

TESIS DEFENDIDA POR  
**Julio Alejandro Sánchez-Aldana López**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



---

Dr. Manuel Alberto Segovia Quintero  
*Director del Comité*



---

M. en C. Josefina Rodríguez Jacobo  
*Miembro del Comité*



---

Dr. Benjamín Barón Sevilla  
*Miembro del Comité*



---

Dra. Meritxell Riquelme Pérez  
*Coordinador del programa de  
posgrado en Acuicultura y  
Biotecnología Marina*



---

Dr. David Hilario Covarrubias  
Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

28 de Marzo de 2008

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE  
ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
CON ORIENTACIÓN EN ACUICULTURA**

---

**CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO DE MASA DE UN SISTEMA CERRADO,  
PARA EL APROVECHAMIENTO DE SUS EFLUENTES EN HIDROPONIA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

**JULIO ALEJANDRO SÁNCHEZ-ALDANA LÓPEZ**

Ensenada, Baja California, México, Marzo del 2008

RESUMEN de la tesis de Julio Alejandro Sánchez-Aldana López, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en Acuicultura, Ensenada, Baja California. Marzo del 2008.

## CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO DE MASA DE UN SISTEMA CERRADO, PARA EL APROVECHAMIENTO DE SUS EFLUENTES EN HIDROPONIA

Resumen aprobado por:

---

Dr. Manuel Alberto Segovia Quintero  
Director de Tesis

En los últimos años se ha incrementado el interés por integrar la producción acuícola con los cultivos hidropónicos que da lugar a un sistema de acuaponia (SA). Esta técnica puede ser una importante alternativa comercial en la remoción de nutrientes de los efluentes acuícolas y en la generación de ganancias con un cultivo vegetal. En este estudio, con la toma de muestras de agua por semana, se estimó la concentración de los nutrientes: el nitrógeno amoniacal total (NAT), el amonio no ionizado ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), los nitritos ( $\text{NO}_2$ ), el fósforo (P) y el potasio (K), por medio del análisis químico y un espectrofotómetro. Con las concentraciones se caracterizó el flujo de masa de SA y se elaboró un balance de masa de los nutrientes en un sistema hidropónico (SH), donde se cultivó la fresa *Fragaria ananassa* variedad camarosa, y un sistema de recirculación acuícola (SRA) donde se cultivo en forma hiper-intensiva la tilapia nilótica *Oreochromis niloticus*.

A lo largo del periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S) de SH, se encontraron los valores promedio de: la temperatura de 25.9°C, 24.8°C y 20°C, la conductividad eléctrica (CE) de 1.65 mS/cm, 1.643 mS/cm y 1.641 mS/cm, la  $[\text{O}_2]$  de 5.5 mg/L, 5.7 mg/L y 7.9 mg/L, el pH de 7.04, 7.03 y 7.22, la [NAT] de 10.37 mg/L, 6.3 mg/L y 3.7 mg/L, la  $[\text{NH}_3\text{-N}]$  de 0.052 mg/L, 0.022 mg/L y 0.021 mg/L, la  $[\text{NO}_2]$  de 2.62 mg/L, 2.63 mg/L y 1.27 mg/L, la [P] de 4.48 mg/L, 4.41 mg/L y 4.27 mg/L y la [K] de 17.15 mg/L, 16.2 mg/L y 15.9 mg/L. La densidad inicial del SRA fue de 31.9 kg/m<sup>3</sup> y la final fue de 50.7 kg/m<sup>3</sup>. En SH se cultivaron 400 plántulas utilizando la técnica de flujo de nutrientes (TFN) en 4 niveles con perlita como sustrato. Los resultados del balance de masa en SA indican valores promedio de NAT,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2$ , P y K (mg/min) de producción en TC de: 243.4, 1.824, -0.7, 1.8 y 56; y valores de remoción en el biofiltro (B) de: 227.3, 1.817, 8.9, 0.84 y 54.3; y en SH de: 16.1, 0.007, 8.2, 0.96 y 1.7.

Se observaron deficiencias en el cultivo de *F. ananassa* y la adición de  $\text{K} > \text{Ca} > \text{Fe}$ , es requerida. La caracterización del flujo de masa servirá para delimitar el tamaño de un cultivo de *F. ananassa* en función del cultivo de *O. niloticus*, en estudios futuros.

Palabras clave: *Oreochromis niloticus*, *Fragaria ananassa*, hidroponia, sistema de recirculación acuícola, acuaponia, balance de masa.

ABSTRACT of the thesis presented by Julio Alejandro Sánchez-Aldana López as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree with Orientation in Aquaculture. Ensenada, Baja California. March 2008.

## MASS FLOW CHARACTERIZATION OF A CLOSED SYSTEM, FOR THE REUSE OF ITS EFFLUENTS IN HYDROPONICS

In recent years, there has been an increasing interest in the integration of aquaponics systems (SA) that is the merge between the recirculating aquaculture production and the hydroponics technique. Aquaponics can become an important commercial alternative for the removal of nutrients of aquaculture effluents and as a secondary source of income due to the culture of vegetables. In this study, the concentration of the nutrients that were sampled every week: total ammonia nitrogen (TAN), un-ionized ammonia (NH<sub>3</sub>-N), nitrite (NO<sub>2</sub>), phosphorus (P) and potassium (K), concentrations were determined. Once the nutrient concentrations in the AS were characterized, a nutrient mass balance was performed in the hydroponics system (SH) where the strawberry *Fragaria ananassa*, camarosa variety was cultivated and in the recirculating aquaculture system (SRA), where the Nile tilapia *Oreochromis niloticus* was cultured.

Throughout the experimental period, in the culture tank (TC), the entrance (E) and the exit (S) of SH, an average value of temperature of 25.9°C, 24.8°C and 20°C, electrical conductivity (CE) of 1.65 mS/cm, 1.643 mS/cm and 1.641 mS/cm, an [O<sub>2</sub>] of 5.5 mg/L, 5.7 mg/L and 7.9 mg/L, pH of 7.04, 7.03 and 7.22, [TAN] of 10.37 mg/L, 6.3 mg/L and 3.7 mg/L, [NH<sub>3</sub>-N] of 0.052 mg/L, 0.022 mg/L and 0.021 mg/L, [NO<sub>2</sub>] of 2.62 mg/L, 2.63 mg/L and 1.27 mg/L, [P] of 4.48 mg/L, 4.41 mg/L and 4.27 mg/L and [K] of 17.15 mg/L, 16.2 mg/L and 15.9 mg/L were determined, respectively. The initial culture density in the SRA was 31.9 kg/m<sup>3</sup> and the final 50.7 kg/m<sup>3</sup>. In the SH, in a four levels system using perlite as substrate, 400 plants were cultured using the nutrient flow technique (NFT). The resulting mass balance in SA gave an average values of TAN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K at TC of: 243.4, 1.824, -0.7, 1.8 y 56 mg/min; in the biofilter of: 227.3, 1.817, 8.9, 0.84 y 54.3 mg/min; and in SH of: 16.1, 0.007, 8.2, 0.96 y 1.7 mg/min.

Deficiencies in the culture of *F. ananassa* were observed through-out the experiment and the addition of K > Ca > F, is required. The mass flow characterization will serve to determine the size of *F. ananassa* cultivar based on an *O. niloticus* cultivar, in future studies.

Key words: *Oreochromis niloticus*, *Fragaria ananassa*, hydroponics, recirculating aquaculture system, aquaponics, mass balance.

## **DEDICATORIA**

A las dos personas que me han dado todo lo que soy, Alejandro y Araceli, por su eterno amor, apoyo y fuerza para siempre salir adelante.

A la mujer más divertida del mundo, mí adorada hermana Desirée y por supuesto, a su más nueva creación, Akira.

A mi compañera de vida, Verónica.

A todos mis hermanos de vida.

A mí, por siempre terminar lo que comienzo e imponerme nuevos retos.

## AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Dr. Manuel Alberto Segovia Quintero por su apoyo para realizar este trabajo y por haber confiado en mí al ingresar a este posgrado.

A mis adorados padres Araceli y Alejandro, por estar siempre tan cerca en todo momento, por el apoyo de toda la vida, su eterno impulso y el amor de siempre. Por enseñarme que las cosas dejan de ser complejas, hasta que las haces.

A mi hermana del alma Desirée, por tu enorme nobleza, tus desequilibrados y absurdos pensamientos, por ser tan fuerte, por siempre apoyarme, creer en mí y siempre estar conmigo. Te adoro mi hermana y también a ti Akira.

A mi abuela Dalila, por ser simplemente única y divertida, por su forma de ver y vivir la vida, por tener fuerza para salir adelante siempre haciendo todo a su modo.

A mi abuelo Julio, donde sea que estés, siempre te recordare con mucho orgullo.

A mi mama Alma y Mini, por todo su cariño y apoyo, a mis primos hermanos Poncho y Carlos, por compartir toda una vida como hermanos, a Pablo por lo anterior y por mostrarnos la maravillosa Sierra Tarmaura, por compartir tu trabajo, llenar de orgullo a la familia y continuar con tu camino de logros.

A mis tías Janine, Lorena, Karina y Margely por creer en mí y por supuesto gracias a todos mis primos, en especial a “Gilbertito”.

A mis tíos Toño, Francisco, Diego y Horacio, por todos los momentos juntos, por su apoyo, amistad y por demostrarme lo fuerte que es la familia. A Angélica, Alina y Roxana, por todas las atenciones.

A la familia Olofsson por la gran suerte de haberlos conocido y seguir siendo una parte tan importante de mi vida, gracias Mónica, Héctor, Jorgen y Linda.

A mis hermanos de vida, Diego Vea “primo” por ser un gran apoyo durante esta maestría, compañero y hermano durante casi 10 años, Eduardo Sierra por ser un gran hermano, demostrarnos que se puede triunfar en cualquier parte del mundo y por compartir todo lo que sabes, Erick Bravo por tu gran amistad chiquitín, por todos los recuerdos y por siempre estar ahí, Nicolet Arano por siempre estar ahí y por todas las porras, Mari Carmen Ruiz e Iram Huerta por los recuerdos y la amistad. A los hermanos que siempre están presentes, los de antaño, Jorge H. López “jou”, por esa amistad entrañable que sigue creciendo, por estar presente todo el tiempo, por las risas y los mejores momentos, Gabriel González “mijo”, por esa amistad que a pesar de la distancia se mantiene siempre fuerte, Rafael Cortés “mafo” por tantas risas mientras crecimos, Alejandra Torcid mi queridísima perra. A mis compañeros de la especialidad en deportes de aventura (jajaja), mis

grandes amigos Eduardo Prieto “lalito”, Roger Frías “roy”, Bruno Mateotti “bruner”, Alejandro Beltrán “alex”, Ricardo Gonzales “richard” y Alberto Alvino “albertus”.

A mis compañeros de clases, con quienes compartí excelentes momentos de ñoñés. Nuevamente a Roger Frías “roy” y al master ñoño Adolfo Sánchez “adolfus”, por la constante ayuda durante mi proyecto de tesis, todos los buenos ratos durante esta maestría y por supuesto su amistad, al ñoño menor Marco Anzueto por todos los buenos ratos y amistad, a Gustavo Rascón “gus” por todos los concejos para realizar este proyecto, su amistad y a Emilio Peña.

Muy en especial, a todos los técnicos del departamento de acuicultura, ya que sin su ayuda ningún trabajo se llevaría a cabo. Gracias a Francisco Valenzuela “panchito” por el apoyo en el desarrollo, instalación y mantenimiento del sistema, por los dibujos esquemáticos y por su amistad, Carlos Carballo “charly” por el apoyo en el desarrollo, instalación y mantenimiento del sistema, Luis Murillo por la ayuda en toda la instalación eléctrica y sus prácticos concejos, Norberto Flores por su buena disposición, siempre buen humor y prácticos concejos. A la Biol. Rosario Jara, por su ayuda durante el desarrollo de este trabajo.

A M. en C. Josefina Rodríguez Jacobo por aceptar colaborar en este proyecto, por todas las terapias y ayudarme a finalizar un ciclo.

A Dr. Benjamín Barón Sevilla por las excelentes clases impartidas, por compartir sus conocimientos, aceptar colaborar en este proyecto y enriquecerlo.

A Obed Pérez Cortés por su ayuda en el sistema de ecuaciones y por su amistad.

A los profesores del departamento de acuicultura por su tiempo y disponibilidad.

A las secretarías del departamento de acuicultura Cecilia Loera, Bibiana Medina y Varuní Arredondo por su ayuda en todo momento.

Al personal de la dirección de estudios de posgrado, Dolores Sarracino, Citlali Romero, Ivon Best y Norma Fuentes por toda su ayuda, disponibilidad y paciencia.

Al CONACYT, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Por último gracias a ti flaca, Verónica, mi compañera de vida. Gracias por cada uno de los diferentes momentos que hemos pasado juntos, desde los más felices, hasta esos en los que necesité de un gran apoyo. Este es un ciclo más que cierro junto a ti y uno de tantos logros que festejaremos. De la infinidad de momentos en que se puede existir, soy muy afortunado de coincidir contigo, te amo.

Gracias a la suerte, por poner a todos y cada uno de ustedes en mí camino.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN EN ESPAÑOL</b> .....	i
<b>RESUMEN EN INGLÉS</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xiv
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Balance de Masa .....	6
1.3 Antecedentes .....	6
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	10
2.1 Objetivo General .....	10
2.2 Objetivos Particulares .....	10
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	11
3.1 Sistemas de cultivo .....	11
3.1.1 Maternidad .....	11
3.1.2 Sistema de recirculación acuícola (SRA) .....	12
3.1.3 Sistema de hidroponia (SH) .....	14
3.2 Obtención de organismos .....	17
3.2.1 Sistema de recirculación acuícola (SRA) .....	17
3.2.1 Sistema de hidroponia (SH) .....	17
3.3 Alimentación.....	18
3.4 Manejo y calidad del agua .....	19
3.4.1 Sistema de recirculación acuícola (SRA) .....	19



## CONTENIDO (continuación)

	<b>Página</b>
3.4.2 Sistema de hidroponia (SH) .....	20
3.4.3 Calculo del $\text{NH}_3\text{-N}$ del NAT .....	21
3.5 Diseño experimental .....	22
3.5.1 Parámetros fisicoquímicos .....	22
3.5.2 Nutrientes.....	22
3.5.3 Cálculo de la eficiencia de remoción de nutrientes (ER).....	24
3.5.4 Producción en acuaponia.....	25
Producción de peces.....	25
Términos de producción.....	25
Producción de plantas.....	26
3.5.5 Balance de masa .....	27
Volumen de control .....	27
3.5.5.1 Balance de masa del tanque de cultivo (TC).....	28
3.5.5.1 Balance de masa del biofiltro (B) .....	28
3.5.5.1 Balance de masa del sistema de hidroponia (SH) .....	30
3.6 Análisis de datos .....	31
<b>IV. RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
4.1 Parámetros fisicoquímicos .....	33
4.1.1 Temperatura.....	33
4.1.2 Conductividad eléctrica (CE).....	37
4.1.3 Oxígeno .....	41
4.1.4 pH .....	45
4.2 Nutrientes.....	49
4.2.1 Nitrógeno amoniacal total (NAT) .....	49
4.2.2 Cálculo del $\text{NH}_3\text{-N}$ del NAT.....	53
4.2.3 Nitritos ( $\text{NO}_2$ ).....	55

## CONTENIDO (continuación)

	<b>Página</b>
4.2.4 Fósforo (P) .....	59
4.2.5 Potasio (K) .....	63
4.3 Cálculo de la eficiencia de remoción de nutrientes (ER).....	67
4.4 Producción en acuaponia.....	69
4.4.1 Producción de peces.....	69
4.4.2 Términos de producción.....	72
4.4.3 Producción de plantas.....	73
4.5 Balance de masa .....	76
<b>V. DISCUSIÓN</b> .....	<b>81</b>
Parámetros fisicoquímicos .....	81
Temperatura .....	81
Conductividad eléctrica (CE).....	82
Oxígeno .....	83
pH .....	84
Nutrientes.....	86
Nitrógeno amoniacal total (NAT), NH <sub>3</sub> -N del NAT y Nitritos (NO <sub>2</sub> ).....	86
Fósforo (P) .....	90
Potasio (K) .....	92
Producción en acuaponia.....	93
Producción de peces.....	93
Producción de plantas.....	94
Manejo del sistema de acuaponia.....	96
Balance de masa .....	99

**CONTENIDO (continuación)**

	<b>Página</b>
<b>VI. CONCLUSIONES</b> .....	100
<b>VII. RECOMENDACIONES</b> .....	102
<b>VIII. REFERENCIAS</b> .....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Descripción de los procesos de transformación y descomposición de los nutrientes (minerales y compuestos orgánicos simples) antes de ser tomados por la planta. Comparación entre un cultivo en suelo, hidroponía y el sistema de acuaponía (SA) empleado en este estudio (Resh, 1991).....	9
2	Diagrama del sistema de maternidad para la tilapia nilótica <i>Oreochromis niloticus</i> .....	12
3	Esquema de la configuración y el equipo del sistema de recirculación acuícola (SRA) utilizado en el cultivo de la tilapia nilótica <i>Oreochromis niloticus</i> .....	13
4	Esquema del sistema de hidroponía (SH) y el equipo utilizado para el cultivo de la fresa <i>Fragaria ananassa</i> variedad camarosa.....	16
5	Esquema en vista de planta del sistema de acuaponía (SA) conformado por el sistema de recirculación acuícola (SRA) y el sistema de hidroponía (SH). Se muestra el equipo utilizado y la posición de los puntos de muestreo en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S) del SH.....	23
6	Diagrama conceptual del sistema de acuaponía (SA) con todas las variables involucradas en el planteamiento del balance de masa de cada uno de los volúmenes de control definidos: el tanque de cultivo (TC), el biofiltro (B) y el sistema de hidroponía (SH).....	27
7	Comparación entre los valores de temperatura promedio (°C) encontrados en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S) a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.....	35

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
8	Valores semanales de temperatura promedio (°C) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.....	36
9	Comparación entre los valores de conductividad eléctrica promedio (CE, mS/cm) encontrados en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S) a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.....	39
10	Valores semanales de conductividad eléctrica promedio (CE, mS/cm) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.....	40
11	Comparación entre las concentraciones de O <sub>2</sub> promedio (mg/L) encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.....	43
12	Valores semanales de concentración de O <sub>2</sub> promedio (mg/L) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.....	44
13	Comparación entre los valores de pH promedio encontrados en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.....	47

### LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
14	Valores semanales de pH promedio registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.....	48
15	Comparación entre las concentraciones de NAT (mg/L) promedio encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.....	51
16	Valores semanales de concentración promedio de NAT (mg/L) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.....	52
17	Comparación entre las concentraciones de NO <sub>2</sub> (mg/L) promedio encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.....	57
18	Valores semanales de concentración promedio de NO <sub>2</sub> (mg/L) encontrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.....	58
19	Comparación entre las concentraciones de P (mg/L) promedio encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.....	61

### LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
20	Valores semanales de concentración promedio de P (mg/L) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.....	62
21	Comparación entre las concentraciones de K (mg/L) promedio encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.....	65
22	Valores semanales de concentración promedio de K (mg/L) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.....	66
23	Valores promedio del peso (g) y longitud (cm) de tilapia nilótica <i>Oreochromis niloticus</i> registrados en las biometrías realizadas a lo largo del periodo de cultivo. Las barras indican los valores de desviación estándar y las letras (a>b>c) nos indican que existieron diferencias significativas entre las 3 biometrías.....	71
24	Crecimiento en valores promedio y desviación estándar de la altura (H, cm), el diámetro (D, cm) y el número de hojas trifoliadas (HT) registrados durante el periodo experimental.....	75
25	Diagrama conceptual del sistema de acuaponía (SA) con los resultados del balance de masa. Se muestra el valor promedio en términos de producción (P) o remoción (R) de NAT, NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> , P y K en mg/min, en el TC, B y SH...	80
26	Disponibilidad de nutrientes en función del pH, tomado de Resh (1991).....	85

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
I	Tipos de cultivo y su descripción, propuestos por Mayo et al. (1984) y Álvarez et al. (1999).....	1
II	Número de muestreos realizados, el día de cultivo y la fecha en que se tomaron las muestras a lo largo de periodo experimental.....	22
III	Valores promedio (m) de temperatura y desviación estándar (°C) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras ( <b>x, y, z</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.....	34
IV	Valores promedio (m) de conductividad eléctrica (CE) y desviación estándar (mS/cm) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras ( <b>x, y, z</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.....	38
V	Valores promedio (m) de concentración de O <sub>2</sub> y desviación estándar (mg/L) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras ( <b>x, y, z</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.	42
VI	Valores promedio (m) de pH y desviación estándar registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras ( <b>x, y, z</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.....	46



### LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
VII	Valores de promedio (m) de concentración de NAT (mg/L) y desviación estándar registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras ( <b>x, y, z</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.....	50
VIII	Valores promedio de concentración de NH <sub>3</sub> -N (mg/L) registrados por semana obtenidos a partir de las concentraciones de NAT, por medio de la ecuación 2, en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras ( <b>x, y</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre cada lugar de muestreo.....	54
IX	Valores promedio (m) de concentración de NO <sub>2</sub> y desviación estándar (mg/L) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras ( <b>x, y, z</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.....	56
X	Valores promedio (m) de concentración de P y desviación estándar (mg/L) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras ( <b>x, y, z</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.....	60
XI	Valores promedio (m) de concentración de K y desviación estándar (mg/L) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras ( <b>x, y, z</b> ) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo.....	64

### LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
XII	Eficiencia de remoción de nutrientes (NAT, NO <sub>2</sub> , P y K) determinados para el biofiltro (B) y el sistema de hidroponía (SH) a lo largo del periodo experimental. Se presentan también los valores promedio por nutriente (m), la desviación estándar (DE) y los resultados obtenidos de la prueba T realizada entre B y SH.....	68
XIII	Valores promedio y desviación estándar del peso (g) y longitud (cm) de la tilapia nilótica <i>O. niloticus</i> registrados durante las biometrías realizadas a lo largo del periodo experimental. Los superíndices indican las diferencias (a>b>c) encontradas entre las biometrías. Con los datos obtenidos se estimó el peso total (PT, kg) la densidad del cultivo (D, kg/m <sup>3</sup> ), la ganancia en peso diaria entre biometrías (GP, g/día), la ganancia en peso promedio (GPm, g/día), la tasa de conversión alimenticia (TCA= kg de alimento que produce 1kg de ganancia en peso) y la eficiencia alimenticia (EA= peso ganado kg por 1 kg de alimento consumido).....	70
XIV	Valores de producción de NAT por kg de alimento diarios, por minuto y en concentración (P <sub>NAT</sub> mg/L), estimados a partir del término definido por Timmons et al. (2002). También se muestran los promedios semanales de alimento por día (m A/día) y la cantidad total semanal (A/S), proporcionada al a los peces durante el periodo experimental.....	72
XV	Valores promedio y desviación estándar de la altura (H), el diámetro (D) y el número de hojas trifoliadas (HT) determinados por nivel en las 6 biometrías a lo largo del periodo de cultivo (Bio - día de cultivo). Las letras (a>b>c>d) indican diferencias significativas entre biometrías (D/Bio) y los índices superiores ( <b>x&gt;y&gt;z</b> ) denotan las diferencias significativas entre niveles en una misma biometría.....	74
XVI	Cantidad de frutos por nivel (g) obtenidos en las dos cosechas de fresa realizadas en el SH el día 70 y 91 del periodo de cultivo.....	75

### LISTA DE TABLAS (continuación)

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
XVII	Resultados obtenidos del balance de masa para el tanque de cultivo (TC), el biofiltro (B) y el sistema de hidroponia (SH). Los datos mostrados en el caso del TC indican producción (Pt), para el B y el SH indican remoción (R) de NAT, NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> , P y K en mg/min. En la parte inferior de la tabla se muestra el valor promedio (m), la desviación estándar (DE) y las diferencias estadísticas entre semanas (d/S).....	78
XVIII	Comparación de los valores promedio de la eficiencia de remoción de nutrientes en el sistema de acuaponia (SA), entre el biofiltro (B) y el sistema de hidroponia (SH). Se muestra la concentración de nutrientes en el sistema [NS], la remoción determinada en el balance de masa (R), la eficiencia de remoción (ER) y la eficiencia de remoción absoluta (ERA).....	79

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

En México, la acuicultura ha adquirido mayor importancia en los últimos años y hoy en día es considerada como una actividad del sector primario de la economía. La acuicultura además de arrojar beneficios sociales, posee una potencialidad importante en la producción de alimentos, la generación de fuentes de empleo y en el mejoramiento de la dieta de la población. Uno de los principales objetivos de la acuicultura es producir proteína de origen animal de calidad con un elevado valor nutricional (Aguirre, 1996; Alvarez et al. 1999; Michel, 1999).

Para la comprensión de los diferentes tipos de cultivos acuícolas, diversos autores han propuesto términos y categorías con base al tipo de medios con los que se desarrollan los cultivos, la especie con la que se trabaja o por los diversos grados de intensidad del esfuerzo humano aplicado. Una de estas clasificaciones fue desarrollada por Mayo et al. (1984) y Álvarez et al. (1999) y se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Tipos de cultivo y su descripción, propuestos por Mayo et al. (1984) y Álvarez et al. (1999).

Tipo de Cultivo	Descripción
Extensivo	Todos los requerimientos nutricionales se derivan de fuentes naturales sin intervención deliberada del hombre.
Semintensivo	La capacidad de carga del sistema es alcanzada con la fertilización intencional o utilizando alimento complementario.
Intensivo	Todos los requerimientos nutricionales se satisfacen con fuentes externas.

Los límites en la densidad de organismos cultivados por hectárea, para la caracterización de los tipos de cultivo (kg/ha), son difíciles de precisar. En cuanto a los sistemas extensivos, se utilizan valores desde 100 hasta 1000 kg/ha en el caso de las zonas tropicales (Asia). En los cultivos semintensivos los intervalos son más amplios, desde: 100-500 kg/ha en estanques fertilizados, 600-1500 kg/ha en policultivos y 700-10,000 kg/ha para sistemas con fertilización y alimento complementario. En los sistemas intensivos, gracias al manejo integral de la columna de agua, los valores de carga se expresan en peso por unidad de volumen ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), un sistema puede registrar cargas de hasta  $120 \text{ kg}/\text{m}^3$  (Ackefors y Enel, 1994; Timmons et al. 2002).

En la actualidad, la producción acuícola tradicional en estanques, emplea grandes cantidades de agua y tierra. Aproximadamente por cada estanque de cultivo de una hectárea de superficie, se utiliza además de la cantidad inicial de agua, el mismo volumen de agua para mantener una buena calidad a lo largo del periodo de cultivo (Losordo et al. 1992a; Losordo et al. 1992b).

Debido al constante crecimiento de la industria acuícola a nivel mundial, los grandes volúmenes de agua utilizados en la producción y la superficie utilizada, los avances de las técnicas de cultivo se han enfocado hacia la optimización en el uso del recurso hídrico, del espacio y de los efluentes.

Por este motivo, desde hace más de tres décadas, se han utilizado sistemas de recirculación acuícola (SRA) en la investigación (Timmons et al. 2002). En estos sistemas la densidad de cultivo puede incrementarse dramáticamente, mediante el

control total del ambiente. En un sistema de recirculación, el recambio de agua por día debe ser menor al 10% del volumen total del sistema.

Para el desarrollo exitoso de un SRA se debe considerar además de un manejo eficiente, el control de la calidad del agua, tomando en cuenta diversos parámetros fisicoquímicos tales como: la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), el oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ) (mg/L), el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (mg/L), el pH, el nitrógeno amoniacal total (NAT) (mg/L), los nitritos ( $\text{NO}_2$ ) (mg/L), la alcalinidad del agua ( $\text{CaCO}_3$ ) (mg/L) y los sólidos suspendidos totales (SST). Dichos parámetros deben ser controlados de forma continua tomando en cuenta las cinco operaciones unitarias características de un SRA: 1) la captura de SST, 2) la aireación-oxigenación, 3) la degasificación, 4) la circulación y 5) la nitrificación (Losordo et al. 1992a; Losordo et al. 1992b; Timmons et al. 2002).

Las ventajas que promueve un SRA son: la reducción en los requerimientos de agua y espacio, un mayor control ambiental al disminuir la cantidad de los efluentes, impedir la fuga de organismos, mayor control de enfermedades y finalmente su posible localización geográfica estratégica, cerca de los lugares de consumo.

Desde hace una década, se han realizado numerosos intentos para llevar los SRA a una escala comercial (Masser et al. 1998; Timmons et al. 2002). Para que dichos sistemas sean rentables, se deben manejar altas densidades de organismos ( $<120 \text{ kg/m}^3$ ), debido a los altos costos de producción causados por el bombeo continuo del agua, la alimentación intensiva y el equipo especializado. Al excederse la capacidad natural de filtración del sistema, debido a las grandes

cantidades de alimento metabolizado, heces y alimento no ingerido, el productor utiliza el flujo de agua que pasa por la unidad de producción para mantener una óptima calidad de agua. El agua, después de salir de la unidad de producción, pasa por el biofiltro, que además de remover del agua los sólidos con un diámetro mayor a 30  $\mu\text{m}$ , lleva a cabo el proceso de nitrificación (Masser et al. 1998; Malone y Beecher, 2000; Timmons et al. 2002). Como resultado de la alimentación intensiva, los peces producen desechos nitrogenados en diversas formas, a través de difusión branquial, en orina y las heces (Wedemeyer, 1996). De dichos productos de desecho, el amonio y el nitrito resultan altamente tóxicos en bajas concentraciones para cualquier organismo acuático, pero son a su vez, una fuente de alimento para las bacterias autótrofas "*Nitrosomonas*" y "*Nitrobacter*," que catabolizan el amonio no ionizado a nitrito y el nitrito a nitrato (Hagopian y Riley, 1998; Timmons et al. 2002).

