



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE TILAPIA,  
ACOCIL Y LECHUGA EN UN SISTEMA DE  
RECIRCULACIÓN ACUAPÓNICO EN CONDICIONES  
DE LABORATORIO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGA**

**PRESENTA:**

**MIREYA RAMÍREZ BALLESTEROS**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JOSÉ ROMÁN LATOURNERIÉ CERVERA**

**2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**1. Datos del alumno**

Ramírez  
Ballesteros  
Mireya  
44448185  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Biología  
100002131

**2. Datos del tutor**

Dr.  
José Román  
Latournerié  
Cervera

**3. Datos del sinodal 1**

Dra.  
Rosaura  
Mayén  
Estrada

**4. Datos del sinodal 2**

Dra.  
Elsa Guadalupe  
Escamilla  
Chimal

**5. Datos del sinodal 3**

M. en C.  
Yamel  
Nacif  
Osorio

**6. Datos del sinodal 4**

Dr.  
René de Jesús  
Cárdenas  
Vázquez

**7. Datos del trabajo escrito**

Evaluación del crecimiento de tilapia, acocil y lechuga en un sistema de recirculación acuapónico en condiciones de laboratorio  
91 p.  
2013

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que me albergó y me brindó la llave para conseguir este logro, es un enorme orgullo ser parte de la Máxima Casa de Estudios.

Al Doctor José Román Latournerié, por toda la confianza, el invaluable apoyo, las enseñanzas, el asesoramiento y la compañía. Mi más eterno agradecimiento profesor por haber confiado en mí y haberme permitido estar en su laboratorio estos años, ha sido un placer. Muchas gracias por todo.

A la Maestra en Ciencias Yamel Nacif, por su apoyo constante, su amistad y por los consejos académicos y personales que me brindó.

A la Doctora Rosaura Mayén, por enseñarme a amar tanto a la biología en aquellas clases maravillosas de animales y por las observaciones y comentarios realizados a este trabajo y por convertirse para mí, en un ejemplo a seguir.

Al Doctor René Cárdenas, por la constante ayuda durante mi proyecto de tesis, por la paciencia, por los conocimientos transmitidos y por abrirme las puertas de su laboratorio.

A la Doctora Elsa Escamilla, por su valioso apoyo, comentarios, aportaciones y por el tiempo brindado hacia esta tesis.

## **DEDICATORIAS**

A mi madre, Virginia, gracias por ser mi ejemplo a seguir, por tu fortaleza, esto es para ti bella, esto es tu logro, no soy nada sin ti, sin tu amor, sin tus palabras, sin tu confianza, sin tus enseñanzas, sin tu apoyo. Gracias por ser mi mamá. Te amo belleza de mujer.

Al amor de mis vidas, Adrián, gracias por estar siempre a mi lado, por ser mi pilar, mi mejor amigo, mi compañero, mi fuerza, mi esperanza, mi felicidad, por ser mi todo. Te amo Osito, gracias por haberme acompañado en este proceso, por tus consejos, tus revisiones, por aguantarme, por todo Adrián, muchísimas gracias. Te amo con todo mi ser.

Al compañero de mi vida, mi hermano Allan, gracias por tu insustituible amor, gracias por cuidarme tanto, por apoyarme, por sostenerme y por siempre estar ahí, te adoro hermanito.

A mi amigo René, gracias por ser mi apoyo siempre, por tu amistad inquebrantable, por esas risas que solo tú y yo sabemos causarnos. Lo logramos Ranita hermosa.

A todos mis amigos, que hacen que mi vida sea feliz, emocionante, divertida y tranquila, los quiero muchísimo. Arlen por tu incondicional y maravillosa amistad. Sandra, gracias por entrar a mi vida, no te dejaré salir nunca, te adoro sandía. Silva y Erika, por estar ahí chicas, siempre puedo contar con ustedes. Jorge, mi lic. favorito, gracias por tu hermosa y sincera amistad. Vane, gracias por tu eterna compañía y amistad.

Gracias a todos por acompañarme en este camino. Los quiero mucho chicos.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>Índice de tablas</b>	III
<b>Índice de figuras</b>	IV
<b>Resumen</b>	V
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 Tilapia	2
1.2 Acocil	5
1.3 Lechuga	7
1.4 Xochimilco	9
<b>2. ANTECEDENTES</b>	13
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	16
<b>4. HIPÓTESIS</b>	16
<b>5. OBJETIVO GENERAL</b>	16
5.1 Objetivos específicos	17
<b>6. MATERIAL Y MÉTODO</b>	18
6.1 Fase de campo y aclimatación	18
6.1.1 Tilapia	18
6.1.2 Acocil	19
6.1.3 Lechuga	19
6.2 Descripción del sistema acuapónico	20
6.3 Registro de parámetros físicos y químicos del agua	21
6.4 Manejo de organismos y registro del crecimiento	22
6.4.1 Tilapia	22
6.4.2 Acocil	23
6.4.3 Lechuga	24

## CONTENIDO

6.5 Medición de índices fisiológicos	24
6.5.1 Tilapia	24
6.5.2 Acocil	25
6.6 Composición proximal del tejido	25
6.6.1 Tilapia	25
6.6.2 Acocil	26
6.6.3 Lechuga	27
<b>7. RESULTADOS</b>	<b>28</b>
7.1 Registro de parámetros físicos y químicos del agua	28
7.2 Crecimiento	30
7.2.1 Tilapia	30
7.2.2 Acocil	32
7.2.3 Lechuga	33
7.3 Medición de índices fisiológicos	36
7.3.1 Tilapia	36
7.3.2 Acocil	37
7.4 Composición proximal del tejido	38
7.4.1 Tilapia	38
7.4.2 Acocil	41
7.4.3 Lechuga	42
<b>8. DISCUSIÓN</b>	<b>43</b>
<b>9. CONCLUSIONES</b>	<b>70</b>
<b>10. SUGERENCIAS</b>	<b>71</b>
<b>11. LITERATURA CITADA</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tablas</b>		<b>Página</b>
I	Parámetros físicos registrados	28
II	Parámetros químicos registrados	29
III	Crecimiento en peso de tilapia	30
IV	Crecimiento en peso de tilapias dominantes	31
V	Crecimiento en peso de acocil	32
VI	Crecimiento en peso de lechuga en distintas camas	34
VII	Consumo de oxígeno entre clase talla de tilapia	36
VIII	Consumo de oxígeno entre clase talla de acocil	37
IX	Composición hepática y muscular en tilapia	39
X	Composición proximal entre clase talla de tilapia	40
XI	Composición proximal del tejido en acocil	41
XII	Composición proximal entre clase talla de acocil	41
XIII	Composición proximal entre camas de lechuga	42



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figuras</b>		<b>Página</b>
1	Descripción del sistema acuapónico	21
2	Crecimiento de tilapia durante noventa días	30
3	Crecimiento de tilapias dominantes durante noventa días	31
4	Distribuciones de peso de acocil por cada clase talla en hembras	32
5	Distribuciones de peso de acocil por cada clase talla en machos	33
6	Crecimiento en peso de lechugas durante noventa días	34
7	Crecimiento en peso de lechugas dispuestas en la cama 1	35
8	Crecimiento en peso de lechugas dispuestas en la cama 2	35
9	Consumo de oxígeno al término de la fase experimental de tilapia	36
10	Relación de la tasa metabólica con el peso seco de tilapia	37
11	Consumo de oxígeno al término de la fase experimental de acocil	38
12	Relación de la tasa metabólica con el peso seco de acocil	38
13	Gráfico discriminante de composición bioquímica de tilapia	39
14	Gráfico discriminante de composición proximal de tilapia	40
15	Gráfico discriminante de composición proximal de acocil	42

## RESUMEN

En el presente estudio se evaluó el crecimiento de tilapias *Oreochromis niloticus*, acociles *Cambarellus (Cambarellus) montezumae* y lechugas *Lactuca sativa*, en un sistema de recirculación acuapónico bajo condiciones de laboratorio. Se utilizaron 85 alevines machos de *O. niloticus*, revertidos sexualmente y se colocaron en un tanque de 570 litros de agua, el 30% de esta agua fue obtenida del canal de Cuemanco en Xochimilco y el 70% restante fue agua limpia. Los acociles se separaron en dos clases talla, dependiendo de la longitud total (LT); para la clase talla uno se utilizaron 25 organismos con una LT de 1.00 - 1.40cm y para la clase talla dos 20 organismos de LT de 1.41 - 1.70cm. Las lechugas fueron plantadas en tierra y se eligieron 20 plántulas con un peso promedio de 39mg, se colocaron en un sistema de raíz flotante, en 2 camas de poliestireno expandido, 10 por cada cama, con una separación entre plántulas de 15cm. El experimento duró noventa días. Quincenalmente se realizó una caracterización merística de los organismos. La velocidad de flujo del sistema de recirculación fue de 3L/minuto, éste se pausaba durante las noches.

En el crecimiento de las tilapias se encontró una dominancia a los 45 días de la fase experimental (15 organismos), los cuales fueron aislados dentro del mismo sistema, para las tilapias dominantes se registró un peso promedio final de  $18.63 \pm 0.32g$ , para el resto de las tilapias  $11.00 \pm 0.26g$ . El crecimiento de los acociles presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre clases talla y sexo. Las hembras tuvieron un crecimiento más homogéneo en comparación de los machos. Para las lechugas existieron diferencias significativas del crecimiento entre las camas ( $p < 0.05$ ). Se encontró que los parámetros fisicoquímicos del agua afectaron significativamente el crecimiento de las tres especies, principalmente la temperatura, el oxígeno disuelto, la dureza total, el pH, los niveles de nitritos y nitratos, así como la concentración de amoníaco, además, la escasez de radiación solar afectó el crecimiento de las lechugas.

El sistema acuapónico instalado en el acuario del Laboratorio de Acuicultura de la Facultad de Ciencias, funcionó durante los noventa días experimentales, generando productos con valor comercial, reutilizando los desechos y minimizando la contaminación del agua, logrando cultivar plantas, peces y crustáceos de manera integral en un espacio reducido sin necesidad de infraestructura especializada. La información obtenida del trabajo realizado, permite señalar que un sistema acuapónico es una alternativa viable y sustentable si se controlan los factores que afectan el crecimiento de las especies cultivadas.

Contribución No. 152. (Tesis de Licenciatura). Laboratorio de Acuicultura y Producción Acuática. Departamento de Biología Comparada. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.

# 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las actividades productivas conlleva un deterioro ambiental. La acuaponía es una alternativa económica de producción sustentable que optimiza el uso de agua valiéndose de sistemas de recirculación cerrados.

En las últimas décadas la acuicultura ha crecido notablemente, sin embargo, esta actividad ha provocado modificaciones en el ambiente y condiciones de eutrofización (Rakocy, 2007). Un sistema de recirculación que utiliza los efluentes de la acuicultura, minimiza el impacto al ambiente, lo que permite efectuar actividades productivas que generan un beneficio social y económico (Adler *et al.*, 2000; Diver, 2000). El deterioro ambiental afecta también a dichas actividades, por ejemplo, la acuicultura se ve afectada significativamente, ya que la calidad del agua es un factor determinante en esta actividad, el balance entre los factores bióticos y abióticos dentro de la acuicultura es indispensable para el desarrollo de este proceso productivo (Diver, 2000; Rakocy, 2007).

La acuaponía es un sistema integrado que vincula la producción de la hidroponía con la recirculación de la acuicultura; es un sistema en el cual se cultivan plantas y peces de manera integral; los desperdicios de los peces proveen una fuente de nutrientes para las plantas y éstas proveen un filtro natural al agua en la que viven los peces (Diver, 2000). Dentro de un sistema acuapónico se obtienen productos con valor comercial, se recuperan los nutrientes y además se impide la contaminación del agua.

El principio básico de la acuaponía reside en el aprovechamiento de la energía del sistema, utilizando los desechos en componentes útiles (García *et al.*, 2004). Church y Pond (1982) mencionaron que sólo el 30% del alimento ingerido por los peces es incorporado al tejido. Por lo tanto, el alimento libre en el sistema, es decir, el no consumido o desechado por los organismos, puede ser utilizado como nutriente para el crecimiento de las plantas.

Los peces excretan los residuos de nitrógeno en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), así que tanto el amoníaco no ionizado y los nitritos ( $\text{NO}_2$ ) pueden ser tóxicos para los mismos peces

en niveles muy bajos (Wilson, 2010). En el proceso de nitrificación, las bacterias del género *Nitrosomonas* oxidan amoníaco a nitrito ( $\text{NO}_2$ ) y las bacterias del género *Nitrobacter* oxidan nitrito en nitrato ( $\text{NO}_3$ ). Esta transformación del nitrógeno elimina el amoníaco del agua. El nitrato no es tóxico para los peces y es la principal fuente de nitrógeno absorbido por los cultivos de hortalizas, las cuales limpian el agua para los organismos acuáticos actuando como filtro biológico (Cockx y Simonne, 2003).

Las ventajas de la acuaponía son: a) la reducción y la extensión del uso del agua; b) disminución de las descargas al ambiente y por ende la cantidad de nitrógeno; c) aumento potencial de ganancias mediante la producción de dos o más cultivos comerciales de alto valor; d) los desechos de los peces proporcionan un suministro constante de nutrientes para las plantas, eliminando la necesidad de suministrar constantemente soluciones nutritivas; e) las plantas absorben los nutrientes que son tóxicos para los peces, descartando el uso de filtros costosos; f) incremento de la calidad de los alimentos producidos, ya que están libres de fungicidas o de insecticidas y, por otra parte, son menos susceptibles al ataque de enfermedades y g) éste sistema se puede aplicar a un nivel familiar o a escala comercial (Diver, 2000; Timmons *et al.*, 2002; Rakocy, 2007).

## **1.1 Tilapia**

La tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) es un pez nativo de África y el Medio Oriente, el cual es considerado una importante fuente alimenticia. En el idioma swahili, hablado por la población indígena que habita la costa del Lago Ngami, “tilapia” significa pez (Castillo, 2003).

Su incorporación a la acuicultura comenzó entre los años 1950 y 1960 en diferentes lugares del mundo (Fitzsimmons, 1997). En las últimas dos décadas, la tilapia ha sido una de las especies líderes en la acuicultura mundial, cultivada bajo diferentes técnicas de producción, desde sistemas extensivos hasta hiper-intensivos (Lazard, 1997). El cultivo comercial de la tilapia se lleva a cabo en más de 65 países, la mayoría de éstos se encuentran situados en los trópicos y en la región subtropical. México, Brasil, Ecuador y

Colombia se han consolidado como los principales productores de tilapias en América Latina. Ecuador, Costa Rica y Honduras son los principales exportadores de la región a los Estados Unidos y más recientemente a Europa. Brasil y México son los principales consumidores locales (FAO, 2012).

Las tilapias del género *Oreochromis* fueron introducidas a México provenientes de Estados Unidos a partir del año de 1964, las especies que se introdujeron fueron principalmente *O. aureus*, *O. mossambicus*, *O. niloticus* y *O. urolepis hornorum* (Morales, 1991). Sin embargo, *Oreochromis niloticus* es uno de los peces más importantes a nivel económico para la acuicultura en zonas tropicales, como es el caso de México (De Graaf, 2004).

Los cultivos iniciales de tilapia en México se realizaron a escala familiar, utilizando nutrientes de bajo costo como abonos orgánicos y subproductos agrícolas. La acuicultura rural de tilapia es una alternativa de producción apta para atenuar la demanda sobre los recursos naturales. La producción de este ejemplar es una opción para la generación de empleos, el arraigo en las comunidades y la producción de alimento de alta calidad nutricional para el ser humano (Vega *et al.*, 2010).

La gran popularidad del uso de la tilapia se debe a diferentes características que la hacen relativamente fácil de cultivar, tales como una tasa de crecimiento rápida, con reproducción “sencilla” en cautiverio, tolerancia a altas densidades de siembra, resistencia a la manipulación y a las enfermedades, así como la tolerancia a un amplio rango de condiciones ambientales (Shiau, 2002). Debido a estas características la tilapia es la especie adecuada para los proyectos de desarrollo rural en sistemas acuícolas de pequeña y mediana producción, así como por su aceptación en mercados regionales e internacionales.

Las tilapias tienen hábitos alimenticios muy amplios, se pueden alimentar con subproductos agrícolas: hojas, vegetales, granos básicos y alimentos concentrados (Kamal *et al.*, 2010). Por su parte Lovell (1989) señaló que las tilapias del género *Oreochromis* son micrófagas y que su alimentación consiste en fitoplancton, zooplancton, detritus y

organismos del bentos; mencionó también que las especies *O. aureus*, *O. niloticus* y *O. mosambicus* son principalmente omnívoras.

De acuerdo al Sistema Integrado de Información Taxonómica (ITIS) la clasificación taxonómica de *O. niloticus* es la siguiente:

Phylum	Chordata
Subphylum	Vertebrata
Superclase	Osteichthyes
Clase	Actinopterygii
Orden	Perciformes
Suborden	Labroidei
Familia	Cichlidae
Género	<i>Oreochromis</i>
Especie	<i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus, 1758)

La familia Cichlidae incluye peces nativos de África, América Central y Sudamérica, caracterizados por una coloración muy atractiva. Los cíclidos presentan un orificio nasal a cada lado de la cabeza, que funcionan como la entrada y salida de la cavidad nasal. Su cuerpo es comprimido, en la mayoría de las especies la cabeza es más grande en los machos. En ocasiones en su desarrollo se presenta un tejido graso en la región anterior y dorsal de la cabeza del macho, presentándose así, un dimorfismo sexual (Morales, 1991).

*Oreochromis niloticus* es un pez teleósteo que presenta una coloración grisácea oscura, con franjas verticales negras y delgadas en la aleta caudal. Tiene un color rosa claro en los ojos. El margen superior de la aleta dorsal es grisáceo (Morales, 1991). En México la tilapia está distribuida de forma extensa, principalmente en lugares por debajo de los 1,500m.s.n.m. (Vega *et al.*, 2010).

Las tilapias son especies aptas para el cultivo en zonas tropicales y subtropicales del país. Habitan en aguas lénticas principalmente, pero también se han encontrado a las orillas

de los ríos entre piedras y plantas acuáticas. Son especies euritermas siendo el intervalo de tolerancia de 12 a 42°C. El rango de temperatura óptima para la tilapia es de 25-32°C, mientras que el pH aceptable para su cultivo es de 6.5-8.5 (Meyer, 2007). Es eurihalina, puede crecer en aguas con salinidades de hasta 20ppm, y el nivel mínimo recomendado de oxígeno disuelto en el agua es de 3.0mg/L O<sub>2</sub> (De Graaf, 2004).

En el cultivo de la tilapia del Nilo, la madurez sexual precoz puede producir un incremento rápido de la población en los estanques, aumentando la competitividad por el recurso alimenticio provocando, en consecuencia, una disminución en la tasa de crecimiento (Pillay, 1997), por ello, es recomendable controlar la capacidad reproductiva en un cultivo. Un alto gasto energético lo produce la madurez gonadal y el cuidado parental en las hembras, esto implica una desviación de la energía dirigida al crecimiento (Green *et al.*, 1997), por lo que es recomendable manejar solamente machos. Durante la ontogenia de las tilapias existe un período en el cual el sexo no está establecido, esta etapa se conoce como periodo lábil, llevándose a cabo entre los 10 y 16 días posteriores a la eclosión. En este lapso, se pueden suministrar hormonas sexuales para influir en la inversión sexual, proceso por el cual la gónada indiferenciada es dirigida hacia un sexo deseado. En tilapias se utiliza el andrógeno 17 $\alpha$ -metilttestosterona (Devlin y Nagahama, 2002).

## 1.2 Acocil

El acocil *Cambarellus (Cambarellus) montezumae* (Saussure, 1857), es una especie endémica de México, es un crustáceo decápodo representativo del sistema lacustre de Xochimilco, Distrito Federal, ya que vive asociado al fondo del sistema, utilizando como refugio al lirio *Eichhornia crassipes* y la elodea *Egeria densa* (Rangel, 2009). En México, *C. (C.) montezumae* es aprovechado de manera tradicional como alimento autóctono (Arana *et al.*, 1998). Su rango de distribución comprende: desde el estado de Puebla en el Este, hasta el estado de Jalisco en el Oeste; en el Centro se encuentra en el sistema lacustre de Xochimilco y en el lago de Chapultepec, D.F., en remanentes del lago de Texcoco, Estado de México, también hay registros que muestran su residencia en los estados de México, Hidalgo y Morelos (Villalobos, 1983; Cornejo, 1991). Generalmente habita en ríos, lagos,



represas, bordos y canales asociados a las raíces de la vegetación riparia en los primeros 50cm de profundidad (Hobbs, 1991). En el resto del mundo la distribución de los acociles abarca Norte América, Sudamérica, Europa, Este de Asia, Australia y Nueva Guinea (Moctezuma, 1996).

La reproducción de *C. (C.) montezumae* puede efectuarse durante todo el año, alcanzando la madurez sexual a partir de los 2cm de longitud y los 9 meses de edad aproximadamente, la hembra oviposita entre 12 y 120 huevecillos, de los cuales solo el 4% alcanzará las tallas reproductivas (Álvarez y Rangel, 2007).

*Cambarellus (Cambarellus) montezumae* es presa de anfibios y peces, se alimenta de pequeños invertebrados y de detritus vegetal. Se ha observado que la biomasa de algunas de las especies de macrofitas decrece con el aumento en la abundancia de los acociles (Hinojosa y Zambrano, 2004), por lo que el acocil posee una influencia significativa en varios niveles tróficos, tanto como depredador como presa. Tiene una importancia ecológica porque ayuda a mantener un equilibrio en la cadena alimentaria en los procesos de degradación de la materia orgánica dentro del sistema (Momot, 1984).

Es uno de los invertebrados bentónicos característicos de muchos ambientes dulceacuícolas (Momot, 1984). Se encuentra en las orillas de los cuerpos de agua y posee una resistencia de temperatura, que va desde los 10°C hasta los 35°C, soportando bajas temperaturas debido a su comportamiento hipogeo que incluye la construcción de galerías (Cornejo, 1991).

De acuerdo al Sistema Integrado de Información Taxonómica (ITIS) la clasificación taxómica de *C. (C.) montezumae* es la siguiente:

Phylum	Arthropoda
Subphylum	Crustacea
Clase	Malacostraca
Subclase	Eumalacostraca

Superorden	Eucarida
Orden	Decapoda
Suborden	Pleocyemata
Superfamilia	Astacoidea
Familia	Cambaridae
Género	<i>Cambarellus</i>
Subgénero	<i>Cambarellus (Cambarellus)</i>
Especie	<i>Cambarellus (Cambarellus) montezumae</i> (Saussure, 1857)

El acocil es considerado como un organismo de gran potencial para el cultivo porque presenta una tolerancia a sequías periódicas y temperaturas extremas, las instalaciones que requiere para su cultivo son mínimas y no demanda artes de pesca sofisticadas o mano de obra especializada (Rodríguez y Carmona, 2002).

Dado su alto contenido nutricional ha sido utilizado como complemento alimenticio en la elaboración de dietas para peces y otros crustáceos que se cultivan con fines comerciales (Lee y Wickins, 1992). El acocil se ha utilizado para controlar la proliferación de macrófitas, es un indicador de contaminación y en fisiología se emplea como modelo en la comprensión de procesos en el sistema neuromuscular de los invertebrados (Holdich y Lowery, 1980).

### 1.3 Lechuga

Una de las familias de plantas más utilizadas para el consumo humano es la Asteraceae, de la que se tienen reportes de su utilización en el Códice Florentino, se empleaban para satisfacer necesidades medicinales, comestibles, ceremoniales, de estética y para obtener colorantes (Villaseñor *et al.*, 2005).

La familia Asteraceae posee una amplia distribución en México tanto en las zonas montañosas como en las áridas y semiáridas que representan las principales áreas de diversificación. Esta familia es una de las más numerosas de las angiospermas, comprende

unos 387 géneros y 2861 especies en México (Rzedowski, 1991). Esta diversidad puede atribuirse a su plasticidad genética que les permite adaptarse a diversas condiciones ecológicas, a sus eficientes mecanismos de dispersión y también a su gran plasticidad química, reflejando su éxito contra los depredadores (Villaseñor *et al.*, 2005).

Dentro de esta familia se encuentra la lechuga *Lactuca sativa* var. *longuifolia*, que es ampliamente conocida y cultivada en todo el mundo, siendo la planta más importante entre las hortalizas de hojas que se consumen crudas (Giaconi y Escaff, 1995).

La especie *L. sativa* se caracteriza por una alta diversidad genética que resulta de su origen polifilético y un proceso de domesticación, ésta diversidad se compone de siete grandes grupos fenotípicamente diferentes (Kesseli *et al.*, 1991). La lechuga *L. sativa* var. *longuifolia*, o *Cos*, conocida coloquialmente como romana, presenta hojas grandes y largas, erguidas y oblongas, aproximadamente de 20 a 30cm. Su nervadura es sobresaliente, con un borde ligeramente dentado. La longitud del tallo es mínima ya que permanece cubierto por un conjunto de hojas formando una cabeza cónica. El nombre del morfotipo se tomó de la isla griega Kos, donde ha sido cultivada, es la lechuga más común en los países mediterráneos de Europa, Asia Occidental y África del Norte (Ryder, 1986).

