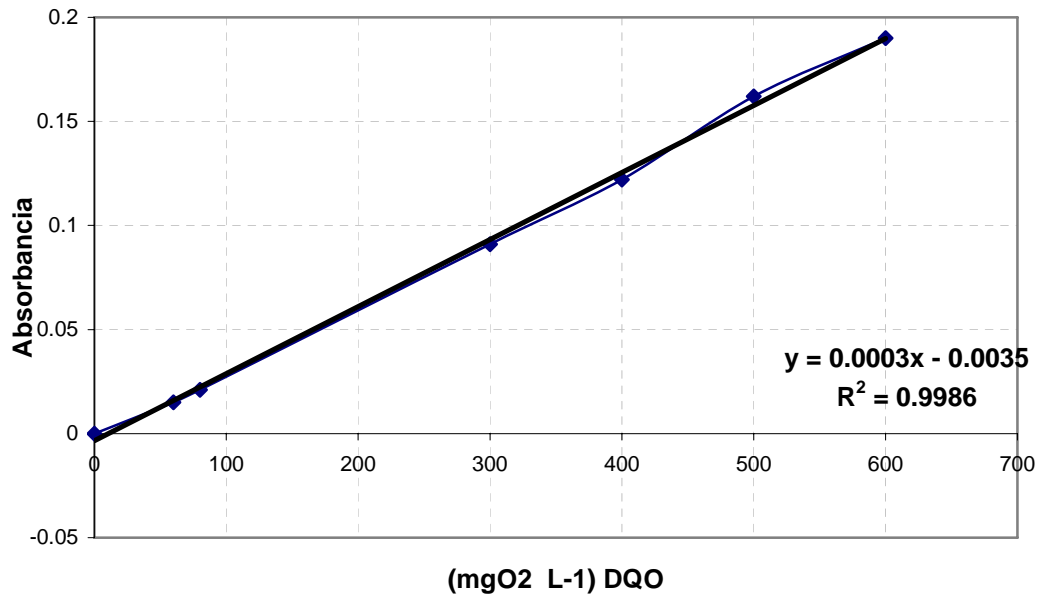


Figura A.9.4 Curva de calibración de DQO

## Anexo 10 Análisis de Varianza

Se realizó un análisis de varianza para cada una de las especies de nitrógeno, con el programa STATGRAPHICS. A partir de un diseño categórico multifactorial donde se estimaron los efectos de tres factores. A continuación se muestran la base de diseño, los factores y las respuestas.

### A.10.1 Análisis de varianza para ión amonio

Se realizó el análisis multifactorial de la varianzas para  $[\text{NH}_4^+]$  ANDEVA. A partir de varias pruebas y gráficos se encontró que factores tienen un efecto estadísticamente significativo en  $[\text{NH}_4^+]$ . Así como el análisis de las interacciones significativas entre los factores. Los gráficos de medias A.10.1, A.10.2, A.10.3 muestran las medias que son significativamente diferentes de otras.

Análisis de la Varianza para  $\text{NH}_4$  - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Planta	0.564267	1	0.564267	5.39	0.0359
B:Carga	3.31527	1	3.31527	31.64	0.0001
C:Profundidad	0.747175	2	0.373588	3.57	0.0560
INTERACCIONES					
AB	0.4056	1	0.4056	3.87	0.0693
AC	1.20116	2	0.600579	5.73	0.0152
BC	0.733958	2	0.366979	3.50	0.0584
RESIDUOS	1.46698	14	0.104784		
TOTAL (CORREGIDO)	8.4344	23			

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

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de  $\text{NH}_4$  en las contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que 3 p-valores son inferiores a 0.05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en  $\text{NH}_4$  para un 95.0%.