Al igual que las bacterias autótrofas, las plantas también se pueden alimentar a partir de los nutrientes disueltos en el agua. De esta forma se pueden cultivar sin el uso de suelo por medio de una técnica conocida como hidroponía (Rakocy et al. 1992; Rakocy, 2002a; Rakocy et al. 2004; Gooley et al. 2003). La hidroponía surgió a partir de experimentos que se realizaron para determinar la composición elemental de las plantas y posteriormente se transformó en una técnica específica para proveer una solución nutritiva que contiene los nutrientes esenciales para el crecimiento óptimo de las plantas. Algunas de las ventajas que promueve el uso de la hidroponía son: el uso de dietas balanceadas, la producción en lugares áridos o no aptos para la agricultura, el aumento de la producción y bioseguridad,

al tener un mayor control de enfermedades. Bajo condiciones ideales, la hidroponía reduce los costos de la preparación del suelo, el uso de insecticidas y fungicidas, las pérdidas por sequías o inundación de tierras. Otra ventaja es el ahorro de energía en búsqueda de alimento por parte de las plantas. Como resultado los productos que se generan son de mayor tamaño, mejor sabor y mayor valor nutricional que los producidos en el campo. En la actualidad los sistemas de hidroponía comercial utilizan nutrientes inorgánicos y fertilizantes artificiales compuestos de la mezcla de “elementos puros” (Keith, 2003), sin embargo, los estudios recientes se están enfocando hacia el manejo eficiente de los efluentes de la acuicultura. De esta manera surgen los sistemas de acuaponía (SA), que son la integración de la producción simultánea de peces y plantas (Rakocy et al. 1992; Rakocy, 2002a).

En un sistema cerrado de producción acuícola, durante el proceso continuo de tratamiento y reúso del agua, diversos nutrientes (desechos tóxicos y no tóxicos, para los peces y bacterias autótrofas) y materia orgánica, se acumulan en el agua. Estos nutrientes pueden ser utilizados en la producción de plantas, ya que crecen rápidamente en respuesta a las altas concentraciones nutrimentales (Rakocy, 2002a).



## 1.2 Balance de Masa

Tomando como base la ley de la conservación de la masa, se ha utilizado al balance de masa como una herramienta en el diseño y análisis de sistemas de recirculación acuícola (Weatherley, 1982; Weatherley et al. 1993; Timmons et al. 2002). El balance de masa permite calcular el flujo de agua óptimo en un SRA. El fundamento del balance de masa se explica por la siguiente ecuación:

$$\Delta m = E - S + G - R \quad (1)$$

Donde:  $\Delta m$ , es el incremento de masa; E, es la entrada de masa; S, es la salida de masa; G, la generación de masa y R, es la remoción de masa. Todos los términos de la ecuación deben poseer las mismas unidades de masa.

De esta forma se aplica el balance de masa a cualquier variable que afecte la calidad del agua en el SRA, tomando en cuenta su valor de entrada, la producción del compuesto y su valor de salida (Timmons et al. 2002).

## 1.3 Antecedentes

La acuaponía posee grandes ventajas con respecto al concepto tradicional de recirculación e incluso sobre la hidroponía. Además de actuar como un filtro biológico, el cultivo de vegetales genera ganancias por la venta de productos hortícolas producidos a partir de los efluentes del SRA. Esto se debe a que las plantas se caracterizan por ser excelentes biorremediadores, ya que crecen de manera rápida en respuesta a los altos niveles de nutrientes disueltos en el agua (Rakocy et al. 2004). Por este motivo, los SA deben ser operados cerca de la

capacidad máxima de ambos cultivos, peces y plantas, para que estos sean rentables. En el caso de los peces, la biomasa debe acercarse a la capacidad máxima de carga del SRA para maximizar la producción y llegar a una tasa de alimentación constante, por medio de la cual se fijará el tamaño adecuado del cultivo vegetal (Rakocy et al. 1992, Rakocy, 2002a).

El crecimiento óptimo de las plantas en un sistema de hidroponia requiere de 16 nutrientes esenciales. Los principales criterios para que un nutriente sea considerado como esencial son: 1) la planta no puede completar su ciclo de vida en ausencia de este nutriente; 2) la acción del nutriente en la planta debe ser específica y ningún otro nutriente puede realizarla; 3) debe estar relacionado con la nutrición de la planta, ser necesario para la formación de metabolitos esenciales o por lo menos necesario para la acción o funcionamiento de una enzima esencial (Resh, 1991). Dichos nutrientes esenciales se dividen en macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes son: el nitrógeno (N), el potasio (K), el calcio (Ca), el magnesio (Mg), el fósforo (P) y el azufre (S). Los micronutrientes son: el cloro (Cl), el hierro (Fe), el manganeso (Mn), el boro (B), el zinc (Zn), el cobre (Cu) y el molibdeno (Mo). Los nutrientes deben estar presentes de manera balanceada, ya que cualquier incremento en la concentración de alguno, puede causar interferencia en la incorporación de otro (Resh, 1991; Rakocy et al. 1992; Rakocy, 2002a).

En la figura 1 se explican brevemente los procesos de transformación y descomposición de los elementos antes de ser tomados por las plantas, haciendo una comparación entre un cultivo en suelo y uno en agua, utilizando técnicas de

hidroponia (Resh, 1991). Al diagrama se le anexaron los procesos a los que son sujetos los elementos en el SA empleado durante este estudio, desde su entrada (en forma de alimento), la ingesta por los peces y sus procesos metabólicos, el paso por el biofiltro (B) y la nitrificación, hasta llegar a las raíces de las plantas en el sistema de hidroponia (SH).

En este estudio se utilizaron los efluentes provenientes de un sistema de recirculación de un cultivo de tilapia nilótica *Oreochromis niloticus*, como medio para proveer los nutrientes necesarios para el desarrollo de un cultivo de *Fragaria ananassa*, variedad "Camarosa" utilizando técnicas de hidroponia. Con el fin de comprender la dinámica de los nutrientes dentro de la unidad de producción, se caracterizó el flujo de materia del SRA y del SH que conforman al SA, se elaboró un balance de masa del nitrógeno en forma de nitrógeno amoniacal total (NAT), amonio no ionizado ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2$ ), del fósforo (P) y del potasio (K) presentes en el sistema, desde su entrada en forma de alimento así como los puntos en donde su presencia se incrementa por producción o disminuye por consumo.

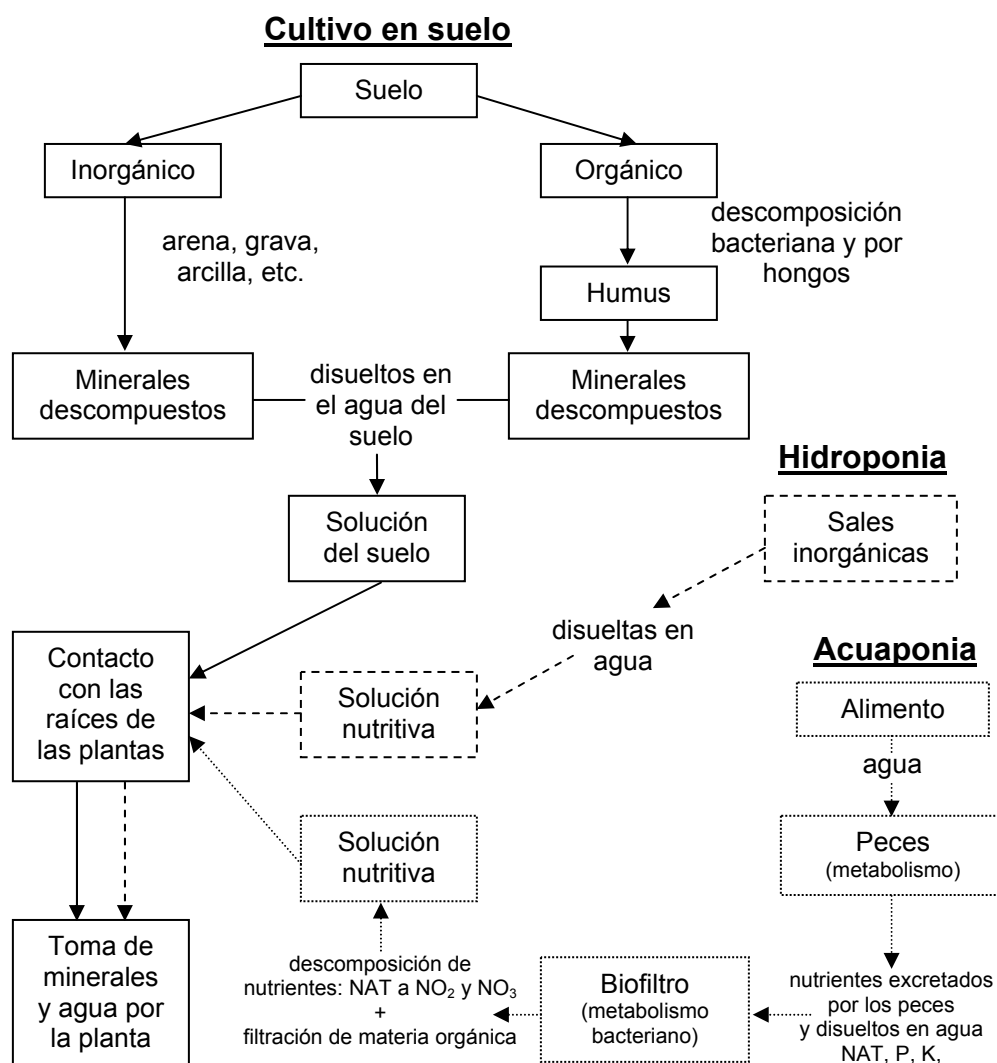


Figura 1. Descripción de los procesos de transformación y descomposición de los nutrientes (minerales y compuestos orgánicos simples) antes de ser tomados por la planta. Comparación entre un cultivo en suelo, hidroponia y el sistema de acuaponia (SA) empleado en este estudio (Resh, 1991).

## II. OBJETIVOS

### Objetivo general

Caracterizar el flujo de materia de un SA a partir de un cultivo de tilapia nilótica *O. niloticus*, para el aprovechamiento de sus efluentes en un cultivo vegetal de *F. ananassa* variedad camarosa, utilizando técnicas de hidroponía.

### Objetivos particulares

- 1) Caracterizar el funcionamiento del biofiltro realizando un balance de masa con los nutrientes (NAT, NO<sub>2</sub>, P y K).
- 2) Evaluar la contribución de los efluentes del biofiltro en el óptimo desarrollo del cultivo vegetal del SH.
- 3) Evaluar el efecto del SH sobre la calidad del agua del SRA.
- 4) Estimar si es necesaria la adición de algún nutriente complementario, para mejorar el desarrollo y calidad del cultivo vegetal.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Sistemas de cultivo**

En este estudio se utilizaron tres sistemas de cultivo. 1) En el desarrollo de los alevines se utilizó un sistema de maternidad, 2) en la fase de engorda se utilizó un SRA y 3) para el cultivo vegetal se utilizó al SH. La combinación del SRA y el SH constituyen al SA.

##### **3.1.1 Maternidad**

Este sistema consistió en 3 tanques de plástico color negro con diámetro de 0.77 m, con 0.46 m de alto, con fondo plano, un tubo de nivel de 0.4 m y una capacidad máxima de 280 L. El sistema de maternidad de flujo continuo se abasteció de agua dulce de la red de distribución general del Departamento de Acuicultura del CICESE. El flujo de agua de entrada al sistema se mantuvo siempre menor a 0.5 L por minuto (tasa de recambio máxima de 289% por día). La limpieza de los tanques se llevo a cabo por sifoneo y en caso necesario por recambio total del agua. El agua se mantuvo a una temperatura constante de 28°C utilizando un calentador de 800 vatios (Fines, JSK Merchandising Inc. Wesmont, IL. EUA) (figura 2).

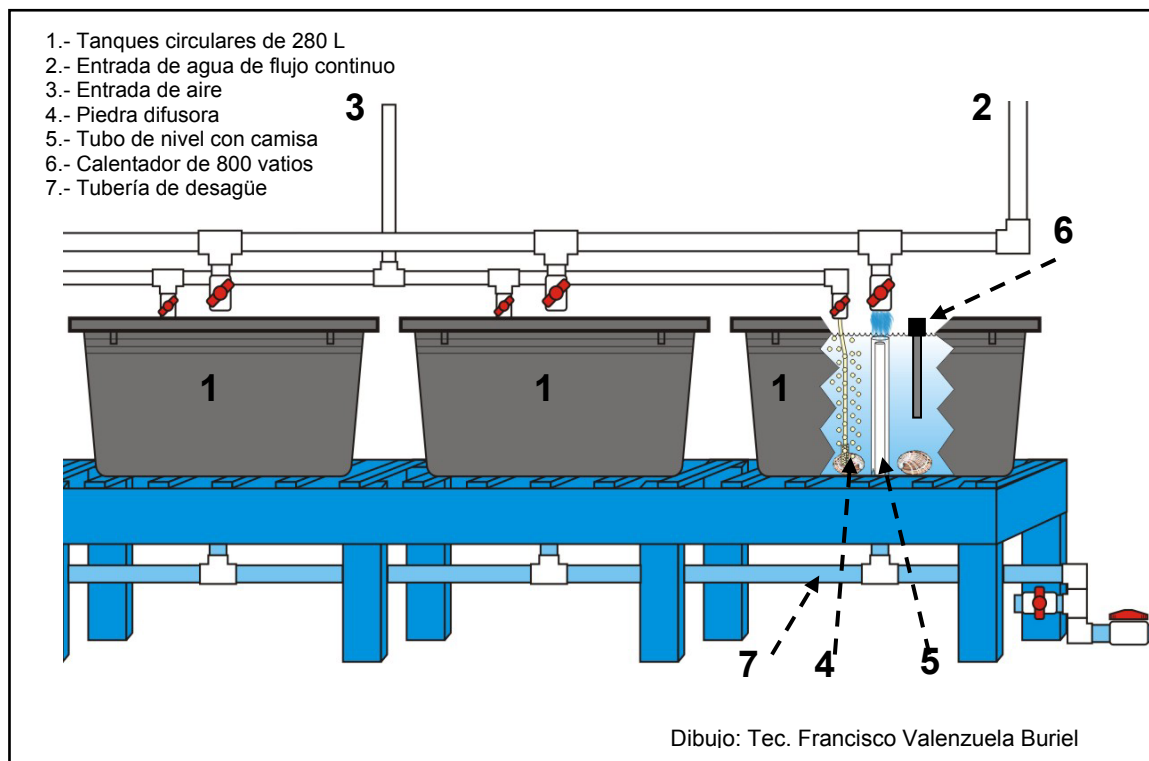


Figura 2. Diagrama del sistema de maternidad para la tilapia nilótica *Oreochromis niloticus*.

### 3.1.2 Sistema de recirculación acuícola (SRA)

El SRA esta compuesto por un tanque de cultivo (TC) de fibra de vidrio, de fondo plano, de color azul claro con 2.62 metros de diámetro, 1.1 m de altura, con una capacidad máxima de 4 m<sup>3</sup>, con un tubo de nivel central de 0.9 metros de altura, provisto de una camisa perforada en la parte inferior, un tanque de compensación (Tcom 1) de plástico color azul de 0.65, 0.93 y 1.35 metros de altura, ancho y largo respectivamente, con una capacidad de 0.8 m<sup>3</sup>, el agua se hizo circular con una bomba centrífuga de 1 ½ HP (STA-RITE DYNA-MAX modelo MPEA6F-148L,

STA-RITE INDUSTRIES INC., Develan WI EUA) a través del SRA. Se utilizó un biofiltro de cuentas de retrolavado mecánico por propela de 0.283 m<sup>3</sup> (Aquaculture Systems Technology, New Orleans, EUA) el cual opera con una tasa de flujo de 432 L/min (figura 3).

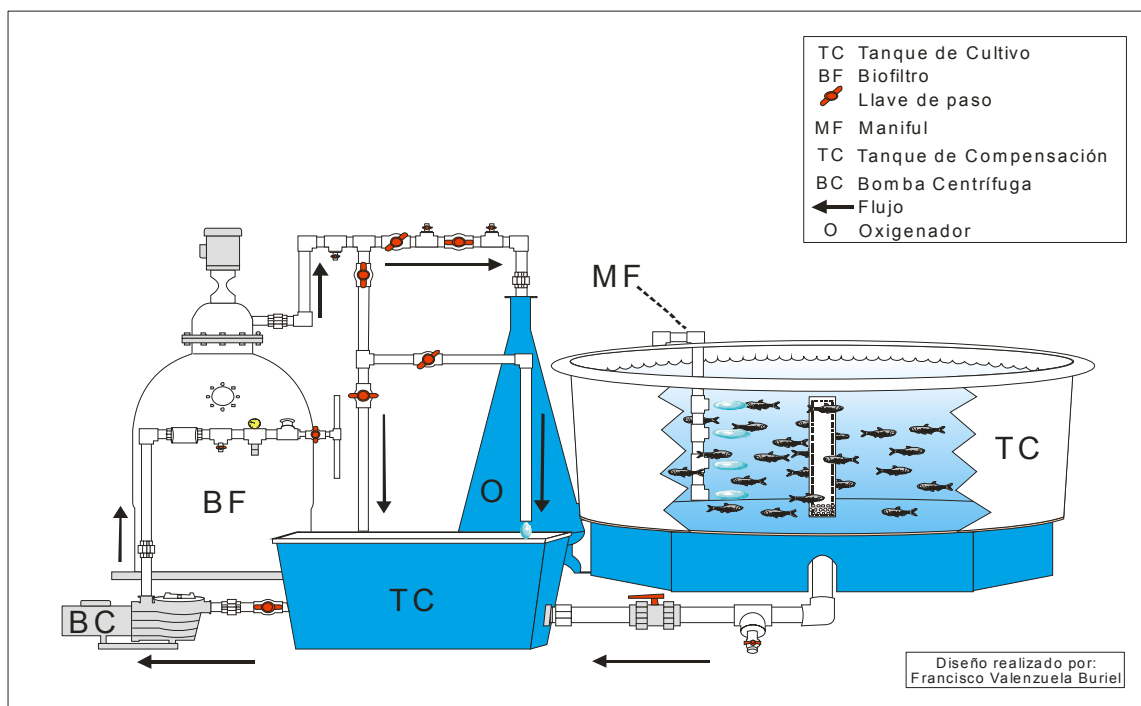


Figura 3. Esquema de la configuración y el equipo del sistema de recirculación acuícola (SRA) utilizado en el cultivo de la tilapia nilótica *Oreochromis niloticus*.

Para mantener la temperatura del agua a 25°C se utilizó un calentador de inmersión de Titanio de 5000 vatios (Process Technology, modelo TA5239-PT-I,



EUA). El agua, después de pasar por el biofiltro, ingresó al tanque de cultivo por medio de una línea de distribución con tres entradas con diferentes alturas a 0.1, 0.4 y 0.8m respectivamente.

### **3.1.3 Sistema de hidroponia (SH)**

El SH consistió en 28 tubos de PVC cédula 40 de 10.16 cm de diámetro y 6 m de largo, colocados sobre un anaquel de madera con cuatro niveles diferentes, con 7 tubos por nivel (figura 4). Dicho sistema contó con 2 tanques de compensación (Tcom 2 y Tcom 3) de 0.75m, 0.4m y 0.6m de largo, ancho y alto respectivamente, con un volumen total de  $0.18\text{m}^3$ , colocados a la entrada y a la salida del SH. Al Tcom 2 se hizo llegar el agua proveniente del SRA por medio de una salida, la cual estaba colocada en posición posterior al biofiltro, utilizando una tubería de PVC de 1.905 cm de diámetro. En el Tcom 2 se instaló una bomba sumergible (Little Giant, modelo 4E-34N, Little Giant Pumps Company Quality Systems, EUA) con 1/12 HP de fuerza con salida de 1.905 cm de diámetro y una capacidad de 43.5 L/min, la cual bombeo el agua a través de un enfriador (Delta Star modelo DS-5, Aqualogic Inc. San Diego CA, USA) hasta la entrada del SH. El agua entró por uno de los extremos del primer tubo del nivel 1 (nivel superior) y se mantuvo con un flujo constante de 6 L/min. El primer nivel se conectó con el nivel 2 por medio de codos de  $90^\circ$  para tubería de 10.16 cm de diámetro, de esta forma se hizo circular el agua por gravedad hacia el tercer y cuarto nivel. De esta manera se logró que el SH fuera abastecido por una sola entrada, recorriendo un total de 168 m lineales de tubería. El agua que circuló por el SH finalizó en el Tcom 3, donde se bombeó de regreso al Tcom 1, utilizando una bomba sumergible de 1/12

HP de potencia (Little Giant, modelo 4E-34N, Little Giant Pumps Company Quality Systems, EUA). Esta bomba sumergible se accionaba por medio de un sensor de nivel automático situado dentro del Tcom 3. En cada uno de los niveles del SH se colocaron 4 lámparas de luz blanca de 125 vatios.

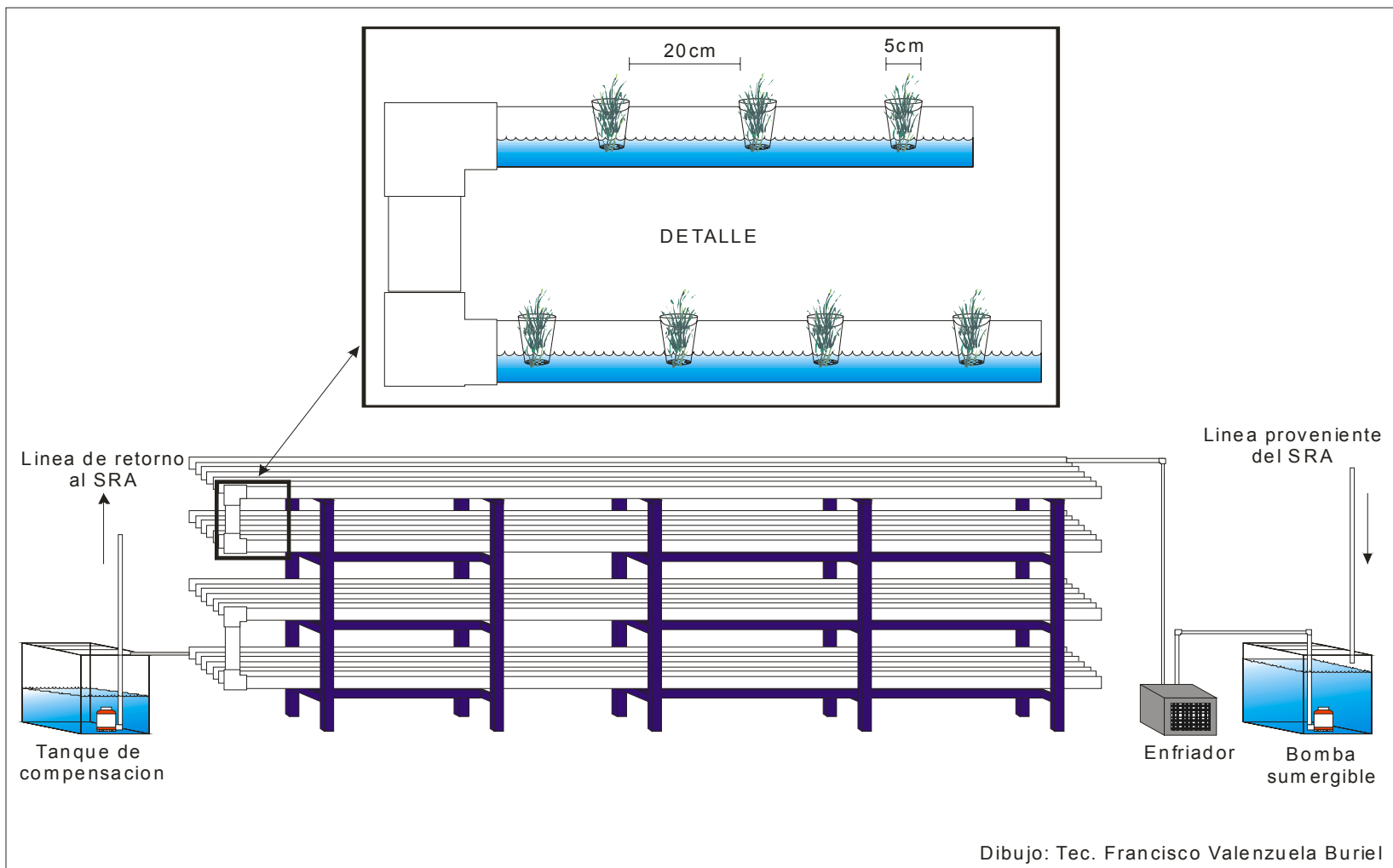


Figura 4. Esquema del sistema de hidroponia (SH) y el equipo utilizado para el cultivo de la fresa *Fragaria ananassa* variedad camarosa.

## **3.2 Obtención de organismos**

### **3.2.1 Sistema de recirculación acuícola (SRA)**

Para llevar a cabo este experimento se utilizaron 1,000 alevines de tilapia nilótica *O. niloticus*, con un peso promedio de 0.2 gr., producidos por la empresa SANAGRO S.A. de C.V., ubicada en Bahía Quino, Sonora. Los organismos fueron transportados vía aérea hacia la Ciudad de Tijuana para posteriormente ser trasladados por vía terrestre al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), en una bolsa de plástico dosificada con oxígeno puro, dentro de una hielera de poliuretano. Las tilapias se aclimataron por un periodo de 2 horas en la unidad de maternidad (figura 2). Durante las primeras tres semanas del periodo de cultivo, los organismos fueron alimentados con una dieta comercial tipo iniciador tamaño 1 con 45% de proteína cruda (Purina Pet Care Company, Sonora) hasta que alcanzaron un peso de 12 gr.

### **3.2.2 Sistema de hidroponia (SH)**

Para el cultivo vegetal se utilizaron 400 plántulas de fresa *F. ananassa* variedad camarosa. Las plantas arribaron por vía terrestre, provenientes de la compañía Lassen Canyon Nursery (Reading California, EUA). Previo a su siembra en el SH, las plantas fueron sumergidas en un recipiente con agua para humedecer la raíz. Posteriormente cada una de las plantas fue colocada en una canasta de tipo hidropónica con dimensiones de 10 cm altura de altura y con 8.0 cm de diámetro, con paredes y fondo de malla. Al colocar la planta se guió cuidadosamente la raíz por entre la malla del fondo. El paso siguiente fue colocar perlita (Thermo Rock, West Inc., Chandler Arizona USA), como medio de soporte y sustrato para

mantener la humedad. La perlita fue tamizada para separar las partículas con un diámetro mayor a  $0.027 \text{ cm}^3$ , para evitar su pérdida a través de la malla de la canasta contenedora. Posteriormente, se presionó cuidadosamente la perlita para que la planta quedara firme y entonces, se colocaron 100 plantas por nivel para un total de 400 plantas en todo el SH.

### **3.3 Alimentación**

En la etapa inicial del cultivo las tilapias *O. niloticus* fueron alimentadas diariamente tres veces por día a saciedad, a las 9:00, 12:00 y 16:00 horas. Al trasladarse de los tanques de maternidad al SRA, se alimentaron con una dieta balanceada comercial “El Pedregal Silver Cup” con 38% de proteína cruda 2 veces por día a saciedad, a las 10:00 y 14:00 horas.

### **3.4 Manejo y calidad del agua**

En el SRA y en el SH se realizaron monitoreos diarios de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), la conductividad eléctrica (CE,  $\text{mS/cm}$ ) y el oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ,  $\text{mg/L}$ ), utilizando un medidor multiparámetro (modelo 556MPS, YSI, Cal. USA). El pH se midió con un potenciómetro con compensación de temperatura (modelo pHep, Hanna Instruments, Woonsocket, USA).

#### **3.4.1 Sistema de recirculación acuícola (SRA)**

En el SRA se utilizó un kit de análisis de calidad del agua (modelo FF3, HACH, USA) con la metodología propuesta por Hach (1997), para medir la concentración del nitrógeno amoniacal total (NAT) y los nitritos ( $\text{NO}_2$ ), con una frecuencia semanal.

Para medir el flujo de masa en el SRA (NAT,  $\text{NO}_2$ , P y K) se colectaron muestras una vez por semana en recipientes de 30 ml, por triplicado. A partir de la muestra se tomaron las alícuotas necesarias para su análisis. Para medir la absorbancia se utilizó un espectrofotómetro portátil (DR/400, HACH company, Loveland Colorado, USA) y celdas de cuarzo (UV, Micro Black Walled, Spectrosil, USA) con un volumen de 0.7 ml.

El NAT se midió con la técnica de fenol-hipoclorito, al tratar la muestra en un medio alcalino con fenol e hipoclorito de sodio, cuya reacción produjo una coloración azul que indicaba la cantidad de amonio presente en la muestra. Las muestras fueron leídas a una longitud de onda de 630 nm (Parsons et al. 1984).

Para medir la concentración de  $\text{NO}_2$ , se hicieron reaccionar con sulfanilamida en un medio ácido, para posteriormente reaccionar con N-1naftil-etilenidamina, dando

como resultado un color rojizo intenso. Las muestras fueron leídas a una longitud de onda de 543 nm (Parsons et al. 1984).

Para el análisis del P y el K, se utilizaron los métodos 8048 y 8049, respectivamente (Hatch Company, 2002).

El análisis del P, consistió en la reacción que se produjo entre el ortofosfato y molibdato en un medio ácido que a su vez produjo una mezcla fosfato/molibdato. Posteriormente el ácido ascórbico reduce el complejo, lo que da como resultado una intensa coloración azul. Las muestras fueron leídas a una longitud de onda de 880nm.