De acuerdo al Sistema Integrado de Información Taxonómica (ITIS), la clasificación taxonómica para *Lactuca sativa* es la siguiente:

División	Tracheophyta
Subdivisión	Spermatophytina
Infradivisión	Angiospermae
Clase	Magnoliopsida
Superorden	Asteranae
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae
Género	<i>Lactuca</i>
Especie	<i>Lactuca sativa</i> (Linnaeus, 1753)

La lechuga *L. sativa* es una planta anual (Maroto *et al.*, 2000). El clima óptimo para su cultivo es fresco y húmedo, con una temperatura de 5-12°C en la noche y de 17-28°C en el día. La lechuga se produce en una amplia variedad de suelos, desde los más sueltos hasta los más compactos, pero los mejores productos se obtienen en suelos de consistencia media, fértiles y con drenaje adecuado (Giaconi y Escaff, 1995). No tolera la acidez, adaptándose mejor en suelos alcalinos, y resiste valores medios de salinidad (Maroto *et al.*, 2000).

Su cultivo ha ido incrementándose en los últimos años debido a su diversificación genética. Entre los más grandes productores mundiales se encuentran China, Estados Unidos, España, Italia, India y Japón (Mou, 2008). El cultivo de estas hortalizas está expuesto a una serie de problemas, ya que las plantas se deterioran entre la cosecha y su comercialización, esto es, a causa de procesos fisiológicos, ataques microbiológicos y principalmente daños físicos. Durante la comercialización se pierde entre un 25 hasta un 80% de la producción total, de ahí nace la importancia de desarrollar un cultivo con técnicas que permitan disminuir las pérdidas (Auger, 1990; Baldwin *et al.*, 1995).

Una parte importante de la producción de lechuga se realiza bajo condiciones de invernadero, por lo que se puede disponer de esta hortaliza prácticamente durante todo el año. La lechuga es el cuarto vegetal más importante cultivado hidropónicamente después del tomate, el pepino y el chile dulce (Mou, 2008). Tiene gran importancia como cultivo hortícola en México, produciéndose durante todo el año en todas las regiones del país. Existe una producción de lechugas orgánicas e hidropónicas que se venden a precios muy superiores a las producidas en forma tradicional. En la última década ha aumentado la demanda de estos productos orgánicos (Villaseñor *et al.*, 2005), lo que ha llevado a que sean considerados como productos *gourmet*, de alta calidad (Maroto *et al.*, 2000).

#### **1.4 Xochimilco**

La Delegación de Xochimilco se encuentra ubicada en el Distrito Federal, colindando al Norte con las delegaciones Tlalpan, Coyoacán, Iztapalapa y Tláhuac; al Este con Tláhuac y Milpa Alta; al Sur con Milpa Alta y Tlalpan y al Oeste con Tlalpan. Posee

una superficie de 122Km<sup>2</sup> con 404,458 habitantes (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2005).

Xochimilco fue fundado en el año 919 d.C. por los Xochimilcas (Aranda, 2004). La zona lacustre de Xochimilco forma parte de la región del Pánuco, dentro de la cuenca hidrológica del Río Moctezuma y la subcuenca Lago Texcoco-Zumpango (INEGI, 2008). La palabra Xochimilco es de origen náhuatl y significa "campo de flores", está compuesta por los vocablos *xóchitl* (flor) y *milli* (campo cultivado) (Aranda, 2004).

Se localiza a una altitud de 2,240m.s.n.m., en el sureste de la cuenca de México. El clima según la clasificación de Köppen es Cw2, templado subhúmedo con lluvias en verano y temperatura media anual de 13.7°C, mientras que su temperatura superficial oscila entre los 20 y 30°C, siendo enero el mes más frío con 11.8°C y mayo el más caluroso con 18.9°C (García, 1981). Su localización geográfica es 19°16' Norte y 99°03' Oeste, la precipitación media anual es de 620.4mm; las lluvias más abundantes se presentan entre los meses de junio y septiembre (INEGI, 2008).

En diciembre de 1986, por decreto oficial, se declaró una superficie de 89.638km<sup>2</sup>, de las delegaciones Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, como Zona de Monumentos Históricos, reconociendo la importancia ambiental, cultural y patrimonial de la zona (Chávez, 2000). En 1987, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), colocó a Xochimilco como Patrimonio Mundial Cultural y Natural, el reconocimiento incluye el sistema de chinampas y el paisaje lacustre como vestigio de la época prehispánica (Hernández y Sandoval, 2001). En 1992, se estableció por decreto presidencial como Área Nacional Protegida (ANP), bajo la categoría de Zona Sujeta a Conservación Ecológica (ZSCE) "Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco" (Chávez, 2000). En febrero de 2004, el Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), dependiente de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), declaró el ANP y su zona chinampera, como Sitio Ramsar, por ser reconocido como humedal de importancia internacional (Hernández y Sandoval, 2001).

Xochimilco posee un área de canales con una extensión de 189km<sup>2</sup> constituyendo una red de comunicación y riego para las chinampas, estos canales tienen un ancho que varía de 1 a 65 metros, con una profundidad máxima de 2.25 metros (Aranda, 2004). Ha sido una zona protagonista del crecimiento urbano descontrolado en el sur de la ciudad de México (Bazant, 2001). Esto ha propiciado un cambio en el uso de suelo de la región originando que las áreas de protección y preservación ecológica hayan disminuido.

El aporte de agua se limita a agua pluvial, agua tratada proveniente de las plantas de tratamiento Cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtemalco y la de San Lorenzo Tezonco (Aranda, 2004), agua residual sin tratamiento proveniente de los asentamientos humanos y de la zona de captación localizada a lo largo de la ladera norte de la Sierra del Chichinautzin, en el extremo sur de la cuenca de México (INEGI, 2008). Estas descargas han ocasionado un incremento de la contaminación microbiológica, así como un aumento de compuestos fosfatados y nitrogenados provenientes de fertilizantes y productos de limpieza, propiciando que los servicios ambientales de Xochimilco hayan disminuido considerablemente. Los suelos de Xochimilco son salinos y sódicos debido, a que existe un exceso de iones, especialmente de sodio, lo que conduce a la salinización y sodificación de los suelos de las chinampas (Sandoval, 2008).

Las chinampas son consideradas como un sistema agro-ecológico sustentable, en las cuales se regulan y utilizan de manera racional los recursos agrícolas (Merlín, 2009), se emplean principalmente para cultivar maíz, frijol, calabaza, lechuga, chiles, jitomate y amaranto (Ezcurra, 1990). La palabra “chinampa” deriva de los vocablos de origen náhuatl “chinamitl” (seto o cerca de cañas) y “pan” (encima de) (Chávez, 2000). Dentro de las chinampas se tiene el control de todos los recursos naturales como son: agua, suelo, microclima y el espacio. Éstas alcanzaron su máxima extensión y productividad entre los años de 1300 a 1500 de nuestra era, lo que permitió, por un lado, la expansión y consolidación de ciudades importantes como Azcapotzalco, Xochimilco, Chalco y más tarde la consolidación del imperio Azteca y, por el otro, la chinampería pudo sostener el abasto de la población en la cuenca de México, aproximadamente de 1, 500,000 habitantes (Ezcurra, 1990).

Las chinampas son un sistema eficaz para la producción de plantas, sin embargo, el deterioro y abandono del cultivo de éstas ha ido en aumento en los últimos años, debido en parte a la contaminación excesiva con metales pesados provenientes de los canales y por la alimentación de éstos con aguas residuales (Merlín, 2009).

Actualmente la actividad agrícola generada bajo el sistema chinampero se encuentra impactada de manera considerable por los problemas ambientales y sólo se utiliza 15% de la superficie de uso agrícola. En términos económicos, las hortalizas y las flores son los productos más importantes; las hortalizas se producen principalmente en San Gregorio Atlapulco, las flores en San Luis Tlaxialtemalco y el maíz en Xochimilco (Merlín, 2009).

## 2. ANTECEDENTES

Existe una gran diversidad de trabajos encaminados al estudio de la acuaponia, de los que se ha obtenido información importante para el desarrollo de esta actividad.

Sanders y McMurtry (1988) en la Universidad de Carolina del Norte desarrollaron un sistema acuapónico utilizando tilapias *Sarotherodon aureus*, tomates *Solanum lycopersicum* y pepinos *Cucumis sativus*; el riego de los cultivos fue a través de goteo, reduciendo la cantidad de agua, desarrollando así, un sistema acuapónico en regiones áridas o semiáridas donde el pescado y los vegetales frescos son de gran demanda.

Speraneo y Speraneo (1990) implementaron una granja acuapónica en Missouri, con tilapias y albahaca, ésta se expandió a una granja comercial. El proyecto tuvo gran éxito, convirtiéndose en el modelo de invernaderos acuapónicos, además publicaron un manual con las especificaciones técnicas para establecer un sistema acuapónico.

Brown (1993) en el Instituto de Agua Dulce en Shepherdstown, Virginia, se especializó en sistemas de recirculación con la cría de trucha alpina *Salvelinus alpinus*, los resultados mostraron que el nitrógeno, el fósforo y otros nutrientes en los efluentes acuícolas, podían ser efectivamente removidos por las plantas. A partir de ello, se implementó un manual sobre el diseño de un sistema acuapónico.

Made (2002) en Australia, estableció la empresa Fish Farms, produciendo 37 toneladas de barramundi (*Lates calcarifer*) al año, el agua proveniente de los peces fue utilizada para fertilizar lechugas que crecieron en canales hidropónicos.

Rakocy (2003) en Colombia, utilizó el pez Koi (*Cyprinus carpio*) var. *koi* en sistemas acuapónicos, dándole un valor agregado al cultivar un pez de ornato.



García y colaboradores (2004) evaluaron un sistema experimental de acuaponía en el cual utilizaron la tilapia *Oreochromis mossambicus* y el pepino *Cucumis sativus* durante 75 días, produciendo 5kg de pepino y un crecimiento promedio de 25g en peces.

Banting (2005) implementó un sistema acuapónico sobre azoteas en Toronto, Canadá, comparó los beneficios ambientales y los costos del sistema y demostró que éstos resultaban mínimos. Este trabajo dio pauta a que el gobierno de esa ciudad implementara el Programa de Acuaponía y Azoteas Verdes, el cual tuvo como objetivo instalar sistemas acuapónicos en edificios gubernamentales dentro de la ciudad.

Nelson (2005) en Columbia, Missouri, cultivó albahaca *Ocimum basilicum* en un sistema acuapónico, con una densidad de 24 plantas/m<sup>2</sup>, alcanzando los costos del mercado.

Range y Range (2005) desarrollaron un sistema en Reynosa, Tamaulipas, en un orfanato, con tilapias *Oreochromis mossambicus* y plátanos *Musa paradisiaca*, utilizaron lentejas de agua *Lemna minor* como alimento para las tilapias, y así disminuyeron los costos.

Wilson (2006) llevó a cabo varios trabajos y estudios acerca de la acuaponía a cielo abierto en la Universidad de las Islas Vírgenes.

Lennard y Leonard (2006) en Melbourne, Australia, desarrollaron un sistema acuapónico en el que los desechos sólidos provenientes de los tanques de peces fueron dirigidos a granjas de lombrices, las cuales sirvieron como alimento para los peces, y el agua se usó para el riego de vegetales.

Ramos (2006) en la Universidad de Guadalajara, México, estableció un programa acuapónico piloto con tanques para peces y tanques para el cultivo del acocil rojo *Cherax quadricarinatus*.

Rakocy (2006) realizó una comparación de gastos entre un sistema hidropónico y otro acuapónico, y refirió que se emplean 600L de agua para producir 100 dólares de lechuga en la hidroponia y en cambio con la acuaponia se utilizan 500L para la misma cantidad de lechuga, con la ventaja de que en el sistema acuapónico se obtienen dos productos.

Savidov y Nichols (2008) en Alberta, Canadá, estableció el centro de diversificación de cultivo, convirtió su granja acuícola en una acuapónica y logró una producción ideal para competir en el mercado en un clima frío.

Quevedo (2008) evaluó en Mazatlán, Sinaloa, el mangle rojo *Rhizophora mangle* en forma de cultivo hidropónico para la remoción de nutrientes en un sistema cerrado midiendo el crecimiento de poecílidos, con lo que demostró la gran capacidad que tiene esta planta para reducir nutrientes del agua.

Sánchez (2008) en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), desarrolló un sistema acuapónico utilizando *O. niloticus* y *Fragaria ananassa* y encontraron que los efluentes producidos por el cultivo de *O. niloticus* mediante el uso de una dieta comercial, no satisfacen las necesidades nutrimentales del cultivo *F. ananassa*.

Ronzón y colaboradores (2012) compararon la eficiencia productiva entre un sistema hidropónico y otro acuapónico con el cultivo de albahaca *O. basilicum* y de langostino *Macrobrachium rosenbergii*, demostrando que el sistema acuapónico es una alternativa. Sin embargo, consideraron que se requiere que el sistema produzca suficientes metabolitos nitrogenados para la nutrición de las plantas.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

La acuaponía es una metodología en la cual se obtienen beneficios económicos y sociales, y al mismo tiempo se minimiza la degradación del ambiente. La importancia de la acuaponía consiste en que los desechos de un primer sistema biológico sirven como nutrientes para un segundo sistema biológico, por lo que la generación de desechos es casi nula y el desperdicio de agua es mínimo. Además se producen alimentos de forma sustentable.

Con esta tesis se pretende obtener el conocimiento y sentar las bases científicas para escalar la acuaponía a las Chinampas del lago de Xochimilco, D.F. y así, incrementar la diversidad y la producción de los cultivos de tilapia, acocil y lechuga de una manera sustentable, ofreciendo con ello una alternativa económica para las comunidades rurales.

### **4. HIPÓTESIS**

Con el sistema acuapónico se espera que las tilapias y los acociles tengan un crecimiento adecuado, ya que al utilizar a las plantas como un filtro biológico tendrán agua limpia, por su parte, las plantas obtendrán los nutrientes necesarios provenientes de los desechos de los organismos acuáticos.

### **5. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el crecimiento y la supervivencia de las tilapias, los acociles y las lechugas, dentro de un sistema de recirculación acuapónico en condiciones de laboratorio.

## **5.1 Objetivos específicos**

- Instalar un sistema experimental de acuaponia en condiciones de laboratorio.
- Manejar los aspectos básicos de la técnica acuapónica y analizar el crecimiento y supervivencia de los organismos.
- Evaluar los parámetros físicos y químicos del agua asociados al crecimiento de los organismos dentro del sistema acuapónico.
- Registrar algunos índices fisiológicos de los organismos relacionados con el crecimiento en este sistema.

## 6. MATERIAL Y MÉTODO

### 6.1 Fase de campo y aclimatación

#### 6.1.1 Tilapia

La tilapia *Oreochromis niloticus* es el organismo acuático de mayor consumo en México, se eligió para este estudio debido a la gran tolerancia a factores ambientales que ésta posee, además de que es una de las especies más importantes a nivel económico para la acuicultura (De Graaf, 2004; FAO, 2012). Se obtuvieron alevines machos revertidos sexualmente de tilapias *O. niloticus* del Centro Acuícola de Zacatepec, en el estado de Morelos, México. Se emplearon machos debido a que, cuando se utilizan poblaciones mixtas, la maduración sexual es estimulada por la presencia de feromonas disminuyendo el crecimiento, utilizando la energía, que sería dedicada al crecimiento corporal, en la maduración gonadal y en el proceso de reproducción.

Los alevines fueron trasladados en bolsas de agua con oxígeno a saturación al Acuario del Laboratorio de Acuicultura y Producción Acuática de la Facultad de Ciencias de la UNAM, y se colocaron en un tanque de 570 litros de agua: el 30% de esta agua fue obtenida del canal de Cuemanco (Xochimilco) y el 70% restante fue agua limpia proveniente del sistema de distribución del área de acuarios, con una aireación constante a una temperatura de 26°C. Los alevines permanecieron dentro de sus bolsas sobre el agua y se les fue adicionando gradualmente el agua del tanque dentro de las mismas, hasta que éstos salieron de ellas y permanecieron en el tanque 10 días previos a la fase experimental.

Después de 10 días se registraron las medidas y peso de las tilapias y se seleccionaron 85 alevines para la fase experimental con las siguientes características morfométricas, Media ( $\bar{X}$ )  $\pm$  Desviación estándar (D.S), peso:  $3.27 \pm 1.041\text{g}$  con una balanza OHAUS ( $\pm 0.01\text{g}$ ), Scout Pro; longitud total (LT):  $5.34 \pm 0.61\text{cm}$ ; longitud patrón (LP):  $4.26 \pm 0.49\text{cm}$  con un vernier ( $\pm 0.01\text{mm}$ ).

### **6.1.2 Acocil**

En el canal de Cuemanco, se llevó a cabo un monitoreo y análisis del hábitat con la finalidad de conocer las condiciones a las que están expuestos los organismos, se registró la temperatura (°C) y el pH con un potenciómetro HANNA HI98129, la conductividad ( $\mu\text{S}$ ) con un multianalizador Cole Parmer, la transparencia (cm) por medio de un disco de Secchi y el oxígeno disuelto ( $\text{O}_2/\text{L}$ ) con un oxímetro YSI modelo 51B; estos parámetros se midieron en dos sitios de la columna de agua, superficie y fondo.

Se colectaron 60 acociles *Cambarellus (Cambarellus) montezumae* por medio de un muestreo realizado en el canal de Cuemanco del Lago de Xochimilco en el mes de Junio de 2010, entre las 10:00 y las 12:00 hrs. Fueron capturados con una red de cuchara triangular con 1mm de abertura de malla, los animales se colocaron en cubetas con agua del mismo medio y fueron trasladados al acuario del Laboratorio de Acuicultura y Producción Acuática de la Facultad de Ciencias, UNAM.

Los organismos se mantuvieron en peceras con aireación constante durante 5 días en el acuario, con el fin de evitar el estrés por manipulación. Posteriormente se les realizó una caracterización morfométrica, tomando en cuenta la longitud total, la longitud cefalotorácica (LCT) y el peso (g) y se seleccionaron 45 acociles para la fase experimental, separándolos en dos clases talla (CT) de acuerdo a la longitud total: CT1= 1.00 – 1.40cm de LT; CT2= 1.41 - 1.70cm de LT. Se colocaron 25 acociles de la clase talla uno en una java con una capacidad de 35 litros de agua y 20 acociles destinados a la clase talla dos en otra java similar, las dos con aireación constante a una temperatura de 26°C.

### **6.1.3 Lechuga**

Las semillas de lechuga *Lactuca sativa* se obtuvieron de la compañía Euro Garden, fueron previamente lavadas con agua destilada y se sembraron 45 semillas de lechugas en 15 cajas de plástico con tierra, 3 semillas por caja. Se regaron tres veces por semana; germinaron después de 8 días y se esperó hasta que presentaran los cotiledones para poder

ser trasplantadas. Para la fase experimental se eligieron 20 plántulas con las siguientes características morfométricas ( $\bar{X} \pm D.S$ ), Peso:  $39 \pm 12\text{mg}$ ; longitud total:  $4.66 \pm 0.66\text{cm}$ ; longitud foliar:  $2.77 \pm 0.85\text{cm}$  y longitud del tallo:  $2.00 \pm 0.74\text{cm}$ . Estas plántulas se colocaron en 2 camas flotantes de poliestireno expandido, en un sistema de raíz flotante, 10 por cada cama, con una separación entre plántulas de 15cm.

## **6.2 Descripción del sistema acuapónico**

El sistema de recirculación acuapónico (Figura 1), fue construido dentro de las instalaciones del acuario del Laboratorio de Acuicultura de la Facultad de Ciencias. El dispositivo consta de un tanque de 570 litros, destinado para las tilapias, dos tanques con 40 litros para sostener las camas flotantes de lechugas y dos tanques de 35 litros para los acociles, el agua proveniente del tanque de las lechugas pasa por un filtro mecánico relleno con zeolita, para llegar a un contenedor de sedimentación, de ahí, el agua sube por medio de un bomba hacia un tinaco Rotoplas de 600 litros, de este tinaco el agua va directo al primer tanque de acociles y baja al segundo tanque de acociles, pasa por otro filtro mecánico de zeolita para llegar al tanque de las tilapias, dentro de este tanque hay otra bomba que impele el agua hacia los contenedores de las camas de lechugas, y este proceso se repite continuamente. El sistema acuapónico tuvo una velocidad de flujo de  $1\text{L}/19.6\text{seg.}$ , equivalente a  $(183.7\text{L}/\text{h})$ , lo que permitía aproximadamente 3 recambios/día del total del agua por ciclo de operación. La temperatura se mantuvo en  $26 \pm 0.18^\circ\text{C}$ . El sistema se mantuvo en 13 horas luz, 11 horas oscuridad. Durante los noventa días de la fase experimental el sistema se apagaba a las 20:00 hrs. y se encendía de nuevo a las 09:00 hrs., dejando pausado el flujo por 13 horas.

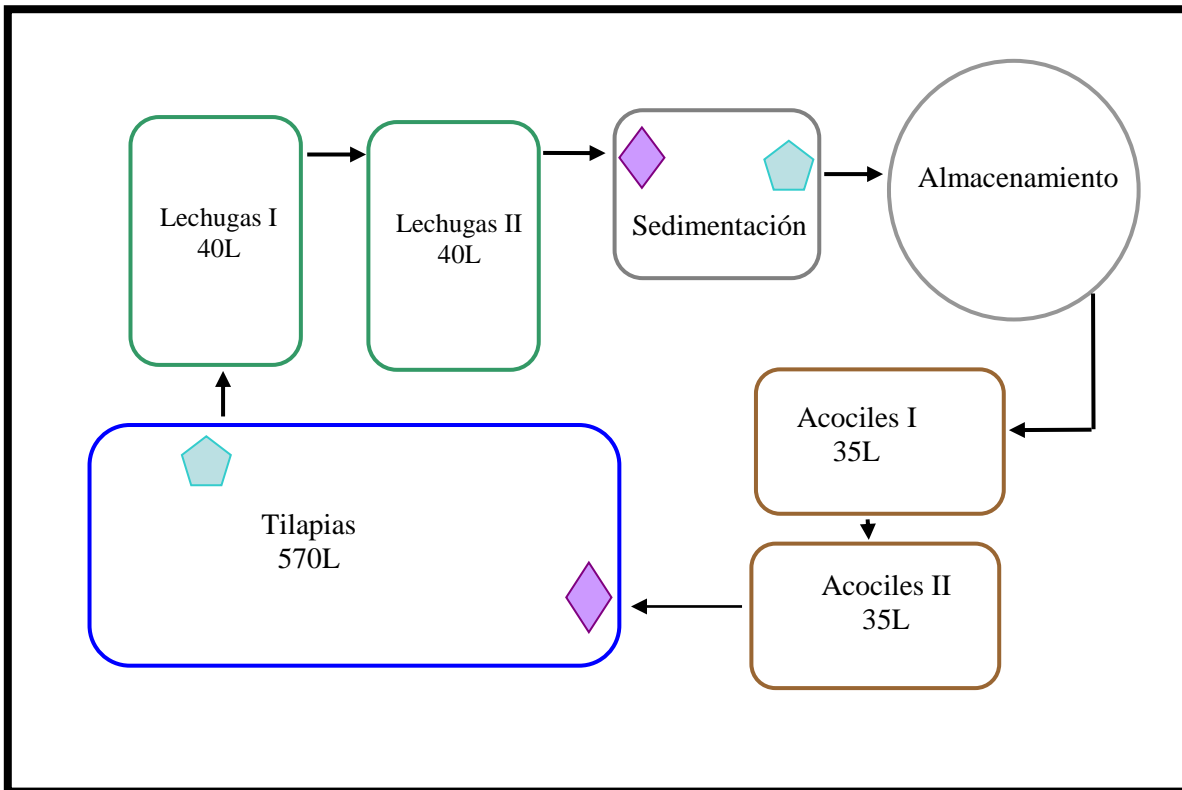


Figura 1. Diagrama del sistema acuapónico, las flechas indican la dirección del flujo de agua, los rombos los filtros mecánicos y los pentágonos las bombas de agua dentro del sistema.

### 6.3 Registro de parámetros físicos y químicos del agua

La evaluación de los parámetros físicos y químicos el agua es importante porque permite determinar las condiciones de los cuerpos de agua, dado que las alteraciones dentro del sistema pueden tener efectos en su funcionamiento. Se llevó a cabo un análisis de calidad de agua dentro del sistema acuapónico para identificar los parámetros que pudieron afectar o favorecer el crecimiento de los organismos dentro de sistema de recirculación.

Los parámetros físicos que se midieron cada tres días, durante toda la fase experimental fueron: la conductividad ( $\mu\text{S}$ ) con un multianalizador Cole Parmer, la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y el pH con un potenciómetro HI98129 y el oxígeno disuelto ( $\text{O}_2/\text{L}$ ) con un oxímetro YSI modelo 51B, estos parámetros se midieron en el tanque de tilapias, ya que era el tanque principal del sistema.