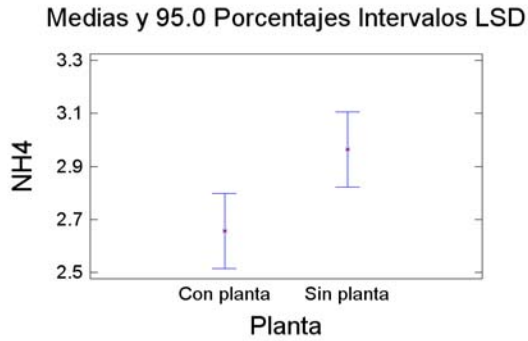


Figura A.10.1 Gráfico de variabilidad en medias a un 95% para los reactores RA1 RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para  $[\text{NH}_4^+]$

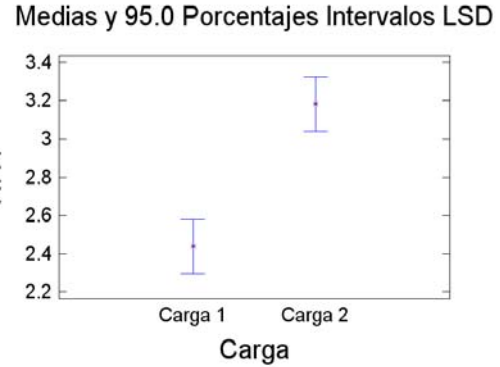


Figura A.10.2 Gráfico de variabilidad en medias a un 95% para los reactores RA1 RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) durante la primera etapa ( $450 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa) y segunda etapa ( $225 \text{ mg L}^{-1}$  de sacarosa) para  $[\text{NH}_4^+]$

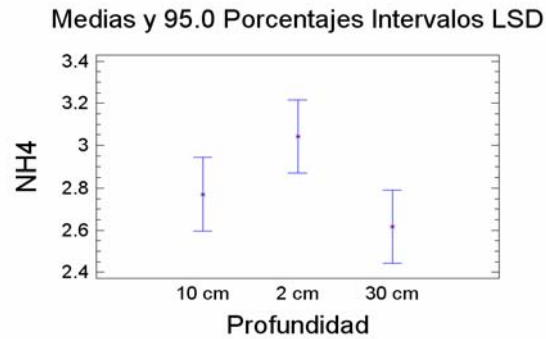


Figura A.10.3 Gráfico de variabilidad en medias a un 95% para los reactores RA1 RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) a las distintas profundidades de la parte superior del reactor para  $[\text{NH}_4^+]$

### A.10.2 Análisis de varianza para nitratos

Se realizó un análisis multifactorial de la varianza para  $[\text{NO}_3^-]$  mostrados en la tabla de ANDEVA. A partir de varias pruebas y gráficos se encontraron los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo para  $[\text{NO}_3^-]$ . Se muestran tres gráficos de varianza de medias para comparar el efecto significativo de los factores de la planta, la carga orgánica y la profundidad a un 95% de confianza.

Análisis de la Varianza para NO<sub>3</sub> - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Planta	0.00770417	1	0.00770417	4.67	0.0485
B:Carga	0.329004	1	0.329004	199.54	0.0000
C:Profundidad	0.0133	2	0.00665	4.03	0.0414
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.00120417	1	0.00120417	0.73	0.4072
AC	0.0177333	2	0.00886667	5.38	0.0185
BC	0.00813333	2	0.00406667	2.47	0.1209
RESIDUOS	0.0230833	14	0.00164881		
TOTAL (CORREGIDO)	0.400163	23			

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

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de NO<sub>3</sub> en las contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que 4 p-valores son inferiores a 0.05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en NO<sub>3</sub> para un 95.0%.

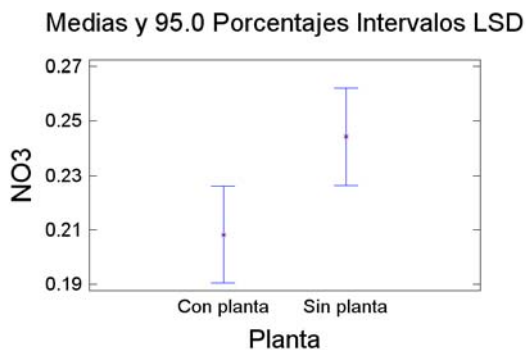


Figura A.10.4 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]

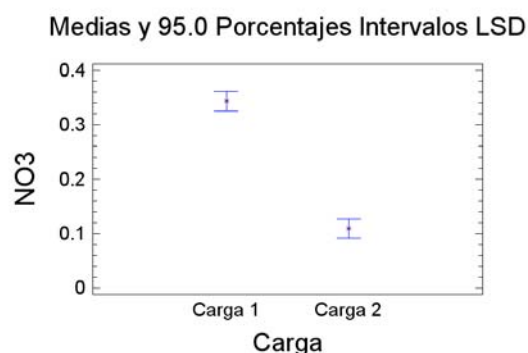


Figura A.10.5 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) al cambiar la carga orgánica de la primera etapa (450 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa) a la segunda etapa (225 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa) para [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]