Para el análisis del K, se produjo una reacción del K en la muestra con tetrafenilborato de sodio, para formar tetrafenilborato de potasio, produciendo una coloración blanca insoluble. La turbiedad producida es proporcional a la concentración de K. Las muestras fueron leídas a una longitud de onda de 650nm.

#### **3.4.2 Sistema de hidroponia (SH)**

Para medir el flujo de masa en el SH (NAT, NO<sub>2</sub>, P y K) se colectaron muestras una vez por semana y se procesaron tal como se describió en el inciso anterior.

### 3.4.3 Cálculo del NH<sub>3</sub>-N del NAT

La concentración de NH<sub>3</sub>-N se calculó a partir de las concentraciones de NAT por medio de la siguiente ecuación:

$$[NH_3 - N] = \frac{[NAT]}{1 + 10^{(pK_a - pH)}} \quad (2)$$

Donde: NAT, es la concentración (mg/L) de nitrógeno amoniacal total; pK<sub>a</sub>, es la constante de acidez para la reacción; pH, es el valor de pH medido durante la toma de muestra para el análisis de NAT (Timmons et al. 2002; Colt, 2006).



### 3.5 Diseño experimental

#### 3.5.1 Parámetros fisicoquímicos

El muestreo de los parámetros fisicoquímicos como la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), la conductividad eléctrica (CE, mS/cm), el oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ , mg/L) y el pH, se realizó diariamente en las mismas posiciones de muestreo tal como se muestra en la figura 5, en donde se puede diferenciar al SRA del SH.

#### 3.5.2 Nutrientes

La toma de las muestras utilizadas para determinar la concentración de nutrientes como (NAT,  $\text{NO}_2$ , P y K) se realizó de manera semanal a lo largo del periodo experimental (Tabla II), en el punto de muestreo del TC, a la entrada (E) y a la salida (S) del SH. Las posiciones de muestreo están señaladas en la figura 5.

Tabla II. Número de muestreos realizados, el día de cultivo y la fecha en que se tomaron las muestras a lo largo de periodo experimental.

# Muestreo	Día de Cultivo	Fecha
1	26	5 de diciembre 2006
2	34	13 de diciembre 2006
3	41	20 de diciembre 2006
4	47	26 de diciembre 2006
5	55	3 de enero 2007
6	61	9 de enero 2007
7	69	17 de enero 2007
8	76	24 de enero 2007
9	82	30 de enero 2007
10	89	6 de febrero 2007

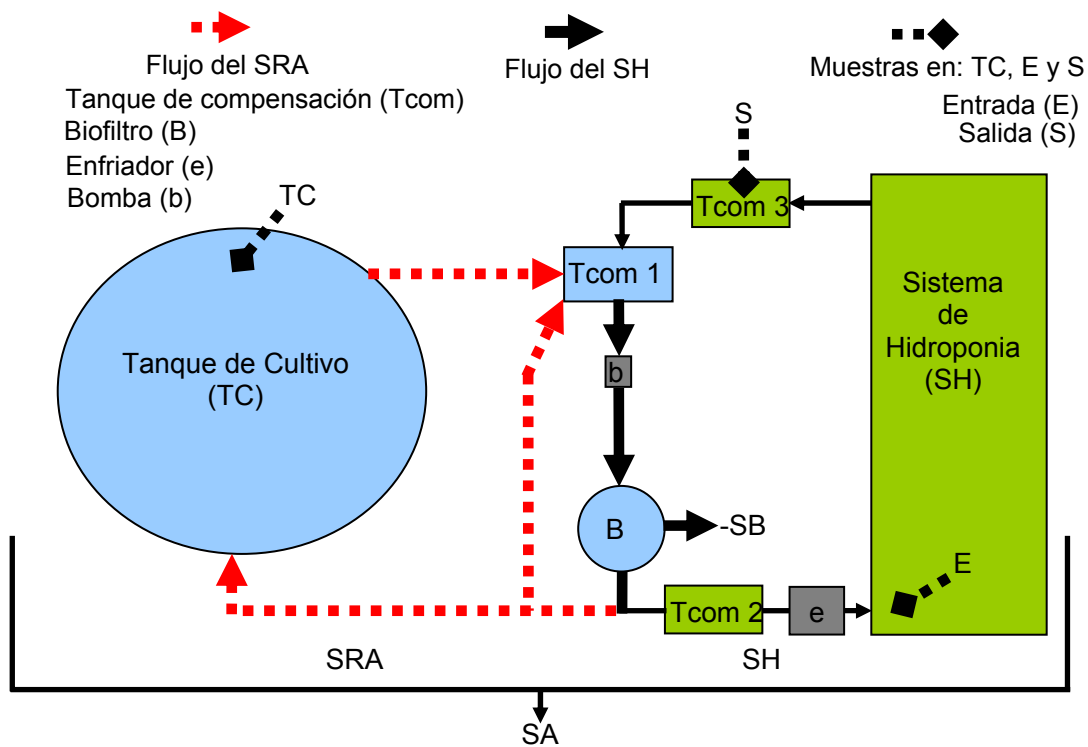


Figura 5. Esquema en vista de planta del sistema de acuaponía (SA) conformado por el sistema de recirculación acuícola (SRA) y el sistema de hidroponía (SH). Se muestra el equipo utilizado y la posición de los puntos de muestreo en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S) del SH.

### 3.5.3 Cálculo de la eficiencia de remoción de nutrientes (ER)

El cálculo de la eficiencia de remoción de nutrientes (ER) se realizó como una forma de evaluar y comparar la eficiencia de remoción de nutrientes entre el biofiltro y el SH. Para ello se utilizaron las concentraciones de nutrientes (NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P, y K) obtenidas en las 10 semanas de muestreo a lo largo del periodo experimental. El cálculo se realizó usando las concentraciones antes y después de su paso por el biofiltro o el SH, tal como se explica en la ecuación 3:

$$\% ER = \left( \frac{[X_{entrada} \text{ mg / L}] - [X_{salida} \text{ mg / L}]}{[X_{entrada} \text{ mg / L}]} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:  $[X_{entrada} \text{ mg/L}]$ , es la concentración de la variable (NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P o K) en mg/L antes de pasar por el B o el SH;  $[X_{salida} \text{ mg/L}]$ , es la concentración de la variable (NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P o K) en mg/L después de su paso por el biofiltro o el SH.

### **3.5.4 Producción en acuaponia**

#### **Producción de peces**

En el TC del SRA se colocaron 270 peces provenientes de los tanques de maternidad con un peso promedio de 472 g, con una densidad inicial de 32 kg/m<sup>3</sup>. Para evaluar el crecimiento de los peces a lo largo del periodo experimental, se realizaron tres biometrías. La primera realizada el día 1, la segunda el día 29 y la tercera el día 92, del periodo experimental. En cada biometría se tomó una muestra de 20 peces de manera aleatoria, a los cuales se les midió la longitud total, utilizando un ictiómetro (0.1 cm) y el peso, utilizando una balanza electrónica (1 g, AND modelo SK-2000 WP, Korea).

Con los resultados obtenidos en cada biometría se estimó: el peso total (PT, kg) de los organismos en cada biometría; la densidad del cultivo, (D, kg/m<sup>3</sup>) tomando en cuenta el volumen del tanque de cultivo (4 m<sup>3</sup>); la tasa de crecimiento (TC, g/día), obtenida al dividir la diferencia en peso entre biometrías entre el número de días entre biometrías; la tasa de conversión alimenticia (TCA), indica los kg de alimento que producen 1 kg de ganancia en peso en los peces; y la eficiencia alimenticia (EA), es el peso ganado en kg por 1 kg de alimento consumido (Timmons et al. 2002).

#### **Términos de producción**

El término producción (P), representa la formación (NAT, CO<sub>2</sub>, SST) o consumo (O<sub>2</sub>) tal como se estableció en el balance de masa y dicho término esta directamente relacionado con la tasa de alimentación. Para conocer la cantidad de NAT (mg/L) que se produjo en el SRA se usó la siguiente expresión, que indica la

cantidad de NAT que se produce por cada kg de alimento proporcionado a los organismos:

$$P_{NAT} = A \cdot CP \cdot 0.092 \quad (4)$$

Donde: A, es el alimento subministrado a los organismos (kg); CP, es el contenido protéico de la dieta (kg) y 0.092 es una constante (Timmons et al. 2002).

### **Producción de plantas**

La superficie y el número de plantas del SH se determinó tomando en cuenta la relación existente entre la superficie vegetal y el área del SRA de 5:1 (Rakocy, 2002a), en referencia a una densidad de cultivo de 40 kg/m<sup>3</sup>.

Para evaluar el crecimiento de las plantas a lo largo del periodo experimental se llevaron a cabo 6 biometrías (los días 9, 16, 22, 29, 36, y 70 del periodo de cultivo) en las que se midió la altura (H), el diámetro (D) y el número de hojas trifoliadas (HT) de la planta. En cada biometría se tomó una muestra de 10 plantas de manera aleatoria de cada uno de los 4 niveles. Para medir las plantas se usó una cinta métrica (0.1cm). La H se midió desde el inicio del tallo hasta la hoja mas alta, el D se determinó tomando en cuenta a la planta (vista desde arriba) como una circunferencia, donde siempre se midió la mayor distancia entre las puntas de sus hojas de un extremo a otro, las HT son la cantidad de brotes de hojas que conformaban a cada planta. En una etapa mas avanzada del cultivo, se determinó la cantidad de frutos. Se realizaron dos cosechas (los días 71 y 91 del periodo experimental), en las que se obtuvo el peso de cada fruto usando una balanza digital (0.001, Acculab modelo VI-200, EUA), a fin de estimar la producción de frutos por planta (g/planta) y por nivel.

### 3.5.5 Balance de masa

#### Volumen de control

Se elaboró un diagrama conceptual del SA para identificar las variables involucradas y definir los volúmenes de control (figura 6). Los volúmenes de control definidos fueron: el tanque de cultivo (TC), el biofiltro (B) y el sistema de hidroponía (SH). Se desarrollo una ecuación de balance de masa para cada uno de ellos.

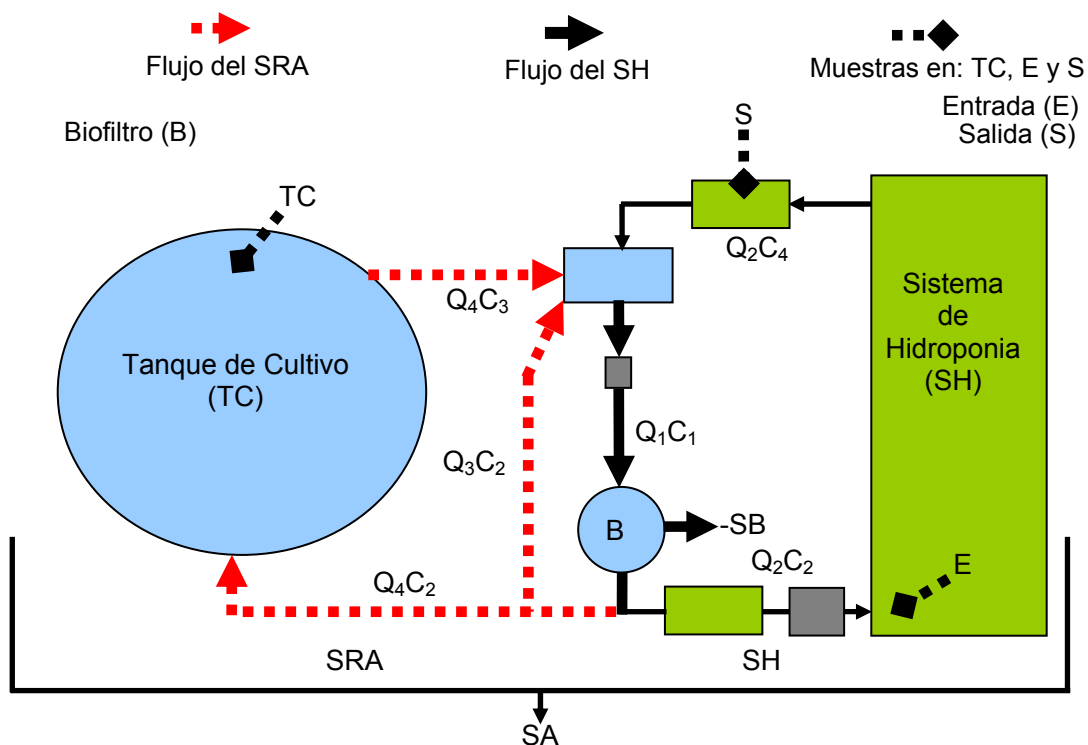


Figura 6. Diagrama conceptual del sistema de acuaponía (SA) con todas las variables involucradas en el planteamiento del balance de masa de cada uno de los volúmenes de control definidos: el tanque de cultivo (TC), el biofiltro (B) y el sistema de hidroponía (SH).

### 3.5.5.1 Balance de masa del tanque de cultivo (TC)

Al considerar a TC como un volumen de control se obtuvo la tasa de cambio en términos de producción (Pt) en mg/min de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K y se definió la siguiente ecuación del balance de masa:

$$Pt = Q_4 \cdot (C_3 - C_2) \quad (5)$$

Donde: Q<sub>4</sub>, es la tasa de flujo en el tanque de cultivo (L/min); C<sub>2</sub> y C<sub>3</sub>, son la concentración de nutrientes (mg/L) de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P o K en el agua que entra y sale del tanque de cultivo, respectivamente.

### 3.5.5.2 Balance de masa del biofiltro (B)

Al considerar a B como un volumen de control, se obtuvo la tasa de cambio en términos de remoción de materia (R) en mg/min a partir de las concentraciones de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K y se definió la siguiente ecuación:

$$Q_1 C_1 = Q_2 C_2 + Q_3 C_2 + Q_4 C_2 + R \quad (6)$$

Donde: Q<sub>1</sub>, es la tasa de flujo en el biofiltro (L/min); C<sub>1</sub>, es la concentración de nutrientes (mg/L) de NAT, NO<sub>2</sub>, P o K en el agua que entra al biofiltro; Q<sub>2</sub>, es la tasa de flujo (L/min) en el tubo que conduce al sistema de hidroponía; Q<sub>3</sub>, es la tasa de flujo (L/min) en el tubo de retorno; Q<sub>4</sub>, es la tasa de flujo (L/min) en el tubo que conduce al tanque de cultivo.

De la ecuación 6, se despejó R a fin de obtener la tasa de cambio en términos de remoción de materia (mg/min):

$$R = Q_1C_1 - (Q_2C_2 + Q_3C_2 + Q_4C_2) \quad (7)$$

En la ecuación 7 se sustituyeron los valores de la tasa de flujo (L/min) y las concentraciones de los nutrientes NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K (mg/L), que se vierten en el Tcom 1 provenientes del SRA, del tubo de retorno y del SH, para conformar el flujo de agua que ingresa al biofiltro (Q<sub>1</sub>C<sub>1</sub>) y se expresó con la siguiente ecuación:

$$R = (Q_3C_2 + Q_4C_3 + Q_2C_4) - (Q_2C_2 + Q_3C_2 + Q_4C_2) \quad (8)$$

Donde: Q<sub>3</sub>, es la tasa de flujo en el tubo de retorno (L/min); Q<sub>4</sub>, es la tasa de flujo (L/min) en el tubo que proviene del tanque de cultivo; Q<sub>2</sub>, es la tasa de flujo (L/min) en el tubo que proviene del sistema de hidroponia; C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub> son las concentraciones de nutrientes (mg/L) de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P o K en el agua proveniente del tubo de retorno, del tanque de cultivo y del sistema de hidroponia, respectivamente.



### 3.5.5.3 Balance de masa del sistema de hidroponia (SH)

Al considerar a SH como un volumen de control, se obtuvo la tasa de cambio en términos de remoción de materia (R) en mg/min a partir de las concentraciones de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K y se definió la siguiente ecuación:

$$R = Q_2 \cdot (C_2 - C_4) \quad (9)$$

Donde: Q<sub>2</sub>, es la tasa de flujo (L/min) del sistema de hidroponia; C<sub>2</sub> y C<sub>4</sub> son las concentraciones de nutrientes (mg/L) de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P o K en el agua, provenientes del biofiltro y del sistema de hidroponia, respectivamente.

### 3.6 Análisis de datos

Las limitaciones en cuanto a la infraestructura para la realización de este estudio, no permitieron la posibilidad de replicar el SA, debido a las dimensiones y recursos que esto implicaría. Por este motivo se comparó los resultados encontrados (explicados individualmente a continuación) entre las semanas de muestreo y entre los lugares de muestreo del SA: el TC, la E y la S.

Para decidir el tipo de estadística a utilizar en el análisis de datos obtenidos a lo largo del periodo experimental, se les aplicó pruebas de homocedasticidad y normalidad (SAS, 1985).

Los datos obtenidos de los monitoreos diarios de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), conductividad eléctrica (CE) en mS/cm, oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ) en mg/L y pH, en el TC, la E y la S, con un total de 98 días (duración del periodo experimental), fueron agrupados por semanas para el análisis (13 semanas de muestreo). Para cada parámetro fisicoquímico se evaluó si había diferencias entre los valores promedio de los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E y S) con un análisis de varianza de una vía. Posteriormente se evaluó si existían diferencias entre semanas dentro de cada lugar de muestreo con un análisis de varianza de una vía. En caso de encontrar diferencias entre lugares de muestreo o entre las semanas de un lugar de muestreo, se realizó un análisis *a posteriori* tipo Tukey con un nivel de significancia de 0.05 (STATISTICA, 2002).

Para las concentraciones de nutrientes medidas (NAT,  $\text{NO}_2$ , P, K y  $\text{NH}_3\text{-N}$  calculado a partir de la ecuación 2) durante 10 semanas a lo largo del periodo experimental, se evaluaron las diferencias entre los tres diferentes lugares de

muestreo (TC, E y S), con un análisis de varianza de una vía. Posteriormente se evaluó si existían diferencias entre semanas dentro de cada lugar de muestreo con un análisis de varianza de una vía. En caso de encontrar diferencias entre lugares de muestreo o entre las semanas de un lugar de muestreo, se realizó un análisis *a posteriori* tipo Tukey con un nivel de significancia de 0.05 (STATISTICA, 2002).

Para evaluar la eficiencia de remoción (ER) de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K, en el B y en el SH, se compararon los resultados obtenidos por semana entre los dos lugares, utilizando una prueba T con un nivel de significancia de 0.05 (STATISTICA, 2002).

A fin de detectar si existió un incremento en peso en las tilapias se realizó una prueba T (peso inicial vs peso final) con un nivel de significancia de 0.05 (STATISTICA, 2002).

En la producción de plantas (T, D y HT), se realizó un análisis de varianza de una vía entre biometrías. En los casos en que se encontraron diferencias significativas se realizó un análisis *a posteriori* tipo Tukey, con un nivel de significancia de 0.05. En cada biometría se llevó a cabo un análisis de varianza de una vía para detectar si existían diferencias entre los 4 niveles del SH. En caso de encontrar diferencias significativas, se realizó un análisis *a posteriori* tipo Tukey, con un nivel de significancia de 0.05 (STATISTICA, 2002).

En los resultados obtenidos del balance de masa se realizó una prueba T, para saber si existían diferencias entre semanas dentro de cada lugar de muestreo (TC, B y S) con un nivel de significancia de 0.05 (STATISTICA, 2002).

## **IV. RESULTADOS**

### **4.1 Parámetros fisicoquímicos**

#### **4.1.1 Temperatura**

Se encontraron diferencias significativas ( $p=0.000023$ ) entre los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E y S), (Tabla III, figura 7).

En TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.000001$ ) entre las semanas de muestreo, la temperatura promedio fue de  $25.9^{\circ}\text{C}$  (mínima-máxima:  $22.1-26.4^{\circ}\text{C}$ ). En E se encontraron diferencias significativas ( $p=0.000000$ ) entre las semanas de muestreo, la temperatura promedio fue de  $24.8^{\circ}\text{C}$  ( $18.7-26.3^{\circ}\text{C}$ ). En S se encontraron diferencias significativas ( $p=0.029315$ ) entre semanas, la temperatura promedio fue de  $20^{\circ}\text{C}$  ( $17.2-21.8^{\circ}\text{C}$ ) (Tabla III, figura 8).

Tabla III. Valores promedio (m) de temperatura y desviación estándar (°C) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras (x, y, z) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.

Lugar de muestreo	Semana de muestreo												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TC m = 25 1.7 x	26.4 0.43 <sub>a</sub>	26.2 0.76 <sub>a</sub>	24.6 1.15 <sub>abc</sub>	26.1 1.54 <sub>ab</sub>	26.1 0.73 <sub>ab</sub>	23.8 1.50 <sub>bc</sub>	24.9 1.04 <sub>ab</sub>	25.0 1.53 <sub>ab</sub>	25.5 1.54 <sub>ab</sub>	22.1 1.06 <sub>c</sub>	25.2 0.87 <sub>ab</sub>	22.3 0.26 <sub>c</sub>	23.8 1.52 <sub>abc</sub>
E m = 22.8 2.37 y	26.3 0.46 <sub>a</sub>	26.0 0.88 <sub>a</sub>	24.2 1.91 <sub>a</sub>	23.5 0.97 <sub>a</sub>	22.5 1.38 <sub>ab</sub>	20.9 0.77 <sub>b</sub>	21.9 1.16 <sub>b</sub>	21.4 1.07 <sub>b</sub>	21.7 1.17 <sub>b</sub>	20.4 1.14 <sub>bc</sub>	22.3 0.42 <sub>b</sub>	18.7 0.29 <sub>c</sub>	20.6 1.11 <sub>bc</sub>
S m = 20 2.46 z	21.8 0.6 <sub>a</sub>	21.1 1.62 <sub>ab</sub>	18.7 2.96 <sub>ab</sub>	21.7 2.62 <sub>a</sub>	18.5 3.89 <sub>ab</sub>	18.6 1.63 <sub>ab</sub>	21.8 2.74 <sub>a</sub>	19.7 0.50 <sub>a</sub>	19.8 1.01 <sub>a</sub>	18.4 2.10 <sub>ab</sub>	21.8 2.27 <sub>a</sub>	17.2 0.21 <sub>b</sub>	19.5 0.58 <sub>a</sub>

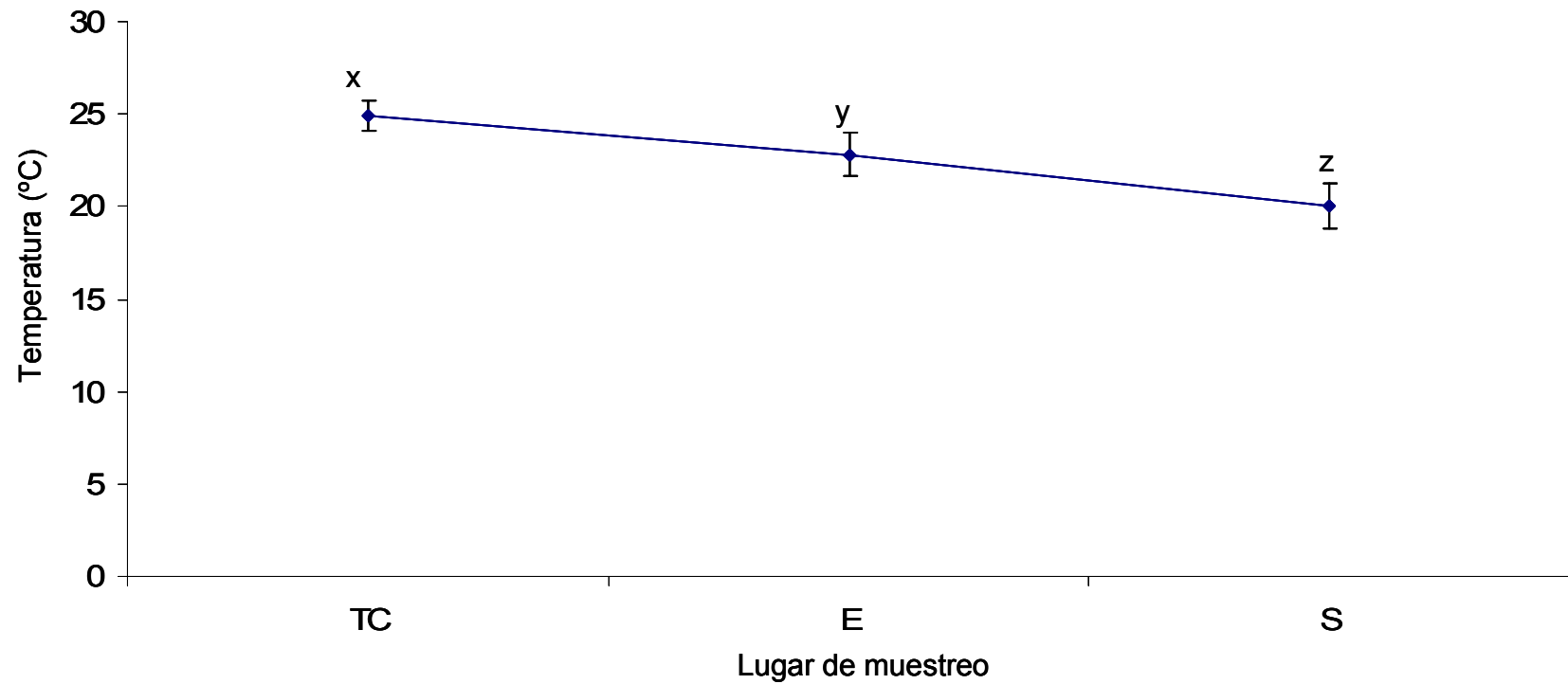


Figura 7. Comparación entre los valores de temperatura promedio (°C) encontrados en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S) a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.

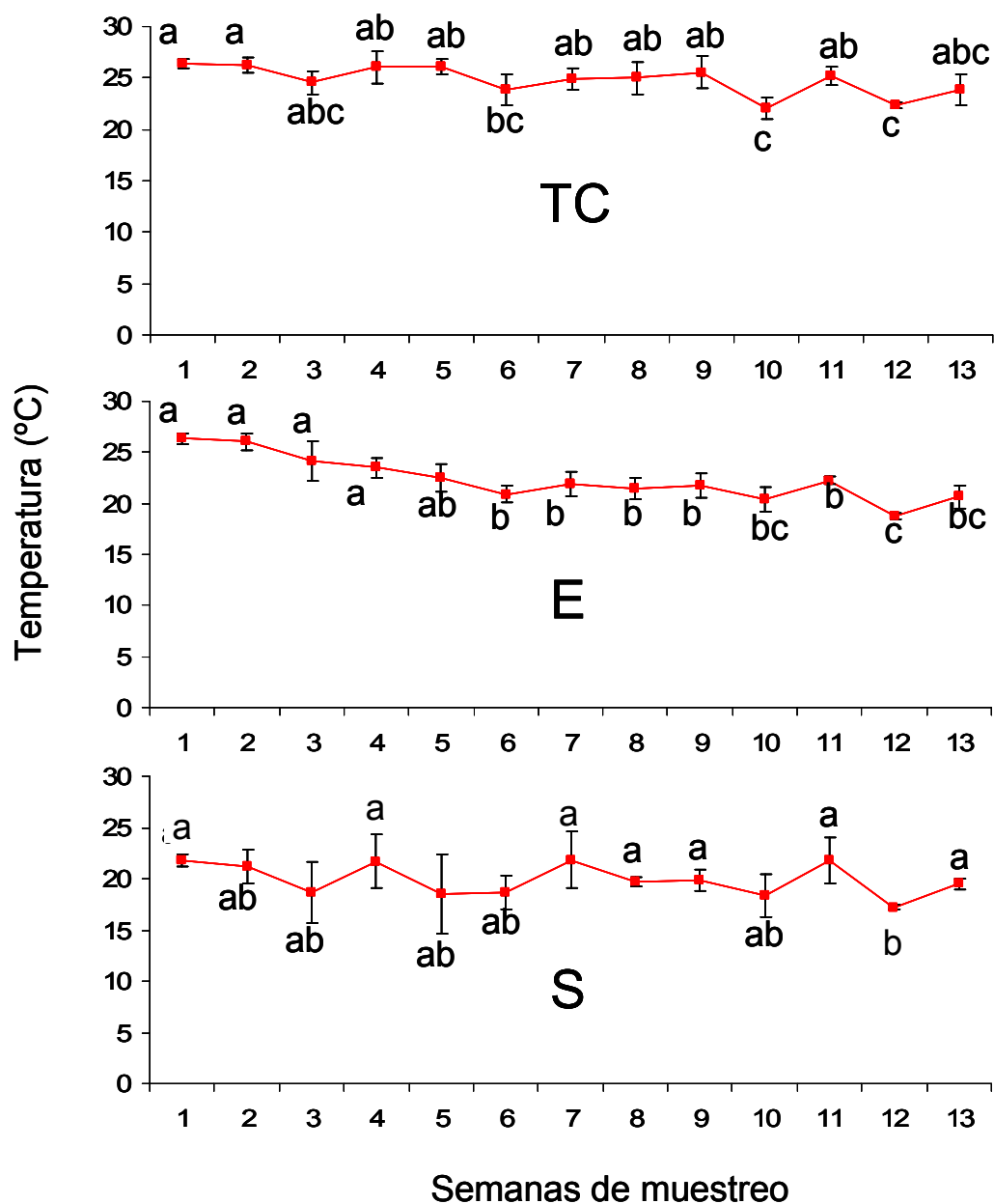


Figura 8. Valores semanales de temperatura promedio (°C) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.

#### **4.1.2 Conductividad eléctrica (CE)**

No se encontraron diferencias significativas ( $p=0.9667$ ) entre los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E y S) (Tabla IV, figura 9).

En TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la CE promedio fue de 1.65 mS/cm (mínima-máxima: 1.5-2.0 mS/cm). En E se encontraron diferencias significativas ( $p=0.00000$ ) entre semanas, la CE promedio fue de 1.643 mS/cm (1.5-2.0 mS/cm). En S se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la CE promedio fue de 1.641 mS/cm (1.5-2.0 mS/cm) (Tabla IV, figura 10).



Tabla IV. Valores promedio (m) de conductividad eléctrica (CE) y desviación estándar (mS/cm) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras (x, y, z) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.

Lugar de muestreo	Semana de muestreo												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TC m=1.6506 0.167 x	2.0 0.21 <sub>a</sub>	1.6 0.02 <sub>bc</sub>	1.7 0.03 <sub>b</sub>	1.7 0.02 <sub>b</sub>	1.6 0.06 <sub>bc</sub>	1.6 0.05 <sub>bc</sub>	1.5 0.02 <sub>c</sub>	1.5 0.02 <sub>bc</sub>	1.6 0.02 <sub>bc</sub>	1.6 0.10 <sub>bc</sub>	1.6 0.01 <sub>bc</sub>	1.7 0.01 <sub>bc</sub>	1.7 0.03 <sub>bc</sub>
E m=1.6436 0.1754 x	2.0 0.22 <sub>a</sub>	1.6 0.02 <sub>bc</sub>	1.7 0.01 <sub>b</sub>	1.7 0.02 <sub>b</sub>	1.6 0.06 <sub>bc</sub>	1.5 0.06 <sub>bc</sub>	1.5 0.02 <sub>c</sub>	1.5 0.02 <sub>bc</sub>	1.6 0.03 <sub>bc</sub>	1.5 0.04 <sub>bc</sub>	1.6 0.01 <sub>bc</sub>	1.6 0.01 <sub>bc</sub>	1.7 0.03 <sub>bc</sub>
S m=1.6418 0.1775 x	2.0 0.22 <sub>a</sub>	1.6 0.02 <sub>bc</sub>	1.7 0.01 <sub>b</sub>	1.7 0.02 <sub>b</sub>	1.6 0.07 <sub>bc</sub>	1.5 0.05 <sub>bc</sub>	1.5 0.02 <sub>c</sub>	1.5 0.02 <sub>bc</sub>	1.6 0.01 <sub>bc</sub>	1.5 0.04 <sub>bc</sub>	1.6 0.01 <sub>bc</sub>	1.6 0.01 <sub>bc</sub>	1.7 0.05 <sub>bc</sub>

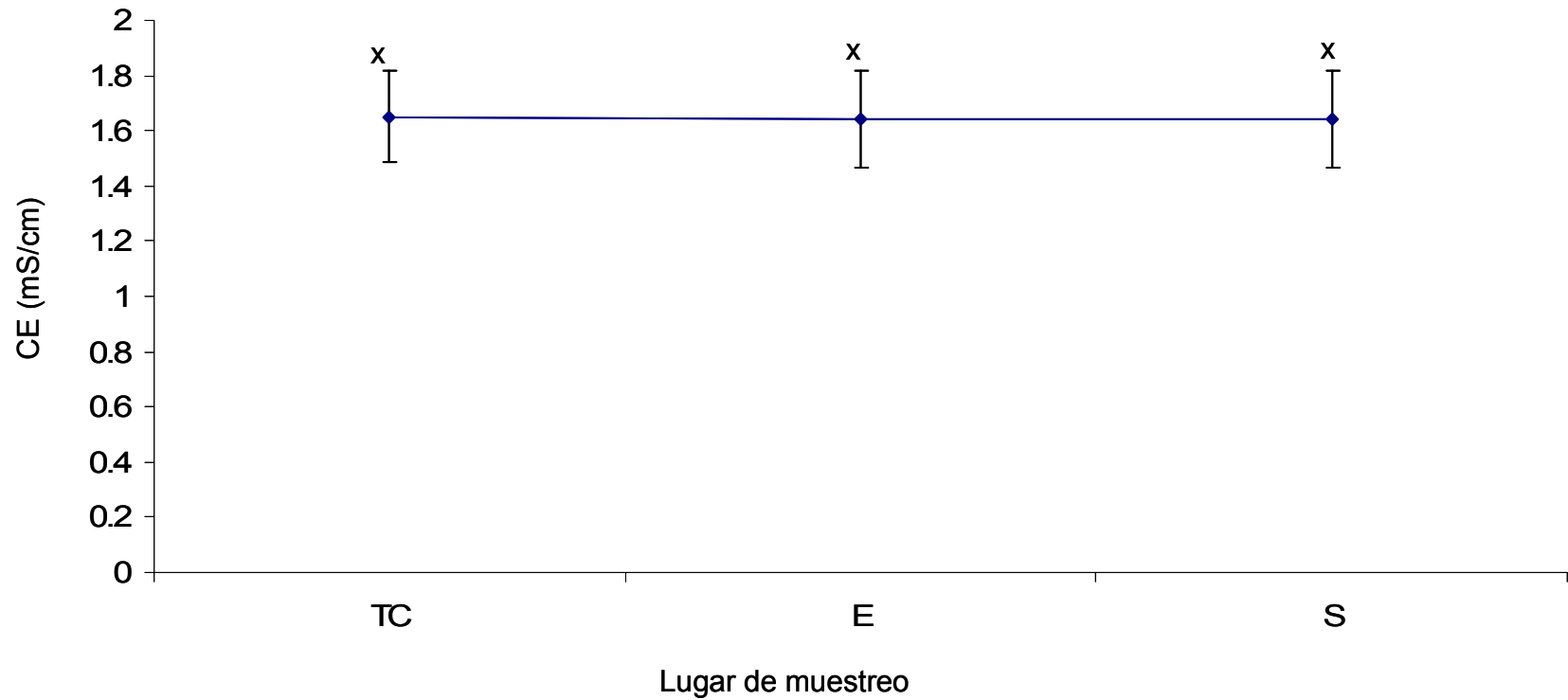


Figura 9. Comparación entre los valores de conductividad eléctrica promedio (CE, mS/cm) encontrados en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S) a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.

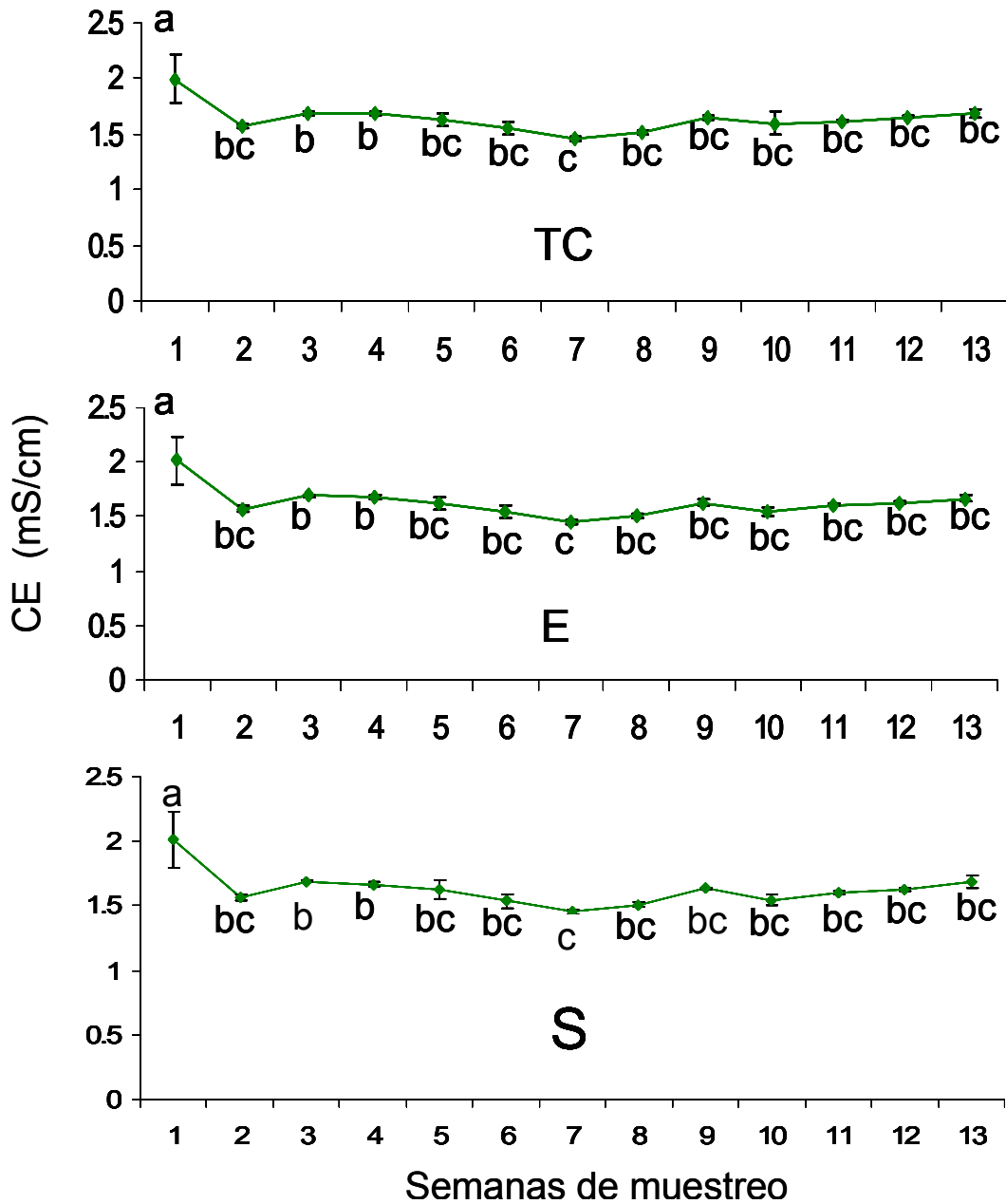


Figura 10. Valores semanales de conductividad eléctrica promedio (CE, mS/cm) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.

### 4.1.3 Oxígeno

Se detectaron diferencias significativas ( $p=0.000022$ ) entre los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E y S), donde la S fue significativamente diferente y mayor que el TC y la E (Tabla V, figura 11).

En TC, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.4096$ ) entre semanas, la concentración promedio de  $O_2$  fue de 5.5 mg/L (mínima-máxima: 4.8-6.0 mg/L).

En E, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.1141$ ) entre semanas, la concentración promedio de  $O_2$  fue de 5.7 mg/L (6.6-4.4 mg/L). En S, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.1366$ ) entre semanas, la concentración promedio de  $O_2$  fue de 7.9 mg/L (7.0-8.1 mg/L) (Tabla V, figura 12).

Tabla V. Valores promedio (m) de concentración de O<sub>2</sub> y desviación estándar (mg/L) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras (**x**, **y**, **z**) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.

Lugar de muestreo	Semana de muestreo												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TC m = 5.5 0.8 <b>y</b>	5.2 1.07 <sub>a</sub>	5.4 0.70 <sub>a</sub>	6.1 0.62 <sub>a</sub>	5.1 0.63 <sub>a</sub>	5.2 0.39 <sub>a</sub>	6.0 0.61 <sub>a</sub>	5.7 0.40 <sub>a</sub>	5.3 0.98 <sub>a</sub>	5.1 0.66 <sub>a</sub>	5.7 1.19 <sub>a</sub>	4.8 1.03 <sub>a</sub>	5.9 0.05 <sub>a</sub>	5.5 0.87 <sub>a</sub>
E m = 5.72 1.1 <b>y</b>	6.6 1.15 <sub>a</sub>	6.4 0.80 <sub>a</sub>	6.0 0.80 <sub>a</sub>	4.6 0.54 <sub>a</sub>	5.4 1.08 <sub>a</sub>	5.3 0.57 <sub>a</sub>	6.3 0.21 <sub>a</sub>	5.4 1.62 <sub>a</sub>	5.5 0.15 <sub>a</sub>	5.9 1.84 <sub>a</sub>	5.2 1.46 <sub>a</sub>	4.5 0.07 <sub>a</sub>	6.6 0.43 <sub>a</sub>
S m = 7.9 0.59 <b>x</b>	8.0 0.35 <sub>a</sub>	7.9 0.59 <sub>a</sub>	8.1 0.73 <sub>a</sub>	7.0 0.60 <sub>a</sub>	8.1 0.96 <sub>a</sub>	8.0 0.44 <sub>a</sub>	7.7 0.60 <sub>a</sub>	8.1 0.47 <sub>a</sub>	7.9 0.49 <sub>a</sub>	8.2 0.25 <sub>a</sub>	7.6 0.17 <sub>a</sub>	7.9 0.03 <sub>a</sub>	8.0 0.39 <sub>a</sub>

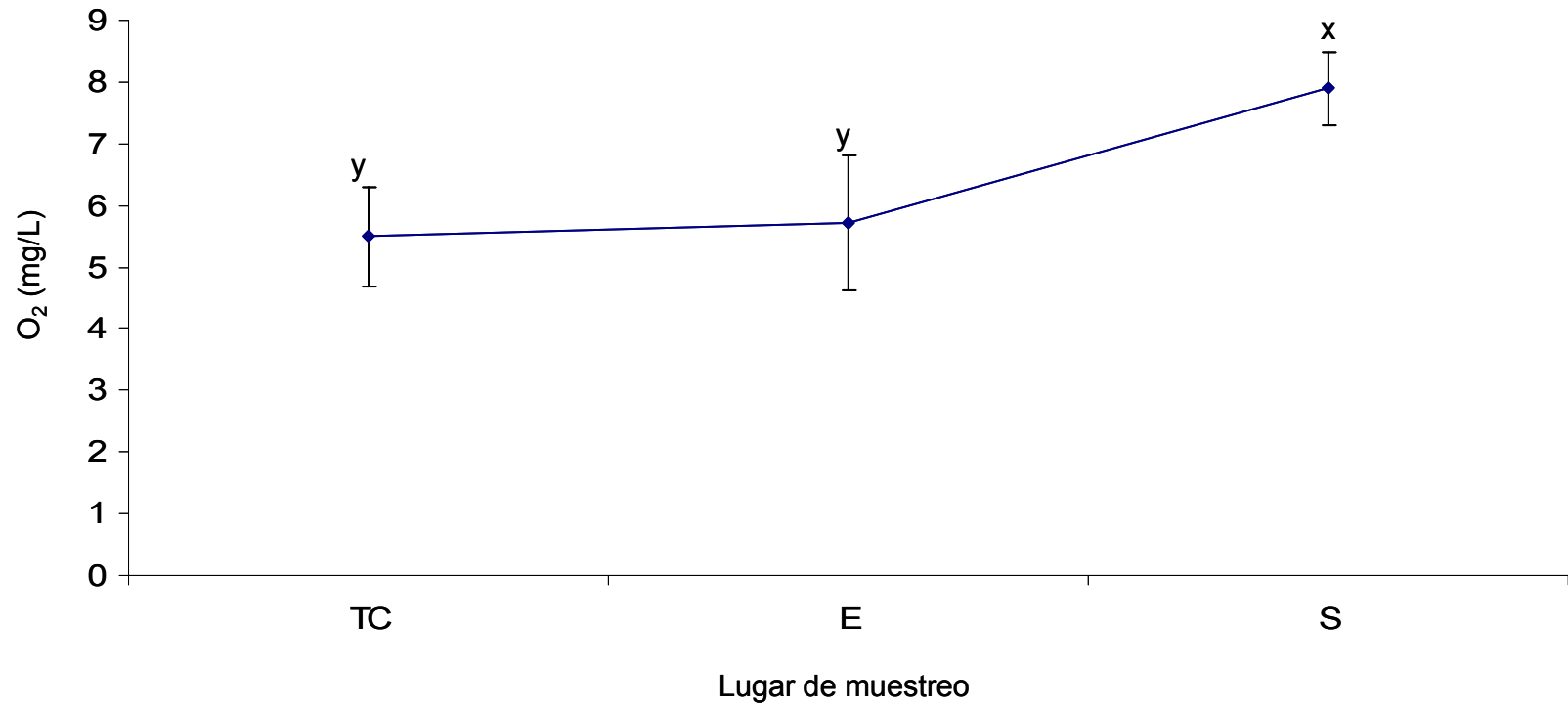


Figura 11. Comparación entre las concentraciones de  $O_2$  promedio (mg/L) encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.

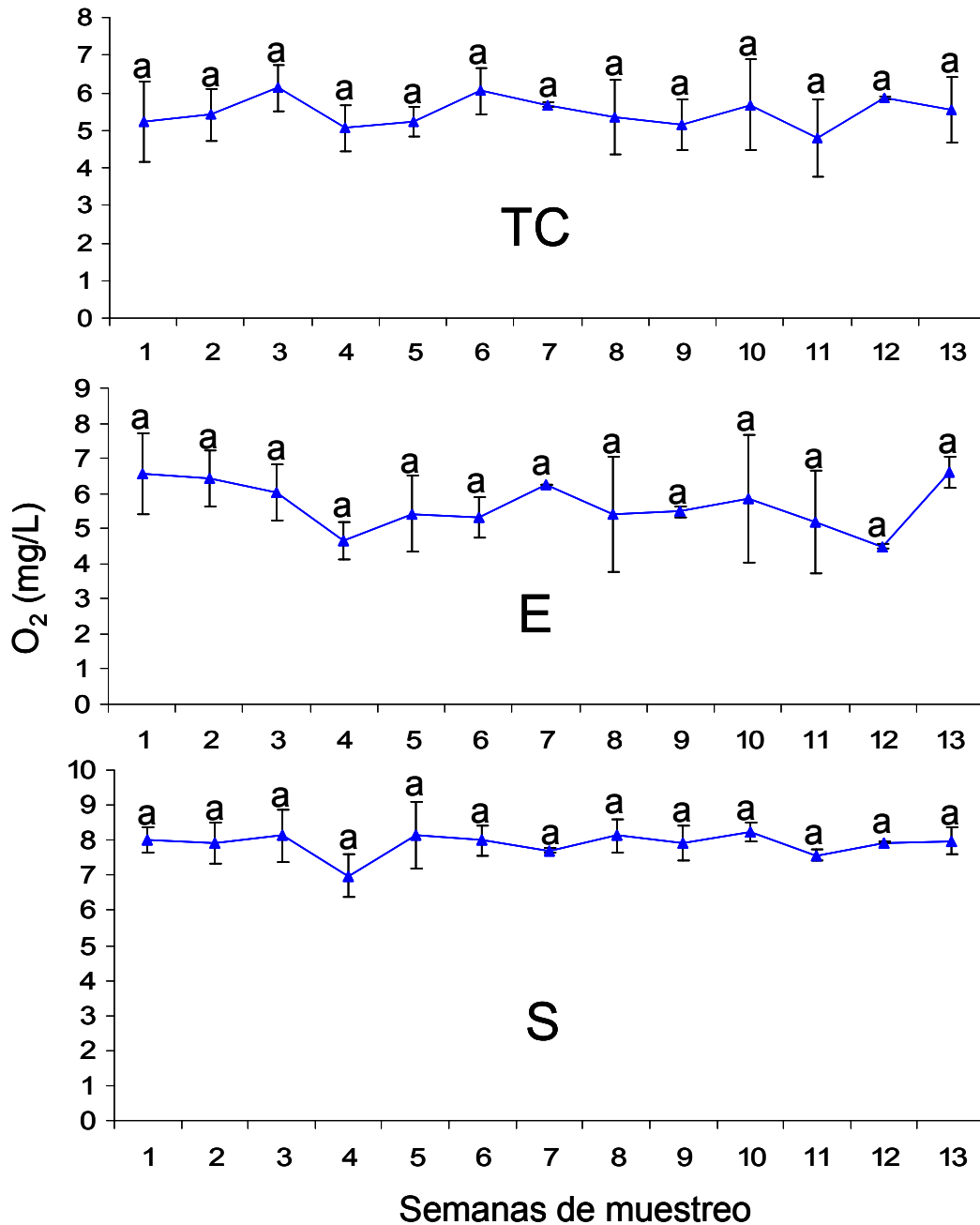


Figura 12. Valores semanales de concentración de O<sub>2</sub> promedio (mg/L) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.

#### 4.1.4 pH

Se encontraron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E y S), donde S fue significativamente diferente y mayor al TC ( $p=0.020573$ ) y a la E ( $p=0.010808$ ) (Tabla VI, figura 13).

En TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.002563$ ) entre semanas, el valor de pH promedio fue de 7.04 (mínimo-máximo: 6.6-7.5). En E se encontraron diferencias significativas ( $p=0.000181$ ) entre semanas, el valor de pH promedio fue de 7.03 (6.6-7.6). En S se encontraron diferencias significativas ( $p=0.000103$ ) entre semanas, el valor de pH promedio fue de 7.22 (6.8 -7.8) (Tabla VI, figura 14).



Tabla VI. Valores promedio (m) de pH y desviación estándar registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras (**x**, **y**, **z**) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.

Lugar de muestreo	Semana de muestreo												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TC m = 7.05 0.35 <b>y</b>	7.4 0.34 <sub>a</sub>	7.5 0.22 <sub>a</sub>	7.2 0.56 <sub>ab</sub>	6.9 0.32 <sub>ab</sub>	6.8 0.18 <sub>b</sub>	6.9 0.13 <sub>ab</sub>	7.1 0.05 <sub>ab</sub>	7.0 0.10 <sub>ab</sub>	6.9 0.00 <sub>ab</sub>	7.2 0.05 <sub>ab</sub>	7.0 0.21 <sub>ab</sub>	6.6 0.14 <sub>b</sub>	6.7 0.78 <sub>ab</sub>
E m = 7.03 0.37 <b>y</b>	7.4 0.38 <sub>a</sub>	7.6 0.15 <sub>a</sub>	7.0 0.40 <sub>ab</sub>	6.9 0.34 <sub>b</sub>	6.8 0.19 <sub>b</sub>	6.9 0.15 <sub>b</sub>	7.1 0.00 <sub>ab</sub>	6.9 0.17 <sub>b</sub>	6.9 0.07 <sub>ab</sub>	7.1 0.15 <sub>ab</sub>	7.0 0.21 <sub>ab</sub>	6.6 0.21 <sub>ab</sub>	6.7 0.78 <sub>b</sub>
S m = 7.23 0.36 <b>x</b>	7.5 0.39 <sub>ab</sub>	7.8 0.19 <sub>a</sub>	7.0 0.30 <sub>b</sub>	7.0 0.32 <sub>b</sub>	7.1 0.23 <sub>b</sub>	7.1 0.17 <sub>b</sub>	7.3 0.06 <sub>ab</sub>	7.2 0.00 <sub>ab</sub>	7.2 0.07 <sub>ab</sub>	7.4 0.05 <sub>ab</sub>	7.3 0.17 <sub>ab</sub>	6.8 0.21 <sub>b</sub>	6.9 0.78 <sub>b</sub>

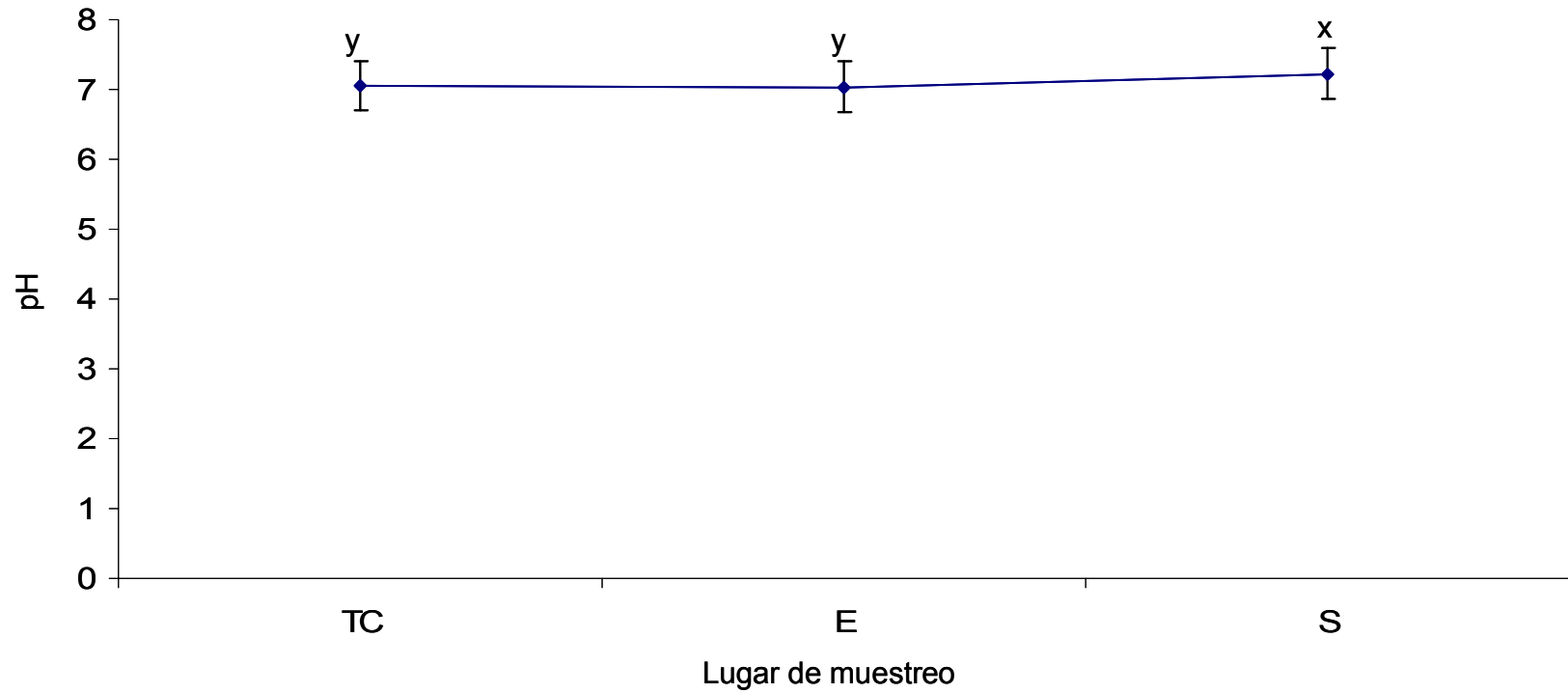


Figura 13. Comparación entre los valores de pH promedio encontrados en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.

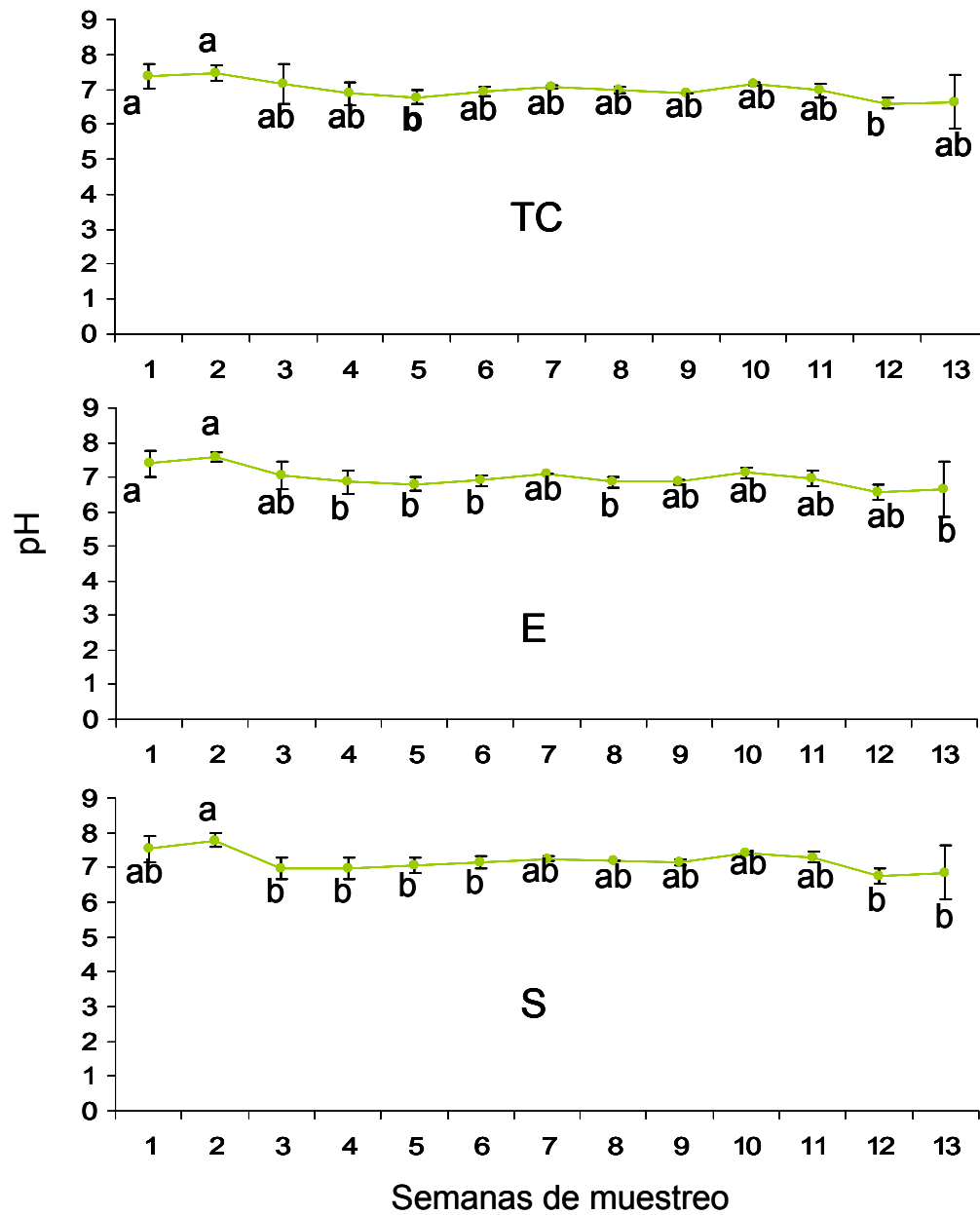


Figura 14. Valores semanales de pH promedio registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.