Quincenalmente se midieron los parámetros químicos: la dureza y calcio a través del método titulométrico del EDTA; alcalinidad por el método de fenolftaleína; magnesio que se calcula con la diferencia entre la dureza y el calcio (APHA, 1995). Para analizar los parámetros químicos, se tomaron muestras de agua del tanque de tilapias de la superficie y del fondo con la finalidad de abarcar toda la columna de agua.

Para el análisis de nitrógeno se utilizó el espectrofotómetro DR/870 de un equipo HACH, con una precisión de 0.005mg/L, los nitratos (mg/L de NO<sub>3</sub>) se midieron por el método de reducción de cadmio utilizando el reactivo NitraVer5; los nitritos (mg/L de NO<sub>2</sub>) se midieron por el método de diazotización utilizando el reactivo NitraVer3; el fósforo (mg/L de PO<sub>4</sub>) se midió con el mismo espectrofotómetro DR/870 de HACH usando el método de ácido ascórbico. En los tres métodos se calibró el equipo con agua destilada y se analizaron 10ml de muestra.

## **6.4 Manejo de organismos y registro del crecimiento**

### **6.4.1 Tilapia**

En el tanque de las tilapias se mantuvo el nivel de oxígeno disuelto de  $4.4 \pm 0.12$ mg/L durante la etapa experimental. A los organismos se les proveyó alimento formulado comercial (PURINA, conteniendo 35% de proteína) cada dos días, al inicio se les proporcionó 3.7% del peso corporal/ejemplar/día, conforme fueron creciendo esta cantidad se aumentó al 5% de su peso corporal.

El experimento del sistema acuapónico inició el 21 de junio de 2010 y finalizó el 9 de septiembre de 2010, teniendo una duración de 90 días. Cada quince días se llevó a cabo una caracterización merística de las tilapias, con el fin de evaluar el crecimiento. El procedimiento consistía en: sacar los peces del tanque con una red de malla fina. Se colocaban en cubetas de 20L, con aireación constante, posteriormente se tomaban con una red de acuario individualmente, se les quitaba el excedente de agua con una toalla de papel, y se pesaban en una balanza analítica de precisión ( $\pm 0.01$ g). A continuación se tomaban las

medidas de longitud total (LT) y longitud patrón (LP) por medio de un vernier ( $\pm 0.01\text{mm}$ ), para después devolverlos al tanque de prueba.

A los 45 días de la fase experimental, se observó el desarrollo de jerarquías dentro de la población del tanque de prueba, esto se confirmó con un análisis de distribución de tallas con la prueba de Shapiro-Wilk, por lo que se implementó una jaula flotante dentro del tanque con los 15 organismos más dominantes.

#### **6.4.2 Acocil**

Los acociles se mantuvieron en jivas de plástico y se les alimentó con un formulado comercial: CAMARONINA (35% de proteína), a un nivel de ración del 3% de su masa corporal cada tercer día. Quincenalmente se les realizaba un sifoneo con la intención de limpiar los residuos en el fondo. El tanque de los acociles de la clase talla uno, contenía 25 acociles, mientras que el de la clase talla dos, tenía 20 organismos. A los dos tanques se les colocaron 10 tubos de PVC con un diámetro de 2cm y 5cm de largo, a manera de refugios. Los contenedores mantuvieron niveles de oxígeno constante de  $4.4 \pm 0.12\text{mg/L}$ . A diferencia que con las tilapias no se observaron jerarquías dentro del sistema de las dos clases talla de acociles, por lo cual, no fue necesario aislar organismos dominantes durante la fase experimental.

Quincenalmente se les realizó un análisis merístico a los acociles, el procedimiento de manipulación fue similar al reportado para las tilapias, a continuación se determinaba el sexo, en caso de que fueran machos, se observaba el desarrollo sexual, para comprobar si era un macho maduro sexualmente. Después se registró la longitud total (LT), longitud cefalotorácica (LCT) y peso de los organismos de las dos clases talla.

### **6.4.3 Lechuga**

Los tanques que contenían las camas flotantes de lechugas, estaban interconectados con la finalidad de que el agua y la cantidad de nutrientes provenientes de los peces fuera similar. Se observó un crecimiento mayor para la cama uno, por lo que en la cuarta semana se inició la rotación de las camas, con el fin de que la luz solar fuera equitativa, se procuró que la radiación solar directa fuera de 4h/día. Semanalmente se revisaban las raíces y las hojas para detectar alguna enfermedad.

Cada 15 días se registró el crecimiento de las lechugas, se retiraban de las camas flotantes, se les quitaba el excedente de agua con una toalla de papel, se medía la longitud del tallo, longitud total (LT), longitud foliar y medida de cada hoja, calculando el promedio por planta para registrar el crecimiento foliar y se pesaban las lechugas.

## **6.5 Medición de índices fisiológicos**

### **6.5.1 Tilapia**

Al concluir la fase experimental, se realizó la medición del metabolismo de rutina de las tilapias, se seleccionaron 20 especímenes con base en su tamaño, distribuyéndose en tres grupos: 8 pequeñas, con un peso entre 6-10g, 6 medianas que pesaban entre 11-15g y 6 tilapias grandes con un peso entre 16-22g. Cada una se colocó en una cámara respirométrica de 1 litro, y se utilizaron además dos cámaras control, todas las cámaras estaban sumergidas en un contenedor de 50 litros en baño María; para evitar las fluctuaciones de temperatura, se les colocó agua previamente aireada a saturación de O<sub>2</sub>. Los peces permanecieron en las cámaras la noche previa al experimento con el fin de minimizar el estrés por manipulación y mantener la concentración de oxígeno adecuada, además se mantuvieron en ayunas por 24 horas. Se preparó un reservorio con agua en las mismas condiciones que la de las cámaras para recuperar el agua extraída durante el experimento.

El experimento comenzó a las 08:20 hrs., primero se retiraron las mangueras de aireación de las cámaras, se tomó una alícuota de agua de 100ml de cada una de ellas y el

nivel de agua perdido se repuso con el agua del reservorio, inmediatamente se midió el O<sub>2</sub> en cada una de las muestras, con un oxímetro YSI modelo 51B ( $\pm 0.05\text{mg/L}$ ), previamente calibrado. Las cámaras respirométricas que contenían a los peces permanecieron cerradas por dos horas, al término de este lapso, las cámaras se abrieron de manera secuencial y se obtuvo una muestra de 100ml, y se midió la concentración de O<sub>2</sub> final. A continuación las cámaras se airearon por 90 minutos, previo al siguiente ciclo de medición, repitiéndose el procedimiento señalado. Se realizaron tres mediciones durante el experimento, la primera inició a las 8:20 hrs., la segunda medición fue 12:20 hrs. y la tercera a las 16:20 hrs.

### **6.5.2 Acocil**

Para medir el consumo de oxígeno en los acociles se tomaron 10 acociles de cada clase talla, éstos se colocaron en cámaras respirométricas de 250ml, el procedimiento de medición fue similar al realizado con las tilapias, pero en lugar de tomar 100ml de muestra se tomaron 50ml de cada cámara respirométrica. Se realizaron igualmente tres mediciones durante el día, la primera inició a las 8:00 hrs., la segunda a las 12:00 hrs. y la tercera a las 16:00 hrs.

## **6.6 Composición proximal del tejido**

### **6.6.1 Tilapia**

Al término de la fase experimental se sacrificaron 20 tilapias por medio de un shock hipotérmico a  $-20^{\circ}\text{C}$ , para estar en posibilidades de registrar la composición del tejido. Se utilizaron 12 tilapias para medir la cantidad de glucosa y glucógeno, a las cuales se les tomó 80mg de tejido de músculo y 80mg de hígado por medio de una pequeña disección en la parte ventral del organismo.

Se determinó el glucógeno y la glucosa en el tejido de tilapias, por medio de una modificación de los métodos de Murat y Serfaty (1974) y Kowalsky y Chatterton (1997), tanto en el músculo como en el hígado.

Para los análisis de energía del tejido, materia orgánica y minerales totales del tejido, se colocaron las tilapias restantes en una estufa a 60°C hasta obtener su peso seco (PS) constante, posteriormente, se trituró todo el organismo y se agruparon en pequeñas, medianas y grandes de acuerdo a su peso seco, se tomaron 3 muestras de 0.5g para las pequeñas, 3 muestras para las medianas de 0.5g y dos muestras de 0.5g para las grandes. Se determinó el contenido de energía del tejido mediante una bomba calorimétrica Parr previamente calibrada con ácido benzoico grado calorífico. Los minerales totales y la materia orgánica se obtuvieron mediante la técnica de calcinación, empleando un horno de alta a temperatura a 550°C por un lapso de 3.5 hrs.

### **6.6.2 Acocil**

Se realizó un análisis de composición del tejido de los organismos con el fin de cuantificar la concentración de lípidos totales, proteínas, triglicéridos y glucosa. Los organismos se sacrificaron por medio de un shock hipotérmico a -20°C, durante 3 horas. Se tomaron 20 acociles en total para los análisis, los primeros 5 acociles son iniciales sin tratamiento de la CT-1 con una  $\bar{X}=0.042\text{g}$ ; 5 acociles iniciales sin tratamiento de la CT-2 con  $\bar{X}=0.09\text{g}$ ; se tomaron 10 acociles finales, es decir, tomados al término de la fase de crecimiento, 5 de la CT-1 y 5 CT-2 finales, los 5 acociles de la CT-1 con una  $\bar{X}=0.22\text{g}$  y 5 acociles de CT-2 con  $\bar{X}=0.34\text{g}$ , para éstos análisis los acociles fueron triturados individualmente con el fin de homogenizar el tejido del animal, éste fue filtrado para separar los restos de exoesqueleto, manteniendo en hielo el tejido en todo momento para evitar su degradación.

Los lípidos totales se midieron por el método de sulfo-fosfo vainillina colorimétrico (Zöllner y Kirsch, 1962). Las proteínas por el método de Bradford (Bradford, 1976). La glucosa y triglicéridos se calcularon por medio del método enzimático colorimétrico (Kit de reactivos SpinReact).

Para el análisis de composición del tejido, al término de la fase experimental se seleccionaron 10 acociles de cada clase talla de manera aleatoria, se registró el peso

húmedo (PH), de cada organismo, a continuación se sacrificaron por medio de shock hipotérmico a  $-20^{\circ}\text{C}$  durante 3 hrs. y se colocaron en una estufa a  $60^{\circ}\text{C}$  hasta obtener su peso seco (PS) constante, posteriormente se trituró todo el organismo y se agruparon los acociles de cada clase talla por separado; de la CT-1 se tenían 0.40g y para CT-2, 0.68g, se realizaron dos determinaciones de contenido de minerales totales y dos de contenido de energía con una submuestra de 0.1g para la CT-1. Por su parte para la CT-2 se realizaron tres determinaciones para contenido de energía y tres para minerales con submuestras de 0.1g.

Se determinó el contenido de cenizas mediante el método de calcinación para obtener los minerales totales y la materia orgánica. El contenido de energía del tejido se determinó mediante una bomba calorimétrica Parr.

### **6.6.3 Lechuga**

Se tomaron 10 lechugas, 5 de la primera cama flotante y 5 de la segunda, se obtuvo peso húmedo y peso seco y con este último se determinó el contenido de cenizas mediante el método de calcinación empleando un horno de alta a temperatura a  $550^{\circ}\text{C}$  por un lapso de 3.5 hrs., para obtener los minerales totales y la materia orgánica.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Registro de parámetros físicos y químicos del agua

La temperatura (°C) es un factor de gran importancia porque regula los procesos fisiológicos, químicos y biológicos de los organismos y del agua en la que habitan. Este parámetro presentó diferencias significativas entre las semanas de medición ( $\bar{x}=26.0$ ,  $p=0.0377$ ). Por otra parte, en relación al oxígeno disuelto, también se detectaron diferencias significativas entre las semanas ( $\bar{x}=4.4$ ,  $p=0.0296$ ). El pH, por su parte, es un parámetro que indica la concentración de iones de hidrógeno, es una medida de la acidez o alcalinidad del agua, durante el estudio no presentó diferencias significativas ( $\bar{x}=9.07$ ,  $p=0.7319$ ). La conductividad expresa la resistencia del agua para el paso de una corriente eléctrica, la unidad de medición es micro Siemens ( $\mu\text{S}$ ), este factor presentó diferencias significativas entre las semanas ( $\bar{x}=7.02$ ,  $p=0.0001$ ), así como la medición de sólidos disueltos (SD) ( $\bar{x}=4.4$ ,  $p=0.0030$ ), que es la cantidad de materia disuelta en el agua (Tabla I).

Tabla I. Valores de los parámetros físicos registrados semanalmente a lo largo del periodo experimental.

Factor	Tiempo en semana											$\bar{X} \pm \text{E.E}$	I.C. del 95%
	$\bar{X} \pm \text{E.E}$												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Temp. °C	26.0 <sup>b</sup> ± 0.12	26.2 <sup>a</sup> ± 0.12	26.2 <sup>a</sup> ± 0.12	26.3 <sup>a</sup> ± 0.12	26.6 <sup>a</sup> ± 0.12	26.2 <sup>a</sup> ± 0.12	26.1 <sup>a</sup> ± 0.12	26.0 <sup>b</sup> ± 0.12	26.0 <sup>b</sup> ± 0.12	26.0 <sup>b</sup> ± 0.12	26.0 <sup>b</sup> ± 0.12	26.0 ± 0.18	25.8 - 26.0
O <sub>2</sub> mg/L	4.5 <sup>a</sup> ± 0.07	4.3 <sup>b</sup> ± 0.07	4.4 <sup>a</sup> ± 0.07	4.2 <sup>b</sup> ± 0.07	4.06 <sup>b</sup> ± 0.07	4.4 <sup>a</sup> ± 0.07	4.4 <sup>a</sup> ± 0.07	4.4 <sup>a</sup> ± 0.07	4.4 <sup>a</sup> ± 0.07	4.4 <sup>a</sup> ± 0.07	4.4 <sup>a</sup> ± 0.07	4.4 ± 0.12	4.3 - 4.6
pH	9.05 <sup>a</sup> ± 0.03	9.07 <sup>a</sup> ± 0.03	9.05 <sup>a</sup> ± 0.03	9.08 <sup>a</sup> ± 0.03	9.11 <sup>a</sup> ± 0.03	9.14 <sup>a</sup> ± 0.03	9.05 <sup>a</sup> ± 0.03	9.08 <sup>a</sup> ± 0.03	9.05 <sup>a</sup> ± 0.03	9.05 <sup>a</sup> ± 0.03	9.04 <sup>a</sup> ± 0.03	9.07 ± 0.03	9.0 - 9.1
Cond. $\mu\text{S}$	720 <sup>a</sup> ± 7.54	719 <sup>a</sup> ± 7.54	717 <sup>a</sup> ± 7.54	700 <sup>c</sup> ± 7.54	605 <sup>d</sup> ± 7.54	660 <sup>c</sup> ± 7.54	694 <sup>c</sup> ± 7.54	734 <sup>a</sup> ± 7.54	725 <sup>b</sup> ± 7.54	723 <sup>b</sup> ± 7.54	726 <sup>b</sup> ± 7.54	702 ± 38.2	706.3 - 742.3
SD mg/L	4.4 <sup>b</sup> ± 0.09	4.5 <sup>a</sup> ± 0.09	4.5 <sup>b</sup> ± 0.09	4.4 <sup>b</sup> ± 0.09	4.2 <sup>b</sup> ± 0.09	4.2 <sup>b</sup> ± 0.09	4.5 <sup>a</sup> ± 0.09	4.0 <sup>b</sup> ± 0.09	4.5 <sup>a</sup> ± 0.09	4.5 <sup>a</sup> ± 0.09	4.5 <sup>a</sup> ± 0.096	4.4 ± 0.17	4.2 - 4.8

Los superíndices diferentes en la misma fila, indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). [Temperatura (Temp.), oxígeno disuelto (O<sub>2</sub>), potencial de hidrógeno (pH), conductividad (Cond.), sólidos disueltos (SD), media ( $\bar{X}$ ), error estándar (E.E.) e intervalo de confianza (I.C.)].

Los nitritos (NO<sub>2</sub> mg/L) y los nitratos (NO<sub>3</sub> mg/L) presentaron diferencias significativas entre las semanas ( $\bar{x}$ =0.41, p=0.0007,  $\bar{x}$ =46.2, p=0.0001) respectivamente. Por su parte, la medición de fosfatos (PO<sub>4</sub> mg/L) no presentó diferencias significativas. En lo que respecta al amonio (NH<sub>4</sub> mg/L) se muestran diferencias entre semanas ( $\bar{x}$ =0.45, p=0.0001). Para la medición de alcalinidad no se presentaron diferencias significativas. La dureza es la cantidad de metales disueltos en el agua, fundamentalmente el calcio y el magnesio, no se encontraron diferencias significativas para el parámetro de calcio (Ca mg/L), pero si se encontraron para el magnesio (Mg mg/L) ( $\bar{x}$ =300, p=0.0135) y para la dureza total (CaCO<sub>3</sub> mg/L) ( $\bar{x}$ =565, p=0.0120) (Tabla II).

Tabla II. Valores de parámetros químicos registrados quincenalmente a lo largo del periodo experimental.

Factor (mg/L)	Tiempo en semana							$\bar{X}$ ± E.E	I.C. del 95%
	$\bar{X} \pm$ E.E.								
	1	3	5	7	9	11	13		
NO <sub>2</sub>	0.38 <sup>c</sup> ± 0.006	0.39 <sup>c</sup> ± 0.006	0.405 <sup>b</sup> ± 0.006	0.43 <sup>a</sup> ± 0.006	0.43 <sup>a</sup> ± 0.006	0.44 <sup>a</sup> ± 0.006	0.45 <sup>a</sup> ± 0.006	0.41 ± 0.14	0.3 - 0.4
NO <sub>3</sub>	43.3 <sup>d</sup> ± 0.22	45.7 <sup>c</sup> ± .22	47.2 <sup>b</sup> ± 0.22	48.5 <sup>a</sup> ± 0.22	46.4 <sup>b</sup> ± 0.22	46.5 <sup>b</sup> ± 0.22	45.7 <sup>c</sup> ± 0.22	46.2 ± 1.57	42.8 - 46.3
PO <sub>4</sub>	3.3 <sup>a</sup> ± 0.40	2.6 <sup>a</sup> ± 0.40	3.0 <sup>a</sup> ± 0.40	3.5 <sup>a</sup> ± 0.40	4.0 <sup>a</sup> ± 0.40	4.2 <sup>a</sup> ± 0.40	4.6 <sup>a</sup> ± 0.40	3.6 ± 0.70	2.4 - 5.5
NH <sub>4</sub>	0.36 <sup>c</sup> ± 0.006	0.60 <sup>b</sup> ± 0.006	0.65 ± 0.006	0.62 <sup>a</sup> ± 0.006	0.34 <sup>d</sup> ± 0.006	0.30 <sup>d</sup> ± 0.006	0.20 <sup>e</sup> ± 0.006	0.45 ± 0.18	0.2 - 0.3
Alcal.	700 <sup>a</sup> ± 113	800 <sup>a</sup> ± 113	700 <sup>a</sup> ± 113	700 <sup>a</sup> ± 113	700 <sup>a</sup> ± 113	700 <sup>a</sup> ± 113	800 <sup>a</sup> ± 113	730 ± 48.7	435 - 965
Ca	240 <sup>a</sup> ± 10.5	248 <sup>a</sup> ± 10.5	256 <sup>a</sup> ± 10.5	264 <sup>a</sup> ± 10.5	280 <sup>a</sup> ± 10.5	256 <sup>a</sup> ± 10.5	296 <sup>a</sup> ± 10.5	263 ± 19.2	215.6 - 321.4
Mg	379 <sup>a</sup> ± 19.9	271 <sup>b</sup> ± 19.9	323 <sup>a</sup> ± 19.9	335 <sup>a</sup> ± 19.9	299 <sup>b</sup> ± 19.9	243 <sup>b</sup> ± 19.9	243 <sup>b</sup> ± 19.9	300 ± 50.5	290.4 - 332.4
DT	620 <sup>a</sup> ± 16.9	520 <sup>b</sup> ± 16.90	580 <sup>c</sup> ± 16.9	600 <sup>c</sup> ± 16.9	580 <sup>c</sup> ± 16.9	500 <sup>c</sup> ± 16.9	540 <sup>b</sup> ± 16.9	565 ± 43.8	579.9 - 580.0

Los superíndices diferentes en la misma fila, indican diferencias significativas (p < 0.05). [Nitritos (NO<sub>2</sub>), nitratos (NO<sub>3</sub>), fosfatos (PO<sub>4</sub>), amonio (NH<sub>4</sub>), alcalinidad (Alcal.), calcio (Ca), magnesio (Mg), dureza total (DT), media ( $\bar{X}$ ), error estándar (E.E.) e intervalo de confianza (I.C.)].



## 7.2 Crecimiento

### 7.2.1 Tilapia

El crecimiento se considera como el aumento en peso o longitud a través del tiempo, en la tabla III se muestran los resultados del análisis del crecimiento en peso de tilapia, con diferencias significativas para el crecimiento en peso ( $\bar{X}=5.94$ ,  $p=0.0001$ ) durante los noventa días experimentales (Figura 2).

Tabla III. Valores de crecimiento en peso (gramos) de tilapia durante los distintos tiempos de medición.

Tiempo (días)	N	$\bar{X} \pm E.E.$	I.C. del 95%
0	85	$3.28^e \pm 0.23$	2.81 - 3.74
15	85	$4.20^d \pm 0.23$	3.74 - 4.66
30	85	$4.54^d \pm 0.23$	4.07 - 4.99
45	70	$4.54^d \pm 0.25$	4.04 - 5.05
60	69	$5.66^c \pm 0.26$	5.15 - 6.18
75	69	$8.40^b \pm 0.26$	7.90 - 8.91
90	69	$11.00^a \pm 0.26$	10.50 - 11.52

Los superíndices diferentes, indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) [Número de muestra (N), media ( $\bar{X}$ ), error estándar (E.E.) e intervalo de confianza (I.C.)].

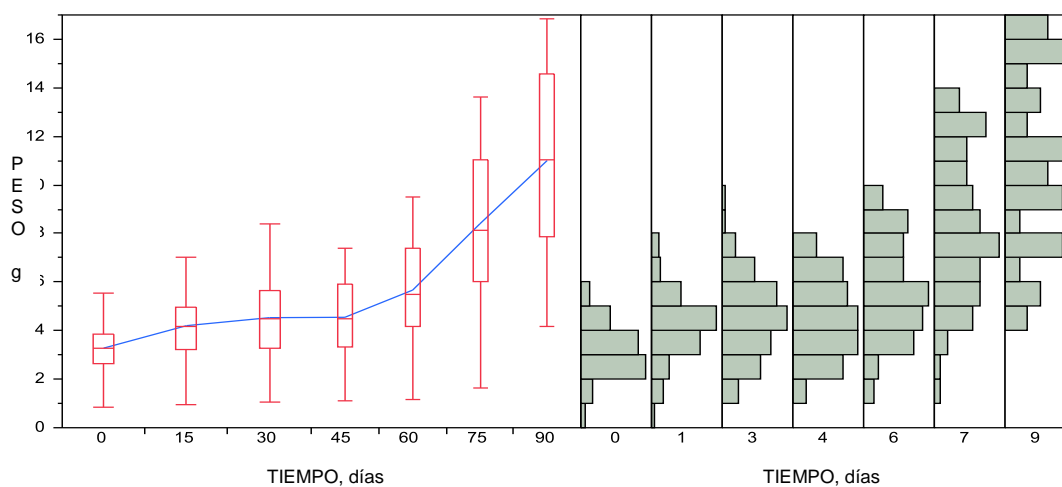


Figura 2. Diagrama de caja mostrando el crecimiento de tilapia durante los noventa días (izquierda). Se muestran las distribuciones de talla de cada lapso de medición (derecha).

- **Distribución de peso de tilapia**

Se realizó una prueba de Shapiro-Wilk para contrastar la normalidad de la distribución de peso para las tilapias, el análisis mostró que a partir de los 45 días experimentales se incrementó la heterogeneidad, mostrando una jerarquía de 15 tilapias, lo que dio la pauta para que fueran aisladas en una jaula flotante dentro del sistema, con la finalidad de que éstas, no alteraran el crecimiento de los demás especímenes por su efecto de dominancia.

- **Crecimiento en peso tilapias dominantes**

Para eliminar las jerarquías dentro del sistema, 15 tilapias fueron aisladas, a éstos organismos se les realizó la medición correspondiente de cada 15 días y presentaron diferencias en los distintos tiempos de medición ( $\bar{X}=13.2$ ,  $p=0.0001$ ) (Tabla IV. Figura 3).

Tabla IV. Valores de crecimiento en peso (gramos) de tilapias dominantes durante los distintos tiempos de medición

Tiempo (días)	N	$\bar{X} \pm E.E.$	I.C. del 95%
45	15	$8.40^d \pm 0.32$	7.75 - 9.027
60	15	$10.67^c \pm 0.32$	10.03 - 11.31
75	15	$15.15^b \pm 0.32$	14.51 - 15.8
90	15	$18.63^a \pm 0.32$	18.0 - 19.28

Los superíndices diferentes, indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). [Número de muestra (N), media ( $\bar{X}$ ), error estándar (E.E.) e intervalo de confianza (I.C.).]