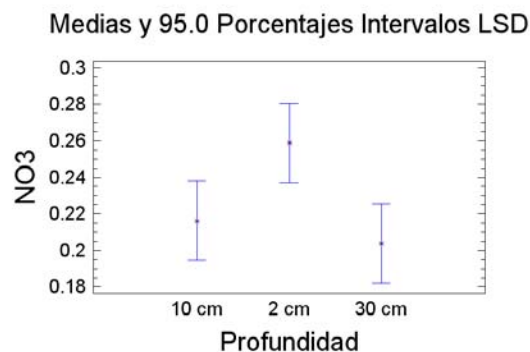


Figura A.10.6 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta ) a través de las profundidades 2, 10 y 30 cm , medidas desde la parte superior del reactor para [NO<sub>3</sub>]

### A.10.3 Análisis de varianza para nitrógeno orgánico

Se realizó un análisis multifactorial de la varianza para nitrógeno orgánico, a partir de varias pruebas y gráficos para determinar los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo en el nitrógeno orgánico. Las pruebas de la tabla de ANDEVA permiten conocer los factores que tienen un efecto significativo en nitrógeno orgánico.

Análisis de la Varianza paraNorg - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Planta	0.6534	1	0.6534	0.07	0.7947
B:Carga	20.6462	1	20.6462	2.22	0.1582
C:Profundidad	21.6638	2	10.8319	1.17	0.3401
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	35.6241	1	35.6241	3.83	0.0704
AC	22.781	2	11.3905	1.23	0.3231
BC	1.63457	2	0.817287	0.09	0.9163
RESIDUOS	130.071	14	9.29079		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	<b>233.074</b>	<b>23</b>			

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

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Norg en las contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que ningún P-valor es inferior a 0.05, ninguno de los factores o interacciones tienen efecto estadísticamente significativo en Norg para un nivel de confianza del 95.0%.

Contraste Múltiple de Rangos para Norg según Carga

Método: 84.0 porcentaje LSD

Carga	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Carga 2	12	15.48	0.879905	X
Carga 1	12	17.335	0.879905	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
Carga 1 - Carga 2	*1.855	1.84652

\* indica una diferencia significativa.

El StatAdvisor

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. La mitad inferior de la salida muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de uno de los pares, indica que éste muestra diferencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza 84.0%. En la parte superior de la página, se identifican 2 grupos homogéneos según la alineación del signo X en la columna. Dentro de cada columna, los niveles que tienen signo X forman un grupo de medias entre las cuales no hay diferencias estadísticamente significativas. El método actualmente utilizado para discernir entre las medias es el procedimiento de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Con este método, hay un 16.0% de riesgo de considerar cada par de medias como significativamente diferentes cuando la diferencia real es igual a 0.

Medias y 84.0 Porcentajes Intervalos LSD

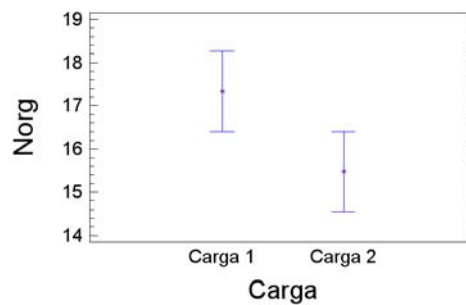


Figura A.10.7 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para nitrógeno orgánico a un 84% de confianza al cambiar la carga orgánica de la primera etapa (450 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa) a la segunda etapa (225 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa)

## A 10.4 Análisis de varianza para nitrógeno total

Se realizó un análisis multifactorial de la varianza para el nitrógeno total. Al realizar varias pruebas y gráficos se encontró que factores tienen un efecto significativo en el nitrógeno total. La tabla ANDEVA se puede conocer las relaciones significativas entre los factores. A partir del gráfico de medias a un 95% de confianza se puede conocer que medias son significativamente diferentes de otras. El gráfico de interacciones mostradas nos permite conocer los efectos significantes.