## **4.2 Nutrientes**

### **4.2.1 Nitrógeno amoniacal total (NAT)**

Se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E y S), donde TC fue significativamente diferente y mayor que E y S, mientras que E fue significativamente diferente y mayor a S (Tabla VII, figura 15).

En TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de NAT fue de 10.37 mg/L (mínima-máxima: 3.2-21.1 mg/L). En E se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de NAT fue de 6.3 mg/L (2.6-16.1 mg/L). En S se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de NAT fue de 3.7 mg/L (1.5-12.4 mg/L) (Tabla VII, figura 16).

Tabla VII. Valores de promedio (m) de concentración de NAT (mg/L) y desviación estándar registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras (**x**, **y**, **z**) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.

Lugar de muestreo	Semana de muestreo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TC m = 10.37 5.9 <b>x</b>	6.6 2.5 <sub>bc</sub>	16.9 1.3 <sub>a</sub>	7.7 1.5 <sub>bc</sub>	7.3 0.4 <sub>bc</sub>	16.2 3.8 <sub>a</sub>	21.1 1.4 <sub>a</sub>	10.8 0.6 <sub>b</sub>	10.0 0.3 <sub>b</sub>	3.2 0.6 <sub>c</sub>	3.9 2.3 <sub>c</sub>
E m = 6.31 4.5 <b>y</b>	4.8 2.3 <sub>b</sub>	13.3 2.1 <sub>a</sub>	5.5 0.6 <sub>b</sub>	3.4 0.7 <sub>b</sub>	16.1 2.2 <sub>a</sub>	4.9 1.7 <sub>b</sub>	3.5 0.2 <sub>b</sub>	4.2 0.2 <sub>b</sub>	5.0 4.2 <sub>b</sub>	2.6 0.9 <sub>b</sub>
S m = 3.72 3.14 <b>z</b>	2.5 0.0 <sub>b</sub>	4.0 1.4 <sub>b</sub>	3.4 1.4 <sub>b</sub>	1.5 0.1 <sub>b</sub>	12.4 0.3 <sub>a</sub>	3.3 1.4 <sub>b</sub>	2.5 0.4 <sub>b</sub>	2.4 0.6 <sub>b</sub>	3.6 0.4 <sub>b</sub>	1.7 0.9 <sub>b</sub>

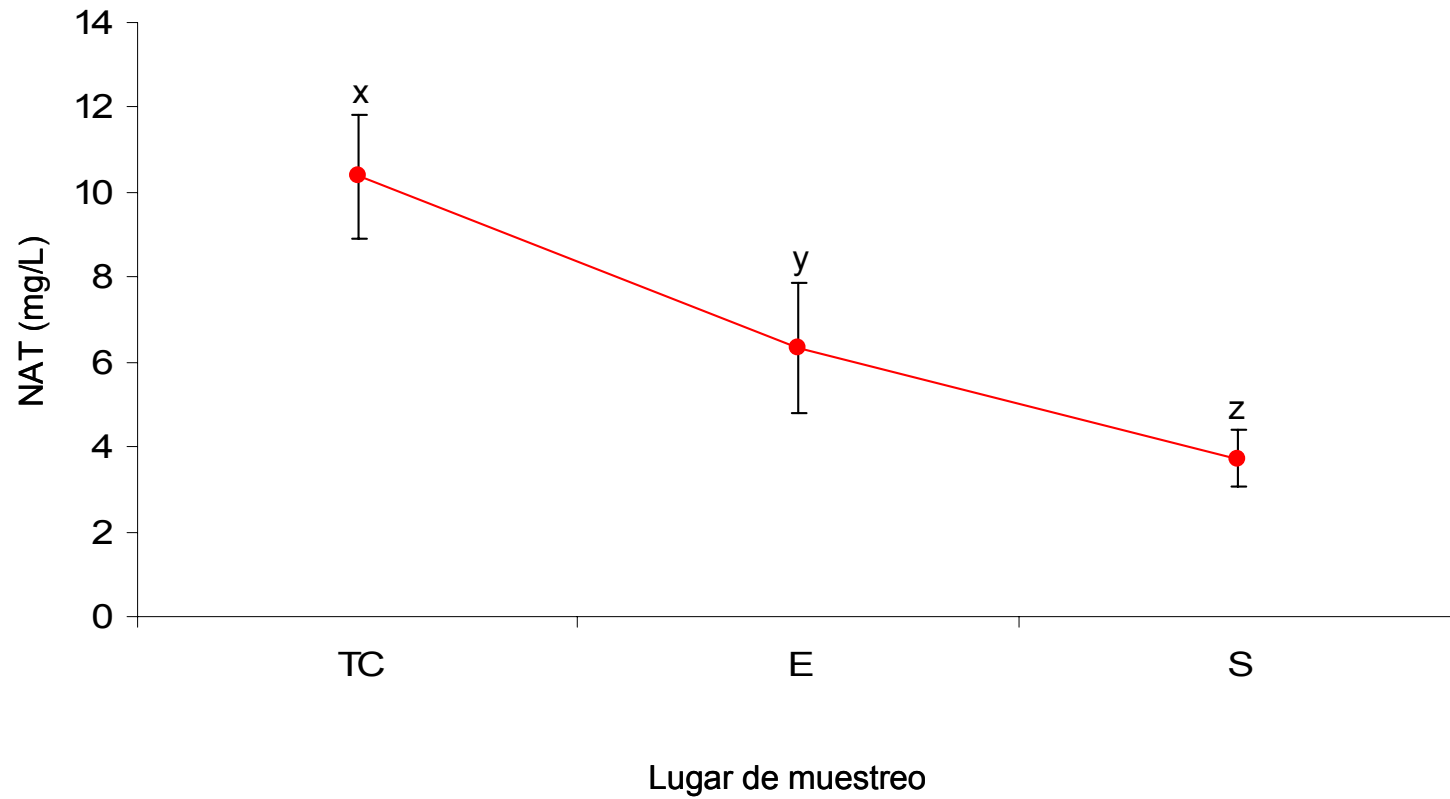


Figura 15. Comparación entre las concentraciones de NAT (mg/L) promedio encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.

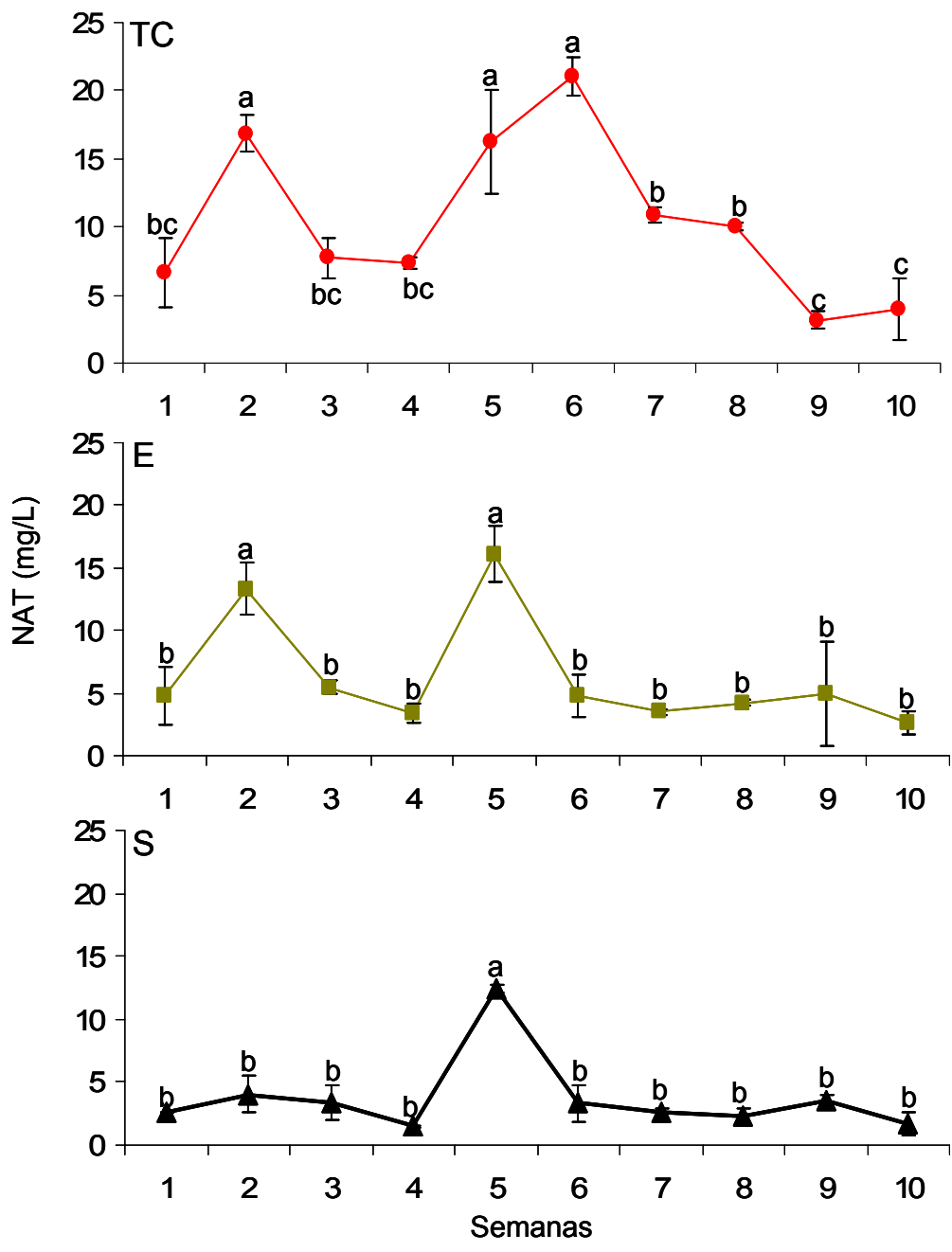


Figura 16. Valores semanales de concentración promedio de NAT (mg/L) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.

#### 4.2.2 Cálculo del $\text{NH}_3\text{-N}$ del NAT

La concentración de  $\text{NH}_3\text{-N}$  (mg/L) fue estimada por medio de la ecuación 2, a partir de los valores semanales promedio: de concentración de NAT, de pH y de temperatura (Tabla VIII).

Se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre TC respecto a E y S, donde TC fue significativamente diferente y mayor a E y a S, mientras que entre E y S, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.9860$ ) (Tabla VIII).

En TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0006$ ) entre semanas, la concentración promedio de  $\text{NH}_3\text{-N}$  fue de 0.052 mg/L (mínima-máxima: 0.010-0.098 mg/L). En E se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0012$ ) entre semanas, la concentración promedio de  $\text{NH}_3\text{-N}$  fue de 0.022 mg/L (0.005-0.056 mg/L). En S se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0092$ ) entre semanas, la concentración promedio de  $\text{NH}_3\text{-N}$  fue de 0.021 mg/L (0.005-0.076 mg/L) (Tabla VIII).



Tabla VIII. Valores promedio de concentración de  $\text{NH}_3\text{-N}$  (mg/L) registrados por semana obtenidos a partir de las concentraciones de NAT, por medio de la ecuación 2, en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (**x**, **y**) indican que se detectaron diferencias significativas entre cada lugar de muestreo.

		Semana de muestreo											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	m	
TC	NAT	6.6	16.9	7.7	7.3	16.2	21.1	10.8	10	3.2	3.9	10.37	d/S p=0.0006
	pH	6.9	6.8	6.9	7.1	7	6.9	7.2	7	6.6	6.7	6.91	
	T	26.1	26.1	23.8	24.9	25	25.5	22.1	25.2	22.3	23.8	24.48	
	NH3-N	0.032	0.065	0.032	0.052	0.092	0.098	0.079	0.057	0.006	0.010	0.052	<b>x</b>
E	NAT	4.8	13.3	5.5	3.4	16.1	4.9	3.5	4.2	5	2.6	6.33	d/S p=0.0012
	pH	6.9	6.8	6.9	7.1	6.9	6.9	7.1	7	6.6	6.7	6.89	
	T	23.5	22.5	20.9	21.9	21.4	21.7	20.4	22.3	18.7	20.6	21.39	
	NH3-N	0.019	0.040	0.018	0.019	0.056	0.017	0.018	0.020	0.007	0.005	0.022	<b>y</b>
S	NAT	2.5	4	3.4	1.5	12.4	3.3	2.5	2.4	3.6	1.7	3.73	d/S p=0.0092
	pH	7	7.1	7.1	7.3	7.2	7.2	7.4	7.3	6.8	6.9	7.13	
	T	21.7	18.5	18.6	21.8	19.7	19.8	18.4	21.8	17.2	19.5	19.7	
	NH3-N	0.011	0.018	0.015	0.013	0.076	0.020	0.022	0.021	0.007	0.005	0.021	<b>y</b>

### 4.2.3 Nitritos (NO<sub>2</sub>)

Se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre TC y E, respecto a S, donde S fue significativamente diferente y menor que TC y E (Tabla IX, figura 17).

En TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de NO<sub>2</sub> fue de 2.62 mg/L (mínima-máxima: 1.36-4.21 mg/L). En E se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de NO<sub>2</sub> fue de 2.63 mg/L (1.22-4.15 mg/L). En S se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de NO<sub>2</sub> fue de 1.27 mg/L (0.05-3.15 mg/L) (Tabla IX, figura 18).

Tabla IX. Valores promedio ( $m$ ) de concentración de  $\text{NO}_2$  y desviación estándar (mg/L) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras (**x**, **y**, **z**) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.

Lugar de muestreo	Semana de muestreo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TC $m = 2.62$ 0.86 <b>x</b>	4.02 0.29 <sub>a</sub>	2.23 0.07 <sub>b</sub>	2.60 0.18 <sub>b</sub>	1.36 0.18 <sub>c</sub>	4.21 0.05 <sub>a</sub>	2.34 0.07 <sub>b</sub>	2.47 0.11 <sub>b</sub>	2.33 0.04 <sub>b</sub>	2.45 0.17 <sub>b</sub>	2.14 0.04 <sub>b</sub>
E $m = 2.63$ 0.89 <b>x</b>	4.14 0.06 <sub>b</sub>	2.30 0.06 <sub>b</sub>	2.64 0.18 <sub>b</sub>	1.22 0.05 <sub>c</sub>	4.15 0.03 <sub>a</sub>	2.26 0.10 <sub>b</sub>	2.62 0.12 <sub>b</sub>	2.39 0.08 <sub>b</sub>	2.47 0.02 <sub>b</sub>	2.08 0.07 <sub>b</sub>
S $m = 1.27$ 0.98 <b>y</b>	3.15 0.25 <sub>a</sub>	1.37 0.09 <sub>c</sub>	0.34 0.10 <sub>b</sub>	0.05 0.11 <sub>d</sub>	2.56 0.05 <sub>b</sub>	0.98 0.04 <sub>c</sub>	1.10 0.21 <sub>c</sub>	0.72 0.13 <sub>d</sub>	1.81 0.21 <sub>c</sub>	0.55 0.16 <sub>d</sub>

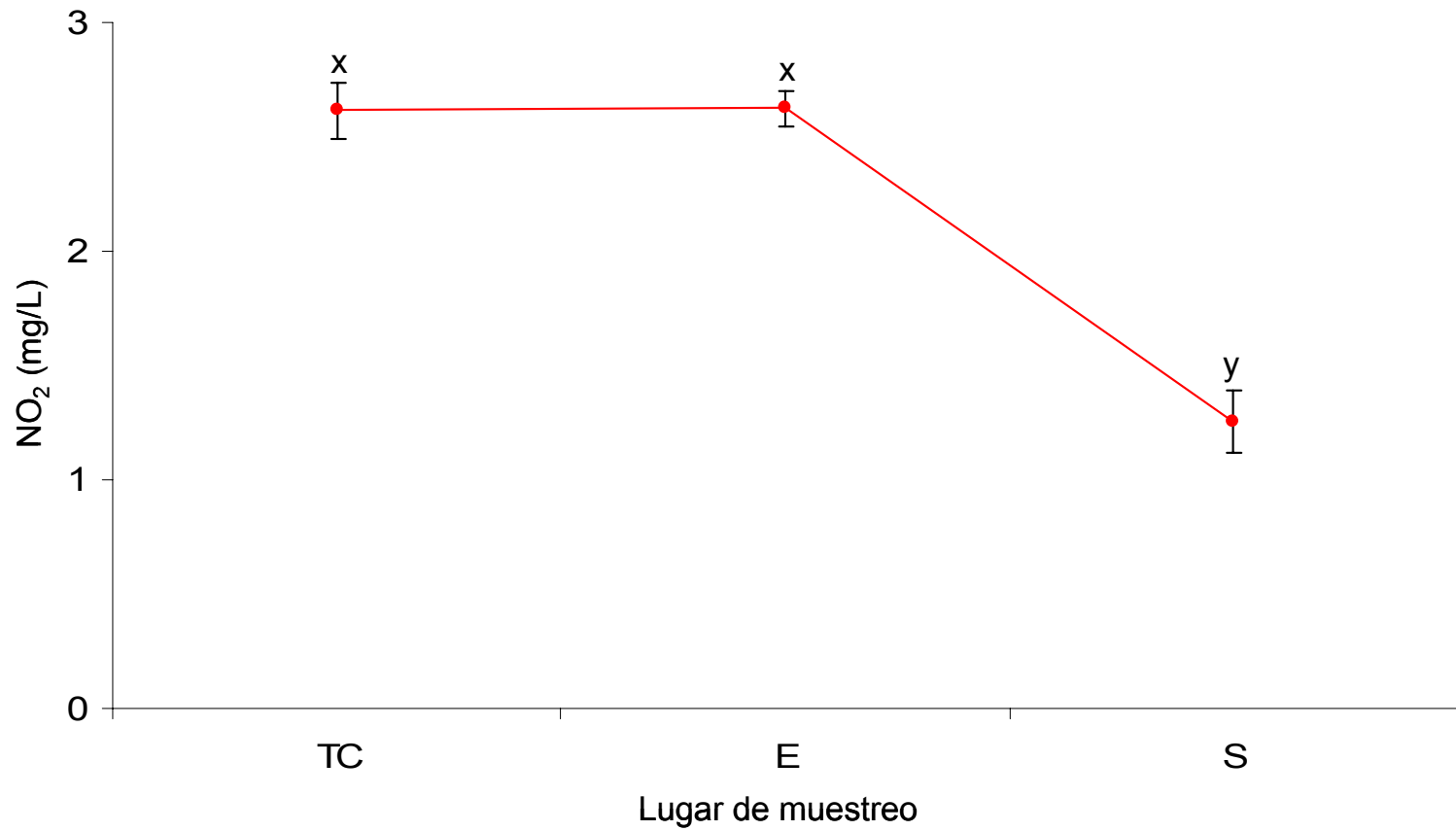


Figura 17. Comparación entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> (mg/L) promedio encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.

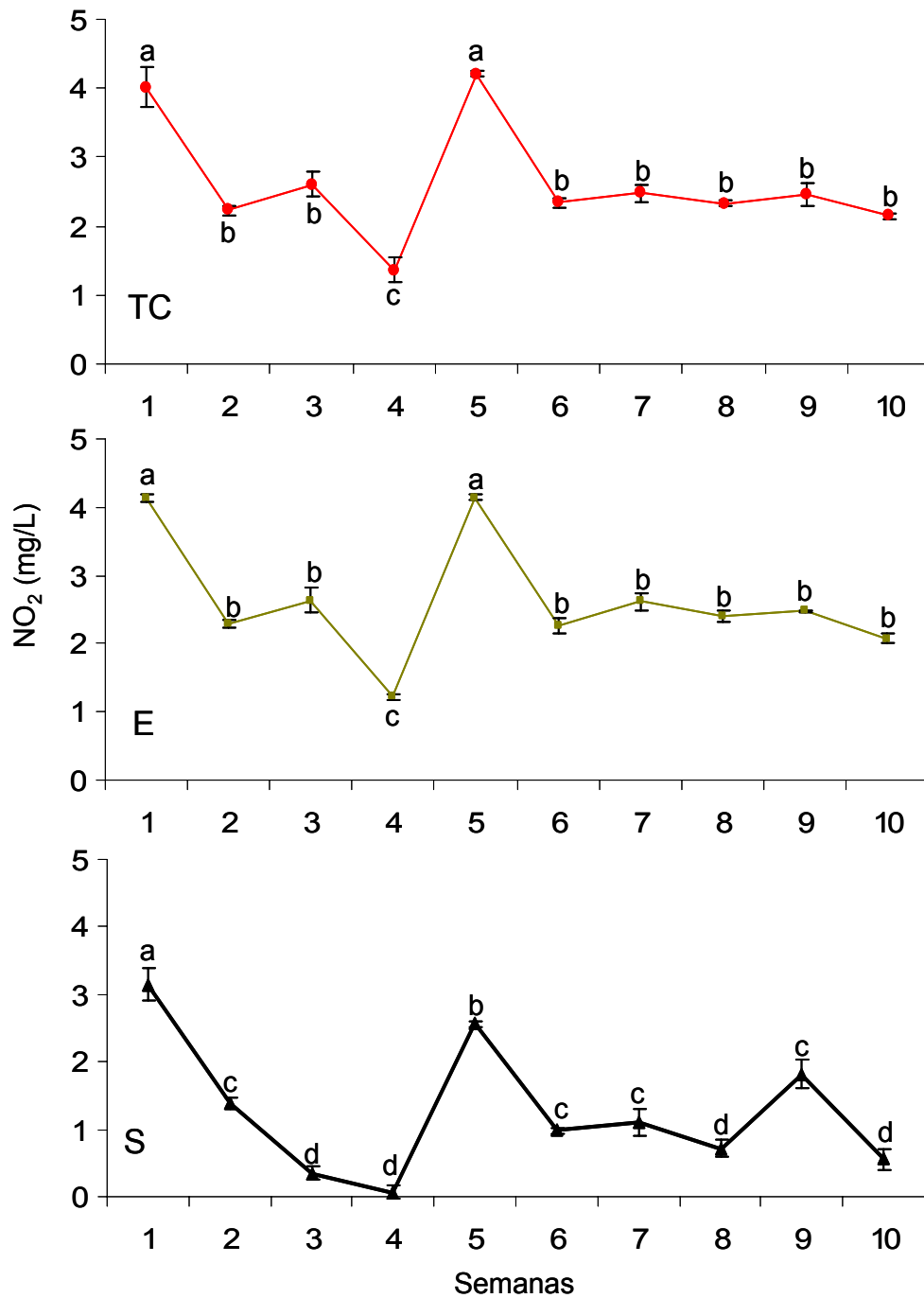


Figura 18. Valores semanales de concentración promedio de NO<sub>2</sub> (mg/L) encontrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.

#### 4.2.4 Fósforo (P)

No se encontraron diferencias significativas ( $p=0.02062$ ) entre los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E y S) (Tabla X, figura 19).

En TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de P fue de 4.48 mg/L (mínima-máxima: 1.85-10.35 mg/L). En E se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de P fue de 4.41 mg/L (1.35-10.52 mg/L). En S se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0000$ ) entre semanas, la concentración promedio de P fue de 4.27 mg/L (1.4-9.87 mg/L) (Tabla X, figura 20).

Tabla X. Valores promedio ( $m$ ) de concentración de P y desviación estándar (mg/L) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras (**x**, **y**, **z**) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo. Los subíndices (a, b, c) muestran que se detectaron diferencias significativas entre semanas en cada lugar de muestreo.

Lugar de muestreo	Semana de muestreo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TC $m = 4.48$ 2.41 <b>x</b>	3.13 0.06 <sub>c</sub>	5.15 0.20 <sub>b</sub>	1.85 0 <sub>c</sub>	3.27 0.47 <sub>c</sub>	3.55 0.1 <sub>c</sub>	5.00 0.91 <sub>b</sub>	3.02 0.23 <sub>c</sub>	3.32 0.94 <sub>c</sub>	6.18 0.15 <sub>b</sub>	10.35 0.25 <sub>a</sub>
E $m = 4.41$ 2.52 <b>x</b>	3.33 0.29 <sub>d</sub>	5.25 0.36 <sub>c</sub>	1.35 0 <sub>e</sub>	3.63 0.32 <sub>d</sub>	2.83 0.20 <sub>d</sub>	4.38 0.40 <sub>c</sub>	3.40 0.17 <sub>d</sub>	3.17 0.24 <sub>d</sub>	6.25 0.35 <sub>b</sub>	10.52 0.23 <sub>a</sub>
S $m = 4.27$ 2.39 <b>x</b>	2.87 0.06 <sub>c</sub>	4.35 0.65 <sub>c</sub>	1.40 0 <sub>d</sub>	3.05 0.41 <sub>c</sub>	3.77 0.29 <sub>c</sub>	5.33 1.11 <sub>bc</sub>	2.73 0.46 <sub>c</sub>	3.18 0.51 <sub>c</sub>	6.17 0.46 <sub>b</sub>	9.87 0.19 <sub>a</sub>

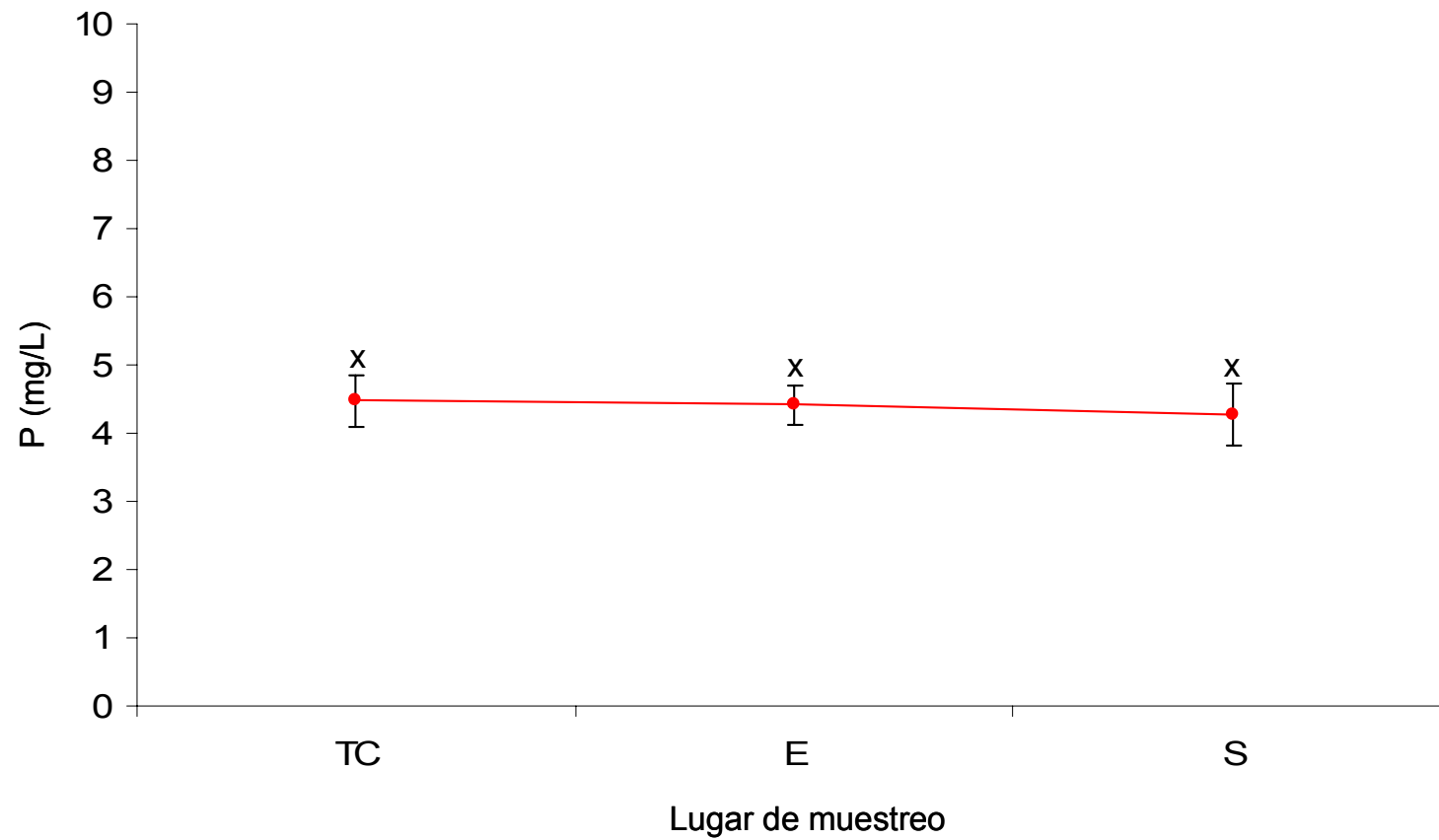


Figura 19. Comparación entre las concentraciones de P (mg/L) promedio encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.