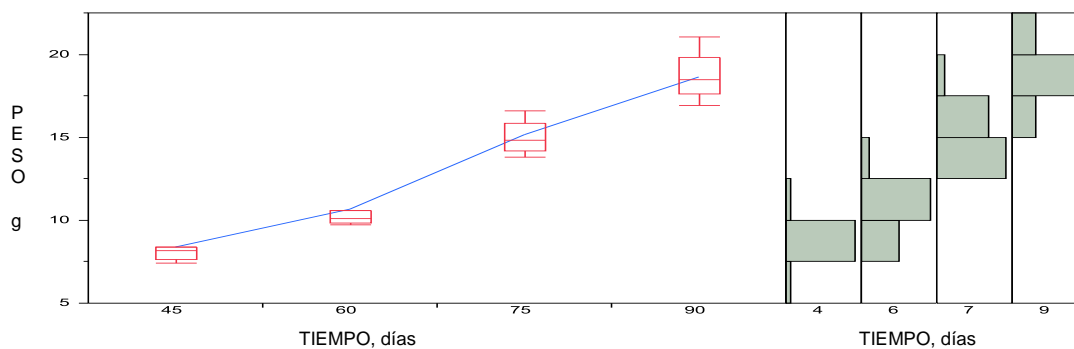


Figura 3. Diagrama de caja mostrando el crecimiento de tilapias dominantes durante su etapa de aislamiento en el tanque de prueba (izquierda). Se muestran las distribuciones de talla de cada lapso de medición (derecha).

- **Distribución de peso tilapias dominantes**

Dentro del análisis de distribución de peso para las tilapias dominantes, se llevó a cabo una prueba de Shapiro-Wilk para contrastar la normalidad. En este, se rechazó la hipótesis de normalidad para los tiempos 45, 60 y 75 días y se aceptó para el último lapso de medición.

### 7.2.2 Acocil

En el crecimiento en peso de los acociles a los noventa días, se presentaron diferencias significativas entre clases talla (CT) para las hembras ( $\bar{X}=0.3$ ,  $p= 0.0069$ ) (Figura 4), y para los machos ( $\bar{X}=0.27$ ,  $p= 0.0019$ ) (Figura 5), indicando que las hembras tuvieron un comportamiento más homogéneo en comparación de los machos (Tabla V).

Tabla V. Valores de crecimiento en peso (gramos) de acocil por sexo y por clase talla durante los noventa días experimentales.

C.T.	Sexo	N	$\bar{X} \pm E.E.$	I.C. del 95%
1	H	19	$0.25^b \pm 0.025$	0.19 - 0.30
1	M	5	$0.19^b \pm 0.029$	0.12 - 0.25
2	H	14	$0.35^a \pm 0.030$	0.29 - 0.41
2	M	6	$0.35^a \pm 0.025$	0.30 - 0.41

Los superíndices diferentes, indican diferencias significativas ( $p<0.05$ ). [Clase talla (CT), número de muestra (N), media ( $\bar{X}$ ), error estándar (E.E.) e intervalo de confianza (I.C.)].

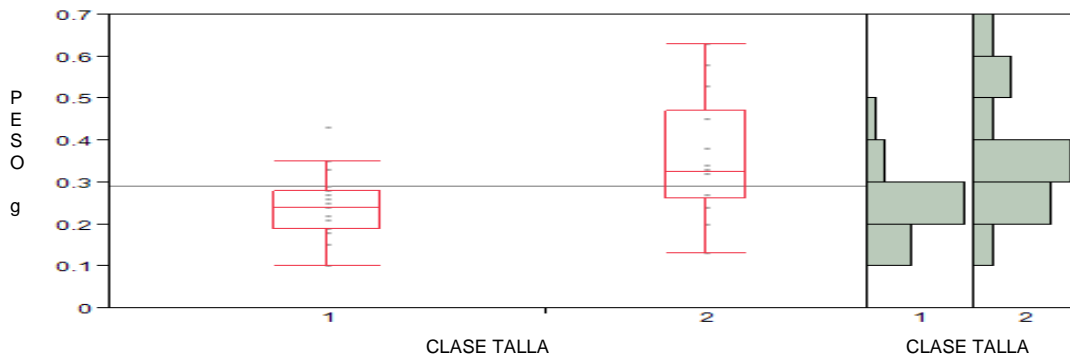


Figura 4. Diagrama de caja que muestra las distribuciones de peso por clase talla en hembras (izquierda). Se encuentran las distribuciones correspondientes de cada clase talla (derecha).

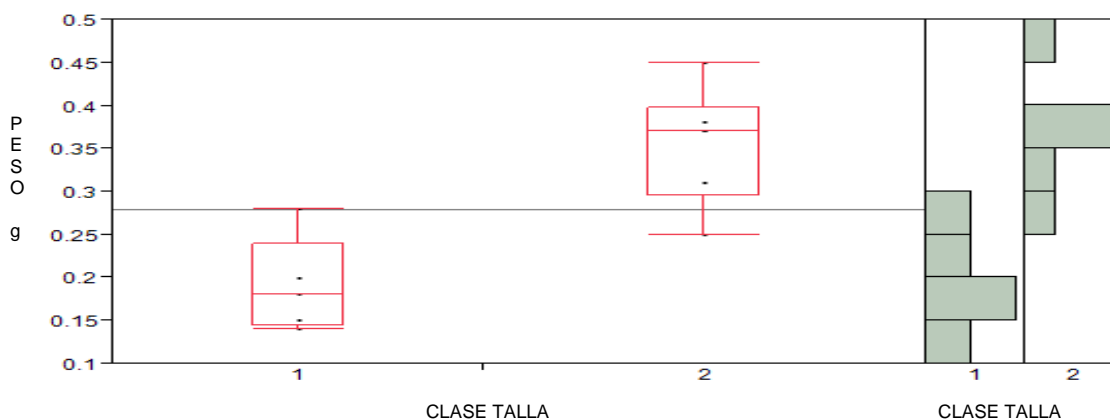


Figura 5. Diagrama de caja que muestra las distribuciones de peso por clase talla en machos (izquierda). Se encuentran las distribuciones correspondientes de cada clase talla (derecha).

- **Distribución de peso acocil**

Para el análisis de distribución de peso de los acociles de las dos clases talla, se realizó una prueba de Shapiro-Wilk para contrastar la normalidad, se muestra que los grupos tuvieron una distribución normal a los noventa días. Los datos del análisis de distribuciones de clase talla y sexo de los acociles, indican que no se encontraron diferencias significativas por sexos, por tiempo, ni por clase talla.

### 7.2.3 Lechuga

Para medir el crecimiento en peso de la lechuga a los noventa días, se realizó un análisis factorial, para el factor cama, los resultados de dichos análisis no presentaron diferencias significativas ( $p=0.9937$ ), pero si para el tiempo y para la interacción entre cama y tiempo ( $p=0.0001$  y  $p=0.0118$ ) respectivamente (Tabla VI). Se observa un crecimiento homogéneo hasta los 45 días de medición para las dos camas flotantes, a partir de los 45 días, la cama uno tuvo un crecimiento mayor (Figura 6). En la figura 7 se muestra la homogeneidad del crecimiento de las lechugas en la cama uno, en comparación del crecimiento más heterogéneo que se observó en las lechugas dispuestas en la cama dos (Figura 8).

Tabla VI. Valores de crecimiento en peso (gramos) de lechuga en distintas camas y en tiempos de medición

Cama	Tiempo (días)	N	$\bar{X} \pm E.E.$	I.C. del 95%
1	0	10	$0.041^f \pm 0.01$	0.60 - 0.68
1	15	10	$0.13^f \pm 0.05$	0.51 - 0.77
1	30	10	$0.56^d \pm 0.16$	0.09 - 1.20
1	45	10	$1.50^c \pm 0.52$	0.83 - 2.13
1	60	10	$3.11^b \pm 0.82$	2.46 - 3.76
1	75	10	$5.85^a \pm 1.65$	5.20 - 6.49
1	90	10	$6.15^a \pm 1.90$	5.50 - 6.80
2	0	10	$0.04^f \pm 0.01$	0.74 - 0.82
2	15	10	$0.09^f \pm 0.04$	0.69 - 0.87
2	30	10	$0.40^f \pm 0.18$	0.39 - 1.16
2	45	10	$1.09^d \pm 0.53$	0.31 - 1.87
2	60	10	$2.23^c \pm 1.26$	1.45 - 3.01
2	75	10	$3.60^b \pm 2.11$	2.81 - 4.37
2	90	10	$4.60^b \pm 2.08$	3.81 - 5.37

Los superíndices diferentes, indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). [Número de muestra (N), media ( $\bar{X}$ ), error estándar (E.E.) e intervalo de confianza (I.C.)].

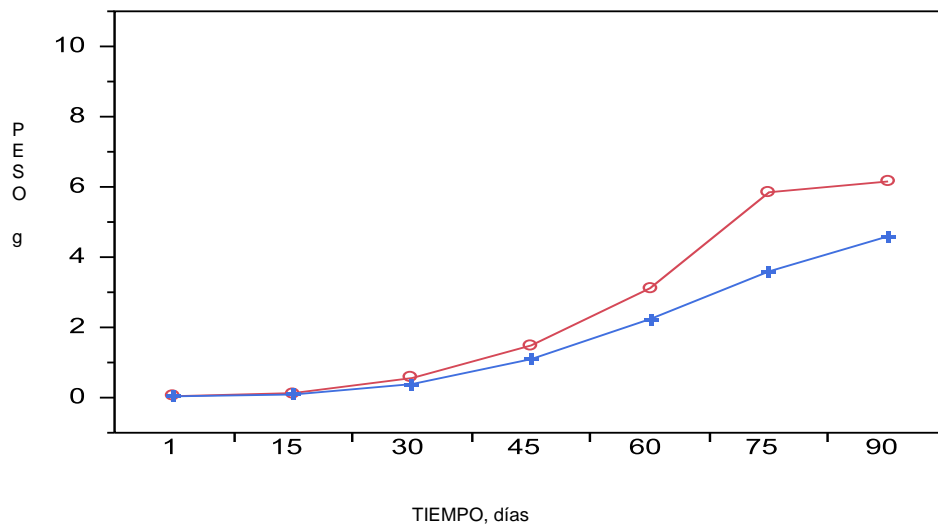


Figura 6. Crecimiento en peso de lechugas durante noventa días, la línea roja ejemplifica el crecimiento de lechugas dispuestas en la cama uno, la línea azul, muestra el crecimiento de las lechugas en la cama dos.

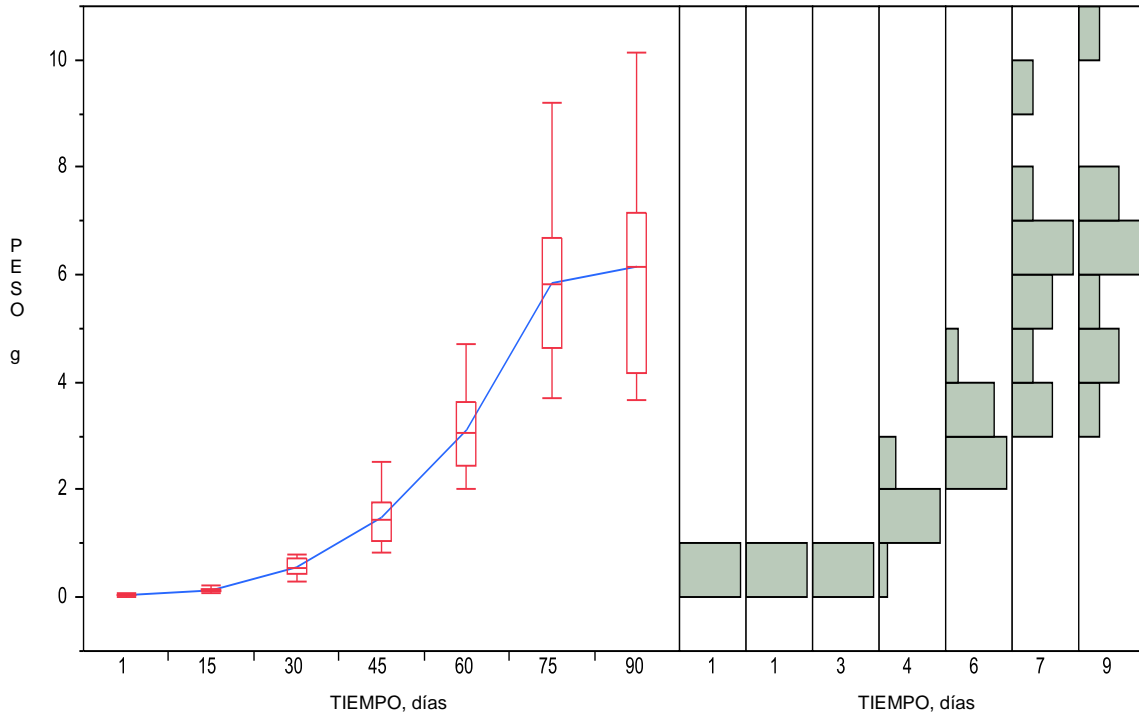


Figura 7. Crecimiento en peso de lechugas dispuestas en la cama 1 (izquierda). Se muestra las distribuciones del peso en cada lapso de medición (derecha).

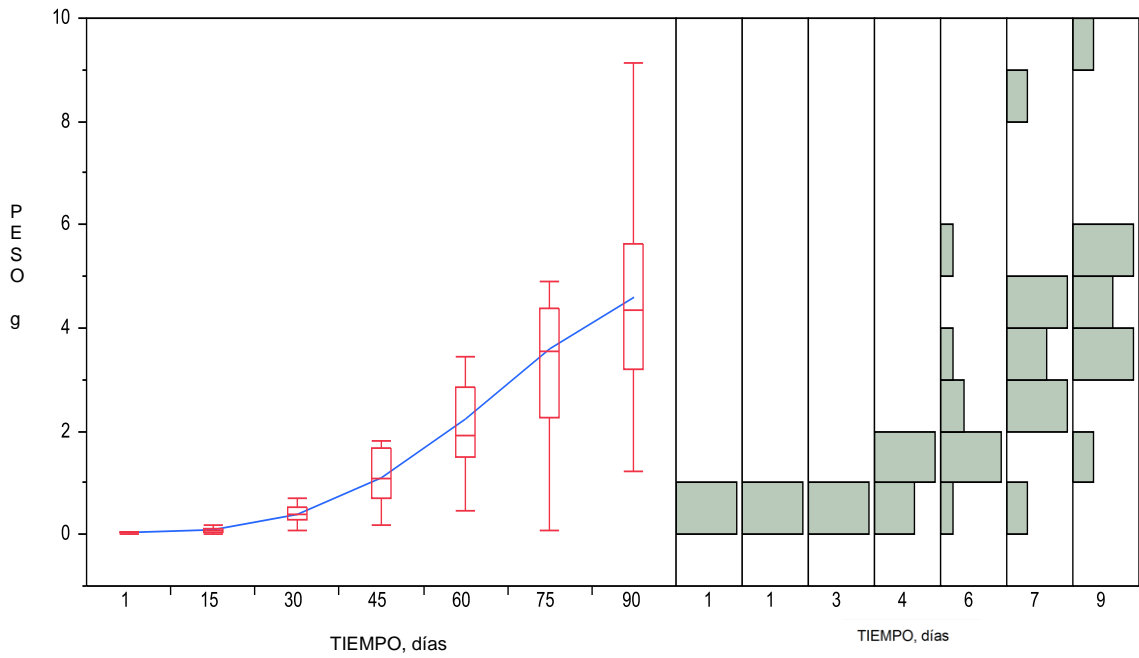


Figura 8. Crecimiento en peso de lechugas dispuestas en la cama 2 (izquierda). Se muestra las distribuciones del peso en cada lapso de medición (derecha).

## 7.3 Medición de índices fisiológicos

### 7.3.1 Tilapia

Los índices fisiológicos se midieron a través de la tasa de consumo de oxígeno de rutina ( $QO_2$ :  $mgO_2$  /h/g Ph), éste índice, es uno de los procesos fisiológicos que permiten establecer el estado metabólico en los organismos acuáticos, para las tilapias se presentaron diferencias significativas ( $\bar{x}=0.67$ ,  $p=0.0001$ ) entre las tres clases talla: 1=chica, 2=mediana, y 3=grande (Tabla VII, Figura 9). Se realizó un análisis para establecer el modelo potencial entre el metabolismo y el peso corporal de los organismos (Figura 10).

Tabla VII. Valores del consumo de oxígeno ( $mgO_2$  /h/g Ph) entre clase talla de tilapia.

Clase talla	N	$\bar{X} \pm E.E.$	I.C. del 95%
1	8	$1.14^a \pm 0.072$	1.00 - 1.29
2	6	$0.57^b \pm 0.089$	0.38 - 0.76
3	6	$0.32^b \pm 0.097$	0.12 - 0.53

Los superíndices diferentes, indican diferencias significativas ( $p<0.05$ ). [Número de muestra (N), media ( $\bar{X}$ ), error estándar (E.E.) e intervalo de confianza (I.C.)].

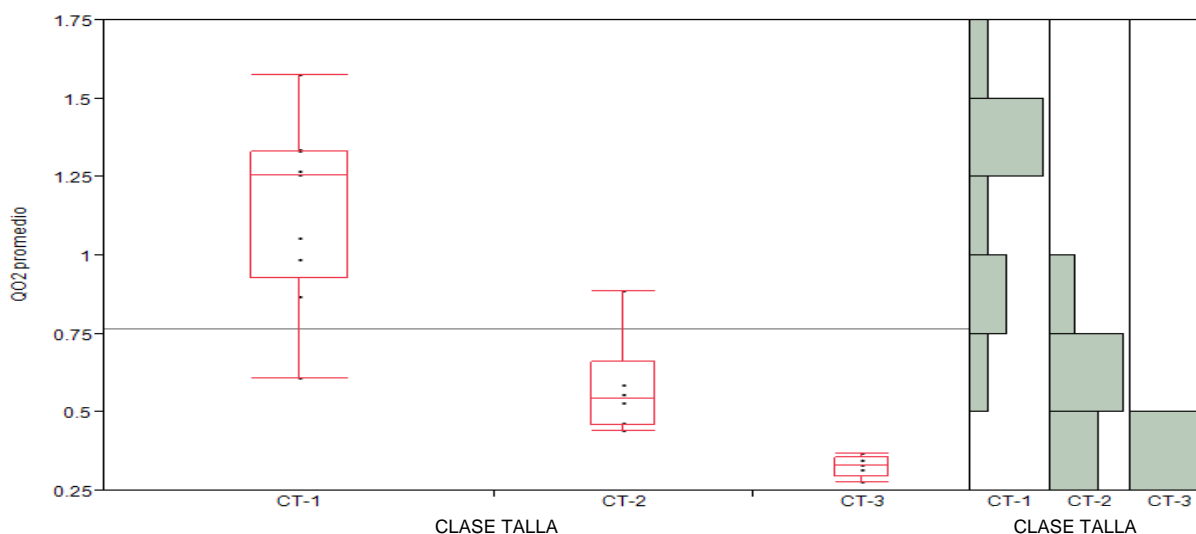


Figura 9. Consumo de oxígeno al término de la fase experimental de las tres clases talla de tilapia (izquierda). Se encuentran las distribuciones de cada talla (derecha).

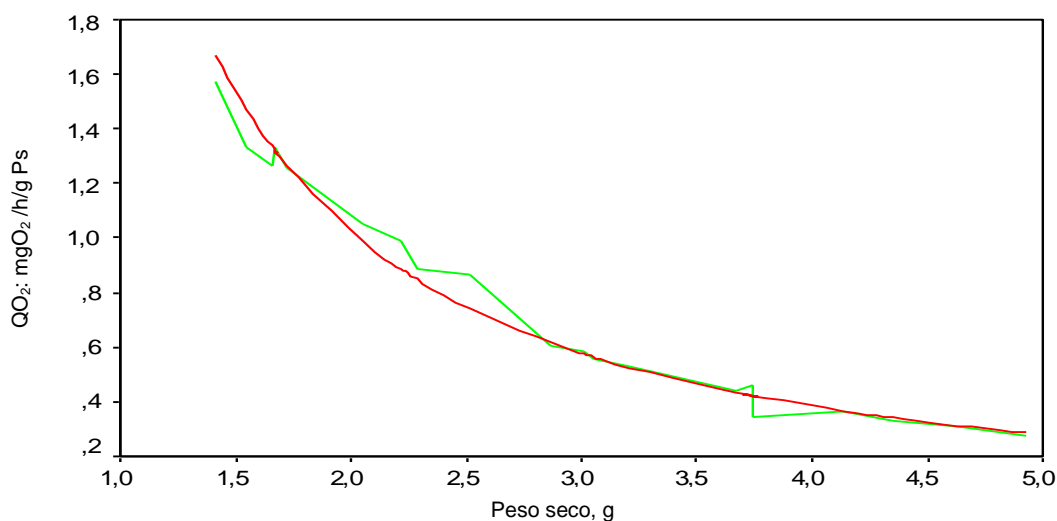


Figura 10. Relación de la tasa metabólica con el peso seco de las tilapias, modelo potencial, la línea roja muestra los resultados del modelo ajustado, mientras que la verde indica los valores observados.

### 7.3.2 Acocil

La tasa de consumo de oxígeno de rutina (QO<sub>2</sub>: mgO<sub>2</sub> /h/g Ph), es un indicador cuantitativo de la energía utilizada en los mecanismos metabólicos, para los acociles no se presentaron diferencias significativas entre las dos clases talla (Tabla VIII. Figura 11). Se realizó un análisis para establecer el modelo potencial entre el metabolismo y el peso corporal de los organismos (Figura 12).

Tabla VIII. Valores del consumo de oxígeno (mgO<sub>2</sub> /h/g Ph) entre clase talla de acocil.

Clase talla	N	$\bar{X} \pm E.E.$	I.C. del 95%
1	10	15.19 <sup>a</sup> ± 1.69	11.6 - 18.7
2	10	10.80 <sup>a</sup> ± 1.69	7.2 - 14.3

Los superíndices iguales, indican que no hay diferencias significativas (p<0.05). [Número de muestra (N), media ( $\bar{X}$ ), error estándar (E.E.) e intervalo de confianza (I.C.)].



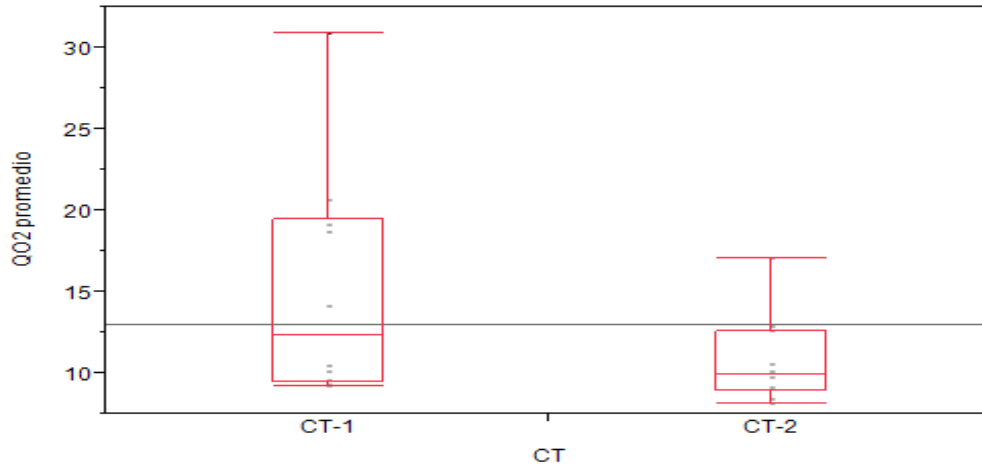


Figura 11. Consumo de oxígeno al término de la fase experimental de las dos clases talla de acocil.

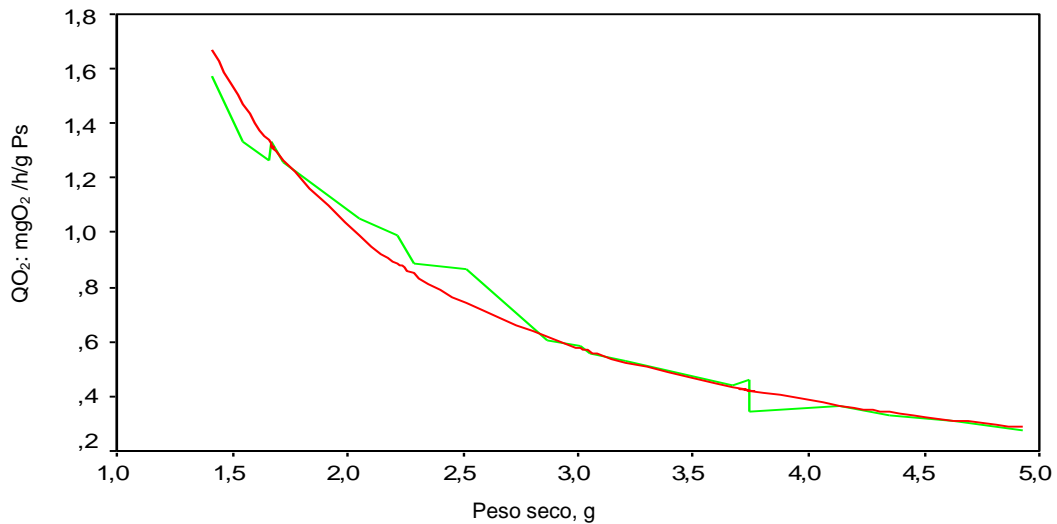


Figura 12. Relación de la tasa metabólica con el peso seco de acocil, modelo potencial, la línea roja muestra los resultados del modelo ajustado, mientras que la verde indica los valores observados.