### Resumen del procedimiento

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Planta	4.77042	1	4.77042	1.00(1)	0.5000
B:Carga	108.29	1	108.29	22.61(0)	0.0003
C:Profundidad	22.6377	2	11.3189	2.36(0)	0.1305
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.22815	1	0.22815	0.05(0)	0.8304
AC	27.7159	2	13.8579	2.89(0)	0.0888
BC	6.44291	2	3.22145	0.67(0)	0.5261
RESIDUOS	67.0573	14	4.78981		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	<b>237.142</b>	<b>23</b>			

Los cocientes F están basados en los siguientes cuadrados medios:

- (0) Residuos
- (1) A

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Ntotal en las contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que un p-valor es inferior a 0.05, este factor tiene efecto estadísticamente significativo en Ntotal para un 95.0%.

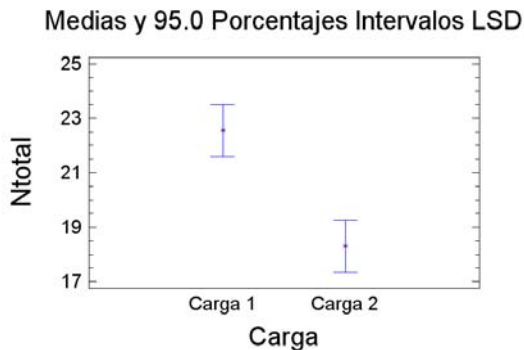


Figura A.10.8 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para nitrógeno total a un 95% de confianza al cambiar la carga orgánica de 450 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa a 225 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa.

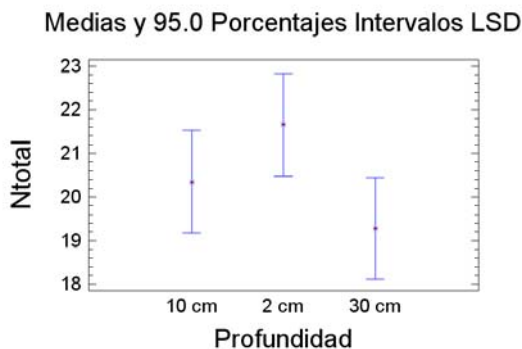


Figura A.10.9 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) a través de las profundidades 2, 10 y 30cm, medidas desde la parte superior del reactor para nitrógeno total a un 95% de confianza

### A.10.5 Análisis de varianza para DQO

Se realizó el análisis multifactorial de la varianzas para la DQO (ANOVA en inglés y ANDEVA en español). A partir de varias pruebas y gráficos se encontró que factores tienen un efecto estadísticamente significativo en la DQO, así como el análisis de las interacciones significativas entre los factores. En dicho análisis multifactorial de varianzas la variable dependiente fue la DQO y los factores fueron la carga orgánica y la planta.

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

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Carga orgánica	10975.0	1	10975.0	100.84	0.0006
B:Planta	1004.19	1	1004.19	9.23	0.0385
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	531.543	1	531.543	4.88	0.0916
RESIDUOS	435.339	4	108.835		
TOTAL (CORREGIDO)	12946.0	7			

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

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de DQO en las contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que 2 p-valores son inferiores a 0.05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en DQO para un 95.0%.