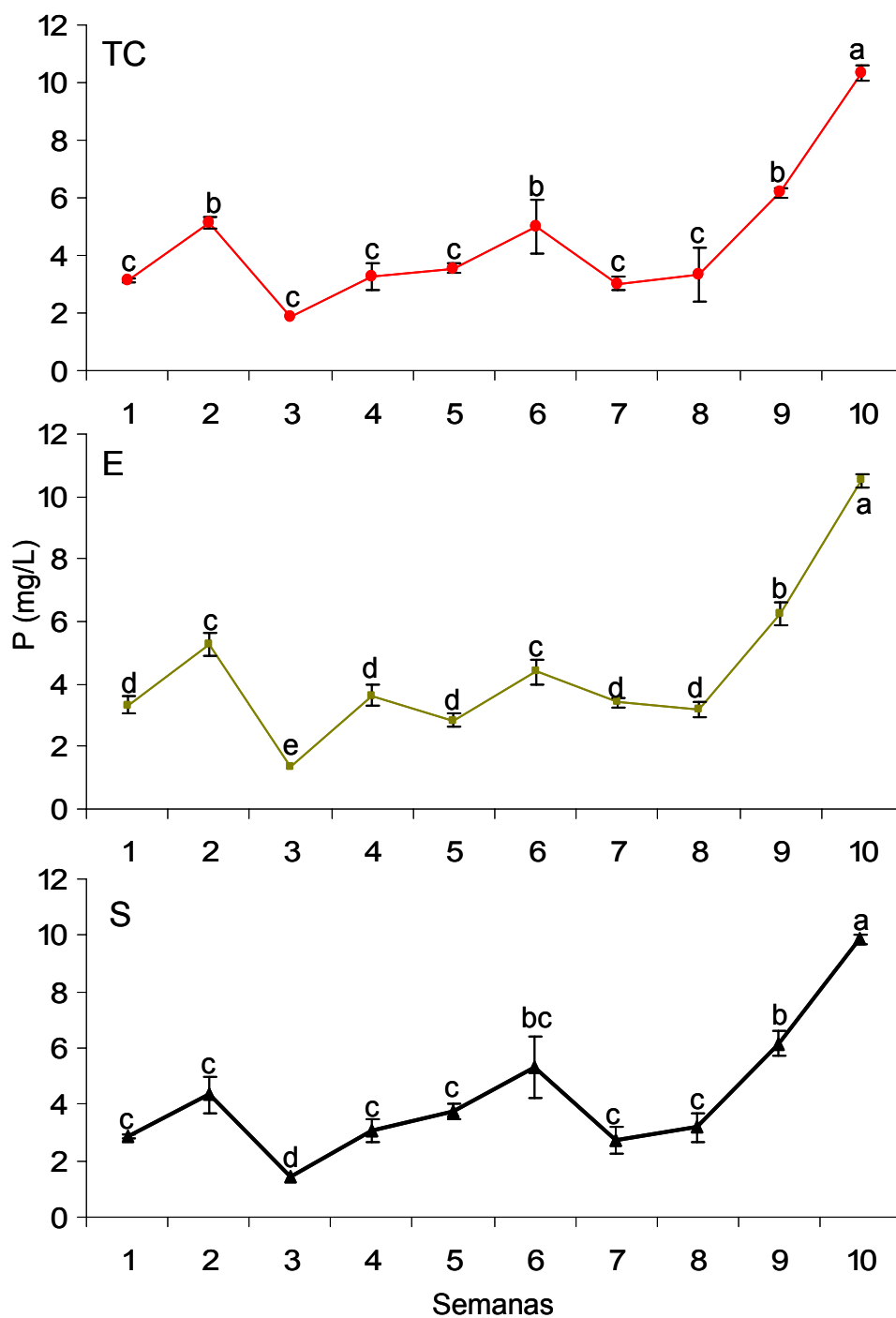


Figura 20. Valores semanales de concentración promedio de P (mg/L) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.

#### **4.2.5 Potasio (K)**

No se encontraron diferencias significativas ( $p=0.6603$ ) entre los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E y S) (Tabla XI, figura 21).

En TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.000171$ ) entre semanas, la concentración promedio de K fue de 17.15 mg/L (mínima-máxima: 10.3-21.7 mg/L). En E se encontraron diferencias significativas ( $p=0.000150$ ) entre semanas, la concentración promedio de K fue de 16.2 mg/L (10-20.2 mg/L). En S se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0002$ ) entre semanas, la concentración promedio de K fue de 15.9 mg/L (9.7 -19.2 mg/L) (Tabla XI, figura 22).

Tabla XI. Valores promedio (m) de concentración de K y desviación estándar (mg/L) registrados a lo largo del periodo experimental y por semanas, en los tres diferentes lugares de muestreo (TC, E, y S). Las letras (**x**, **y**, **z**) indican que se detectaron diferencias significativas entre los lugares de muestreo.

Lugar de muestreo	Semana de muestreo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TC m = 17.15 3.16 <b>x</b>	21.67 0.29	10.33 0.58	18 -	15 -	16.5 -	19.5 -	17.5 -	18.5 -	19.5 -	15 -
E m = 16.21 3.04 <b>x</b>	20.2 0.29	10.0 0.50	14.5 -	14.0 -	16.0 -	19.5 -	16.5 -	18.0 -	18.5 -	15.0 -
S m = 15.93 3.14 <b>x</b>	19.2 0.58	9.7 0.29	13.5 -	14.0 -	15.5 -	19.5 -	16.5 -	18.5 -	18.5 -	14.5 -

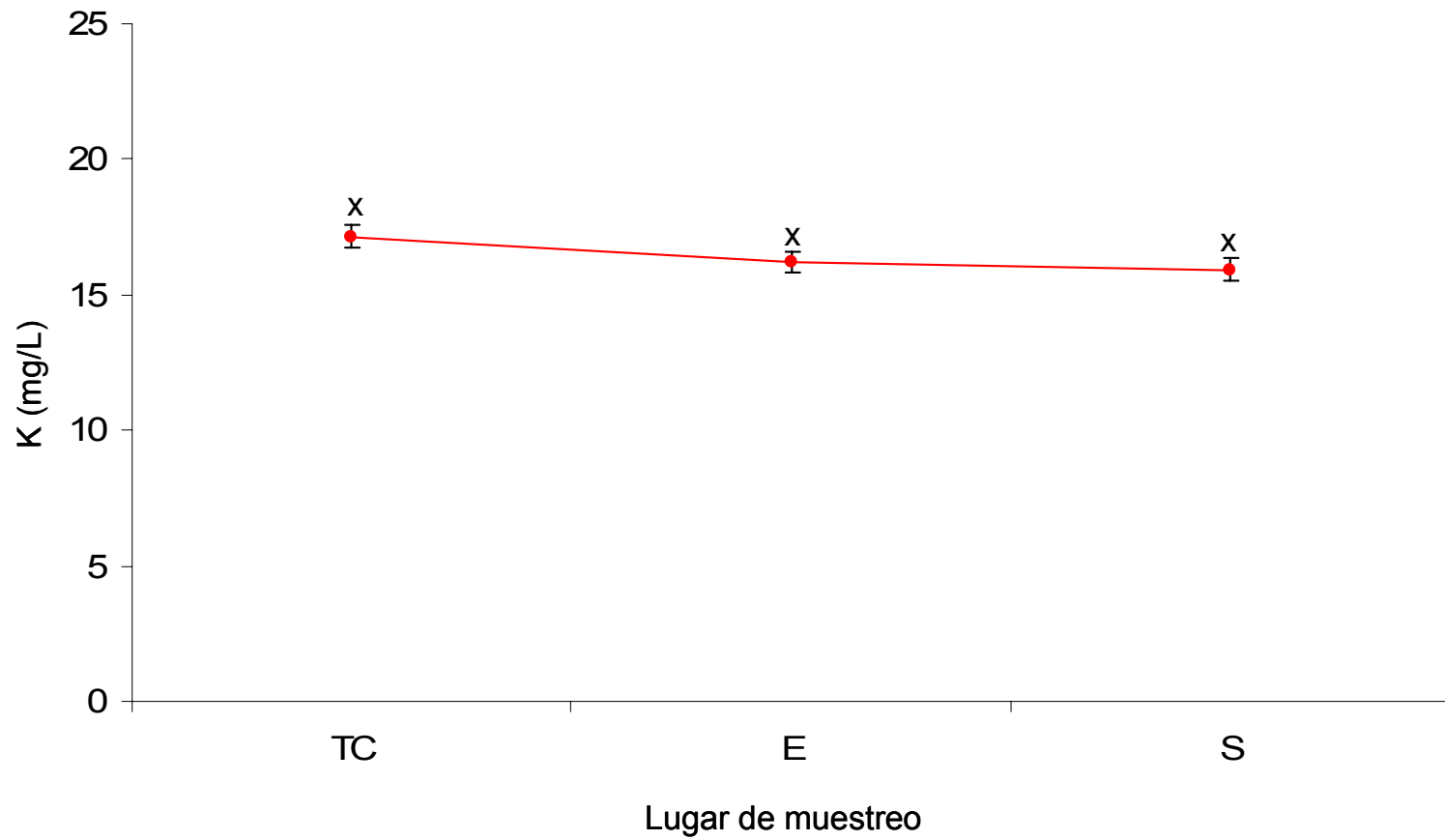


Figura 21. Comparación entre las concentraciones de K (mg/L) promedio encontradas en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S), a lo largo del periodo experimental. Las letras (x, y, z) indican que existieron diferencias significativas entre los tres diferentes lugares de muestreo.

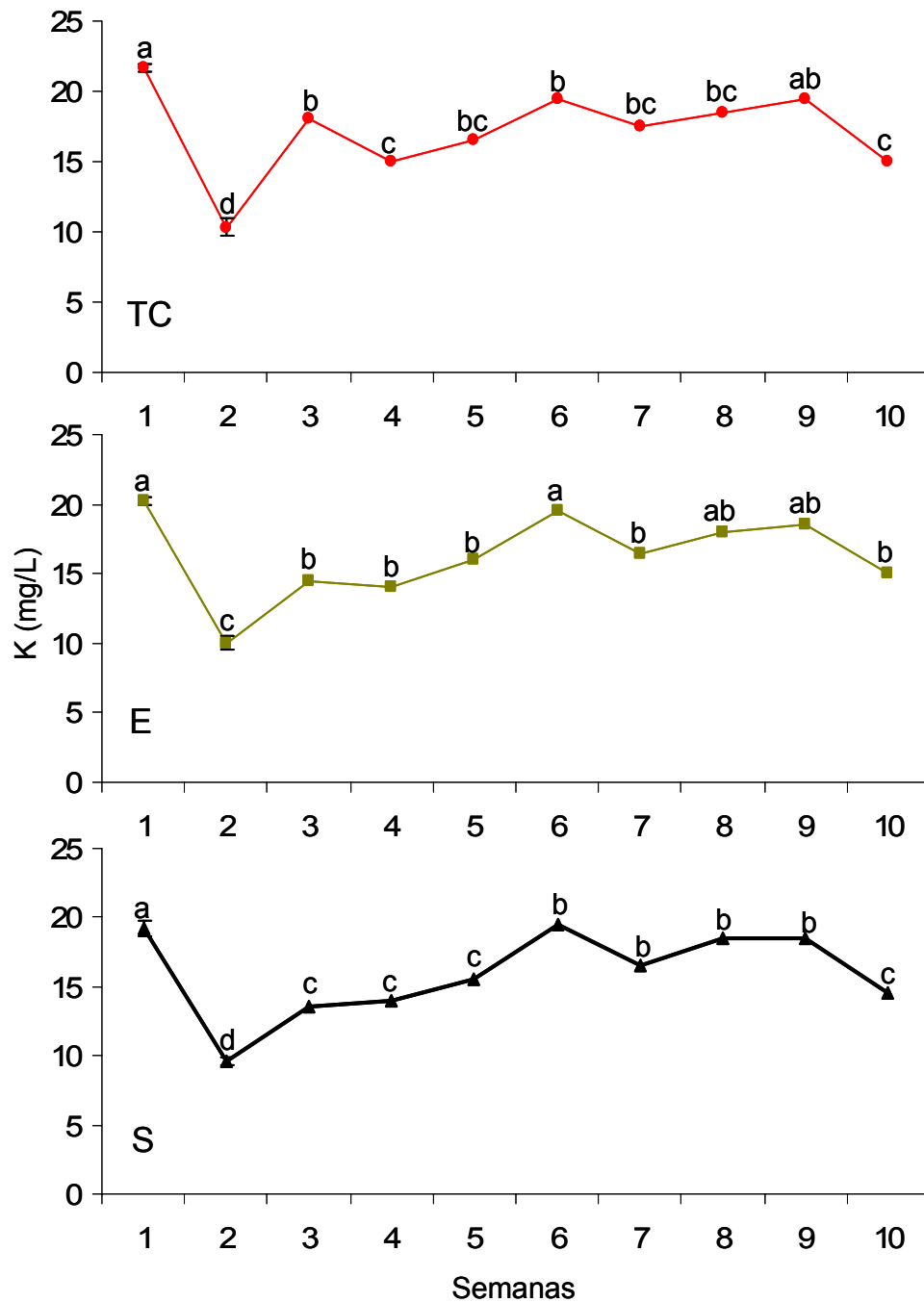


Figura 22. Valores semanales de concentración promedio de K (mg/L) registrados durante el periodo experimental en el tanque de cultivo (TC), la entrada (E) y la salida (S). Las letras (a, b, c) indican que existieron diferencias significativas entre las semanas de cada lugar de muestreo.

### **4.3 Cálculo de la eficiencia de remoción de nutrientes (ER)**

Los cálculos de eficiencia se usaron para estimar la remoción de la concentración de nutrientes (NAT, NO<sub>2</sub>, P y K) entre el biofiltro (B) y el sistema de hidroponía (SH).

No se encontraron diferencias significativas ( $p=0.5873$ ) en ER del NAT entre el B y el SH a lo largo del periodo experimental. En ER de los NO<sub>2</sub>, se encontraron diferencias altamente significativas ( $p=0.000016$ ) entre el B y el SH. En ER del P no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0556$ ) entre el B y el SH. En ER del K no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0680$ ) entre el B y el SH. Los resultados semanales de ER por nutriente (NAT, NO<sub>2</sub>, P y K) se muestran en la Tabla XII.

Tabla XII. Eficiencia de remoción de nutrientes (NAT, NO<sub>2</sub>, P y K) determinados para el biofiltro (B) y el sistema de hidroponía (SH) a lo largo del periodo experimental. Se presentan también los valores promedio por nutriente (m), la desviación estándar (DE) y los resultados obtenidos de la prueba T realizada entre B y SH.

Semana	NAT		NO <sub>2</sub>		P		K	
	B	SH	B	SH	B	SH	B	SH
1	28.21	46.43	-2.96	23.88	6.00	8.51	6.92	4.96
2	21.03	69.82	-3.29	40.21	1.90	15.53	3.23	3.33
3	29.13	38.36	-1.41	87.09	27.03	-3.70	19.44	6.90
4	53.79	56.72	10.12	104.35	10.09	6.63	6.67	0.00
5	0.64	23.08	1.52	38.17	-25.29	-6.10	3.03	3.13
6	79.65	31.91	3.51	56.63	-14.07	-6.67	0.00	0.00
7	67.66	27.69	-5.92	58.00	11.27	9.39	5.71	0.00
8	57.69	44.44	-2.75	70.06	-4.74	4.02	2.70	-2.78
9	20.31	-41.18	-0.75	26.65	1.07	0.27	5.13	0.00
10	33.33	33.33	2.99	73.50	1.58	4.67	0.00	3.33
m	39.14	33.06	0.11	57.86	1.49	3.26	5.28	1.89
DE	24.57	29.61	4.60	26.33	14.30	7.25	5.55	2.91
p	0.5873		0.000016		0.0556		0.0680	

## **4.4 Producción en acuaponía**

### **4.4.1 Producción de peces**

Se encontraron diferencias significativas ( $p=0000$ ) entre las tres biometrías realizadas a lo largo del periodo experimental (Tabla XIII).

Los datos de las biometrías realizadas nos indicaron una ganancia total en peso de 75.4kg del día 1al 92, lo que nos indica una tasa de crecimiento (TC) de 3.7 g/día. El peso inicial total de los organismos fue de 127.4 y el final de 202.8kg. La densidad (D) inicial del cultivo fue de 31.9 kg/m<sup>3</sup>, al día 29 fue de 42 kg/m<sup>3</sup> y al día 92 fue de 50.7 kg/m<sup>3</sup>. La tasa de conversión alimenticia (TCA) obtenida fue de 2, mientras que la eficiencia alimenticia (EA) fue de 0.5 (Tabla XIII, figura 23).



Tabla XIII. Valores promedio y desviación estándar del peso (g) y longitud (cm) de la tilapia nilótica *O. niloticus* registrados durante las biometrías realizadas a lo largo del periodo experimental. Los superíndices indican las diferencias (a>b>c) encontradas entre las biometrías. Con los datos obtenidos se estimó el peso total (PT, kg) la densidad del cultivo (D, kg/m<sup>3</sup>), la ganancia en peso diaria entre biometrías (GP, g/día), la ganancia en peso promedio (GPm, g/día), la tasa de conversión alimenticia (TCA= kg de alimento que produce 1kg de ganancia en peso) y la eficiencia alimenticia (EA= peso ganado kg por 1 kg de alimento consumido).

Día de cultivo	Biometrías					
	1		29		92	
Fecha	9/11/2006		7/12/2006		8/2/2007	
	Peso	Longitud	Peso	Longitud	Peso	Longitud
m	471.9	27.3	621.9	30.8	751.1	32.7
(DE)	(104.6) <sup>c</sup>	(1.6) <sup>c</sup>	(101.2) <sup>b</sup>	(2.9) <sup>b</sup>	(136.6) <sup>a</sup>	(1.5) <sup>a</sup>
PT	127.4		167.9		202.8	
D	31.9		42.0		50.7	
TC		1-29 = 5.2		29-92 = 2.1		
TCm		3.65				
TCA		2				
EA		0.5				

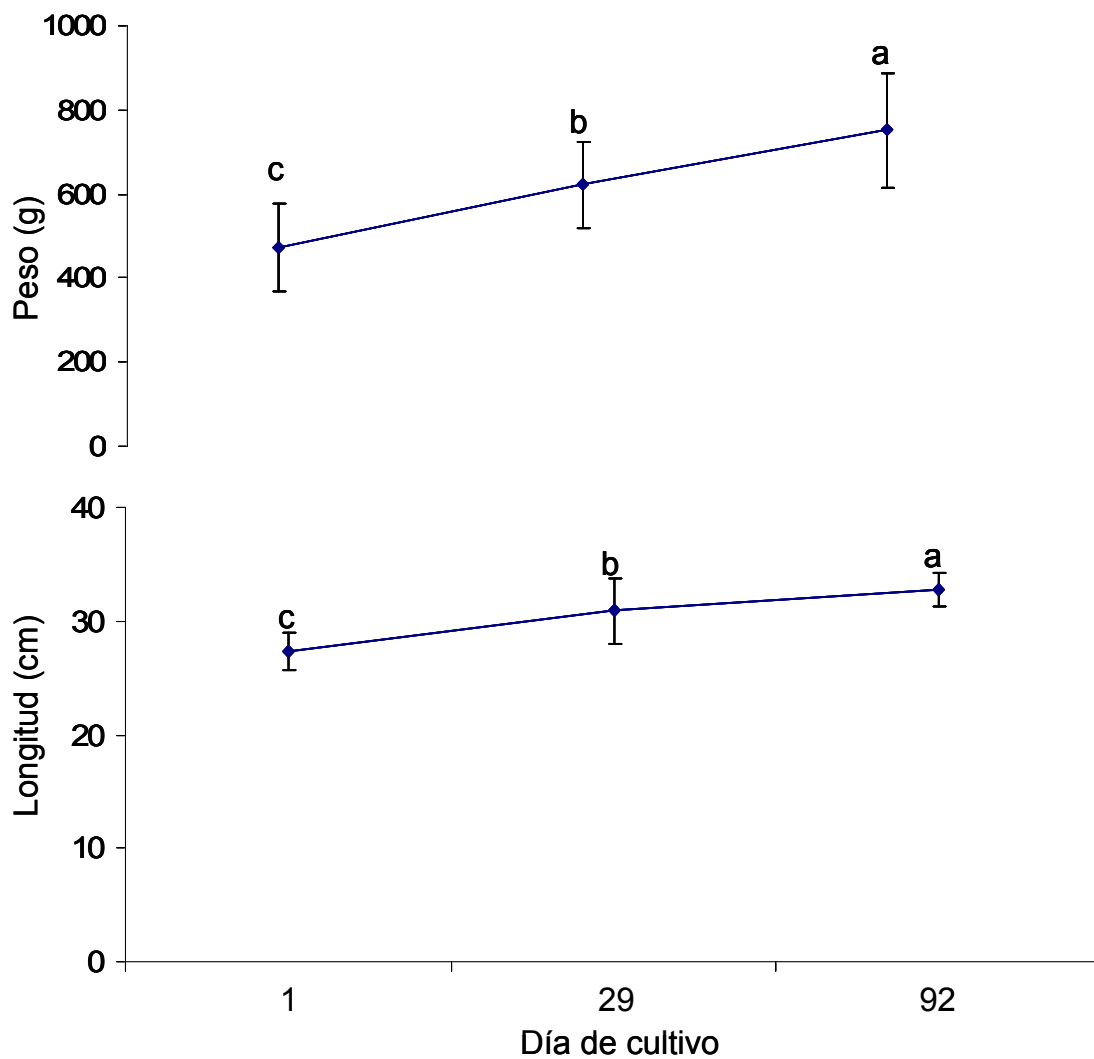


Figura 23. Valores promedio del peso (g) y longitud (cm) de tilapia nilótica *Oreochromis niloticus* registrados en las biometrías realizadas a lo largo del periodo de cultivo. Las barras indican los valores de desviación estándar y las letras (a>b>c) nos indican que existieron diferencias significativas entre las 3 biometrías.

#### 4.4.2 Términos de producción

La producción de NAT por kg de alimento (Timmons et al. 2002) por día, por minuto y en mg/L, que entran al sistema primario se reportan en la tabla XIV. Estos valores serán utilizados posteriormente en el planteamiento del balance de masa.

Tabla XIV. Valores de producción de NAT por kg de alimento diarios, por minuto y en concentración ( $P_{\text{NAT}}$ mg/L), estimados a partir del término definido por Timmons et al. (2002). También se muestran los promedios semanales de alimento por día (m A/día) y la cantidad total semanal (A/S), proporcionada al a los peces durante el periodo experimental.

S	m A/día	A/S	$P_{\text{NAT}}$ / día	$P_{\text{NAT}}$ /min	$P_{\text{NAT}}$ mg/L
1	1.6	11.0	43552.8	30.2	10.9
2	1.4	9.5	37398.0	26.0	9.3
3	1.7	11.9	46920.0	32.6	11.7
4	1.9	13.0	51098.6	35.5	12.8
5	2.0	14.3	56315.0	39.1	14.1
6	1.5	10.7	42105.8	29.2	10.5
7	1.5	10.5	41427.6	28.8	10.4
8	1.9	13.3	52440.0	36.4	13.1
9	1.8	12.6	49680.0	34.5	12.4
10	1.7	12.0	47472.0	33.0	11.9
11	1.5	10.5	41400.0	28.8	10.4
12	1.4	9.5	37536.0	26.1	9.4
13	1.8	12.6	49680.0	34.5	12.4

Total →                    151.4      597026      m = 31.9      m = 11.5

#### 4.4.3 Producción de plantas

A lo largo del experimento se llevaron a cabo 6 biometrías en el SH en las cuales se registraron datos de la altura, el diámetro y el número de hojas trifoliadas del cultivo vegetal.

Se encontró que la altura, el diámetro y el número de hojas trifoliadas, fueron significativamente ( $p=0.0000$ ) diferentes y mayores, después de 36 días de cultivo en las biometrías 5 y 6, al compararlas con las anteriores (1, 2, 3 y 4). Las diferencias específicas se muestran en la Tabla XV y la figura 24.

Al comparar el crecimiento en los 4 niveles, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.4398$ ) en la altura durante el periodo experimental. Al evaluar el crecimiento en diámetro, se encontró que a partir del día 70 el nivel 4 fue significativamente ( $p=0.0213$ ) diferente y menor a los niveles 1, 2 y 3. Al evaluar el número de hojas trifoliadas, se encontró que en el día 29, el nivel 4 fue significativamente ( $p=0.0133$ ) diferente y mayor a los niveles 1 y 2, y que compartía características con el nivel 3 (Tabla XV).

En cuanto a la producción de frutos, se realizaron dos cosechas, la primera el día 70 y la segunda el día 91 del periodo de cultivo, en las que se obtuvieron 492.2 y 984.9 g, respectivamente. Los resultados por nivel son mostrados en la tabla XVI.

Tabla XV. Valores promedio y desviación estándar de la altura (H), el diámetro (D) y el número de hojas trifoliadas (HT) determinados por nivel en las 6 biometrías a lo largo del periodo de cultivo (Bio - día de cultivo). Las letras (a>b>c>d) indican diferencias significativas entre biometrías (D/Bio) y los índices superiores (x>y>z) denotan las diferencias significativas entre niveles en una misma biometría.

Bío- Día	Nivel	H	D/Bio(T)	D	D/Bio(D)	HT	D/Bio(HT)
1 - 9	1	8.5(1.5)		6.7(1.2)		1.8(0.6)	
1 - 9	2	10.3(2.1)	b	7.8(1.8)	e	2(0)	c
1 - 9	3	9.1(2.1)		6(1.4)		1.7(0.5)	
1 - 9	4	8.4(1.5)		5.9(2.9)		2.1(0.3)	
2 - 16	1	10.7(2)		13.1(4.3)		2.1(0.3)	
2 - 16	2	8.3(2)	b	9.7(2.6)	d	2.1(0.3)	c
2 - 16	3	9.3(2.3)		10.4(3.9)		2.1(0.3)	
2 - 16	4	10.3(1.9)		12.1(3.4)		2.1(0.3)	
3 - 22	1	9.1(2.5)		16(5.9)		2.7(0.7)	
3 - 22	2	10.1(2)	b	15.7(5.1)	c	2.8(0.6)	bc
3 - 22	3	11.9(2.7)		14(5.1)		3(0.7)	
3 - 22	4	10.1(2.5)		12.2(3.6)		2.9(0.6)	
4 - 29	1	10.5(2.3)		18.8(3.4)		3.2(0.6) <sup>y</sup>	
4 - 29	2	9.9(1.9)	b	17.7(5.3)	b	3.2(0.6) <sup>y</sup>	b
4 - 29	3	11.3(1.5)		20.9(1.8)		4(0.7) <sup>xy</sup>	
4 - 29	4	10.7(2.9)		16.6(5.4)		4.4(1.5) <sup>x</sup>	
5 - 36	1	13.8(3.4)		20.3(3.5)		4.8(1)	
5 - 36	2	12.5(4.1)	a	21.4(9.1)	ab	5.6(2.1)	a
5 - 36	3	14.5(4.5)		23.5(6.4)		5.7(1.6)	
5 - 36	4	13.6(3.8)		19.2(5.1)		4.7(1.4)	
6 - 70	1	14(2.7)		24.7(7.2) <sup>x</sup>		9.9(3.2)	
6 - 70	2	14(2.6)	a	24.1(3) <sup>x</sup>	a	7.2(2.4)	a
6 - 70	3	15.5(5.8)		26.9(5.2) <sup>x</sup>		8.4(3.2)	
6 - 70	4	12.7(4.4)		18.7(6.8) <sup>y</sup>		7.1(2.8)	

Tabla XVI. Cantidad de frutos por nivel (g) obtenidos en las dos cosechas de fresa realizadas en el SH el día 70 y 91 del periodo de cultivo.

Nivel	Cosecha (día)	
	70	91
1	378.3	321.6
2	67.2	324.1
3	46.7	281.8
4	-	57.4
Total →	492.2	984.9

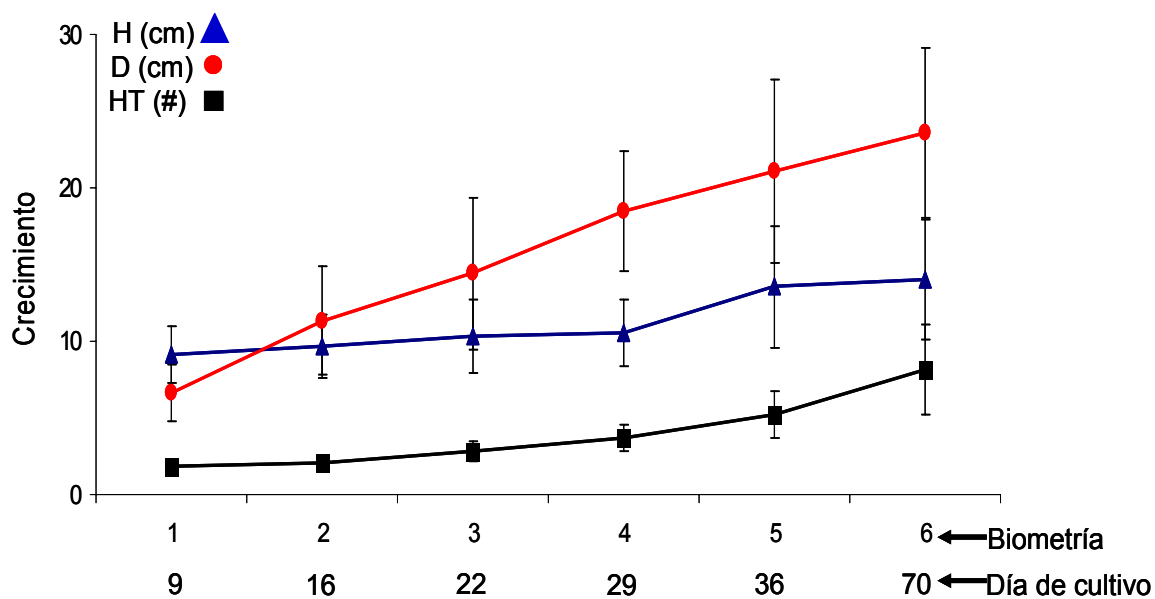


Figura 24. Crecimiento en valores promedio y desviación estándar de la altura (H, cm), el diámetro (D, cm) y el número de hojas trifoliadas (HT) registrados durante el periodo experimental.

#### 4.5 Balance de masa

Mediante los resultados obtenidos del balance de masa se caracterizó el flujo de masa del sistema de acuaponía (SA). Los valores obtenidos expresaron la tasa de producción (Pt) o remoción (R) de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K en mg/min en TC, en B y en SH (Tabla XVII).