## 7.4 Composición proximal del tejido

### 7.4.1 Tilapia

Los carbohidratos son una fuente importante de suministro de energía; en el tejido corporal de la tilapia, la glucosa muscular (GM mg/g ph) y la glucosa hepática (GH mg/g

ph) presentaron diferencias significativas entre clase talla ( $\bar{x}=0.056$ ,  $p=0.0015$  y  $\bar{x}=0.22$ ,  $p=0.0122$ ) respectivamente, mientras que el glucógeno muscular (GLM mg/g ph) y el glucógeno hepático (GLH mg/g ph) no presentaron diferencias significativas entre las tres clases talla: 1=chica, 2=mediana, y 3=grande (Tabla IX).

Tabla IX. Valores de composición hepática y muscular en tres clases talla de tilapia.

Clase talla	Índice (mg/g ph)			
	GM	GH	GLM	GLH
	$\bar{X} \pm E.E.$			
1	0.081 <sup>a</sup> ± 0.005	0.347 <sup>a</sup> ± 0.042	0.104 <sup>a</sup> ± 0.016	0.402 <sup>a</sup> ± 0.063
2	0.048 <sup>b</sup> ± 0.005	0.166 <sup>b</sup> ± 0.042	0.079 <sup>a</sup> ± 0.016	0.391 <sup>a</sup> ± 0.063
3	0.040 <sup>b</sup> ± 0.005	0.133 <sup>b</sup> ± 0.042	0.066 <sup>a</sup> ± 0.016	0.2026 <sup>a</sup> ± 0.063

Los superíndices diferentes en la misma fila, indican diferencias significativas ( $p<0.05$ ). [Glucosa muscular (GM), glucosa hepática (GH), glucógeno muscular (GLM), glucógeno hepático (GLH), media ( $\bar{X}$ ) y error estándar (E.E.).]

Se realizó un análisis discriminante con la finalidad de describir las diferencias entre las tres clase talla: 1=chica, 2=mediana y 3=grande, comparando así su comportamiento, este análisis muestra la discriminación de los tres grupos, siendo las tilapias pequeñas, el grupo excluyente, y más parecidos entre sí, los grupos medianos y grandes (Figura 13).

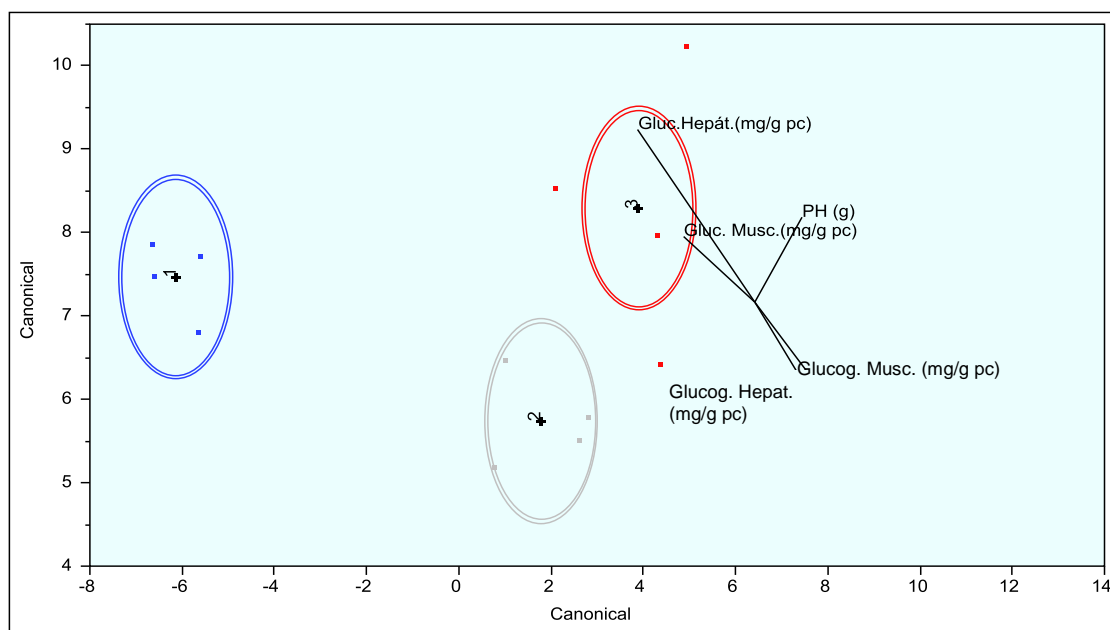


Figura 13. Gráfico discriminante de composición bioquímica, comparando las tres clases tallas y mostrando la discriminación que existe entre ellas. Círculo azul, muestra los datos de la talla chica, el círculo gris, muestra la talla mediana, mientras que el rojo, muestra la clase grande de tilapias.

Para el análisis de % de materia orgánica (%MO), % de minerales (%M) y contenido de energía del tejido (CE cal/g), se presentaron diferencias significativas solo para el peso húmedo (PH gramos) ( $\bar{x}$ =12.9,  $p$ =0.0023) entre las tres clase talla: 1=chica, 2=mediana y 3=grande. Por otro lado, no se presentaron diferencias significativas entre clase talla para las mediciones de % de materia orgánica (%MO), % de minerales (%M), ni para contenido de energía del tejido (CE cal/g), (Tabla X).

Tabla X. Valores promedio de composición proximal entre clases talla de tilapias.

Clase talla	Índice			
	PH (g)	% M.O.	% M	C.E (cal/g)
	$\bar{X} \pm E.E.$			
1	8.22 <sup>b</sup> ± 0.9	75.3 <sup>a</sup> ± 1.04	24.7 <sup>a</sup> ± 1.04	3680 <sup>a</sup> ± 1180
2	13.6 <sup>a</sup> ± 1.06	77.1 <sup>a</sup> ± 0.73	22.8 <sup>a</sup> ± 0.73	5087 <sup>a</sup> ± 834
3	16.9 <sup>a</sup> ± 1.2	77.1 <sup>a</sup> ± 0.84	22.8 <sup>a</sup> ± 0.84	4098 <sup>a</sup> ± 963

Los superíndices diferentes en la misma fila, indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). [Peso húmedo (PH), % de materia orgánica (%MO), % de minerales (%M), contenido de energía del tejido (C.E), media ( $\bar{X}$ ) y error estándar (E.E.).]

En el análisis discriminante se puede observar un comportamiento distinto de la respuesta entre la clase talla uno con relación a las dos restantes, mientras que las clases mediana y grandes mostraron tendencia a ser similares con un traslape significativo (Figura 14).

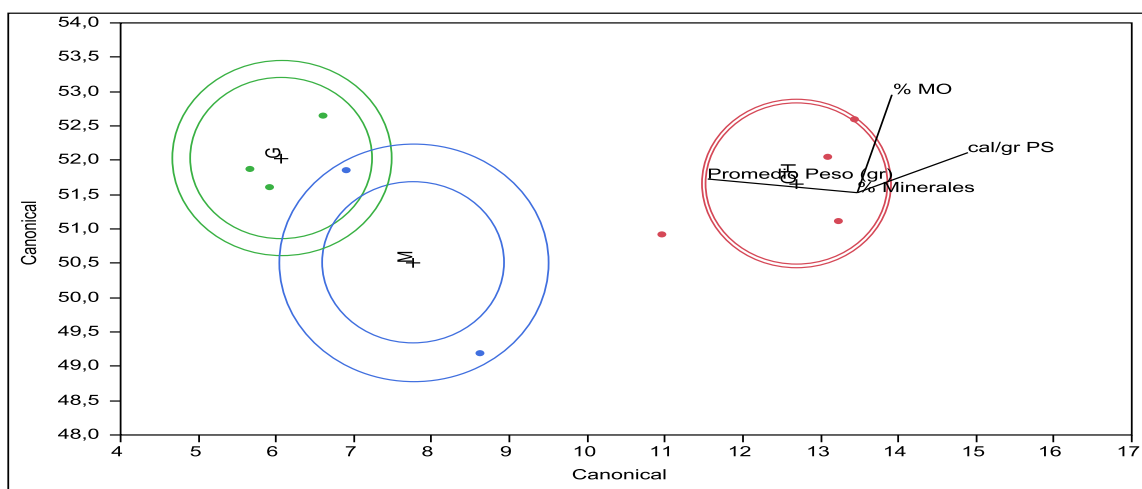


Figura 14. Gráfico discriminante de composición proximal comparando las tres clases talla de tilapia, mostrando el traslape significativo entre la clase mediana (círculo azul) y grande (círculo verde), y la separación de la clase chica (círculo rojo).

## 7.4.2 Acocil

En la medición de la concentración de glucosa, carbohidratos y lípidos, del tejido corporal de los acociles de las tres clases talla, se encontraron diferencias altamente significativas para todos los indicadores, entre las dos clases talla y el período de medición, pero no se encontraron diferencias para la concentración de proteína en el tejido (P mg/g ph) (Tabla XI).

Tabla XI. Composición proximal del tejido entre clases talla y el período inicial y final de medición en los acociles.

Clase talla	Lapso	Índice (mg/g ph)				
		PH (g)	G	P	LT	TG
		$\bar{X} \pm E.E.$				
1	Inicial	$0.04^b \pm 0.04$	$7.74^a \pm 0.73$	$29.6^a \pm 6.51$	$74.1^a \pm 8.35$	$11.7^a \pm 0.90$
2		$0.09^a \pm 0.04$	$4.13^b \pm 0.73$	$41.0^a \pm 6.51$	$39.9^b \pm 8.35$	$9.94^a \pm 0.90$
1	Final	$0.22^c \pm 0.04$	$2.86^b \pm 0.73$	$42.8^a \pm 6.51$	$18.8^b \pm 8.35$	$8.18^b \pm 0.90$
2		$0.35^c \pm 0.04$	$1.90^b \pm 0.73$	$27.3^a \pm 6.51$	$11.5^b \pm 8.35$	$4.66^b \pm 0.90$

Los superíndices diferentes en la misma fila, indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). [Peso húmedo (PH), proteína (P), glucosa (G), lípidos totales (LT), triglicéridos (TG), media ( $\bar{X}$ ) y error estándar (E.E.)]

En el análisis de composición proximal % de materia orgánica (%MO), % de minerales (%M) y contenido de energía del tejido (CE cal/g) de acociles no se presentaron diferencias significativas entre las dos clase talla para ninguno de los índices comparados (Tabla XII).

Tabla XII. Valores de composición proximal entre las clases talla de acociles.

Clase talla	Índice			
	PH (g)	% M.O.	% M	C.E (cal/g)
	$\bar{X} \pm E.E.$			
1	$0.30^a \pm 0.08$	$75.02^a \pm 9.07$	$24.97^a \pm 9.07$	$7635^a \pm 529$
2	$0.45^a \pm 0.10$	$57.5^a \pm 11.11$	$42.46^a \pm 11.11$	$9171^a \pm 648$

Los superíndices iguales en la misma fila, indican que no hay diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). [Peso húmedo (PH), % de materia orgánica (%MO), % de minerales (%M), contenido de energía del tejido (C.E), media ( $\bar{X}$ ) y error estándar (E.E.)].]

Se realizó un análisis discriminante, para evaluar las posibles diferencias en la composición del tejido entre ambas clases talla, en la figura 15 se muestra el gráfico de canónicas correspondiente.

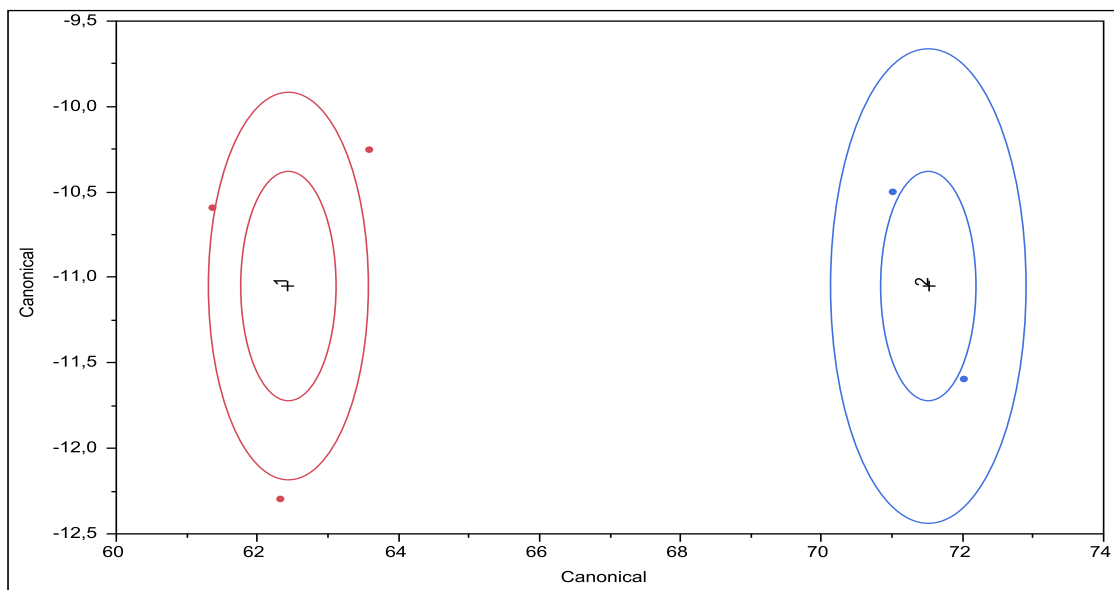


Figura 15. Gráfico discriminante de composición proximal comparando las dos clases talla de acocil. El círculo rojo contiene los datos de la clase talla uno, el azul muestra la clase talla dos.

### 7.4.3 Lechuga

Para el análisis de composición proximal del tejido de lechugas, no se presentaron diferencias significativas en ninguno de los índices evaluados (Tabla XIII).

Tabla XIII. Valores promedio de composición proximal entre camas de lechuga.

Cama	Índice		
	PH (g)	% M.O.	% M
	$\bar{X} \pm E.E.$		
1	5.96 <sup>a</sup> ± 0.86	78.83 <sup>a</sup> ± 3.77	21.16 <sup>a</sup> ± 3.77
2	5.23 <sup>a</sup> ± 0.86	71.66 <sup>a</sup> ± 3.77	28.33 <sup>a</sup> ± 3.77

Los superíndices iguales en la misma fila, indican que no hay diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). [Peso húmedo (PH), % de materia orgánica (%MO), % de minerales (%M), media ( $\bar{X}$ ) y error estándar (E.E.).]

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Crecimiento

#### 8.1.1 Tilapia

El crecimiento es considerado como el proceso de incremento gradual y progresivo con el tiempo en tamaño y en peso del organismo. El crecimiento de las tilapias no dominantes durante la fase experimental de 90 días fue de peso=11.00g y LT=8.79cm, mientras que el crecimiento de los 15 organismos dominantes fue de peso=18.63g y LT=10.49cm a los noventa días. Los organismos dominantes se aislaron ya que se realizó una prueba de Shapiro-Wilk para contrastar la normalidad de la distribución de pesos, demostrando que a partir de los 45 días experimentales se incrementó la heterogeneidad, mostrando una jerarquía de 15 tilapias.

Con referencia a los parámetros de crecimiento, a pesar de la dominancia dentro del sistema y de los demás valores que afectaron el crecimiento, los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por otros autores, Gómez (1998) mencionó que el crecimiento alcanzado en el primer año de vida de la tilapia es alrededor de 9 a 12cm. Orozco (2013) en *O. niloticus* reportó valores de la longitud del cuerpo de 18.64cm al año y medio de crecimiento en condiciones naturales; por otro lado Booth y Merron (1996) con *Oreochromis macrochir* reportaron resultados de 21.5cm de longitud del cuerpo al año y medio. Por lo que el crecimiento de las tilapias dentro del sistema acuapónico es aceptable.

En el sistema acuapónico se observó una dispersión de tamaños dentro del grupo, esta variación del tamaño se explica por el establecimiento de una jerarquía con dominancia de algunos individuos más fuertes, monopolizando el alimento. Una estrategia para evitar este efecto, consiste en la separación de las tallas, agrupando los organismos heterogéneos, este procedimiento se aplicó en el sistema, sin embargo, García (2012) señaló que las diferencias en el tamaño corporal, por medio de su impacto sobre la capacidad individual de

competir socialmente, podrían generar un menor crecimiento, no solo por parte de los organismos pequeños sino afectando el crecimiento global del cultivo.

La temperatura es un factor que afecta directamente el metabolismo de los organismos. A medida que aumenta la temperatura, también aumenta la tasa metabólica y viceversa (Martínez *et al.*, 2009). El rango de temperatura óptima para el cultivo de la tilapia se ubica entre los 25 y 30°C, la temperatura del sistema se mantuvo a  $26 \pm 0.18^\circ\text{C}$ , por lo que el crecimiento de las tilapias, por el factor de la temperatura, no se vio afectado.

Sin embargo, a temperaturas altas los niveles de toxicidad del amoníaco aumentan, ya que la concentración de amoníaco depende del pH y de la temperatura del agua. A una temperatura de 26°C con un pH de 9, la cantidad de amoníaco, que es el producto de la descomposición de los residuos nitrogenados en la mayoría de los teleósteos (Russo, 2006), en el sistema acuapónico fue de 0.17mg/L. Toscano (2010) reportó que niveles por encima de 0.03mg/L de  $\text{NH}_3$ , se consideran tóxicos para la mayoría de los peces. La tilapia *O. niloticus* tolera concentraciones menores de 2.0mg/L de amoníaco (Lovell, 1989; Villarreal, 2010), por otro lado Zweig y colaboradores (1999) sugirieron valores máximos de 0.1mg/L.

La sensibilidad varía de acuerdo al tamaño de los peces, los organismos pequeños son más sensibles a niveles altos de amoníaco que los organismos más grandes (Benli y Köksal, 2005), por lo que niveles de 0.17mg/L de  $\text{NH}_3$  dentro del sistema acuapónico son potencialmente tóxicos, ya que exceden los 0.03mg/L. Sin embargo, se encuentran dentro del rango de tolerancia de la especie, siendo la tilapia, la especie más tolerante a concentraciones altas de amoníaco (Benli y Köksal, 2005). Este factor afecta el crecimiento de las tilapias ya que la principal acción del amoníaco es que irrita el epitelio branquial, éste se recubre de moco disminuyendo considerablemente su capacidad de intercambio gaseoso, provocando así, la dificultad del paso del oxígeno y aumentando la concentración del amoníaco en la sangre, que al no ser eliminado por las branquias, provoca alteraciones internas en los peces, teniendo consecuencias negativas para su desarrollo, crecimiento y supervivencia (Pérez, 2009; Toscano, 2010).

La acumulación de amoníaco y partículas generadas a partir del metabolismo en un sistema cerrado, reduce la calidad del agua afectando el crecimiento de los organismos, por lo que es necesario reducirlo o, de ser posible, eliminarlo por completo. Luccheti y Gray (1988) propusieron mecanismos básicos para ello, los cuales consisten en: el intercambio iónico, utilizando clinoptilolita, una zeolita natural y la biofiltración, donde el agua pasa a través de los biofiltros, previamente colonizados por bacterias nitrificantes.

La tilapia crece mejor en aguas de pH neutro o levemente alcalino, su rango óptimo es de 6.5 - 8.5. El pH del agua depende principalmente de la concentración de carbonatos, bicarbonatos y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), un alto contenido de CO<sub>2</sub> puede causar valores de pH ácidos, afectando el crecimiento de los peces (MAG, 2001). El pH del sistema se mantuvo en  $9.07 \pm 0.03$ , por otro lado, cuanto mayor sea el pH del agua, mayor es la concentración tóxica de amoníaco, mientras más alcalina el agua, la liberación de amoníaco es mayor (Pérez, 2009).

El oxígeno disuelto es indispensable para la supervivencia de los organismos ya que el metabolismo y el crecimiento disminuyen cuando los niveles son bajos, puesto que la cantidad de oxígeno necesario para llevar a cabo el metabolismo de los nutrientes disminuye, por lo que el metabolismo de rutina y mantenimiento se vuelve prioridad antes que el crecimiento (Martínez *et al.*, 2009). La concentración de oxígeno en el agua, se correlaciona con la toxicidad del amoníaco, una disminución del oxígeno disuelto provoca un aumento de la toxicidad, disminuyendo con ello el apetito y el crecimiento de los peces y se ha reportado que una disminución del oxígeno disuelto aumenta hasta en un 40% la toxicidad del amoníaco (Miron *et al.*, 2008). De Graaf (2004) reportó que el nivel mínimo recomendado de oxígeno disuelto en el agua para el cultivo de tilapia es de 3.0mg/L O<sub>2</sub>, el nivel de oxígeno del sistema acuapónico fue de  $4.4 \pm 0.12$ mg/L O<sub>2</sub> por lo que éste parámetro se mantuvo dentro del intervalo óptimo para el crecimiento de los peces.

El estrés afecta significativamente la utilización y flujo de energía en un organismo, debido a que hay un efecto directo sobre su metabolismo. El estrés se presentó en el sistema de cultivo, los organismos experimentaron estrés por manipulación continua ya que se



sometían a capturas y biometrías quincenalmente, toma de muestras de agua (dos veces por semana) para evaluar su calidad, así como la dominancia de los peces. El estrés provoca un aumento significativo en la demanda energética, debido al aumento en el metabolismo, las tilapias llevan a cabo ajustes metabólicos que conllevan un incremento en la demanda energética, por lo que éstos desórdenes fisiológicos alteran el crecimiento (Santerre *et al.*, 2006; Martínez *et al.*, 2009)

Uno de los factores químicos que influyen en el crecimiento de la tilapia es la dureza del agua. La dureza es la concentración de cationes divalentes de calcio y magnesio y se expresa en mg/L de CaCO<sub>3</sub> (Castro *et al.*, 2004). Para el sistema acuapónico se reportaron valores promedio de Ca= 263 ± 19.2mg/L y para Mg= 300 ± 50.5mg/L, dando así una dureza total de 565 ± 43.8mg/L de CaCO<sub>3</sub>, siendo la cantidad de minerales muy alta. El rango de valor óptimo de dureza en el agua para el cultivo de peces es de 20 a 350mg/L de CaCO<sub>3</sub>, mientras que para la tilapia es de 20 - 200mg/L de CaCO<sub>3</sub>. La concentración de minerales afecta las branquias, reduciendo su capacidad respiratoria y metabólica, provocando un lento crecimiento (MAG, 2001; Castro *et al.*, 2004).

### **8.1.2 Acocil**

En crustáceos, el crecimiento es un proceso complejo que incluye la síntesis de proteínas y la proliferación de células durante el período de intermuda y un rápido aumento de la longitud y el peso durante la muda. El desprendimiento del exoesqueleto y la formación de uno nuevo, permite que se expandan los tejidos, con un consecuente incremento en tamaño y volumen, durante este proceso, los organismos presentan cambios en su fisiología, bioquímica, conducta y anatomía (Manor *et al.*, 2002; Gallardo, 2011).

Las hembras de la clase talla uno presentaron un crecimiento en peso promedio de 0.25g, mientras que las de la clase talla dos uno de 0.35g; por otro lado, los machos de la clase talla uno presentaron un peso promedio de 0.19g y los de la clase talla dos un peso de 0.35g. Aunque el peso húmedo medio de los hembras fue mayor en la clase talla uno, que el de los machos, no hubo diferencias significativas en la tasa de crecimiento entre ellos.

Gallardo (2011), mencionó un crecimiento en peso promedio de 0.39g para hembras y 0.36g para machos a 26°C del acocil *C. patzcuarensis* en 120 días de fase experimental, por lo que los resultados del presente estudio, fueron similares con los de este autor.

El crecimiento de los acociles es afectado por la temperatura y una de las características del acocil *C. (C.) montezumae* es su resistencia a temperaturas extremas, realizando ajustes y presentando una respuesta compensatoria, a través de mecanismos homeostáticos. La temperatura óptima reportada en la cual las funciones de los acociles se realizan con la máxima eficiencia es entre 20 y 25°C (Cornejo, 1991; Moctezuma, 1996; Hernández, 2008; Aguilar, 2011). En el sistema acuapónico los niveles de temperatura se mantuvieron en  $26 \pm 0.18^\circ\text{C}$ , aunque el rango óptimo es de 20-25°C para el acocil *C. (C.) montezumae*, pero el efecto por parte de temperaturas altas no fue significativo, ya que las temperaturas altas afectan los procesos respiratorios, de regulación iónica y osmótica produciendo un desequilibrio en la pérdida y absorción de iones afectando el crecimiento (Hernández, 2008; Castro *et al.*, 2011).