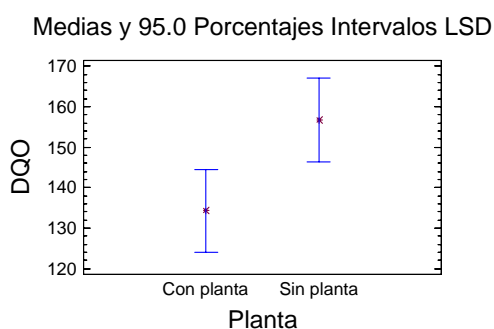


Figura A.10.10 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para DQO

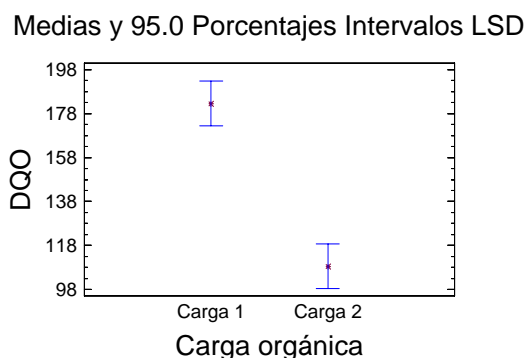
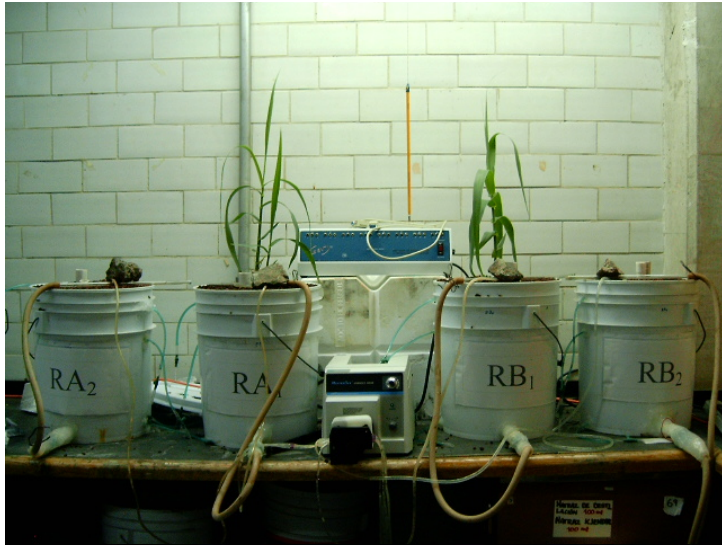


Figura A.10.11 Gráfico de variación de medias para los reactores RA1 y RB1 (con planta) y RA2, RB2 (sin planta) para DQO al cambiar la carga orgánica de la primera etapa (450 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa) a la segunda etapa (225 mg L<sup>-1</sup> de sacarosa)

### Anexo 11. Acervo fotográfico



*Figura A.11.1 Cuatro reactores que simulan humedales artificiales de flujo vertical a escala de laboratorio (tomada el 15 de febrero de 2006)*



*Figura A.11.2 Cuatro reactores que simulan humedales artificiales de flujo vertical a escala de laboratorio (tomada 25 de mayo de 2006)*

## Bibliografía

Atlas, R.M., Bartha, R. 2001. Ecología microbiana y microbiología ambiental. Ed. Addison Wesley. 4a. Edición. México D.F. México.

Alonso, A. 2001. Valoración del efecto de la degradación ambiental sobre los macroinvertebrados bentónicos en la cabecera del río Henares. Departamento de Ecología, Universidad de Alcalá. Madrid, España.

APHA-AWWA-WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. American Public Health Association-American Water Works Association-Water Pollution Control Federation. Ed. Díaz de Santos. Madrid, España. Atlas, R.M., Bartha, R. 2001. Ecología microbiana y microbiología ambiental. Ed. Addison Wesley. 4a. Edición. México D.F. México.

Boltz, D. F. 1958. Colorimetric Determination of Nonmetals. Vol. VIII, Interscience Publishers Inc., Nueva York, EEUUA.

Boyer, R.F. 1993. Modern Experimental Biochemistry. The Benjamín Comings Publishing Company. Segunda edición. Nueva York, EEUUA.

Crumpton, T., Isenhardt, M., Fisher, S.W. 1993. Fate of non-point source nitrate loads results from experimental wetlands mesocosms. En Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, CRC Press Inc. Cap. 29. Pp. 283-291. Boca Raton, FL, EEUUA.

DGN. 1996. Norma Oficial Mexicana **NOM-001-ECOL-1996**, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Poder Ejecutivo Federal. Dirección General de Normas. México D.F. México.

DGN. 2001. Norma Mexicana **NMX-AA-079-SCFI-2001** Análisis de aguas - determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-079-1986). Poder Ejecutivo Federal. Dirección General de Normas. México D.F. México.

Durán-de-Bazúa, C (Ed.). 1994. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria química y de proceso. Volumen 7, Serie Química Ambiental del Agua, Publicación PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM, México D.F., Pág. 45.