En la producción de NAT (PtNAT) en TC se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0310$ ) entre las 10 semanas de muestreo, el valor promedio obtenido fue de  $243.4 \pm 301.4$  mg/min. En la PtNH<sub>3</sub>, se encontraron diferencias significativas ( $p=0.001$ ), el valor promedio fue de  $1.824 \pm 1.525$  mg/min. En la PtNO<sub>2</sub>, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.7201$ ), el valor promedio fue de  $-0.7 \pm 5.6$  mg/min. En la PtP, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.8227$ ), el valor promedio fue de  $1.8 \pm 24.7$  mg/min. En la PtK, se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0179$ ), el valor promedio fue de  $56 \pm 61.3$  mg/min (Tabla XVII).

En la remoción de NAT (RNAT) en el B se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0422$ ) entre las 10 semanas de muestreo, el valor promedio obtenido fue de  $227.3 \pm 303.8$  mg/min. En la RNH<sub>3</sub>, se encontraron diferencias significativas ( $p=0.001$ ), el valor promedio fue de  $1.817 \pm 1.544$  mg/min. En la RNO<sub>2</sub>, se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0013$ ), el valor promedio fue de  $8.9 \pm 6.2$  mg/min. En la RP, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.9130$ ), el valor promedio fue de  $0.84 \pm 23.6$  mg/min. En la RK, se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0184$ ), el valor promedio fue de  $54.3 \pm 59.8$  mg/min (Tabla XVII).

En la remoción de NAT (RNAT) en el SH se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0079$ ) entre las 10 semanas de muestreo, el valor promedio obtenido fue de  $16.1 \pm 14.9$  mg/min. En la  $\text{RNH}_3$ , se encontraron diferencias significativas ( $p=0.001$ ), el valor promedio fue de  $0.007 \pm 0.063$  mg/min. En la  $\text{RNO}_2$ , se encontraron diferencias significativas ( $p=0.00001$ ), el valor promedio fue de  $8.2 \pm 2.8$  mg/min. En la RP, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.1623$ ), el valor promedio fue de  $0.96 \pm 2.0$  mg/min. En la RK, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.0938$ ), el valor promedio fue de  $1.7 \pm 2.9$  mg/min (Tabla XVII).

En la figura 25 se muestra un diagrama conceptual en donde se presenta el promedio de los resultados del balance de masa de NAT,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2$ , P y K en mg/min, que se llevó a cabo en el TC, B y SH.

En la Tabla XVIII, se muestra la eficiencia de remoción absoluta (ERA), que indica la proporción de remoción de cada uno de los nutrientes en el B y en el SH.



Tabla XVII. Resultados obtenidos del balance de masa para el tanque de cultivo (TC), el biofiltro (B) y el sistema de hidroponía (SH). Los datos mostrados en el caso del TC indican producción (Pt), para el B y el SH indican remoción (R) de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K en mg/min. En la parte inferior de la tabla se muestra el valor promedio (m), la desviación estándar (DE) y las diferencias estadísticas entre semanas (d/S).

Semana	TC(Pt)					B (S)					SH(Ph)				
	NAT	NH3	NO2	P	K	NAT	NH3	NO2	P	K	NAT	NH3	NO2	P	K
1	112	0.780	-7.1	12	90	93.7	0.732	-13.1	10.4	84	18.3	0.048	5.9	1.6	6
2	212.8	1.500	-4.4	6	20	157	1.368	-9.9	1.2	18	55.8	0.132	5.5	4.8	2
3	135	0.840	-2.2	30	210	122.4	0.822	-16	30.3	204	12.6	0.018	13.8	-0.3	6
4	236.9	1.980	8.2	22	60	225.3	1.944	0.6	20.7	60	11.5	0.036	7.6	1.3	0
5	6.2	2.160	3.8	-43	30	-16.1	2.280	-5.7	-41.7	27	22.3	-0.12	9.5	-1.3	3
6	972.6	4.860	4.9	-37	0	963.3	4.878	-2.7	-35	0	9.3	-0.02	7.7	-2	0
7	440.2	3.660	-8.8	23	60	434.4	3.684	-17.9	21.3	60	5.8	-0.02	9.1	1.7	0
8	346.9	2.220	-3.8	-9	30	335.6	2.226	-13.9	-9.8	33	11.3	-0.01	10	0.8	-3
9	-107	0.060	-1.1	4	60	-115	0.060	-5.1	3.9	60	8.3	0	4	0.1	0
10	77.8	0.300	3.8	10	0	72.7	0.300	-5.3	7.1	-3	5.2	0	9.2	2.9	3
m →	243.4	1.824	-0.7	1.8	56	227.3	1.817	-8.9	0.84	54.3	16.1	0.007	8.2	0.96	1.7
DE	301.4	1.525	5.6	24.7	61.3	304	1.544	6.2	23.6	59.8	14.9	0.063	2.8	2	2.9
d/S	0.031	0.001	0.720	0.823	0.018	0.042	0.001	0.001	0.913	0.018	0.008	0.009	0.000	0.162	0.094

Tabla XVIII. Comparación de los valores promedio de la eficiencia de remoción de nutrientes en el sistema de acuaponía (SA), entre el biofiltro (B) y el sistema de hidroponía (SH). Se muestra la concentración de nutrientes en el sistema [NS], la remoción determinada en el balance de masa (R), la eficiencia de remoción (ER) y la eficiencia de remoción absoluta (ERA).

		NAT	NO <sub>2</sub>	P	K
[NS]		243.4	-0.7	1.8	56
B	R	227.3	-8.9	0.84	54.3
	ER	39.14	0.11	1.49	5.28
	ERA	93.39	*	46.67	96.96
SH	R	16.1	8.2	0.96	1.7
	ER	33.06	57.86	3.26	1.89
	ERA	6.61	*	53.33	3.04

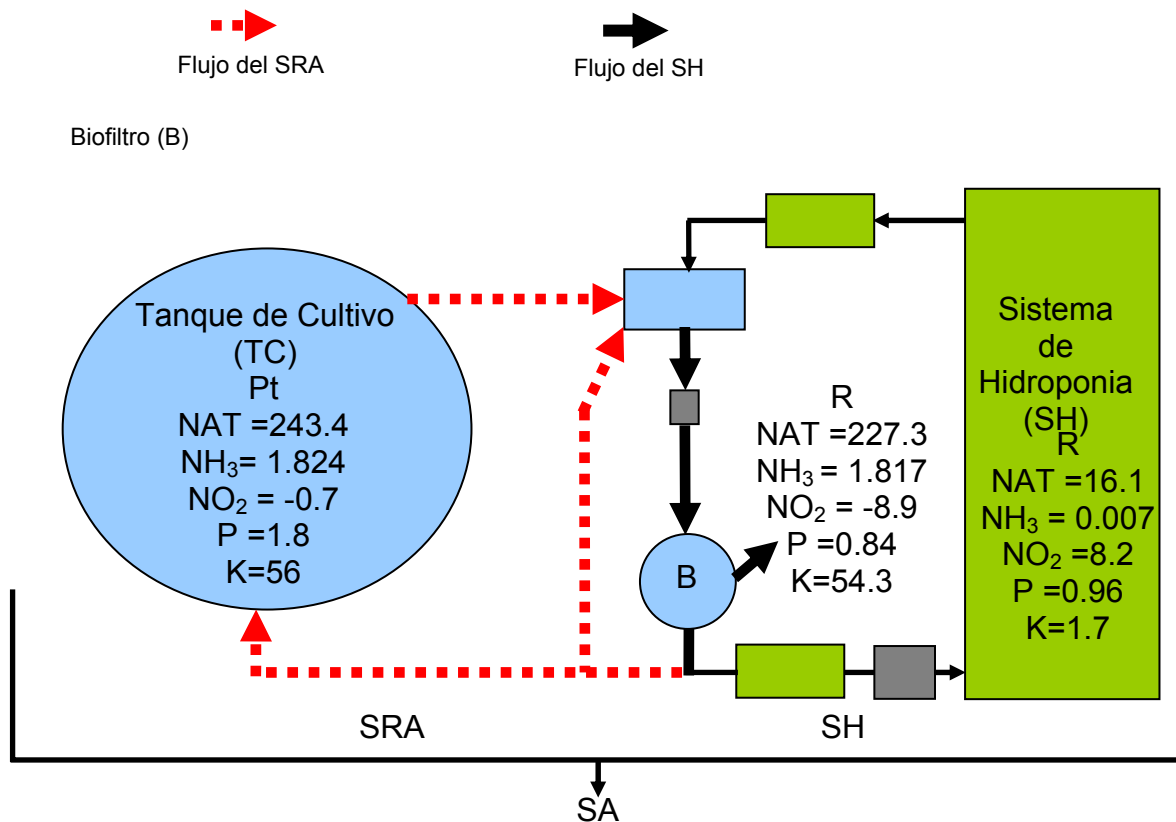


Figura 25. Diagrama conceptual del sistema de acuaponia (SA) con los resultados del balance de masa. Se muestra el valor promedio en términos de producción (P) o remoción (R) de NAT, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>, P y K en mg/min, en el TC, B y SH.

## V. DISCUSIÓN

### Parámetros fisicoquímicos

#### Temperatura

La temperatura es considerada por algunos autores como el parámetro físico químico mas importante en acuicultura, ya que tiene a la vez un efecto importante en la viabilidad económica de los cultivos comerciales de peces, debido a que afecta directamente diversos procesos fisiológicos de los organismos tales como: la tasa de respiración, la eficiencia de asimilación del alimento, el crecimiento, el comportamiento y la reproducción (Timmons et al. 2002; Badillo, 2005; DWAF, 1996). El régimen natural de temperatura, por ejemplo, sirve como un criterio inmediato para seleccionar la especie que puede ser cultivada en un lugar determinado. También afecta otros procesos importantes dentro del sistema de cultivo, como la solubilidad del O<sub>2</sub> en el agua y la tasa de oxidación de la materia orgánica (DWAF, 1996). Cada especie se desarrolla a una temperatura óptima determinada, en el caso de la tilapia nilótica *O. niloticus*, se ha determinado un intervalo de 28 a 30°C, como óptimo para su desarrollo (Zweig et al. 1999; DWAF, 1996; Timmons et al. 2002). Por otra parte, para el cultivo de la fresa, *F. ananassa* variedad camarosa, se han reportado temperaturas mas bajas como las óptimas. Nam (2006), mencionó que el cultivo de fresas se lleva a cabo durante el invierno, cuando la producción de otros vegetales disminuye y reporta intervalos de temperatura entre 17 a 18°C durante la noche y de 24 a 28°C durante el día en, condiciones de invernadero. Economakois y Krulji (2001), realizaron un estudio del efecto del calentamiento de la raíz por medio de la solución nutritiva utilizando un

sistema con técnica de flujo de nutrientes (TFN, nutrient flow technique, en inglés) similar al utilizado en este estudio y determinaron una temperatura de 25°C, como óptima en su cultivo. En este estudio, el intervalo de temperatura para el cultivo de la tilapia nilótica *O. niloticus*, fluctuó de 1.5 a 5°C por debajo de los reportados como óptimos, ya que en el TC se mantuvo una temperatura promedio de 25.9°C (con una mínima de 22.1 y una máxima de 26.4°C). Esto se debe a que se escogió un valor intermedio entre las temperaturas óptimas reportadas para los cultivos de tilapia nilótica *O. niloticus* y de fresa *F. ananassa*. Por su parte en la E fue de 24.8°C (18.7-26.3°C) y en la S fue de 20°C (17.2-21.8°C). La disminución de la temperatura en el SH, se debió al uso del enfriador en la E y a las bajas temperaturas ambientales, ya que el sistema no estaba térmicamente aislado.

### **Conductividad Eléctrica (CE)**

La CE, es una de las tres formas que se utilizan para determinar los sólidos disueltos totales (TDS) en el agua. La CE expresada en mS/cm, se basa en la conductividad del agua producto de la cantidad de partículas con carga (iones), aunque esta medida no distingue los elementos en solución (Resh, 1991; DWAF, 1996). Resh (1991), reportó que la CE típica de una solución hidropónica oscila en un intervalo de 2.00 a 4.00 mS/cm, mientras Rakocy et al. (2004), mencionó valores de 0.5 mS/cm como bajos durante la producción de okra en combinación con tilapia nilótica *O. niloticus*. Paranjpe et al. (2003), reportaron valores de 1.6 mS/cm. En este estudio se encontró una CE en TC de 1.65 mS/cm (1.5-2.0 mS/cm), en la E fue de 1.643 mS/cm (1.5-2.0 mS/cm) y en la S fue de 1.641 mS/cm (1.5-2.0 mS/cm). Los valores más altos de CE en mS/cm registrados en el

TC, la E y la S y están dentro del intervalo reportado por Resh (1991). Sin embargo, los valores promedio de cada lugar de muestreo están por debajo del rango reportado como óptimo. Al compararlos con los datos reportados por Rakocy et al. (2004) están por encima y son prácticamente iguales a los valores que mencionaron Paranjpe et al. (2003).

### **Oxígeno**

La concentración de  $O_2$  (mg/L) en el agua es producto de: la fotosíntesis y la aireación-oxigenación. Las pérdidas se deben al consumo de  $O_2$  por la respiración de los peces, las plantas y la degradación de la materia orgánica por bacterias (demanda biológica de oxígeno) (Zweig et al. 1999). A su vez, la concentración de oxígeno también es afectada por la temperatura, la salinidad, la presión atmosférica y la circulación del agua (DWAF, 1996). En general, diversos autores han considerado a la concentración de  $O_2$  como un factor limitante en la producción acuícola, particularmente cuando aumenta la densidad o se intensifica el cultivo (Losordo et al. 1992a; Timmons et al. 2002; DWAF, 1996; Zweig et al. 1999). Para el cultivo de tilapia nilótica *O. niloticus*, se recomiendan más de 5 mg/L de  $O_2$  como óptimas (Zweig et al. 1999; Timmons et al. 2002; Rakocy et al. 2004), mientras que se ha demostrado que un intervalo de 3 a 4 mg/L de  $O_2$  son perfectamente tolerables por la especie (Zweig et al. 1999). En cuanto al cultivo vegetal, el oxígeno es necesario en el intercambio de aniones con el medio externo (solución nutritiva) y funciona como aceptor de  $H^+$  en la respiración aeróbica, al igual que en los animales. Resh (1991) en diversos experimentos ha intentado resolver los problemas que causa la mala oxigenación de las raíces, en

especial en sistemas que utilizan técnicas de flujo de nutrientes, en donde las dificultades se deben a la circulación, el espacio reducido entre las raíces y al estancamiento del agua. Rakocy et al. (1992, 2002b, 2004) han reportado intervalos de 4.0 a 6.0 mg/L de O<sub>2</sub>, para cultivos de lechuga, okra, albaca y perejil, entre otros, mientras Seawright et al. (1998), mantuvieron concentraciones superiores a 5 mg/L de O<sub>2</sub>. En este trabajo, el agua proveniente del TC tenía una concentración de 5.5 mg/L de O<sub>2</sub> (4.8-6.0 mg/L), en la E fue de 5.7 mg/L (4.4-6.6 mg/L) y en la S fue de 7.9 mg/L (7.0-8.1 mg/L). En el SH, se observó un aumento gradual en la concentración de O<sub>2</sub> desde la entrada a la salida. Estos resultados son corroborados mediante el análisis estadístico donde se encontró que las concentraciones de O<sub>2</sub> del TC y la E, fueron significativamente diferentes a la de la S del SH. La razón de este incremento, son las bajas temperaturas durante el periodo invernal (2006-2007, como se mencionó anteriormente, el sistema no estaba térmicamente aislado), la alta presión atmosférica (solo 40 m arriba del nivel medio del mar) y el efecto de cascada entre los niveles del SH.

## **pH**

El pH se monitoreó todos los días y se mantuvo por medio de la adición de bicarbonato de sodio al Tcom1. En el TC se midió un pH de 7.04 (6.6-7.5), en la E fue de 7.03 (6.6-7.6) y en la S fue de 7.22 (6.8-7.8). Estos valores de pH están dentro del intervalo reportado por Rakocy et al. (1992, 2002a, 2002b, 2004) de 7.0-7.5 como óptimo tanto para el cultivo de tilapia nilótica *O. niloticus*, como en el uso de técnicas de acuaponía, y muy cercano al recomendado por Resh (1991) de 6.5-7.0, como óptimo para la disponibilidad de nutrientes para las plantas (figura

26). El pH nunca presentó valores cercanos o mayores a 8, ya que bajo estas condiciones la presencia del ión bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ) se encuentra en cantidades suficientes para interferir con la disponibilidad de otros iones produciendo una disminución en la tasa de crecimiento en la planta (Resh, 1991; Rakocy, 2002a; Rakocy, 2002b). Por otra parte, Resh (1991), estableció que la respiración y alimentación de la planta da como resultado un intercambio de iones y liberación de  $\text{H}^+$ , lo que tiende a incrementar la acidez del agua. Sin embargo durante el periodo de cultivo en este proyecto se observó una leve tendencia hacia el incremento del pH a la salida del SH.

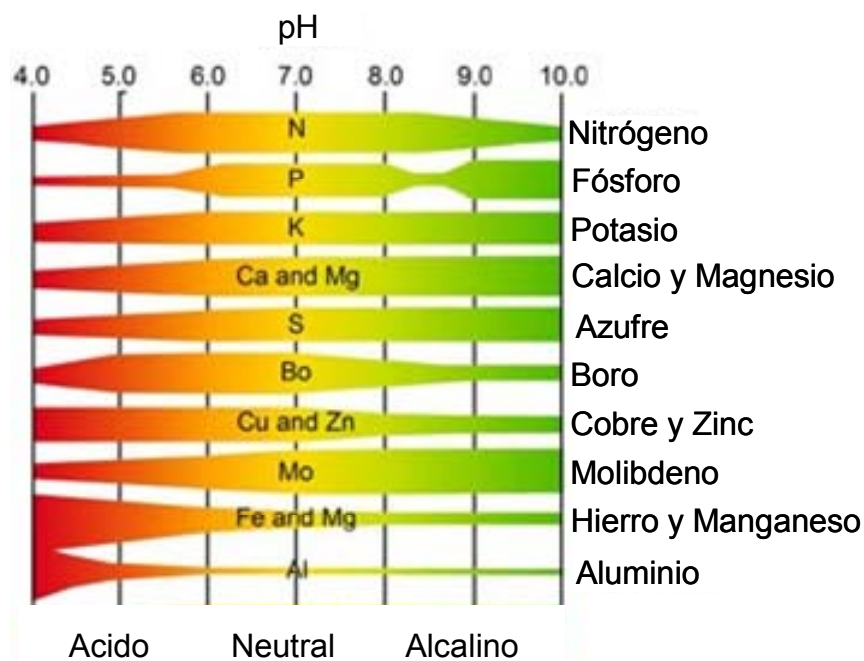


Figura 26. Disponibilidad de nutrientes en función del pH, tomado de Resh (1991).



El pH a la vez es un factor de vital importancia durante los procesos de nitrificación. En los biofiltros utilizados en la acuicultura se han mencionado valores de 7.5-9.0 como óptimos para el proceso de nitrificación (Tyson et al. 2004). Wheaton et al. (1994), reportó un rango óptimo de operación para las bacterias nitrificantes de entre 6.0-9.0. A la vez reportan que cambios drásticos del pH de 0.5–1.0 unidades causan estrés a las bacterias del biofiltro y pueden disminuir la tasa de nitrificación hasta en un 50% (Weathon et al. 1994). Rakocy et al. (2004), indicaron que el pH se debe mantener preferentemente arriba de 7 para promover la nitrificación. Otra consideración importante en relación al pH, radica en la influencia que se tiene en conjunto con la temperatura y la salinidad, que al incrementar, aumentan a su vez, la proporción de  $\text{NH}_3\text{-N}$  del NAT. Colt (2006), mencionó que la capacidad de modificar el pH del cultivo, incide directamente en la posibilidad de mantener concentraciones bajas de  $\text{NH}_3\text{-N}$  en nuestro sistema.

## **Nutrientes**

### **Nitrógeno amoniacal total (NAT), amonio no ionizado ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2$ )**

Estudios realizados con el género *Oreochromis sp.*, han reportado fluctuaciones en cuanto a la concentración de NAT presente a lo largo del periodo de cultivo (Gholamreza et al. 2005), con una concentración de NAT entre 4.73 a 14.87 mg/L, mientras Rakocy et al. (2004), mencionaron valores mucho menores: de 2.2 mg/L (1.6-2.9 mg/L) en el tanque de cultivo, de 1.58 mg/L (0.49-2.42 mg/L) en la entrada al sistema de hidroponía y de 0.95 mg/L (0.2-1.82 mg/L) a la salida. Lo que da como resultado un rendimiento en la remoción del NAT del 40% en el cultivo de okra. En este estudio la concentración de NAT en el TC fue de 10.37

mg/L (3.2- 21.1 mg/L), en la E fue de 6.3 mg/L (2.6-16.1 mg/L) y en la S fue de 3.7 mg/L (12.4- 1.5 mg/L). Estos resultados dieron un rendimiento de remoción de NAT del 30% en el cultivo de fresa *F. ananassa*. Las concentraciones de NAT determinadas durante este estudio son altas al compararlas con otros trabajos, sin embargo hay que recordar que las condiciones del pH y de temperatura a las cuales se sometió el cultivo fueron óptimas para mantener concentraciones bajas de la fracción tóxica del NAT, el  $\text{NH}_3\text{-N}$  (Timmons et al. 2002; Colt, 2006). La toxicidad de la molécula no-ionizada de  $\text{NH}_3\text{-N}$ , radica en su habilidad de moverse a través de las membranas celulares (Colt, 2006), ya que la liberación por parte del pez se lleva a cabo por un gradiente de concentración ( $[\text{NH}_3\text{-N branquia}] > [\text{NH}_3\text{-N ambiente}]$ ), de esta manera, si las concentraciones externas de  $\text{NH}_3\text{-N}$  son elevadas, el nivel de esta molécula en la sangre se incrementa al no poder excretarla (Colt, 2006). El incremento en la concentración de  $\text{NH}_3\text{-N}$  tiene un efecto en el pH de la sangre, daña las branquias, lo que a su vez reduce la capacidad de carga de oxígeno, aumenta la demanda de oxígeno en los tejidos, se afecta a los eritrocitos, a los tejidos que los producen y tienen un efecto directo en la osmoregulación (Zweig et al. 1999). En este experimento la concentración de  $\text{NH}_3\text{-N}$  obtenida en TC fue de 0.052 mg/L, (0.010-0.098 mg/L), en la E fue de 0.022 mg/L (0.005-0.056 mg/L) y en la S la fue de 0.021 mg/L (0.005-0.076 mg/L). Seawright et al. (1998), reportaron concentraciones de  $\text{NH}_3\text{-N}$  menores de 0.074 mg/L, en el cultivo de tilapia nilótica *O. niloticus* en conjunto con un cultivo hidropónico, Al-Harbi et al. (2000), mencionaron un intervalo de concentración de 0.002 a 0.03 mg/L. También se sugieren valores menores de 0.05 mg/L como una

concentración tolerable por la especie (Zweig et al. 1999), hasta un valor máximo permisible de 0.1 mg/L (Zweig et al. 1999). Los peces de aguas tropicales presentan mayor tolerancia a concentraciones altas de  $\text{NH}_3\text{-N}$ , que peces de agua templada o fría, y a su vez, los peces de agua dulce son más tolerantes que los peces de ambientes marinos (Zweig et al. 1999), tomando en cuenta lo anterior, la tilapia nilótica *O. niloticus*, es un ejemplar que posee una amplia tolerancia, lo que la hace ideal para el cultivo. Durante este experimento se mantuvieron condiciones óptimas para el cultivo de tilapia, a pesar de que en la semana 6, se alcanzó una concentración de 0.098 mg/L de  $\text{NH}_3\text{-N}$ . Debido a un correcto manejo de los parámetros fisicoquímicos (una de temperatura de 25.5°C, un pH de 6.9 y concentraciones cercanas a 6.0 mg/L de  $\text{O}_2$ ) se lograron mitigar los efectos de las altas concentraciones de  $\text{NH}_3\text{-N}$ . Tal como lo mencionó Holmes (DWAFF, 1996), al usar altas concentraciones de  $\text{O}_2$ , disminuir el pH y la temperatura.

Los  $\text{NO}_2$  son un producto del metabolismo bacteriano, de la nitrificación y denitrificación. Los  $\text{NO}_2$  son producidos por bacterias *Nitrosomonas spp.* durante el proceso de nitrificación, para posteriormente ser transformado a  $\text{NO}_3$  por las bacterias *Nitrobacter spp.* en el proceso de nitrificación. En el manejo apropiado de un SRA, se esperan bajas concentraciones de  $\text{NO}_2$ , ya que al producirse es inmediatamente transformado a  $\text{NO}_3$ . Altas concentraciones de  $\text{NO}_2$  en un SRA se relacionan con diversos factores como: bajas concentraciones de  $\text{O}_2$  en el agua (se inhibe la oxidación a  $\text{NO}_3$ ), crecimiento desigual de las colonias de bacterias del biofiltro (velocidad de crecimiento de *Nitrosomonas spp.* > *Nitrobacter spp.*), incrementos en la concentración de NAT y cambios drásticos de temperatura (las

*Nitrobacter spp.* son sensitivas a cambios ambientales y/o mal manejo). Su acumulación en el sistema puede producir deficiencias en el transporte de  $O_2$  en la sangre del pez (metemoglobinemia), ya que ingresa por las agallas al torrente sanguíneo y oxida al ión  $Fe^{2+}$  (DWAF, 1996; Tyson et al. 2004). Las concentraciones de  $NO_2$  óptimas para el cultivo de peces están en el intervalo de 0 a 0.05 mg/L (DWAF, 1996). Al-Harbi y Sidiiquei (2000) reportaron intervalos de 0.2 a 0.52 mg/L, menores a las concentraciones letales de 16 mg/L para el cultivo de la tilapia nilótica *O. niloticus* (DWAF, 1996). Shnel et al. (2002), mencionaron concentraciones de 2 mg/L y por su parte, Tyson et al. (2004), en su estudio acerca de la influencia del pH en los procesos de nitrificación, reportaron concentraciones de 5.3 mg/L a un pH de 8.5 y de 0.0 mg/L a un pH de 5.5. Es importante tomar en cuenta lo mencionado anteriormente ya que en ambientes donde el pH es de 2.0-7.0, el NAT esta presente en su totalidad como  $NH_4$  (Tyson, 2004) y por lo tanto las *Nitrosomonas spp.* no pueden transformar el  $NH_3-N$  a  $NO_2$ . Rakocy et al. (2004), midieron concentraciones de 0.7 mg/L (0.4-1.1 mg/L) en el cultivo de tilapia nilótica *O. niloticus* en acuaponia y en cuanto al cultivo vegetal midieron concentraciones de 0.43 mg/L (0.09-0.94 mg/L) a la entrada del sistema de acuaponia y de 0.21 mg/L (0.01-0.66 mg/L) a la salida. Lo que da como resultado una remoción de  $NO_2$  del 51% en el cultivo de okra. En este trabajo la concentración de  $NO_2$  en el TC fue de 2.62 mg/L (1.36-4.21 mg/L), en la E fue de 2.63 mg/L (1.22-4.15 mg/L) y en la S fue de 1.27 mg/L (0.05-3.15 mg/L). Lo que indicó una remoción de nitritos del 58%, mayor al valor reportado por Rakocy et al. (2004). Las concentraciones de  $NO_2$  medidas durante este trabajo fueron mayores

a las reportadas en la literatura, sin embargo, las buenas condiciones de manejo del sistema (25.5°C, un pH de 6.9 y concentraciones de O<sub>2</sub> de 6.0 mg/L) ayudaron a mitigar los efectos de las altas concentraciones de NO<sub>2</sub> en el cultivo de tilapia nilótica *O. niloticus* y produjeron altos valores de remoción en el cultivo de fresa *F. ananassa*.

### **Fósforo (P)**

El fósforo es uno de los macronutrientes clave necesario para el crecimiento de plantas y animales. Toda la producción de energía y almacenamiento en un organismo, es dependiente de los componentes que contengan fosfato, desde el adenosin trifosfato (ATP), la creatina y ácidos nucleicos (ADN y ARN) encargados transmitir la información genética (Estela et al. 2005). Debido a su alto contenido en la dieta, el fósforo generalmente se acumula disuelto en el agua durante la producción acuícola intensiva y como resultado, se genera la eutroficación dando lugar al crecimiento excesivo de plantas e incrementando la DBO (DWAF, 1996). Es importante mencionar que hasta el momento no hay un método práctico y accesible para la remoción del fósforo del agua, sin embargo este proceso se lleva a cabo naturalmente por las plantas, ya que el fósforo es uno de los macronutrientes esenciales requeridos para su desarrollo (Rakocy et al. 1992; Rakocy, 2002a; Rakocy, 2002b; Rakocy et al 2004; DWAF, 1996; Yeo, 2004). Boscolo et al. (2005), determinaron que el requerimiento de fósforo en la dieta para juveniles de tilapia es del 0.74%. En general se consideran como óptimas concentraciones entre el 0.42 y 1.09% de P en la dieta, ya que concentraciones mayores son excretadas directamente (DWAF, 1996). Shnel et al. (2002),

utilizaron el 1.1% de fósforo en la dieta para el cultivo de tilapia. En diversos estudios de cultivos vegetales, Paranjpe et al. (2003), modificaron una dieta utilizada en tomate y la usaron en el desarrollo de *Fragaria ananassa* con 50 mg/L de fósforo en la solución nutritiva. Rakocy et al. (2004), reportaron concentraciones de fósforo de 16.4 mg/L (5.6-31.6 mg/L) a la entrada del sistema de hidroponia y a la salida de 15.9 mg/L (4.4-31.4 mg/L). En este trabajo la concentración de P en el TC fue de 4.48 mg/L (1.85-10.35 mg/L), en la E fue de 4.41 mg/L (1.35-10.52 mg/L) y en la S fue de 4.27 mg/L (1.4-9.87 mg/L). Las concentraciones de P obtenidas a lo largo del periodo experimental son menores a las reportadas en la literatura. Sin embargo, es importante mencionar que la acuaponia es fundamentalmente diferente de la hidroponia, debido a que los nutrientes son generados constantemente en proporción al alimento que ingresa al sistema (Rakocy et al. 2004). Las soluciones hidropónicas emplean altas concentraciones iniciales para evitar la falta de nutrientes durante el ciclo de producción, ya que estas son reabastecidas de forma semanal, para extender su uso hasta un máximo de 3 meses, tiempo después del cual tienen que ser descargadas y reemplazadas (Resh, 1991; Rakocy et al. 2004). Esta capacidad de generación constante de nutrientes en los sistemas de acuaponia, permite mantener intervalos de concentración menores, en comparación con la hidroponia, aun así, Rakocy et al. (2004) y Yeo et al. (2004), mencionaron que las cantidades de nutrientes esenciales son buenas para el crecimiento de las plantas, aunque el calcio (Ca), potasio (K) y hierro (Fe), deben ser suplementados.