La temperatura tiene una consecuencia directa en la tasa metabólica de los organismos poiquiloterms, repercutiendo en el crecimiento y supervivencia; mantener el sistema sin fluctuaciones permite que la energía sea dirigida al crecimiento y no a regular el metabolismo (Hernández, 2008; Castro *et al.*, 2011); la temperatura es el parámetro ambiental que contribuye a determinar la respuesta fisiológica y el comportamiento de la mayoría de los organismos acuáticos.

En crustáceos, a temperaturas bajas, disminuye el número de hemocitos y su capacidad fagocítica, y a temperaturas elevadas el número de hemocitos y la proteína plasmática aumentan, esto provoca una disminución del sistema profenoloxidasa (Le Moullac y Haffner, 2000). El sistema de activación de la profenoloxidasa (proPO), es la respuesta inmune de los artrópodos, se activa con la enzima fenoloxidasa, en crustáceos, el sistema de activación de la proPO y otras moléculas asociadas se encuentran en compartimientos en el interior de los gránulos de los hemocitos (Vargas y Barranco, 2001),

por lo que mantener el rango de temperatura óptimo para la especie que se cultiva es de gran importancia para asegurar el crecimiento y supervivencia adecuados.

Se ha demostrado que los acociles sobreviven en agua con 2mg/L de oxígeno disuelto, son resistentes a concentraciones relativamente bajas. Sin embargo, el rango óptimo se reporta entre 3-5mg/L de O<sub>2</sub>. El nivel de oxígeno del sistema acuapónico fue de  $4.4 \pm 0.12$ mg/L O<sub>2</sub>, este parámetro se mantuvo en los rangos óptimos para el crecimiento de los acociles. En situaciones de hipoxia, los acociles interrumpen la muda para reducir el metabolismo, afectando con ello su crecimiento (Moctezuma, 1996). Por otro lado, una baja concentración de oxígeno disuelto reduce la inmunocompetencia, ya que disminuye la actividad fagocítica de los hemocitos de los crustáceos aumentando así la susceptibilidad a enfermedades (Le Moullac y Haffner, 2000), por lo que mantener los niveles óptimos de oxígeno ayudan a potencializar el crecimiento de los crustáceos.

Se ha reportado que los astácidos prefieren aguas alcalinas ya que el pH alcalino contribuye al endurecimiento de la cutícula y niveles bajos de pH causan un retraso en el crecimiento (Moctezuma, 1996; Cai-Feng *et al.*, 2009). El pH del agua donde se encontraban los acociles fue de  $9.07 \pm 0.03$ , aunque posiblemente un pH de 8.5 sería el límite superior para el endurecimiento de la cutícula, ya que concentraciones elevadas de pH afectan el sistema respiratorio, acumulándose calcio en las branquias, evitando la absorción de sales minerales (Padilla y Cuesta, 2003). Zanotto y Wheatly (1993) demostraron que para *P. clarkii* una condición ácida podría reducir el calcio corporal total hasta un 37%, mientras que el agua alcalina puede causar una elevación en la absorción de calcio. Esto indica que el pH ambiental puede afectar los flujos de calcio asociados con la calcificación de la muda, lo que probablemente afecta la supervivencia y el crecimiento de los acociles.

El crecimiento en los crustáceos está en función del aumento de tamaño en cada muda y su frecuencia (Hernández, 2008). Los crustáceos necesitan carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) para endurecer el nuevo exoesqueleto y no solo lo obtienen de la dieta, sino también del agua en la que habitan, por lo que la concentración de calcio y magnesio en el

agua es un factor importante implicado en el crecimiento y supervivencia de crustáceos (Cai-Feng *et al.*, 2009).

Cai-Feng y colaboradores (2009) demostraron que la concentración de 65.6mg/L de calcio dio lugar a la mayor ganancia de peso de especímenes de *P. clarkii*. Por otra parte, se mostró que la supervivencia del acocil *Paranephrops zealandicus*, aumentó las concentraciones de calcio en el agua por encima de 10mg/L, mientras que las tasas de crecimiento se mantuvieron sin cambios en concentración de calcio de 80mg/L. Para el sistema acuapónico se reportaron valores promedio de  $263 \pm 19.2$ mg/L Ca y  $300 \pm 50.5$ mg/L Mg, dando así una dureza total de  $565 \pm 43.8$ mg/L de CaCO<sub>3</sub>, por lo que posiblemente el crecimiento de los acociles se vio afectado por la cantidad de minerales en el agua, ocasionando problemas osmoregulatorios y una mayor demanda energética para estos procesos.

El amoníaco y los nitritos son los contaminantes principales en los sistemas de cultivo, estos compuestos afectan a los organismos acuáticos incluyendo a los crustáceos, principalmente en el crecimiento, función del sistema nervioso central, equilibrio iónico, metabolismo energético y la supervivencia (Ja-Geun *et al.*, 2005).

Los niveles de 9.03 de pH dentro del sistema pudieron afectar el crecimiento de los acociles, ya que la concentración de amoníaco depende de la temperatura y del pH, niveles de pH 6.5 - 9.0 favorecen la forma ionizada del amonio (NH<sub>4</sub>), en niveles de pH mayores a 9.0, predomina la forma del amonio no-ionizada (NH<sub>3</sub>), debido a que el equilibrio de disociación se desplaza hacia la forma NH<sub>3</sub>, siendo tóxica para los crustáceos. Altas concentraciones de amonio pueden reducir la cantidad de energía para cualquier proceso fisiológico como la reproducción y el crecimiento, ya que disminuye la concentración celular de ATP, afectando el ciclo de Krebs (Frías y Páez, 2008).

Ja-Geun y colaboradores (2005) reportaron una relación inversa entre el ritmo del crecimiento y la concentración de amonio mayor a 50mg/L y nitritos por encima de 50mg/L para el cangrejo tigre *Orithyia sinica* y, para camarones reportaron que a concentraciones

de 30mg/L se redujo significativamente la tasa de crecimiento después de 50 días de exposición. El sistema acuapónico contenía un nivel de nitritos de  $0.41 \pm 0.14\text{mg/L}$  por lo que su concentración pudo afectar el crecimiento de los acociles. La reducción del crecimiento por la concentración de amoníaco y nitritos se debe al aumento de la energía requerida para regular el metabolismo en condiciones de estrés.

Ja-Geun y colaboradores (2005) describieron que la exposición de amoníaco y nitritos por más de 30 días, dio lugar a una reducción del periodo de muda del cangrejo tigre, dado que la frecuencia de la muda aumentó cuando se expusieron a más de 60 días; esto se debe a que el efecto tóxico del amoníaco afecta el sistema nervioso y por lo tanto, la secreción de la hormona de la muda.

Existe un efecto inverso de la densidad sobre el crecimiento, la densidad afecta a través del deterioro de la calidad del agua, disminución de recursos y aumento de las interacciones sociales, siendo el factor social de gran importancia para los crustáceos ya que su crecimiento está asociado con la vulnerabilidad al canibalismo como consecuencia del proceso de muda. Además de afectar el crecimiento, las altas densidades también inducen la madurez sexual a un menor tamaño (Assaf *et al.*, 2006).

En el sistema acuapónico la densidad de los acociles no tuvo ningún efecto determinante sobre el crecimiento o la supervivencia de éstos, posiblemente a causa de la edad de los organismos que se utilizaron para el experimento o bien, a que las densidades de 25 acociles para la clase talla uno y 20 para la clase talla dos, en contenedores de  $0.22\text{m}^2$  cada uno, fueron las adecuadas. Galicia (2012) reportó que la densidad óptima para el crecimiento y producción del acocil *C. (C.) montezumae* es de  $144$  organismos/ $\text{m}^2$ , por lo que la densidad en este estudio fue apropiada, además se controló la cantidad de alimento, evitando la competencia por el recurso y se colocaron pequeños tubos de pvc los cuales fueron utilizados por los animales como refugios naturales.

### 8.1.3 Lechuga

Para mejorar el rendimiento y calidad del cultivo de hortalizas, es necesario controlar las variables ambientales (López *et al.*, 2004). Es indispensable conocer el efecto de los factores ambientales y el grado de limitación que pueden ejercer sobre su crecimiento. La radiación solar, la temperatura, los nutrientes y la calidad del agua son los principales factores determinantes en la tasa de crecimiento de la lechuga acuapónica, expresado como el incremento, tanto en el número de hojas, como en el peso de la planta (Grazia *et al.*, 2001).

Se colocaron dos camas flotantes con 10 lechugas cada una y a través de las biometrías quincenales se observó que las lechugas de la cama uno tuvieron un mayor crecimiento que la cama dos, por lo que en la cuarta semana se inició la rotación de las camas, con la finalidad de que la radiación solar fuera la misma. Sin embargo, en la última medición, transcurridos los 90 días experimentales, las lechugas de la cama uno presentaron un peso mayor  $\bar{X} = 6.15\text{g}$ , en comparación con las lechugas de la cama dos  $\bar{X} = 4.60\text{g}$ . Esto se atribuye a que la radiación solar afectó significativamente el crecimiento de las lechugas dispuestas en la cama dos. En su estudio Craker y Seibert (1983) reportaron que la lechuga *L. sativa* tuvo un crecimiento mayor bajo fotoperiodos largos y altas intensidades luminosas. La cantidad de luz y CO<sub>2</sub> determinan la respuesta fotosintética de la planta y esta respuesta es limitada por un inadecuado suministro de luz (Jarmal *et al.*, 2005).

La radiación solar es el principal factor limitante del crecimiento, ésta determina la tasa de producción de biomasa, mientras que la temperatura ambiental controla el desarrollo del área foliar, determinando de esta forma, la superficie foliar capaz de interceptar la radiación fotosintéticamente activa (Grazia *et al.*, 2001). El periodo experimental se llevó a cabo durante el verano en la ciudad de México. El verano se caracteriza por días lluviosos y frescos con sombra, por lo que el crecimiento se vio afectado significativamente debido a la variabilidad de la radiación solar. Malca y colaboradores (2001) mencionaron que la lechuga requiere de mucha luz, de lo contrario la tasa fotosintética se reduce, afectando el rendimiento de las plantas. En el presente estudio la radiación solar directa fue menor de

4h/día, ya que las camas flotantes estaban dispuestas en un lugar sombreado, para así estar conectadas con el sistema acuapónico, por lo que se sugiere que en estudios posteriores, las camas flotantes de las lechugas estén mejor ubicadas para así evitar la deficiencia del crecimiento por el factor solar, o bien, utilizar un fotoperiodo regulado.

La temperatura del agua es el principal factor regulador del crecimiento en las lechugas durante los estadios iniciales del cultivo. Su relación con la tasa de crecimiento resulta lineal en esta etapa, bajo condiciones de radiación constante (Grazia *et al.*, 2001). La temperatura controla la velocidad de crecimiento de las plantas, si existe un aumento en la temperatura, los procesos fisiológicos se aceleran optimizando el crecimiento. Además, a temperaturas muy altas la planta entra en estrés afectando con ello su crecimiento. El rango óptimo de temperatura ambiental para el cultivo de lechuga es de 24°C durante el día y 19°C durante la noche (Malca *et al.*, 2001), en la ciudad de México el clima en verano varía entre 13 y 24°C. Las altas temperaturas producen la inducción del tallo floral de la lechuga, lo que limita su cultivo cuando es sembrada en regiones con temperaturas medias superiores a 20°C, condiciones típicas del verano (Vera, 2008).

Un factor relacionado con la calidad del agua es el oxígeno disuelto disponible en ella, donde las raíces de la lechuga tienen contacto y absorben los nutrientes, el nivel óptimo es de 4mg/L O<sub>2</sub> (Malca *et al.*, 2001). Los niveles de O<sub>2</sub> del sistema acuapónico que se registraron fueron de 4.4 ± 0.12mg/L. Sin embargo, el sistema se detenía durante la noche, ocasionando un estancamiento del agua y con ello del oxígeno, lo que provocó que la falta de éste en la solución nutritiva pudiera alterar el proceso de respiración, afectando con ello el crecimiento de las lechugas.

El pH de una solución es importante porque controla la disponibilidad de sales fertilizantes, si el agua que transporta los nutrientes que están en contacto con las raíces de las lechugas es ligeramente ácida, se observa que el crecimiento es mejor. Vera (2008), reportó un óptimo de pH entre 5.5 y 6.8, el pH del agua del sistema acuapónico se mantuvo en 9.7 ± 0.03, la calidad del agua permaneció completamente fuera del rango óptimo, y fuera de este rango algunos minerales podrían no estar disponibles para la planta,

provocando deficiencias nutritivas afectando, como se observó, el crecimiento de la lechuga.

## **8.2 Medición de índices fisiológicos**

### **8.2.1 Tilapia**

Los estudios de bioenergética permiten describir, explicar y predecir la condición fisiológica del organismo en un cultivo mediante el cálculo de la energía consumida, gastada y asimilada dentro del organismo. Este balance energético sirve para comparar el consumo de energía de las diferentes rutas metabólicas bajo condiciones controladas (Barreto, 2012).

El metabolismo de rutina da pauta para calcular la cantidad de energía necesaria que un organismo debe incorporar diariamente para sobrevivir a un ciclo normal de 24 horas (El-Sayed *et al.*, 2003). En la acuicultura, este tipo de metabolismo debe ser monitoreado ya que denota los requerimientos diarios del organismo, por ello se midió la cantidad de consumo de oxígeno de las tilapias y de los acociles.

La demanda de oxígeno ( $O_2$ ) en teleósteos depende fundamentalmente de la temperatura del agua y del peso corporal (Sastre *et al.*, 2004). La temperatura juega un papel muy importante, ya que regula la fisiología y el metabolismo tanto del organismo como del cuerpo de agua (Barreto, 2012), determinando así la solubilidad de los gases en el medio acuático y la demanda de  $O_2$  de los peces cultivados (Sastre *et al.*, 2004).

La temperatura tiene una relación directamente proporcional con el consumo de  $O_2$ , a mayor temperatura del agua se presenta mayor consumo de  $O_2$  (Valbuena y Cruz, 2006). La temperatura acelera las reacciones químicas en general y, por lo tanto, aumenta el consumo de  $O_2$  de los seres vivos. También una elevación de la temperatura agudiza los problemas del transporte de  $O_2$  en los peces, lo que no sólo reduce la solubilidad del  $O_2$  en el agua, sino también disminuye la afinidad de la hemoglobina por el  $O_2$ , haciendo más



difícil la transferencia de O<sub>2</sub> entre el agua y la sangre (El-Sayed *et al.*, 2003). Este conocimiento es fundamental en la acuicultura, ya que es una herramienta para la toma de decisiones con respecto a las condiciones de cultivo. La tilapia es un organismo ectotermo, la constancia de la temperatura durante el periodo experimental fue indispensable para eliminar cualquier variación responsable de este factor, por lo cual se mantuvo a  $26 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ , que está dentro del rango de temperatura óptimo para esta especie.

El consumo de oxígeno como parámetro indicador del metabolismo en los organismos, permite determinar los niveles de O<sub>2</sub> disuelto que demanda una especie sometida a cultivo (Patti *et al.*, 2011). Se ha reportado que la deficiencia del O<sub>2</sub> disuelto es responsable de más del 60% de las pérdidas en acuicultura (Sastre *et al.*, 2004).

Dentro del estudio se observó que los organismos pequeños tuvieron una mayor demanda de oxígeno 1.14mg O<sub>2</sub>/h/gPh, en comparación a las tilapias medianas que consumieron 0.57mg O<sub>2</sub>/h/gPh y las tilapias grandes que tuvieron un consumo de 0.32mg O<sub>2</sub>/h/gPh. Esta tendencia denota, que mientras más grande es el organismo tiene menores demandas de O<sub>2</sub> por unidad de masa corporal, por lo que el consumo de oxígeno por unidad de peso corporal presentó una relación inversa con el tamaño de los peces, es decir, peces de menor tamaño consumieron mayor cantidad de O<sub>2</sub> por unidad de peso corporal que los peces de pesos mayores.

Esta relación inversa entre el peso corporal y el consumo de O<sub>2</sub> ha sido reportada en los trabajos de Patti (2011), El-Sayed (2003), Sastre (2004), Valbuena y Cruz (2006) y Peñuela y colaboradores (2007). La mayor tasa de consumo de O<sub>2</sub> por parte de peces pequeños se ha atribuido a una mayor tasa metabólica (Valbuena y Cruz, 2006), por lo que los organismos con pesos mayores podrían tolerar de manera eficiente cuerpos de agua con menores concentraciones de O<sub>2</sub>, lo cual permite establecer rangos de variación del O<sub>2</sub> disuelto de acuerdo a las diversas etapas de las condiciones del cultivo. El consumo de O<sub>2</sub> es un reflejo de la tasa metabólica del pez (Peñuela *et al.*, 2007), si bien la tasa metabólica aumenta a medida que los peces incrementan su biomasa, el consumo de O<sub>2</sub> por unidad de peso disminuye (Patti *et al.*, 2011).

### 8.2.2 Acocil

La tasa respiratoria en crustáceos está influenciada por factores externos tales como la salinidad, la intensidad de la luz, la concentración de oxígeno, la temperatura y por factores internos tales como el tamaño, la actividad, la necesidad de alimento, la muda y el ritmo biológico (Villareal y Ocampo, 1993).

La temperatura es el principal parámetro que influye en la actividad metabólica de estos organismos (Villareal y Ocampo, 1993). Los crustáceos regulan los procesos internos, esta regulación depende significativamente de la temperatura, el grado de la regulación disminuye a medida que la temperatura aumenta, mostrando que los organismos están estrechamente ligados a las condiciones ambientales (Wayne y Kenneth, 1961).

Para evitar las modificaciones en la tasa metabólica a causa de la temperatura, el experimento se realizó a 26°C, temperatura en la que el sistema acuapónico funcionó durante tres meses.

El proceso de ecdisis influye en el metabolismo de los crustáceos, el crecimiento y la muda requieren gastos significativos de energía por el individuo. El consumo de oxígeno de los acociles aumenta a medida que los animales entran en premuda y sigue aumentando hasta que el animal muda por completo (Rice y Armitage, 1974). Stern y Cohen (1982) examinaron las tasas de consumo de oxígeno y la excreción de amonio de *M. rosenbergii* y su correlación con el ciclo de muda y encontraron que la tasa metabólica aumentó antes de la muda, seguido de un descenso durante el período de post-muda. Dentro del sistema acuapónico no se registraron las mudas, por lo que es imposible saber qué tanto se vieron afectados los acociles por este proceso.

El fotoperíodo también afecta la tasa metabólica de los acociles. Rice y Armitage (1974) reportaron que la tasa metabólica de los crustáceos puede variar a lo largo de un período de 24 horas. Estas variaciones cíclicas en el metabolismo son probablemente debidas a los cambios cíclicos en la actividad locomotora de los animales. Fingerman y

Argimiro (2013) reportaron que los acociles *Orconectes clypeatus* son más activos durante la noche que durante el día mostrando una estrecha relación del ciclo de 24 horas con el consumo de oxígeno. Se tienen reportes que los acociles son generalmente más activos desde la medianoche hasta el mediodía. Por tal razón se realizó el experimento por medio de tres mediciones a lo largo del día, para así reportar las variaciones en el metabolismo.

Para este análisis, al igual que las tilapias, se obtuvo una correlación significativa entre el peso y el consumo de oxígeno, los resultados indican una relación inversa entre el peso corporal y la tasa metabólica, por lo que cuando aumenta el peso corporal, el consumo de oxígeno disminuye, esto se debe a que los organismos pequeños tienen una mayor tasa metabólica. Los organismos más pequeños pertenecientes a la clase talla uno, presentaron un consumo de 15.2mg O<sub>2</sub>/h/g Ph, mientras que los organismos grandes que corresponden a la clase talla dos, mostraron un consumo de 10.8mg O<sub>2</sub>/h/g Ph. Esta relación ha sido observada también en el trabajo de Spanopoulos y colaboradores (2005) con el camarón *Litopenaeus stylirostris* y en el trabajo de Stephenson y Knight (1980) con larvas del acocil *M. rosenbergii*.

En el estudio no se encontraron diferencias en el consumo de oxígeno por parte de hembras y machos, resultado similar encontró Villareal (1990), con el acocil *Cherax tenuimanus* con lo que indicó que la diferencia sexual con respecto al consumo específico de oxígeno, no es común en los crustáceos.

Villareal y colaboradores (1994) mencionaron que la salinidad tiene un efecto sobre el consumo de oxígeno, ya que un aumento de la salinidad modifica los niveles osmóticos e iónicos de los camarones, propiciando un aumento en la demanda de energía metabólica, por lo que los organismos canalizan menos energía a los procesos de crecimiento y la reproducción. En el sistema acuapónico no se midió la salinidad ya que los organismos son de agua dulce.

## 8.3 Composición proximal del tejido

### 8.3.1 Tilapia

Los peces obtienen la glucosa y glucógeno a partir del catabolismo de proteínas y de la gluconeogénesis (Castillo, 2011). Una de las principales sustancias de reserva de los peces es el glucógeno, que una vez degradado suministrará glucosa, fuente importante de suministro de energía.

El sitio principal para la deposición de glucógeno en los peces es el hígado y concentraciones bajas se encuentran en el músculo esquelético, generalmente inferior al 0.5% (Metón *et al.*, 2003). La determinación de los depósitos de estos carbohidratos, puede aportar información sobre las necesidades energéticas de los organismos.

El incremento de glucosa resulta en parte de la gluconeogénesis inducida por el cortisol, pero también es originado por la glucogenólisis hepática, dado que el hígado es el principal almacén de carbohidratos del organismo (Castillo, 2011). La glucogenólisis en el hígado permite la liberación de glucosa y su movilización a la sangre, por lo cual el glucógeno hepático disminuye y se incrementa la concentración de glucosa en sangre (Zamora, 2008).

La concentración de glucosa y glucógeno en el músculo y en el hígado, dependen del ciclo en el cual la glucosa puede ser almacenada como glucógeno hasta que sea requerida o, puede pasar del hígado a la sangre en donde es nuevamente transportada al músculo para ser almacenada como glucógeno o, a través de la glucólisis anaeróbica, puede formar lactato, que a su vez es liberado a la sangre y de allí ser transportado al hígado, siendo éste un proceso dinámico donde las diversas rutas metabólicas ocurren de forma simultánea (Zamora, 2008).

Los factores principales que se han registrado acerca de la fluctuación de la concentración de glucógeno y glucosa tanto muscular como hepática, son el estrés y la restricción alimenticia.

El estrés se define como un estado de alerta ante cualquier agente externo que desafía los mecanismos homeostáticos del organismo, o amenaza su supervivencia. En la práctica acuícola existen dos tipos de respuesta del estrés, aguda y crónica, la respuesta aguda es causada esencialmente por la captura, el manejo, las biometrías y el transporte; mientras que el estrés crónico es causado por agentes persistentes como las altas densidades de cultivo, la mala calidad del agua, la exposición a nuevos ambientes y la dominancia entre los peces (Ocampo y Ocampo, 1999), este tipo de manipulación resulta en cambios secundarios en el metabolismo de carbohidratos.

Los organismos utilizados para cuantificar la concentración de glucosa y glucógeno, hepático y muscular, en este estudio, estuvieron expuestos a los dos tipos de estrés previamente referidos, ya que durante el periodo experimental de 90 días, los organismos se sometían a capturas y biometrías quincenales, así como manipulación de su estanque para tomar mediciones cada tercer y séptimo día, por lo cual experimentaban estrés continuamente. Por consiguiente, el resultado de las concentraciones bajas de glucógeno en el estudio se atribuye al estrés de los organismos, ya que como mencionó Weber (2009), el incremento de la glucosa plasmática es una de las respuestas secundarias al estrés, siendo el resultado la movilización de las reservas del glucógeno hepático como consecuencia de la activación de la glucógenolisis por la acción de las catecolaminas y del cortisol.

Por otra parte, también estuvieron sometidos a estrés crónico por dos causas, la primera fue una dominancia, se identificó una jerarquía dentro del sistema; 15 organismos fueron aislados en una jaula flotante, aún con los esfuerzos de aislar organismos dominantes, la jerarquía en un sistema acuático es muy difícil de evitar, porque después de aislar a los organismos jercas, surgió una nueva jerarquía en el sistema, ésta última ya no fue aislada, ya que el periodo experimental estaba por finalizar.

La segunda causa fue por las condiciones de la calidad del agua, principalmente por las concentraciones de amoníaco, que es el principal producto final del metabolismo del nitrógeno en la mayoría de los teleósteos. Las concentraciones más elevadas en el medio se dan principalmente en los sistemas de cultivo con recirculación de agua, tanques sépticos y efluentes industriales de metal, ya que se encuentra un desequilibrio entre las especies de bacterias nitrificantes (Russo, 2006).