Durán-de-Bazúa, C. (Ed.). 2005. Humedales artificiales en México: Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales. Durán-de-Bazúa, C., Haberl, R., Kreiner, I., Krishnan-Ranjani, Luna-Pabello, V. M., Ramírez-Burgos, L.I. (Profesores); Fenoglio-Limón, F. E., García-Vázquez, L., Guzmán-Aguirre, S., Juárez, C.H., Kneidinger, Ch., Millán-Hernández, S.E., Miranda-Ríos, M., Ramírez-Carrillo, H.F., Rodríguez-Cruz, A., Rodríguez-Monroy, J., Salinas-Castillo, N.V., Sánchez-García, H., Schaller, P., Soto-Esquivel, M.G., Varela-Montellano, E. (Estudiantes). Vol. 6, Serie: Química Ambiental del Agua. Púb. Prog. Ing.

Química Ambiental y Química Ambiental ISBN 968-36-9443-8. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. 185 Págs. 200 ejemplares, 1a. Ed. (1999), 194 Págs. 500 ejemplares, 2a. Ed. (2001), 205 Págs. 500 ejemplares, 3a. Ed. (2005). En prensa.

Esponda, P.L. 2001. Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. Agosto 20. México D.F. México.

Fenoglio-Limón, F.E. 2003. Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

García-Vázquez, L. 2005. Uso de reactores biológicos (humedales artificiales de flujo vertical) para depurar aguas residuales de tipo sanitario. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, BUAP. Febrero 4. Puebla, Pue., México.

Guido-Zárate, A. 2006. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan humedales artificiales. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería ambiental, Agua). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

IWA. 2000. IWA Specialist group on use of macrophytes in water pollution control. Constructed wetland for pollution control, processes, performance, design, and operation. Scientific and Technical Report No. 8. Londres, Reino Unido.

Kneidinger, Ch. 1997. Construction and investigation of a constructed wetland system for the tertiary treatment of the maize processing industrial wastewater in Mexico. Master of Engineering Thesis. Universidad BOKU de Viena. Mayo. Viena, Austria.

Luna-Pabello, V.M., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 1998. Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales. Solicitud de Registro: Diciembre 15, 1998. Cesión irrestricta de derechos a la UNAM. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Dirección Divisional de Patentes, México. Patente Núm. 210924. Otorgada el 21 de octubre de 2002. México D.F. México.

Pacheco-Ávila, J., Pat-Canul, R., Cabrera-Sansores, A. 2002. Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. Ingeniería. 6-3:73-81.

Reyes-Luz, M.I. 2006. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Rodríguez-Cruz, A., Varela-Montellano, E. 2003. Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Estudios Superiores "Zaragoza", UNAM. Septiembre 26. México D.F. México.

Rodríguez-Monroy, J. 2005. Estudio de la remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Soto-Esquivel, M.G. 2003. Efecto de la generación de oxígeno fotosintético en un sistema sólido-líquido-gas. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería ambiental, Agua). Facultad de Química, UNAM. México D. F. México.}

Tylova-Munzarova, E., Lorenzen, B., Brix, H., Votrubova, O. 2005. The effects of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  on growth, resource allocation, and nitrogen uptake kinetics of *Phragmites australis* and *Glyceria maxima*. Aquatic Botany. 81:326–342.

Watson, J.T., Danzig, A.J. 1993. Pilot-Scale nitrification studies using vertical-flow and shallow horizontal-flow constructed wetland cells. En Constructed Wetlands for Water Quality Improvement, CRC Press Inc. Cap. 31. Pp. 301-313. Boca Raton, FL, EEUUA.

Zhu, T., Sikora, F.J. 1995. Ammonium and nitrate removal in vegetated and unvegetated gravel bed microcosm wetlands, Water Science Technology. 32(3):219-228.

#### **Documentos consultados en línea (redes internacionales)**

**Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.** (INEGI) 2003. Estadísticas Ambientales. (Agua suministrada y desinfectada por entidad federativa, 2000 a 2003, Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales y capacidad instalada por entidad federativa, 2000 a 2003) [en línea]. <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.asp> [Consulta:23-Marzo-2006].

**Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.** (SEMARNAT) 2001. Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental. Normas oficiales mexicanas [en línea]. <http://www.semarnat.gob.mx/> [Consulta: 02-Febrero-2006].