## **Potasio (K)**

En el caso del cultivo vegetal, el K es también un macronutriente esencial. Su importancia radica en la participación como coenzima o activador de enzimas como la *piruvato kinasa*. Se requiere en altas cantidades durante la síntesis de proteínas y para la formación de frutos, sin embargo, no forma parte estructural de ninguna molécula en las células de las plantas. También es necesario en el desdoblamiento de los carbohidratos (para proveer de energía a las plantas) y ayuda a controlar el balance iónico (Resh, 1991). En el caso de los peces, cumple una función vital en el transporte de moléculas por medio de la bomba  $\text{Na}^+\text{K}$ , que dan lugar al transporte activo. El K puede conformar hasta el 10% de la materia seca de las plantas, mientras que en los peces la concentración de K en el todo el cuerpo, es muy baja, ~1% (Rakocy et al. 2004).

En el alimento balanceado para acuicultura, Seawright et al. (1998), reportaron una concentración de K del 1.28%, mientras que en las soluciones nutritivas hidropónicas se manejan concentraciones de K de 85 mg/L (Paranjpe et al. 2003) y de 100 mg/L específicamente en el cultivo de fresas con perlita como sustrato (Linardakis y Manios, 2005). Por su parte Rakocy et al. (2004), mencionaron concentraciones de K de 63.5 mg/L (30.1-86.9 mg/L) a la entrada del sistema de hidroponía y de 64.6 mg/L (29.4-87.1 mg/L) a la salida. En este trabajo, en el TC la concentración de K fue de 17.15 mg/L (10.3-21.7 mg/L), en la E fue de 16.2 mg/L (10-20.2 mg/L) y en la S fue de 15.9 mg/L (9.7-19.2 mg/L). A pesar de que no se encontraron diferencias significativas entre los lugares de muestreo, se pudo observar una ligera tendencia hacia la disminución de la concentración de K de la

E a la S del SH, lo que indica el consumo del nutriente por las plantas. Las concentraciones de K medidas a lo largo del periodo de cultivo son mucho menores a las reportadas en la literatura.

La forma en que Rakocy et al. (2002b, 2004) mantuvieron la concentración de K tan cercana a la óptima, fue mediante la adición alternada de hidróxido de potasio (KOH) y de hidróxido de calcio (CaOH) como una forma de mantener el pH entre 7.0-7.5, y de manera indirecta suplementaron al sistema los iones K y Ca.

### **Producción en acuaponia**

#### **Producción de peces**

Shnel et al. (2002) reportaron para la engorda de tilapia una tasa de conversión alimenticia (TCA) de 2.03, una tasa de crecimiento (TC, g/día) de 1.42 g/día, una densidad inicial de 10.4 kg/m<sup>3</sup> y una final del cultivo de 81.1 kg/m<sup>3</sup>, después de 331 días de cultivo. Rakocy et al. (2004), mencionaron una TCA de 1.7, una TC de 4.4 g/día y una densidad final de 61.5 kg/m<sup>3</sup>, después de 164 días de cultivo. En este trabajo se obtuvo una TCA de 2, una TC de 3.65 g/día, con una densidad inicial de cultivo de 31.9 kg/m<sup>3</sup> y a una densidad final de 50.7 kg/m<sup>3</sup>, después de 92 días de cultivo. El mayor incremento en peso de los peces, se encontró en los días de cultivo 1-29, en contraste con el periodo 29-92 con una TC de 5.1 y 2.1 g/día, respectivamente. Esta disminución en la TC g/día, esta directamente relacionada con las bajas temperaturas de la zona a partir de la 5<sup>ta</sup> semana del cultivo, ya que en el periodo 1-29 la temperatura promedio fue de 26°C, mientras que del día 29-92 fue de 24°C, temperaturas menores a las óptimas de 28°C reportadas para el cultivo de la tilapia nilótica *O. niloticus*. Durante el periodo de



cultivo se obtuvo un valor de TCA y GP g/día dentro de los rangos recomendados por otros autores.

### **Producción de plantas**

Chow et al. (1992), reportaron en un estudio sobre los requerimientos nutricionales de la fresa *F. ananassa* en un sistema de hidroponía utilizando la técnica de flujo de nutrientes, una altura (H) de  $27.2 \pm 2.1$  cm, un diámetro (D) de  $31.2 \pm 2.3$  cm y número de hojas trifoliadas (HT) de  $17.4 \pm 2.0$ , en un periodo de 60 días de cultivo. En este trabajo a los 70 días de cultivo el promedio de la H ( $14 \pm 3.9$  cm), el D ( $23.6 \pm 5.6$  cm) y el número de HT ( $8.2 \pm 3$ ), fueron mucho menores a los reportados por Chow et al. (1992).

En la producción de fresas por planta, Chow et al. (1992) obtuvieron un rendimiento de 74 g/planta. Posteriormente, Paranjpe et al. (2003) reportaron rendimientos de 344 y 403g en el año 2000 y 2001, respectivamente. En este trabajo, se obtuvieron rendimientos de 15 g/planta, tomando en cuenta solo las plantas que produjeron frutos, de lo contrario el rendimiento sería mucho menor.

Durante el periodo de cultivo se realizaron 2 cosechas con producciones de 492.2 y 984.9 g cada una. Se observó un retraso en la producción con respecto a los niveles, ya que durante la 1<sup>er</sup> cosecha, los niveles 1 y 2, en 28 y 8 plantas respectivamente, produjeron frutos antes. Mientras que en la 2<sup>da</sup> cosecha se produjeron frutos en todos los niveles (Tabla XIX).

Mediante las plantas utilizadas como un control en condiciones ambientales similares, pero utilizando peat moss (Turba de Sphagnum, Premier Horticulture Inc., Canadá) como sustrato de soporte y con riego de la solución nutritiva, se

pudo observar que las plantas del sistema de acuaponia tuvieron una disminución notable en el tiempo de maduración (20 días), con respecto al control. Esto se puede explicar por el efecto del calentamiento de la raíz en *F. ananassa*, ya que una solución nutritiva con una temperatura de 25°C incrementó el crecimiento de la planta notablemente, disminuyendo el tiempo de maduración y aumentando la producción por planta (325 g/planta) (Economakois y Krulji 2001). En este caso debido a la deficiencia de nutrientes, el cultivo mostró únicamente la disminución en el tiempo de maduración.

Al llegar el tiempo de producción (flores y frutos), las necesidades nutrimentales cambian. Chow et al. (1992), indicaron un aumento en el consumo de N durante la floración y la producción de frutos. En el presente estudio, se observó un aumento en el consumo de  $\text{NO}_2$  a partir del día 35 y un consumo máximo en el día 47 (2<sup>da</sup> y 4<sup>ta</sup> semana de medición de nutrientes), relacionado con la primera floración y el comienzo de la producción de frutos. También se pudo observar, el cese del crecimiento de gran cantidad de frutos en todos los niveles, sin embargo esto no se puede relacionar con la cantidad de  $\text{NO}_2$  en la solución nutritiva, debido a que las concentraciones fueron mayores a las propuestas como óptimas por Chow et al. (1992). En cambio puede deberse a la falta de K, ya que los frutos poseen un alto contenido de K, en comparación con otras partes de la planta, lo que provoca una competencia por el K entre las hojas, tallos, raíces, flores y fresas, debido a su uso durante la fotosíntesis y el crecimiento (Chow et al. 1992).

A lo largo del periodo de cultivo de la fresa *F. ananassa* se observaron deficiencias en el crecimiento de las plantas y como resultado una producción

limitada de fresas. Esto puede deberse a la baja concentración de macro o micronutrientes en la solución nutritiva, problema relacionado con el manejo del sistema de acuaponia que se discute a continuación.

### **Manejo del sistema de acuaponia**

En este estudio se eligió la técnica NFT (nutrient flow technique) para el cultivo de la fresa *F. ananassa* en el sistema de acuaponia. Esta es una de las técnicas de cultivo más comunes, junto con el sistema de camas flotantes de poliuretano (Rakocy et al. 1992, 2002ab; Tyson et al. 2004). Esta técnica se ha utilizado como una medida eficiente para proveer concentraciones de O<sub>2</sub> óptimas a la raíz por medio de la solución nutritiva (Chow et al. 1992). En este cultivo se obtuvo concentraciones de O<sub>2</sub> de 5.7 y 7.9mg/L, a la E y S del sistema de acuaponia. Se utilizó perlita, como sustrato, por sus cualidades de porosidad ya que permite el crecimiento de las raíces y provee una buena oxigenación (Tyson et al. 2004). La nutrición de las plantas es uno de los procesos biológicos más conocidos y su eficiencia para absorber nutrientes del agua (P, K, NO<sub>3</sub>) se ha utilizado en el tratamiento de aguas residuales en humedales (Tyson et al. 2004).

Se han reportado eficiencias de remoción de NAT del 86 a 98% en humedales contruidos para recibir efluentes acuícolas (Tyson et al. 2004). Por esto, la acuaponia se plantea como una importante alternativa en la remoción de contaminantes, que a su vez genera ganancias (Rakocy et al. 1992; Rakocy, 2002b; Rakocy et al. 2004; Seawright et al. 1998; Paranjpe et al. 2003; Tyson et al. 2004; Schneider et al. 2005). Diversos autores hacen recomendaciones para el manejo de un sistema de acuaponia debido a la gran complejidad que implica

mantener peces, plantas y bacterias en el mismo medio. Por esto, los parámetros de calidad del agua deben ser favorables para estas tres diferentes comunidades biológicas y deben reflejarse en el desempeño del sistema de acuaponia (Rakocy et al. 1992; Rakocy, 2002b; Rakocy et al. 2004; Seawright et al. 1998; Paranjpe et al. 2003; Tyson et al. 2004).

En un sistema de acuaponia, es importante mantener el pH, lejos de los valores extremos, en un intervalo óptimo de 6.5 a 7.0, ya que las condiciones alcalinas propician el aumento de la concentración del  $\text{NH}_3$ , que afecta a los peces y con valores de 2.0 a 7.0, el NAT esta presente en su totalidad como  $\text{NH}_4$  y además reduce la disponibilidad de algunos nutrientes para las plantas (Tyson et al. 2004). El control del pH se es muy importante en el manejo de un sistema de acuaponia. Rakocy et al. (1992, 2002b, 2004), utilizaron la adición alternada de hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de calcio (CaOH) (para suplementar los iones K y Ca), así como, el uso de grava para promover la liberación de Ca a partir del  $\text{CaCO}_3$  de la roca. Seawright et al. (1998), mencionaron que el uso de bicarbonato de sodio por periodos prolongados, para regular el pH, produce la acumulación del Na hasta niveles tóxicos para las plantas, ya que interfiere con la disponibilidad de K y Ca. Esto a su vez, da como resultado un aumento de la CE normal de la solución nutritiva (Tyson et al. 2004), sin embargo la concentración de nutrientes es inadecuada. En este experimento, los valores promedio de CE (1.65mS/cm) estuvieron cercanos a los valores de CE óptimos reportados por Resh, (1991) de 2.00 a 4.00 mS/cm.

La presencia de deficiencias visibles en las plantas, a partir del día 24 del periodo de cultivo, se asociaron con la falta de Fe y posiblemente de S y Mn, pues las hojas jóvenes mostraron clorosis intervenal. Por este motivo, el día 25 a partir del inicio del cultivo, se aplicó de manera foliar la solución NUTRAPLEX 4x4 COMPLEX MICRO (Western Nutrient Corporation, Bakersfield, CA), con el fin de proveer a las plantas de los micronutrientes esenciales (S =4 %, Zn = 2%, Fe = 4%, Mn = 1%, Cu = 1%), que se pensó, en el caso del Fe y posiblemente S y Mn, eran los causantes de las deficiencias observadas. Después de varias aplicaciones no se observó mejoría y a partir del día 30, aparecieron lesiones necróticas en los bordes de las hojas (puntas quemadas), síntomas de deficiencias de K debido a su baja concentración en la solución nutritiva. Esta sintomatología estuvo relacionada con el incremento en la demanda de K al estar próximo el periodo de floración y producción de frutos.

En conjunto las plantas mostraron diferencias de crecimiento cuando se comparan con el crecimiento registrado en otros estudios (Chow et al. 1992; Castro et al. 2005). Esto se puede relacionar con el efecto de las concentraciones limitantes de nutrientes en *Fragaria ananassa* (variedad chandler) ya que se presentaron los síntomas antes mencionados, al usar tratamientos con concentraciones bajas de N, Ca y P (Castro et al. (2005). De estos, el N y el P, estuvieron presentes en concentraciones aceptables durante el transcurso del experimento, sin embargo, Seawright et al. (1998), encontraron que la acumulación de Na al final de cada experimento, inhibía la incorporación de Ca, por lo que se puede asumir que el Ca

fue uno de los nutrientes limitantes en conjunto por lo que no se obtuvo una producción adecuada de fresas.

Es importante mencionar que las limitaciones en cuanto a la infraestructura en la realización de este estudio, no permitieron la posibilidad de replicar el SA. Los resultados obtenidos no pudieron ser comparados con otro sistema semejante. Sin embargo, la cantidad de información de los síntomas y deficiencias visibles producidas por bajas concentraciones de nutrientes durante un cultivo, es una herramienta importante para corroborar lo observado durante este experimento.

### **Balance de masa**

El principal objetivo de caracterizar el flujo de masa del SA, es conocer los valores de la tasa de producción (Pt) o remoción (R) de NAT, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, P y K en mg/min en el TC, el B y el SH (Tabla XVII), de esta forma es posible delimitar el tamaño del cultivo vegetal asociado al cultivo acuícola. A partir de los resultados encontrados se puede decir que con la ER del NAT del SRA, se requiere un cultivo vegetal 14 veces mayor en el SH, para eliminar el NAT producido por los peces y que es el equivalente a la cantidad removida por el biofiltro, ya que este tiene una eficiencia de remoción absoluta (ERA) de 93.4%, mientras que la del SH es de 6.61%. El SH tuvo una ER de 57% para los NO<sub>2</sub>, superior al biofiltro, sin embargo, el volumen de agua tratado es muy inferior, ya que en el SRA el biofiltro trata un total de 622,080 L/día, mientras que el SH trata un total de 8,640. Hay que considerar la importancia de manejar la tasa de flujo y la cantidad de plantas correcta (Tyson et al. 2004). De esta manera, es factible ajustar la dimensión del SH con respecto a un SRA.

## VI. CONCLUSIONES

La acuaponía es una técnica altamente compleja, ya que peces, plantas y bacterias se encuentran en el mismo medio, los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua deben ser favorables para las tres comunidades y reflejarse directamente en la productividad.

La habilidad de modificar el pH influyó directamente en la posibilidad de mantener concentraciones de  $\text{NH}_3$  bajas, en la nitrificación del biofiltro, su óptima operación y en la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

El control del pH por periodos prolongados utilizando bicarbonato de sodio, produce la acumulación de Na hasta niveles tóxicos e interfiere con la disponibilidad de K y Ca para las plantas.

Los efluentes producidos por el cultivo de la tilapia nilótica *O. niloticus* mediante el uso de una dieta comercial, no satisfacen las necesidades nutrimentales del cultivo de fresa *F. ananassa*, por lo que se requiere la adición de  $\text{K} > \text{Ca} > \text{Fe}$ .

La caracterización del flujo de masa permitirá delimitar el tamaño de un cultivo de la fresa *F. ananassa* asociado al cultivo de la tilapia nilótica *O. niloticus*, en estudios posteriores.

Es necesario incrementar la tasa de flujo en el SH y aumentar la cantidad de plantas, para producir una mejora en la calidad del agua del SRA.

Mediante un sistema de acuaponia se pueden producir peces y plantas en zonas áridas o cercanas a los lugares de consumo, eliminando substancialmente la descarga de los nutrientes en los efluentes acuícolas, generar producción a lo largo del año y equiparar la producción vegetal a un sistema hidropónico, si los nutrientes del cultivo vegetal son complementados.

La acuaponia se destina como una importante alternativa comercial para la generación de alimentos y ganancias, que coadyuva en la remoción de nutrientes de los efluentes acuícolas.



## **VII. RECOMENDACIONES**

Debido a las limitaciones en cuanto a la infraestructura para la realización de este estudio, el uso de una replica anual del SA, es una opción para la comparación de los resultados encontrados.

La acuaponia debe desarrollarse de forma multidisciplinaria, ya que los cultivos, acuícola y vegetal, requieren de habilidades especializadas.

## VIII. REFERENCIAS

- Ackefors H. y M. Enel. 1994. The release of nutrients and organic matter from aquaculture systems in Nordic countries. *Journal of Applied Ichthyology*. 10 (4): 225–241, p.
- Alleman, E. James. 1998. Free Ammonia-Nitrogen Calculator & Information. School of Civil Engineering. Purdue University.
- Alvarez, T.P., F. Soto, S. Avilés, C. Diaz, L. Treviño. 1996. Panorama de la Investigación y su repercusión sobre la producción acuícola en México. En: Memorias del Tercer Simposium Internacional de Nutrición Acuícola, Nov. 11-13, 1996. Monterrey Nuevo León, México. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. 22 pp.
- Alvarez Torres P., C. Ramírez Martínez y A. Orbe Mendoza. 1999. Desarrollo de la Acuicultura en México y Perspectivas de la Acuicultura Rural. 19 pp.
- Alvarez, T.P. 1999. Acuicultura de Repoblamiento en Embalses. Memorias del Taller-Curso: Evaluación de Poblaciones y Repoblamiento en Embalses. SEMARNAP. Instituto Nacional de la Pesca, Dirección General de Investigación en Acuicultura. Subsecretaría de Pesca. Dirección General de Acuicultura y Dir. Gral. Administración de Pesquerías. Chapala, Jalisco. Julio de 1999. 18 pp.
- Aguirre, L. A. 1996. Fundamentos Ecológicos y Económicos para el Manejo de la Zona Costera Tropical. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. México, D.F. 23 pp.

- Al-Harbi A. H. and A. Q. Siddiqui. 2000. Effects of Tilapia Stocking Densities on Fish Growth and Water Quality in Tanks. *Asian Fisheries Science*. 13: 391-396, p.
- Avault, J. W. 1996. *Fundamentals of Aquaculture, A Step by Step Guide to Comercial Aquaculture*. AVA Publishing Company Inc., Baton Rouge, Loussiana EUA, 889 pp.
- Badillo Sotelo, Leticia M. 2005. Efecto de Dos Densidades de Cultivo en el Crecimiento del Abulón Amarillo (*Haliotis corrugata*) en un Sistema Cerrado. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California. México. 83 pp.
- Boscolo W. R., Feiden A., Bombardelli R. A., Signor A., Gentelini A. L., de Souza B.E. 2005. Requirements of Phosforus for nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*. 27: 87-91, p.
- Castro I., O. Goncalves, J. A. Teixeira, A. A. Vicente. 2002. Comparative Study of Selva and Camarosa Strawberries for the Commercial Market. *Journal of Food Science, Food Chemistry and Toxicology*. 67: 2132-2137, p.
- Castro, G., Rodríguez-Delfin, A. and Hoyos, M. 2005. Marginal Mineral Nutrition of Strawberry (*Fragaria ananassa*) Plants Grown Hydroponically. *Acta Horticulturae*. 697: 321-327, p.
- Chow K. K., T. V. Price, and B. C. Hanger. 1992. Nutritional requirements for growth and yield of strawberry in deep flow hydroponic systems. *Scientia Horticultrae*. 52: 95-104, p.

- Colt, J. 2006. Water quality requirements for reuse systems. *Aquacultural Engineering*. 34(3): 337-388, p.
- DWAF (Department of Water Affairs and Forestry). 1996. South African Water Quality Guidelines (second edition). Volume 6: Agricultural Water Use: Aquaculture. Edited by S. Holmes, CSIR Environmental Services. Published: Department of Water Affairs and Forestry. 209 pp.
- Economakois, C.D. y L. Krulji. 2001. Effect of Root-Zone Warming on Strawberry Plants Grown with Nutrient Film Technique (NFT). *Acta Horticulturae*. 548: 189-196, p.
- Estela J. M. y C. Victor. 2005. Flow analysis techniques for phosphorus: an overview. *Talanta*. 66: 307-331, p.
- FAO. 2007. The State of World Fisheries and Aquaculture 2006. FAO Fisheries and Aquaculture Department, Rome. 162 pp.
- Gholamreza R. y C. R. Saad. 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis sp.*) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*. 244: 109-118, p.
- Goltz, W. J., K. A. Rusch y R. F. Malone. 1999. Modeling the major limitations on nitrification in floating-bead filters. *Aquacultural Engineering*. 20: 43-61, p.
- Gooley, G. J. and F. M. Gavine. 2003. Integrated Agri-Aquaculture Systems. A resource Handbook. Rural Industries Research and Development Corporation. Project No. MFR-2A, Printed in Australia. 242 pp.

- Hagopian D. S. y J. G. Riley. 1998. A closer look at the bacteriology nitrification, *Aquacultural Engineering*. 18: 223-244, p.
- Hardy R. W. 2006. Fish Nutrition Basics, Or How to Not Look Like A Fool When Giving A Presentation. *Aquaculture Magazine*. 32 (2): 55-58, p.
- Hatch Company. 2002. DR/2400 Spectrophotometer Procedure Manual. Loveland, Colorado.
- Keith R. 2003. How to Hydroponics. Fourth Edition. Published by: The Futuregarden Inc. Farmingdale, New York. 102 pp.
- Lanza-Espino de la G. y J. L. Arredondo Figueroa. 1990. La Acuicultura en Mexico: de los Conceptos a la Producción. UNAM, Mexico, 316 pp.
- Leonard N. et al. 2000. Populations of heterotrophic bacteria in an experimental recirculating system, *Aquaculture Engineering*. 22: 109-120, p.
- Linardakis D. K. and B.I. Manios. 2005. Hydroponic Culture of Strawberries in Perlite. Institute of Vine, Horticulture & Floriculture. Heraklion, Crete. 3 pp.
- Losordo T. M., M. P. Masser and J. Rakocy. 1992a. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: An Overview of Critical Considerations. Southern Regional Aquaculture Center Publication. No. 451.
- Losordo T. M., J. Rakocy and M. P. Masser. 1992b. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Component Options. Southern Regional Aquaculture Center Publication. Publication No. 453.
- Malone R. F. y L. E. Beecher. 2000. Use of floating bead filters to recondition recirculating waters in warmwater aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*. 22: 57-73, p.

- Marlyn B. 1991. Aquaculture: Realities and Potentials When Getting Started. Southern Regional Aquaculture Center Publication. Publication No. 441.
- Masser M. P., J. Rakocy y T. M. Losordo. 1998. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Management of Recirculating Systems. Southern Regional Aquaculture Center Publication. Publication No. 452.
- Mayo, R., J. Glude y I. Strand. 1984. A Study of Methodologies for forecasting aquaculture development. FAO Fish. Tech. 248: 47 pp.
- Michel, P.J.G. 1999. Acuicultura Rural. Memorias de la Jornada de Investigación Centro Universitario del Sur. Universidad de Guadalajara. 1 de julio.
- Nam M. H., S. K. Jeong, Y. S. Lee, J. M. Choi and H. G. Kim. 2006. Effects of nitrogen, phosphorus, potassium and calcium on strawberry *anthracnose*. Plant Pathology. 55: 246-249, p.
- Palomo, M.G.G. y Arriaga, B.R. 1988. Atlas de ubicación de productos agropecuarios utilizables en la planificación y desarrollo en la Acuicultura en México. 1ª Ed. Secretaría de Pesca. México. 22-26 p.
- Paranjpe A. V., D. J. Cantliffe, E. M. Lamb, P. J. Stoffella y C. Powell. 2003. Winter Strawberry Production in Green Houses Using Soilless Substrates: an Alternative to Methyl Bromide Soil Fumigation. Proceedings of Florida State Horticulture Society. 116: 98-105, p.
- Parsons, T., Y. Maita y C. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological method for seawater analysis. Pergamon Press, 1<sup>st</sup> Edition. Oxford 173 pp.
- Prosser L. 1991. Comparative Animal Physiology. 4<sup>o</sup> Edición. Edit. Willey-Liss.

- Rakocy J. E., T. M. Losordo and M. P. Masser. 1992. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Integrating Fish and Plant Culture. Southern Regional Aquaculture Center Publication. Publication No. 454.
- Rakocy J. E. 2002a. Integrating Hydroponic Plant Production with Recirculating System Aquaculture. En: Timmons M. B., J Ebeling, F. Wheaton, S. Summerfelt y B. Vinci. Recirculating Aquaculture Systems, Northeastern Regional Aquaculture Center, 2nd Edition, USA, 631-698, p.
- Rakocy, J.E. 2002b. Integrating Hydroponic Plant Production with Recirculating System Aquaculture: Some Factors to Consider. Proceedings of the 2nd International Conference on Recirculating Aquaculture U.S. Department of Agriculture, Virginia Cooperative Extension Program, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg VA 24060 USA.
- Rakocy, J.E., R.C. Shultz, D.S. Bailey y E.S. Thoman. 2004. Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Horticulturae (ISHS)*. 648:63-69, p.
- Red de Acuicultura Rural en Pequeña Escala. 1999. Site: Taller ARPE, FAO-UCT, 09 al 12 Noviembre.
- Resh H. M. 1991. Hydroponic Food Production: a Definitive Guidebook of Soilless Food Growing Methods. Woodbridge Press Publishing Company. Fourth Edition. Santa Barbara, California. 462 pp.
- SAS. 1985. Statistics, Cary, NC. Statistical Analysis System Institute Inc.

- Schneider, O., V. Sereti, E. H. Eiding, J. y A. J. Verreth. 2005. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*. 32: 379-401, p.
- Seawright D. E., R. R. Stickney y R. B. Walker. 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquaculture*. 160: 215-237, p.
- SEMARNAP. 1995<sup>a</sup>. Programa de Pesca y Acuicultura (1995-2000). Gobierno de México, Poder Ejecutivo Federal.
- SEPESCA. 1990. Programa Nacional de Desarrollo de la Pesca y sus Recursos 1990-1994; Secretaría de Pesca. México, 1990.
- Shnel N., Y. Barak, T. Ezer, Z. Dafni y J. van Rijn. 2002. Desing and Performance of a Zero-Discharge Tilapia Recirculating System. *Aquacultural Engineering*. 26: 191-203, p.
- STATISTICA. 2002, StatSoft, Inc. (data analisis software system), version 6. 2003. East 14<sup>th</sup> Street Tulsa, OK 74104, USA.
- Stickney, F. 2000. *Encyclopedia of Aquaculture*, John Wiley & Sons, 1008 p.
- Timmons M. B., J Ebeling, F. Wheaton, S. Summerfelt y B. Vinci. 2002. *Recirculating Aquaculture Systems*, Northeastern Regional Aquaculture Center, 2nd Edition, USA, 769 p.
- Tyson R. V., E. H. Simone, J. M. White y E. M. Lamb. 2004. Reconciling Water Quality Parameters Impacting Nitrification in Aquaponics: The pH Levels. *Proceedings of Florida State Horticulture Society*. 117: 79-83, p.
- Wilson Greoff. 2006. *Aquaponics Journal*. First Quarter 2006.



- Weatherley, L. R. 1982. Application of simple dynamic response analysis to a recirculating aquaculture system - a preview. *Aquacultural Engineering*. 1: 33-113, p.
- Weatherley, L. R., R. G. Hill y K. J. Macmillan. 1993. Process modeling of an intensive aquaculture system. *Aquacultural Engineering*. 12: 215 -230, p.
- Weathon, F.W., J.N. Hochheimer, G.E Kaiser, M.J. Krones, G.S. Libey, C.C. Easter. 1994. Nitrification Principles. En: M.B. Timmons and T.M. Losordo, Eds. *Aquaculture Reuse Systems: Engineering Design and Management*. Development in Aquaculture and Fisheries Sciences, Vol. 27, Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands. 101-126, p.
- Wedemeyer G. A. 1996. *Physiology of fish in intensive culture systems*. Chapman and Hall, New York, Printed in U. S. A. 121-139, p.
- Yeo S. E., F. P. Binkowski y J. E. Morris. 2004. *Aquaculture Effluents and Waste By-Products, Characteristics, Potential Recovery and Beneficial Reuse*. North Central Regional Aquaculture Center, Iowa State University, Madison. 50 p.
- Zweig R. D., J. D. Morton y M. M. Stewart. 1999. Source Water Quality for Aquaculture, *a Guide for Assessment*. Environmental and Social Sustainable Development, *Rural Development*. Work in Progress for Public Discussion. 74 p.