El amoníaco es altamente tóxico, trastorna el metabolismo primario, afectando la producción de ATP, agotando así las reservas de energía, especialmente en el cerebro (Buckley *et al.*, 1979).

Se ha observado una reducción en los niveles de glucógeno hepático y muscular en teleósteos expuestos a altos niveles de  $\text{NH}_3$ . La exposición a concentraciones elevadas de amoníaco en agua aumenta el nivel de estrés de los peces, modifica los niveles de cortisol y cortisona que inducen la glucógenolisis y la glucogénesis (Buckley *et al.*, 1979). La reducción de los niveles de glucógeno puede ser atribuido a una demanda de carbohidratos, que se utilizan como una fuente de energía rápida durante situaciones de estrés, debido a que se lleva a cabo la glicólisis anaeróbica o la síntesis de glucógeno, necesitando concentraciones elevadas por parte de las reservas de glucógeno en el hígado, por consiguiente, los niveles de glucosa en el tejido disminuyen (Madison *et al.*, 2009).

El ayuno o restricción alimenticia, puede ser superado por los individuos a través de diversas estrategias metabólicas y fisiológicas que incluyen el uso de las reservas corporales y probablemente la disminución de las tasas metabólicas (Mackenzie *et al.*, 1998). El glucógeno hepático es la principal fuente de energía durante periodos de restricción alimenticia, lo que deja al descubierto la importancia del hígado como órgano metabólico (Riaño, 2012).

Los niveles de glucosa durante restricciones alimenticias, están directamente relacionados con la capacidad de la movilización del glucógeno hepático y depende del cambio en el metabolismo de carbohidratos, con la activación de la glucogenólisis y gluconeogénesis hepática y la reducción en la tasa de utilización de la glucosa (Montserrat

*et al.*, 2007). El descenso de glucosa plasmática está acompañado de una disminución significativa del glucógeno hepático, ya que el hígado actúa como fuente de reserva con la activación de la glucogenólisis y la gluconeogénesis, para facilitar la obtención de glucosa (Metón *et al.*, 2003). En este estudio, los organismos presentaron un ayuno de 24 horas, y las concentraciones de glucosa y glucógeno, tanto hepático como muscular fueron bajas, por lo que éste resultado también se atribuye a la restricción alimenticia ya que los carbohidratos almacenados en hígado y el músculo son los primeros nutrientes utilizados en respuesta al ayuno.

El conocimiento de la composición proximal de los peces y los factores que la afectan, permite evaluar la salud y determinar la eficiencia de la transferencia de los nutrientes a partir de la alimentación, y así estar en posibilidades de modificar estas variables para obtener un mejor producto (Shearer, 1994). La composición proximal y el contenido energético de los organismos depende de la especie, la edad, el sexo, el ambiente, la estación del año y la composición del alimento (Heather y Benkendorff, 2008; González, 2011).

Para el porcentaje de minerales en el cuerpo de la tilapia no se encontraron diferencias significativas entre clase talla, pero si hay una tendencia de las tilapias medianas y grandes a ser más homogéneas en comparación de las tilapias chicas, los porcentajes de minerales de la clase talla chica fueron de  $24.7 \pm 1.04\%$ , para la clase talla mediana de  $22.8 \pm 0.73\%$  y para las tilapias grandes de  $22.8 \pm 0.84\%$ . En este estudio el porcentaje de minerales fue muy alto, ya que Garduño y colaboradores (2007) reportaron niveles de minerales de  $1.08 \pm 0.08\%$  para tilapia del nilo, mientras que Izquierdo y colaboradores (2000) obtuvieron valores de  $1.94\%$  de minerales. Sin embargo, González (2011) encontró valores de  $16.21 - 18.18\%$  para *Totoaba macdonald* con diferentes dietas. El contenido de cenizas está directamente relacionado con el ambiente y la composición de la dieta, la concentración de minerales en el tejido aumenta con el tamaño o la edad ya que a medida que el organismo crece, su hígado se expande, conduciendo a incrementos de proteína y minerales (Shearer, 1994).

En el análisis de composición proximal de materia orgánica del tejido de tilapias, no se presentaron diferencias significativas entre clases talla. Sin embargo, se presentó una tendencia a ser distintas del grupo de las tilapias pequeñas, con respecto de las medianas y grandes; para el porcentaje de materia orgánica, las pequeñas tuvieron valores promedio  $75.3 \pm 1.04\%$  M.O, las medianas de  $77.1 \pm 0.73\%$  M.O, mientras que las grandes de  $77.1 \pm 0.84\%$  M.O, esto se atribuye al nivel de biomasa con el tamaño del organismo, mientras más grande el organismo, su biomasa es mayor (Heather y Benkendorff, 2008; González, 2011).

En el contenido de energía se encontraron valores mayores para las tilapias medianas  $5087 \pm 834\text{cal/g}$ , que para las tilapias pequeñas  $3680 \pm 1180\text{cal/g}$  y para las grandes  $4098 \pm 963\text{cal/g}$ , Aguilar (2010) reportó para *O. niloticus* en un sistema de recirculación, valores de  $5531 \pm 78\text{cal/g}$  a los 30 días de crecimiento,  $5659 \pm 72\text{cal/g}$  a los 60 días y  $5644 \pm 11\text{cal/g}$  a los 90 días de crecimiento, encontrando también mayor contenido energético en tilapias medianas. El contenido calórico que se encontró fue bajo debido al estrés al cual estuvieron sometidos los organismos durante los noventa días experimentales. Cuando las condiciones experimentales crean una diferencia de tamaños, la composición proximal se ve afectada, por lo que es necesario eliminar éste factor para que el tratamiento no afecte los resultados (Shearer, 1994).

### **8.3.2 Acocil**

Diversas funciones de los seres vivos son moduladas por hormonas, en los crustáceos, el nivel de glucosa se encuentra bajo el control de la hormona hiperglucemiante. (Sreenivasula y Pushpalatha, 2007), esta hormona puede funcionar como un activador de glucogenólisis aumentando los niveles de glucosa.

Los niveles de glucosa pueden ser afectados por la maduración gonadal, el fotoperíodo, la calidad del agua, la dieta, la muda y la manipulación (Dos Santos y Colares, 1986). Estos niveles presentan variaciones de acuerdo al estado fisiológico de los crustáceos.



En el estudio bioquímico, no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de glucosa entre machos y hembras, pero si entre el tamaño corporal del organismo, los organismos iniciales de las dos clases talla presentaron los niveles más altos de glucosa  $CT1=7.74\text{mg/g ph}$  y  $CT2=4.13\text{mg/g ph}$ , mientras que los organismos finales, presentaron niveles más bajos  $CT1=2.86\text{mg/g ph}$  y  $CT2=1.90\text{mg/g ph}$ . Esto se debe a que los niveles de glucosa permiten satisfacer la demanda energética, dependiendo de las necesidades fisiológicas, los organismos iniciales tienen una mayor demanda energética para enfocarla a su crecimiento, por lo que los niveles de glucosa son más altos. Por otro lado, los organismos pequeños son más susceptibles al estrés por manipulación, contribuyendo a la elevación de los niveles de glucosa en la sangre. Los crustáceos decápodos responden al estrés, mediante la elevación de sus niveles de glucosa en sangre, el estrés puede ocasionar la aceleración de la glucogenólisis, contribuyendo a la elevación de los niveles de glucosa. Es posible utilizar datos sobre los niveles de glucosa en la sangre como la base para un índice de estrés (Telford, 1974).

El conocimiento de las concentraciones de proteínas totales, lípidos y carbohidratos de los crustáceos es una herramienta para entender los requisitos nutricionales y ambientales para optimizar la producción (García, 2012).

En el estudio, se observó una relación inversa entre el peso de los organismos y los niveles de lípidos totales y triglicéridos, los organismos iniciales que no tuvieron tratamiento, presentaron mayor cantidad de lípidos totales y triglicéridos que los organismos finales que fueron sometidos durante 90 días al experimento, por otro lado para los niveles de proteína total tuvieron un comportamiento similar, pero solo en la clase talla dos, ya que los organismos finales de la clase talla uno presentan niveles mayores a los organismos iniciales sin tratamiento.

Los acociles iniciales, de las dos clases talla, presentaron los niveles más altos de lípidos totales  $CT1=74.1\text{mg/g ph}$  y  $CT2=39.9\text{mg/g ph}$ , mientras que los organismos finales, presentaron niveles más bajos  $CT1=18.8\text{mg/g ph}$  y  $CT2=11.5\text{mg/g ph}$ . Este resultado también se observó para los niveles de triglicéridos, se registraron los niveles más altos en

los organismos iniciales CT1=11.7mg/g ph y CT2=9.94mg/g ph, en tanto que los organismos finales, presentaron los niveles más bajos CT1=8.18mg/g ph y CT2=4.66mg/g ph. Los niveles de proteína para los acociles de la CT2 tuvieron niveles más altos de proteína en los organismos iniciales CT2=41.0mg/g ph que en los organismos finales CT2=27.3 mg/g. Por otro lado, para la CT1, este resultado fue inverso, se presentaron los niveles más altos en los organismos finales CT1=42.8mg/g ph mientras que los organismos sin tratamiento presentaron niveles inferiores CT1=29.6mg/g ph.

Este comportamiento, en el cual los organismos iniciales muestran mayores niveles de lípidos totales, triglicéridos y proteínas a comparación que los organismos finales, se atribuye a que los lípidos y proteínas totales están estrechamente relacionados con la formación de órganos y con el crecimiento (García, 2012). Por otro lado, las proteínas son una fuente importante de combustible (García *et al.*, 2003; García, 2012) los organismos de la clase talla uno finales presentaron niveles más altos que los iniciales, esto posiblemente fue debido a que los organismos finales estuvieron activos durante los 90 días de experimentación, requiriendo un aporte de energía constantemente, por lo que los niveles de proteína aumentaron, otorgándole un suministro de energía a los acociles.

Los lípidos proporcionan un alto contenido de energía para el crecimiento (García, 2012), en particular, los triglicéridos son el principal proveedor de energía durante el desarrollo embrionario, son esenciales como componentes estructurales en la membrana celular y proporcionan ácidos grasos básicos, que actúan como fuente de energía. Las proteínas son los componentes estructurales de los tejidos, también pueden ser utilizadas como combustible en las etapas finales del desarrollo embrionario y en las primeras etapas del crecimiento (García *et al.*, 2003).

El análisis de composición proximal de materia orgánica de los acociles, no tuvo diferencias significativas entre clases talla. Sin embargo, se encontró una mayor cantidad de materia orgánica en la clase talla uno  $75.02 \pm 9.07\%$  M.O y una menor cantidad en la clase talla dos  $57.5 \pm 11.11\%$  M.O. En lo que respecta al contenido de minerales, la clase talla uno tuvo menor porcentaje  $24.97 \pm 9.07\%$  que la clase talla dos  $42.46 \pm 11.11\%$ . Los niveles de minerales en organismos pequeños fueron menores en comparación que los de

las tallas grandes, esto se atribuye a que el metabolismo de los acociles pequeños aún está enfocado en el crecimiento y no en la deposición de los minerales en el cuerpo (Fernández *et al.*, 1994).

Para el análisis de contenido calórico, la clase talla uno tuvo  $7635 \pm 529$ cal/g, mientras que el contenido energético de la clase talla dos fue mayor  $9171 \pm 648$ cal/g. Griffiths (1977) mencionó que el contenido calórico en crustáceos está relacionado con su peso, por lo que los organismos de tallas más grandes tendrían valores más altos en comparación con los organismos pequeños.

Los estudios de composición proximal y calórica de un organismo permiten determinar el valor nutricional y proporcionan información para entender su balance energético (Shearer, 1994; Heather y Benkendorff, 2008).

### **8.4.3 Lechuga**

El contenido proximal de la lechuga acuapónica indica su calidad nutricional para fomentar el desarrollo de un sistema de producción de alimentos que es social, ecológica y económicamente sustentable.

Para el análisis de composición proximal del tejido de lechugas no se presentaron diferencias significativas de materia orgánica y minerales entre las dos camas. Sin embargo, las lechugas de la cama uno tuvieron un nivel de producción de biomasa mayor  $78.83 \pm 3.77\%$  que las de la cama dos  $71.66 \pm 3.77\%$ . En relación al contenido de minerales, las lechugas de la cama dos tuvieron mayor porcentaje  $28.33 \pm 3.77$  que las de la cama uno  $21.16 \pm 3.77$ . Las hortalizas se valoran por el contenido de carbohidratos, vitaminas y minerales (Rumeza *et al.*, 2006), el porcentaje de minerales de la cama dos fue mayor. Sin embargo, las vitaminas y carbohidratos no se midieron, por lo que no se puede deducir que el valor nutrimental de las lechugas de la cama dos sea mayor por este indicador, aunque su crecimiento fuera menor. Un cultivo con porcentajes equilibrados tanto de materia orgánica como de minerales es un cultivo óptimo porque el valor del producto crece conforme

aumenta la cantidad en gramos y el porcentaje de carbohidratos, minerales y vitaminas (Lairon, 2010).

## **8.5 Acuaponia**

El sistema acuapónico instalado en el acuario del Laboratorio de Acuicultura de la Facultad de Ciencias, funcionó durante los noventa días experimentales, generando productos con valor comercial, reutilizando los desechos y minimizando la contaminación del agua. Se logró cultivar plantas, peces y crustáceos de manera integral en un espacio reducido sin necesidad de infraestructura especializada.

Dentro del sistema se produjo un estancamiento del agua y con ello del oxígeno así como de los nutrientes suspendidos en ella, debido a que el flujo se pausaba durante 13 horas, impidiendo la absorción de los nutrientes por parte de las lechugas y generando estrés en los organismos, debido a que diariamente se reiniciaba el flujo del agua, lo que ocasionaba una alteración de su ambiente; por lo que se recomienda, para estudios posteriores, que el flujo del agua sea constante para mejorar el crecimiento y producción de los organismos cultivados.

Por otro lado, la incidencia de la radiación solar fue mínima en las camas flotantes que contenían a las lechugas, afectando el crecimiento de las hortalizas, por tanto es necesario controlar las variables ambientales para mejorar el rendimiento y calidad del cultivo; para tener un crecimiento apropiado, se recomienda buscar un lugar donde la incidencia de la luz solar hacia las lechugas sea mayor.

El estrés es un estado de alerta ante o cualquier agente externo que desafía los mecanismos homeostáticos o amenaza su supervivencia (Ocampo y Ocampo, 1999). Las tilapias presentaron estrés debido a varios factores dentro del sistema, uno de éstos factores fue ocasionado por las capturas y biometrías quincenales de los organismos, otro factor se debió a la manipulación de su estanque para tomar medidas cada tercer y séptimo día, otro más fue a causa de la mala calidad del agua, debido principalmente a las altas

concentraciones de amoníaco y, finalmente, la dominancia entre los peces. El efecto del estrés se vio reflejado en la composición proximal del tejido de las tilapias, así como en el crecimiento de éstas, ya que la energía dirigida al crecimiento era utilizada para regular el metabolismo; por lo que se recomienda controlar el factor de estrés en los peces para así obtener un crecimiento mayor en los organismos, ya que el estrés causa un aumento en la demanda energética debido al metabolismo acelerado, las tilapias llevan a cabo ajustes metabólicos que conllevan un incremento en la demanda energética, estos desórdenes fisiológicos alteran el crecimiento (Santerre *et al.*, 2006; Martínez *et al.*, 2009).

En cuanto a la medición de los parámetros físicos y químicos el agua, ésta tuvo niveles fuera del óptimo de tolerancia de las especies que se cultivaron, afectando así, su crecimiento, éstos parámetros fueron el pH, el amoníaco y la dureza del agua, por lo que para llevar a cabo un sistema acuapónico con éxito es necesario mantener los parámetros fisicoquímicos dentro del rango de tolerancia de las especies cultivadas.

El nivel de pH, en el sistema acuapónico se mantuvo en  $9.07 \pm 0.03$ , lo cual contribuyó a una deficiencia en el crecimiento de las lechugas, ya que su crecimiento se da mejor en aguas ligeramente ácidas, en un rango óptimo de pH entre 5.5 y 6.8, el pH dentro del sistema provocó deficiencias nutritivas afectando así, el crecimiento de las lechugas, así como el crecimiento de las tilapias, ya que la tilapia crece mejor en aguas de pH neutro o levemente alcalino. Es recomendable utilizar niveles de pH entre 5.5 - 8.5, pues son los adecuados para el mejor crecimiento de los organismos cultivados y por ende, si se utilizan estos niveles, el sistema acuapónico será exitoso.

Por otro lado, niveles de 9.07 de pH dentro del sistema, pudieron afectar el crecimiento de los organismos aumentando la concentración de amoníaco, dicha concentración depende de la temperatura y del pH (Frías y Páez, 2008). En el sistema acuapónico la concentración de amoníaco fue de 0.17mg/L, la tilapia tolera concentraciones menores de 2.0mg/L de amoníaco (Lovell, 1989; Villarroel, 2010), por otro lado, Zweig y colaboradores (1999) sugirieron valores máximos de 0.1mg/L. Para crustáceos se recomienda mantener los niveles de amoníaco por debajo de 0.05mg/L (Frías y Páez, 2008).

Concentraciones elevadas de amoníaco afectan el metabolismo energético, ya que reducen la cantidad de energía para cualquier proceso fisiológico, disminuyendo la concentración celular de ATP; también afecta la función del sistema nervioso central y, por otra parte, perturba el intercambio gaseoso, pues dificulta el paso del oxígeno y aumenta la concentración del amoníaco en la sangre provocando alteraciones internas (Ja-Geun *et al.*, 2005; Frías y Páez, 2008; Pérez, 2009; Toscano, 2010), teniendo consecuencias negativas para el desarrollo, supervivencia, reproducción y crecimiento de los organismos cultivados.

El amoníaco tiende a acumularse en sistemas cerrados, debido a la ausencia de mecanismos para reducirlo o eliminarlo, Luccheti y Gray (1988) propusieron la biofiltración, el agua pasa a través de biofiltros, previamente colonizados por bacterias nitrificantes; dentro del sistema acuapónico se instalaron dos filtros mecánicos rellenos con zeolita, pero se carecía de un filtro biológico, lo cual afectó considerablemente la calidad del agua, perturbando el ciclo del nitrógeno en el cual se lleva a cabo la oxidación del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a nitritos ( $\text{NO}_2$ ) y luego de nitritos a nitratos ( $\text{NO}_3$ ) a través de bacterias nitrificantes.

Las dos jvas que contenían a las lechugas pudieron actuar como filtros biológicos, sin embargo, la cantidad de agua fue excesiva y las plantas fueron escasas y de tamaño pequeño, posiblemente las bacterias no llegaron a colonizar estas jvas adecuadamente, ya que las colonias bacterianas en los estanques deben ser más grandes que la capacidad de producción del estanque (Saldias, 2011); se recomienda que haya un contenedor especial para un filtro biológico que se colonice por bacterias nitrificantes.

Otro parámetro en la calidad el agua que afectó el crecimiento de las tilapias fue la dureza del agua, debido a que los valores óptimos de dureza en ésta para el cultivo de las tilapias es de 20 - 200mg/L  $\text{CaCO}_3$ . Sin embargo, la dureza promedio del agua en el sistema acuapónico fue de  $565 \pm 43.8$ mg/L  $\text{CaCO}_3$ , lo que originó que las altas concentraciones de minerales afectaran las branquias, reduciendo con ello su capacidad respiratoria y metabólica, provocando un lento crecimiento. Para ablandar el agua se recomienda utilizar

un proceso de precipitación de  $\text{CaCO}_3$  utilizando cal hidratada (MAG, 2001; Castro et al., 2004).

En lo que respecta al crecimiento de los organismos cultivados, éste se vio afectado por los factores que anteriormente se mencionaron. Sin embargo, en el sistema acuapónico se logró obtener tallas de tilapias, acociles y lechugas comparables con otros estudios de crecimiento realizados con una supervivencia de 99%.

El crecimiento promedio de las tilapias no dominantes fue de 11.00g y 8.79cm, mientras que el crecimiento de los 15 organismos dominantes fue 18.63g y 10.49m a los noventa días. Gómez (1998) reportó un crecimiento de 9 a 12cm en el primer año de vida, mientras que Orozco (2013) obtuvo un crecimiento de 18.64cm al año y medio. Esto sustenta que el crecimiento de las tilapias dentro del sistema acuapónico fue comparable con otros estudios, a pesar de la dominancia dentro del sistema. Controlando el factor de jerarquías, la calidad del agua y el factor de estrés, el crecimiento de las tilapias podría ser más exitoso, también se recomienda ampliar la duración de la fase experimental, para así obtener peces de mayor talla.

Los acociles hembras de la clase talla uno presentaron un crecimiento promedio de 0.25g, mientras que las de la clase talla dos 0.35g; por otro lado, el crecimiento de los machos de la clase talla uno fue de 0.19g y los de la clase talla dos 0.35 gramos. Gallardo (2011) reportó un crecimiento promedio de 0.39g para hembras y 0.36g para machos a 26°C del acocil *C. patzcuarensis* en 120 días experimentales. Los acociles en el sistema acuapónico presentaron un crecimiento adecuado. Sin embargo, los machos no fueron maduros sexualmente, por lo que para inducir la reproducción se recomienda principalmente controlar los factores de la calidad del agua y el estrés, para lograr machos maduros sexualmente y así tener una producción, por otro lado, se recomienda mantener las condiciones de densidades, alimentación y similitud con su hábitat natural que se tuvieron en este estudio, por último, al igual que con las tilapias, se recomienda ampliar la duración de la fase experimental.

Transcurridos los 90 días experimentales, el crecimiento en las lechugas fue bajo, las lechugas de la cama uno presentaron un peso promedio de 6.15g, en comparación de las lechugas de la cama dos que fue de 4.60g. El crecimiento bajo se debió probablemente a la escasa radiación solar, que es el principal factor limitante del crecimiento, al estancamiento de los nutrientes causado por la pausa del flujo del agua y a los niveles altos de pH. Se sugiere que en estudios posteriores las camas flotantes de las lechugas estén mejor ubicadas, para evitar la deficiencia del crecimiento por el factor solar, así como mantener un flujo constante del agua con niveles de pH dentro del rango de tolerancia de las hortalizas, para asegurar un crecimiento adecuado.



## 9. CONCLUSIONES

- Es posible cultivar plantas, peces y crustáceos de manera integral, dentro de un sistema acuapónico eficiente en espacios reducidos, sin necesidad de infraestructura especializada.
- La tilapia *Oreochromis niloticus*, el acocil *Cambarellus (Cambarellus) montezumae* y la lechuga *Lactuca sativa*, son especies que se pueden utilizar favorablemente en un sistema acuapónico, obteniendo tres productos de valor comercial con una supervivencia de 99%.
- Un sistema acuapónico es una alternativa sustentable y viable para llevar a cabo cultivos tanto hidropónicos como acuícolas, reutilizando los desechos y minimizando la contaminación del agua.
- La temperatura, el oxígeno disuelto, la dureza total, el pH, los niveles de nitritos, nitratos y la concentración de amoníaco, influyen de manera significativa en el crecimiento de los organismos dentro del sistema acuapónico, por lo que se sugiere mantener los parámetros fisicoquímicos dentro del rango de tolerancia de las especies cultivadas.
- El estrés es un factor que afecta considerablemente el metabolismo y el desarrollo de los organismos, reflejándose en un menor crecimiento.
- La radiación solar es un factor limitante en el crecimiento de las lechugas, se sugiere que en estudios posteriores las camas flotantes de las lechugas estén mejor ubicadas para así evitar la deficiencia del crecimiento por el factor solar.
- Se recomienda escalar este sistema acuapónico de laboratorio a un sistema piloto de producción, previo a su potencial uso en chinampas, tomando en consideración las sugerencias señaladas.

## 10. SUGERENCIAS

Un sistema acuapónico en las chinampas de Xochimilco traería beneficios para los productores locales aumentando su economía, ya que obtendrían tres productos con valor comercial, los cuales son: peces, crustáceos y hortalizas. La acuaponia permite cultivar alimentos, evitando la eutrofización del agua, reutilizando los efluentes y evitando el cultivo de hortalizas en el suelo, eliminando completamente el problema de sodificación de los suelos de las chinampas que menciona Sandoval (2008). El acocil *Cambarellus (Cambarellus) montezumae* es una especie representativa del sistema lacustre de Xochimilco (Rangel, 2009), por lo que la utilización de éste crustáceo para la acuaponia en las chinampas es posible; la tilapia es una especie introducida en Xochimilco, y es considerada como la especie para cultivar más importante a nivel económico en México (De Graaf, 2004), además de ser tolerante a un amplio rango de condiciones ambientales (Shiau, 2002). Éstas características reflejan que su uso es adecuado en la acuaponia dentro de las chinampas; en lo que respecta a las lechugas, se escogió esta planta por su valor comercial (Mou, 2008). Estas tres especies utilizadas en el sistema acuapónico en condiciones de laboratorio son adecuadas para llevar a cabo la acuaponia en las chinampas de Xochimilco.

Los beneficios de la acuaponia en las chinampas de Xochimilco son que se obtienen productos de valor comercial y de alta calidad nutricional para el ser humano (Vega *et al.*, 2010), no se contamina más el agua de los canales evitando la eutrofización del agua, además de rescatar la actividad agrícola que se ha perdido en los últimos años debido al deterioro de las condiciones ambientales de Xochimilco, y que es parte de la identidad de los habitantes de la zona chinampera y de su comunidad, por lo que es de suma importancia realizar acciones que permitan remediar la calidad ambiental de Xochimilco, una de esas acciones es la implementación de la acuaponia en las chinampas ya que es una alternativa viable y sustentable de producción.

## 11. LITERATURA CITADA

- Adler, P., J. Harper, E. Wade, F. Takeda y S. Summerfelt. 2000. Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. *International Journal of Recirculating Aquaculture*. 1: 10-13.
- Aguilar, E. 2011. Efecto de la temperatura en el metabolismo energético y crecimiento de crías de acocil *Cambarellus montezumae* (SAUSSURE). Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 87 p.
- Aguilar, F. 2010. Modelos matemáticos no lineales como herramienta para evaluar el crecimiento de tilapia roja (*Oreochromis spp.*) y tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus* var. *chitralada*) alimentadas con dietas peletizadas o extruidas. Tesis de Maestría. Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia. Universidad Nacional de Colombia. 135 p.
- Álvarez, F. y R. Rangel. 2007. Estudio poblacional del acocil *Cambarellus montezumae* (Crustacea: Decapoda: Cambaridae) en Xochimilco, México. *Revista mexicana de Biodiversidad*. 78 :431-437.
- American Public Health Association (APHA). 1995. Standard methods for examination of water and wastewater. American Health Association. Washington, U.S.A.
- Arana, F., R. Pérez y A. Malpica. 1998. Cambáridos de tres embalses del Estado de Tlaxcala, México (Crustacea: Decapoda). *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*. 48: 23-35.
- Aranda, M. 2004. Zona lacustre Ejidos de San Gregorio Atlapulco. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). México. 13 p.

- Assaf, B., I. Karplus, R. Manor, S. Parnes, E. Aflalo y A. Sagi. 2006. Growth of redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* in a three-dimensional compartments system: Does a neighbor matter?. *Aquaculture*. 252: 348-355.
- Auger, S. 1990. Enfermedades de poscosecha de importancia en hortalizas de exportación. *In: Tecnologías de apoyo para la exportación de frutas y hortalizas en Chile*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. *Publicaciones Misceláneas Agrícolas*. 32: 85-95.
- Banting, D. 2005. *Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto*. Ryerson University. Department of Architectural Science. 74 p.
- Baldwin, E., M. Nisperos y R. Baker. 1995. Edible coating for lightly processed fruits and vegetables. *Hortscience*. 30 (1): 35-37.
- Barreto, F. 2012. Validación y estandarización de cámaras respirométricas para evaluar el consumo de oxígeno y excreción de amonio en tilapia (*Oreochromis niloticus* var. *Spring*) bajo condiciones de estrés. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma del Estado de Baja California. México. 69 p.
- Bazant, J. 2001. *Periferias urbanas. Procesos de expansión y consolidación urbana incontrolada de bajos ingresos y su impacto sobre el medio ambiente*. Trillas. México. 64 p.
- Benli, A. y G. Köksal. 2005. The acute toxicity of ammonia on tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) larvae and fingerlings. *Turk Journal of Veterinary and Animal Sciences*. 29: 339-344.
- Bernstein, S. 2011. *Aquaponic Gardening: A Step-by-step Guide to Raising Vegetables and Fish Together*. New Society Publishers. U.S.A. 256 p.

- Booth, A y G. Merron. 1996. The age and growth of the greenhead tilapia *Oreochromis macrochir* (Pisces: Cichlidae) from the Okavango Delta, Botswana. *Hydrobiologia*. 321(1): 29-34.
- Bradford, M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 72: 248-254.
- Brown, H. 1993. Scientists seek better ways of utilizing effluent from fish. *Feedstuffs*. 65(22): 10- 15.
- Buckley, J., C. Whitmore y B. Liming. 1979. Effects of prolonged exposure to ammonia on the blood and liver glycogen of Coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) *Comparative Biochemistry and Physiology*. 63: 297-303.
- Cai-Feng, Y., W. Ting-Ting, W. Yu-Feng y Yu Peng. 2009. Effect of combined photoperiod, water calcium concentration and pH on survival, growth, and moulting of juvenile crayfish (*Procambarus clarkii*) cultured under laboratory conditions. *Aquaculture*. 40: 1243-1250.
- Carranza, C., O. Lanhero, D. Miranda y B. Chávez. 2009. Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*. 27(1): 41-48.
- Castillo, A. 2011. Utilización de los carbohidratos dietéticos en los juveniles silvestres del mero rojo *Epinephelus morio*. Tesis de maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. 66 p.
- Castillo, L. 2003. *La importancia de la tilapia roja en el desarrollo de la piscicultura en Colombia*. Asociación Red Cauca. Alevinos del Valle. Colombia. 20 p.

- Castro, J., G. Castro, N. Alcántara, V. Pacheco y E. Rodríguez. 2011. Comparación del incremento en peso de *Cambarellus montezumae* (de Saussure, 1857), alimentado con una dieta enriquecida con probiótico. *Revista electrónica del Departamento. El Hombre y su Ambiente*. 1(1): 20-26.
- Castro, R., J. Hernández y G. Aguilar. 2004. Evaluación del crecimiento de alevines de tres especies de Tilapia (*Oreochromis sp.*) en aguas duras, en la región de la Cañada, Oaxaca, México. *Aquatic*. 20: 38-43.
- Chávez, C., K. Aida y I. Hanyu. 1991. Effects of photoperiod and temperature on molting, reproduction and growth of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*. 57(2): 209-217.
- Chávez, M. 2000. Caracterización física y química de algunas calicatas de San Nicolás Tetelco en la delegación de Tláhuac y Xochimilco, D. F. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 69 p.
- Church, D. y Pond, W. 1982. *Basic animal nutrition and feeding*. John Wiley and Sons, New York, U.S.A. 351 p.
- Cockx, E. y E. Simonne. 2003. Reduction of the impact of fertilization and irrigation on processes in the nitrogen cycle in vegetable fields with BMPs. University of Florida Horticultural Sciences Publication HS948. 22 p.
- Cornejo, R. 1991. Selección térmica del acocil *Cambarellus montezumae* (Saussure) (Crustacea: Astacidae) y su correlación con algunos índices fisiológicos: diferencias estacionales. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 43 p.
- Cracker, L. y M. Seibert. 1983. Light and the development of Grand Rapids lettuce. *Canadian Journal of Plant Science*. 63: 277-281.

- De Graaf, G. 2004. Optimization of the pond rearing of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus niloticus* L.) The impact of stunting processes and recruitment control PhD. Thesis, Wageningen University, Wageningen. The Netherlands. 167 p.
- Devlin, R. y Y. Nagahama. 2002. Sex determination and sex differentiation in fish: an overview of genetic, physiological, and environmental influences. *Aquaculture*. 208: 191-364.
- Diver, S. 2000. *Aquaponics - Integration of hydroponics with aquaculture. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (ATTRA)*; Fayetteville, Arkansas. 16 p.
- Diver, S. 2006. *Aquaponics - Integration of hydroponics with aquaculture* . ATTRA – National Sustainable Agriculture Information Service. North Carolina. 28 p.
- Dos Santos, F. y E. Colares. 1986. Blood glucose regulation in an intertidal crab, *Chasmagnathus granulata* (Dana, 1851). *Comparative Biochemistry and Physiology*. 83(A): 673-675.
- El-Sayed, T., A. Moñino y J. Cerda. 2003. Primeros ensayos de determinación del consumo de oxígeno de juveniles de Tilapia (*Oreochromis niloticus*, L.) bajo diferentes condiciones de temperatura y frecuencia alimentaria. II Congreso Iberoamericano Virtual de Acuicultura. 885-890 p.
- Ezcurra, E. 1990. *De las Chinampas a la Megapolis. El medio ambiente en la Cuenca de México*. Fondo de cultura económica. México. 120 p.
- FAO, 2012. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 231 p. <http://www.fao.org/docrep/016/i2727s/i2727s.pdf>

- Fernández, M., M. Mendoza, J. Marques y M. Vitor. 1994. Seasonal Changes in the Biochemical Composition and Energy Content of the Red Swamp Crayfish *Procambarus clarkii* (Girard) in the Lower Mondego River Valley, Portugal. *Journal of Crustacean Biology*. 14(4): 736-743.
- Fingerman, M. y D. Argimiro. 2013. Endogenous Twenty-Four Hour Rhythms of Locomotor Activity and Oxygen Consumption in the Crawfish *Orconectes clypeatus*. *American Midland Naturalist*. 58: 383-393.
- Fitzsimmons, K. 1997. Tilapia Aquaculture Proceedings from the Fourth International Symposium on *Tilapia* in Aquaculture: introduction to tilapia aquaculture conference proceedings. (Eds.) K. Fitzsimmons. The Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES). Arizona, U.S.A. 1: 3-5.
- Frías, M. y F. Páez. 2008. Toxicidad de los compuestos del nitrógeno en camarones. *In: Camaronicultura y medio ambiente*. Instituto de Ciencia del Mar y Limnología. Programa Universitario de Alimentos y El Colegio de Sinaloa. 253-276 p.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2005. Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación del Distrito Federal en Xochimilco. Órgano del Gobierno del Distrito Federal. No. 53-ER.
- Galicia, A. 2012. Influencia de la densidad y cobertura en el crecimiento y producción del acocil *Cambarellus* (*Cambarellus*) *montezumae* (Saussure, 1857). Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 66 p.
- Gallardo, Y. 2011. Evaluación del efecto de la temperatura en el desove, viabilidad, crecimiento y supervivencia del acocil *Cambarellus* (*montezumae*) *patzcuarensis*, Villalobos, 1943 bajo condiciones de laboratorio. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 76 p.



- Gamperl, A., M. Vijayan y R. Boutilier. 1994. Experimental control of stress hormone levels in fishes: techniques and applications. *Fish Biology and Fisheries*. 4: 215-255.
- García, E. 1981. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Cetenal. México 277 p.
- García, M., C. León, F. Hernández y R. Chávez. 2004. Evaluation of an experimental aquaponic system. *Avances de Investigación Agropecuaria*. 8(1): 1-5.
- García, M., H. Villareal y I. Racotta. 2003. Effect of temperature on lipids, proteins, and carbohydrates levels during development from egg extrusion to juvenile stage of *Cherax quadricarinatus* (Decapoda: Parastacidae). *Comparative Biochemistry and Physiology*. 135A: 147-154.
- García, M y P. Hernández. 2012. Total Protein, Lipid, Carbohydrate, and Water Changes of Eggs Through Embryonic Development of *Macrobrachlum occidentale* Holthuis, 1950 and Its Relation to Morphological Changes. *Journal of Crustacean Biology*. 32(5): 769-773.
- García, S. 2012. Investigaciones aplicables al desarrollo de la producción intensiva de corvina (*Argyrosomus regius*). Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Departamento de Zoología. Universidad de Granada. España. 269 p.
- Guarduño, M., J. Herrera, J. Angulo, G. Muñoz y J. Cruz. 2007. Nutrient composition and sensory evaluation of fillets from wild-type Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) and a red hybrid (Florida red tilapia X red *O. niloticus*). *Aquaculture Research*. 38: 1074-1081.
- Giacconi, V. y M. Escaff. 1995. *Cultivo de hortalizas*. Universitaria. Santiago, Chile. 337 p.
- Gómez, J. 1998. Age and growth of *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae) in Mexico. *Revista de Biología Tropical*. 46(4): 929-936.

- González, D. 2011. Respuesta en crecimiento de juveniles de *Totoaba macdonaldi* alimentados con dietas con diferentes niveles de almidón y lípidos, y adicionadas con un probiótico. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. México. 46 p.
- Grazia, J., P. Tottonell y A. Chiesa. 2001. Efecto de la época de siembra, radiación y nutrición nitrogenada sobre el patrón de crecimiento y el rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.). Investigación agraria. *Producción y protección vegetal*. 16(3): 355-365.
- Green, B., K. Veverica y M. Fitzpatrick. 1997. Fry and fingerling production. *In*: Eгна H. y C. Boyd. (Eds.). Dynamics of pond Aquaculture. CRC Press, Boca Ratón. 215-243 p.
- Griffiths, D. 1977. Caloric variation in Crustacea and other animals. *Journal of Animal Ecology* . 46(2): 593-605.
- Heather, S. y K. Benkendorff. 2008. The impact of diet on the growth and proximate composition of juvenile whelks, *Dicathais orbita* (Gastropoda: Mollusca). *Aquaculture*. 276: 162-170.
- Hernández, J. y L. Sandoval. 2001. El deterioro ecológico, la urbanización y sus efectos en la zona chinampera de Xochimilco. Tesis de licenciatura. Planificación para el Desarrollo Agropecuario. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón. Universidad Nacional Autónoma de México. 164 p.
- Hernández, P. 2008. Efecto de la temperatura en el crecimiento y supervivencia del langostino *Macrobrachium occidentale* y del acocil *Cherax quadricarinatus*. Tesis de maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Instituto Politécnico Nacional. México. 47 p.

- Hinojosa, D. y L. Zambrano. 2004. Interactions of common carp (*Cyprinus carpio*) with benthic crayfish decapods in shallow ponds. *Hydrobiology*. 515: 115-122.
- Hoang, T., M. Barchiesi, S. Lee, C. Keenan y G. Marsden. 2003. Influences of light intensity and photoperiod on moulting and growth of *Penaeus merguensis* cultured under laboratory conditions. *Aquaculture*. 216: 343-354.
- Hobbs, H. 1991. Decapoda. *In: Ecology and classification of North American freshwater invertebrates*, J. Thorp y A. Covich, (Eds.) Academic Press. New York. 823-858 p.
- Holdich, D. y R. Lowery. 1980. *Freshwater crayfish, biology, management and exploitation*. Timber Press. U. K. 480 p.
- Hugley, T. 2005. Aquaponics for developing countries. *Aquaponics Journal*. 38: 16-18.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. Cuaderno estadístico Delegacional de Xochimilco, Distrito Federal. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/cem08/estatal/df/m013/default.htm>
- Integrated Taxonomic Information System (ITIS). 2013. <http://www.itis.gov>
- Izquierdo, P., G. Torres, E. Márquez y M. Hallara. 2000. Análisis proximal, perfil de ácidos grasos, aminoácidos esenciales y contenido de minerales en doce especies de pescado de importancia comercial en Venezuela. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 50: 187-194.
- Ja-Geun, Seong-Gil, Jung-Hoon, Jong-Man, C. Sungchul y Ju-Chan. 2005. Effects of ammonia and nitrite on survival, growth and moulting in juvenile tiger crab, *Orithyia sinica* (Linnaeus). *Aquaculture*. 36: 79-85.

- Jarmal, A., T. Rengifo y H. Armendáriz. 2005. Aspectos fisiológicos de estevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) en el Caribe colombiano: I. Efecto de la radiación incidente sobre el área foliar y la distribución de biomasa. *Agronomía Colombiana*. 23(2): 207-216.
- Jones, B. 1991. *Kjeldahl method for nitrogen determination*. Micro-Macro Publications. Nueva Cork. U.S.A. 79 p.
- Kamal, M., A. Kurt y M. Brown. 2010. Tilapia: Environmental Biology and nutritional requirements. *Journal of Department of Agriculture, South Dakota State University* FS963-02: 1-7.
- Kesseli, R., O. Ochoa y R. Michelmor. 1991. Variation at RFLP loci in *Lactuca spp.* and origin of cultivated lettuce (*L. sativa*). *Genome*. 34: 430–436.
- Kowalsky, W. y R. Chatterton. 1997. Enzymatic determination of endometrial tissue glycogen in the presence of reducing groups. *Analytical Biochemistry*. 252: 207-210.
- Lairon, D. 2010. Nutritional quality and safety of organic food. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 30: 33-1.
- Lazard, J. 1997. Tilapia Aquaculture Proceedings from the Fourth International Symposium on Tilapia in Aquaculture: tilapia more than a fish, a tool for sustainable development. (Eds.) K. Fitzsimmons. The Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES). Arizona, U.S.A. 2: 437-440.
- Lee, D. y Wickins, J. 1992. *Crustacean Farming*. Blackwell Scientific Publications. Oxford. U.K. 392 p.
- Le Moullac, G. y P. Haffner. 2000. Environmental factors affecting immune responses in Crustacea. *Aquaculture*. 191: 121-131.

- Lennard, W. y B. Leonard. 2006. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. *Aquaculture International*. 14(6): 539-550.
- López I., A. Ramírez y A. Rojano. 2004. Análisis de sensibilidad de un Modelo Dinámico de Crecimiento para Lechugas (*Lactuca Sativa* L.) cultivadas en invernadero. *Agrociencia*. 38: 613-624.
- Lovell, T. 1989. *Nutrition and Feeding of Fish*, Van Nostrand Reinhold, New York. U.S.A. 260 p.
- Lucchetti, G. y G. Gray. 1988. Water reuse systems: a review of principal components. *The Progressive Fish-Culturist*. 50: 1-16.
- MacKenzie, D., C. Moore y K. Leiner. 1998. Nutrient regulation of endocrine function in fish. *Aquaculture*. 161: 3–25.
- Madison, B., R. Dhillon, B. Tufts y S. Wang . 2009. Exposure to low concentrations of dissolved ammonia promotes growth rate in walleye *Sander vitreus*. *Journal of Fish Biology*. 74: 872–890.
- Malca, O., D. Alvarado, F. Chávez y K. Anna. 2001. Lechugas hidropónicas. Seminario de Agro Negocios. Universidad del Pacífico. Facultad de Administración y Contabilidad. Lima, Perú. 96 p.
- Malcolm, J. 2005. Backyard aquaponics. A guide to building an aquaponic system. Joel Malcolm, Western Australia. 113 p.
- Manor, R., R. Segev, M. Pimenta, E. Aflalo y A. Sagi. 2002. Intensification of redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* culture II. Growout in a separate cell system. *Aquacultural Engineering*. 26: 263-276.

- Maroto, J., A. Miguel y C. Baixauli. 2000. *La lechuga y la escarola*. Mundi- Prensa. España, Madrid. 242 p.
- Martínez, M., L. Martínez y R. Ramos. 2009. Dinámica del crecimiento de peces y crustáceos. *Revista electrónica de Veterinaria*. 10(10): 1-16.
- Mateus, J. 2009. Acuaponia: Hidroponía y Acuacultura, Sistema Integrado de Producción de Alimentos. Red Hidroponía. Lima-Perú. Boletín 44: 7-10.
- Merlín, U. 2009. Evaluación de dos sistemas de manejo de recursos naturales de Xochimilco con indicadores de sustentabilidad. Tesis de Maestría. Universidad de Xalapa, Veracruz. 214 p.
- Metón, I., F. Fernández y V. Baanante. 2003. Short and long term effects of refeeding on key enzyme activities in glycolysis-gluconeogenesis in the liver of gilthead seabream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*. 225: 99-107.
- Meyer, D. 2007. *Introducción a la Acuacultura*. EAP. Zamorano. Honduras. 159 p.
- Milverton, S. 2010. Aquaponics: An Inquiry into a multi-sensory, differentiated learning project in australasian and asian schools using aquaponics as a key focus. *In: Global Learn Asia Pacific*. 1: 3719-3723.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). 2001. *Guía para el cultivo de tilapia en estanques*. Centro de Desarrollo Pesquero. República de El Salvador. 18 p.
- Miron, D., B. Moraes, A. Becker, M. Crestani, R. Spanevello, V. Loro y B. Baldisserotto. 2008. Ammonia and pH effects on some metabolic parameters and gill histology of silver catfish, *Rhamdia quelen* (Heptapteridae). *Aquaculture*. 277: 192-196.

- Moctezuma, A. 1996. Bases biológicas y técnicas para el cultivo del acocil *Cambarellus montezumae*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad de Colima. 58 p.
- Momot, W. 1984. Crayfish production: A reflection of community energetics. *Journal of Crustacean Biology*. 4(1): 35-54.
- Montserrat, N., P. Gómez, G. Bellini, E. Capilla, J. Pérez, I. Navarro y J. Gutiérrez. 2007. Distinct role of insulin and IGF-I and its receptors in white skeletal muscle during the compensatory growth of gilt head sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*. 267: 188-198.
- Morales, D. 1991. *La Tilapia en México. Biología, Cultivo y Pesquerías*. AGT, México. 190 p.
- Mou, B. 2008. Lettuce. *In*: Prohens J., Nuez F. (Eds.). Handbook of Plant Breeding. Vegetables I. Asteraceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae, and Cucurbitaceae. Springer Science. New York, U.S.A. 75–116 p.
- Murat, J. y A. Serfaty. 1974. Simple enzymatic determination of polysaccharide (glycogen) content of animals tissues. *Clinical Chemistry*. 20(12): 1576-1577.
- Naylor, R., R. Goldberg, J. Primavera, N. Kautsky, M. Beveridge, J. Clay, C. Folke, J. Lubchenco, H. Mooney y M. Troell. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*. 405: 1017-1024.
- Nelson, R. 2005. Missouri Teacher Combines Culinary Arts and Aquaponics. *Aquaponics Journal* .39: 24-25.
- Ocampo, A y L. Ocampo. 1999. Diagnóstico del Estrés en Peces. *Veterinaria México*. 30: 337-344.

- Orozco, E. 2013. Edad y crecimiento de *Oreochromis niloticus* en El Bordo La Palapa, Morelos, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 67 p.
- Padilla, F. y A. Cuesta. 2003. *Zoología Aplicada*. Díaz de Santos. España, Madrid. 488 p.
- Patti, J., M. Esteve y J. Gaviria. 2011. Oxygen consumption of the Florida red tilapia hybrid *Oreochromis sp* In: Seawater, under laboratory conditions. *Saber*. 23: 2:99-106.
- Peñuela, Z., G. Hernández, J. Corredor y P. Cruz. 2007. Consumo de oxígeno en cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) durante diferentes etapas de desarrollo corporal. *Orinoquia*. 11: 49-55.
- Pérez, R. 2009. La situación ambiental de la laguna las Tres Pascualas, Concepción, Chile. Informe preliminar. Unidad de Sistemas Acuáticos, Centro de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción. Chile. 10 p.
- Pillay, R. 1997. *Acuacultura: Principios y prácticas*. Limusa. México. 699 p.
- Quevedo, G. 2008. Remoción de nutrientes en un sistema experimental silvopesquero (manglar-ictiofauna) con/sin fuentes alóctonas de C, N y P. Tesis de maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Unidad Académica Mazatlán. Universidad Nacional Autónoma de México. 64 p.
- Racocy, J. 2003. Questions and Answers. *Aquaponics Journal*. 31: 32-34.
- Rakocy, J. 2007. Ten Guide lines for Aquaponic Systems. *Aquaponics Journal*. 454: 14-17.
- Rakocy, J., R. Shultz, D. Bailey y E. Thoman. 2006. Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. South Pacific Soil less Culture Conference - SPSCC, Virgin Islands. Acta de Horticultura. 648 p.



- Ramos, C. 2006. Acuaponics Guadalajara. *Aquaponics Journal*. 40: 12-13.
- Range, P. y B. Range. 2005. Aquaponics helps to feed students, staff at orphanage in Reynosa, Mexico. *Aquaponics Journal*. 39: 18-19.
- Rangel, R. 2009. Ecología poblacional de *Cambarellus montezumae* en Xochimilco, México, D.F. Tesis de Maestría. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. 60 p.
- Riaño, F. 2012. Efecto de la restricción alimenticia y la realimentación sobre variables hematológicas, bioquímicas y de composición muscular de cachama blanca *Piaractus brachypomus* durante la fase final de engorde. Tesis de maestría. Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia. Universidad Nacional de Colombia. 108 p.
- Rice, P. y K. Armitage. 1974. The effect of photoperiod on oxygen consumption of the crayfish *Orconectes nais*. *Comparative Biochemistry and Physiology*. 47(A): 261-270.
- Rodier, J. 1980. *Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales y agua de mar*. Omega. Barcelona, España. 1059 p.
- Rodríguez, M. y C. Carmona. 2002. Balance energético del acocil *Cambarellus montezumae* (Saussure) (Crustacea: Astacidae: Cambaridae). Pérdida de energía en la tasa metabólica. *Universidad y Ciencia*. 18(36): 128-134.
- Ronzón, M., M. Hernández y C. Pérez. 2012. Producción Hidropónica y Acuapónica de Albahaca (*Ocimum basilicum*) y Langostino Malayo (*Macrobrachium rosenbergii*). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 15 (2): 63-71.
- Rumeza, H., Z. Iqba, M. Iqbal, S. Hanif y M. Rasheed. 2006. Use of vegetables as nutritional food: Role in human health. *Journal of Agricultural and Biological Science*. 1(1): 18-22.

- Russo, R. 2006. Nitrite toxicity to fishes. Proceedings of the IX International Symposium: Fish physiology, toxicology, and water quality. Ecosystems Research Division. 73-88.
- Ryder, E. 1986. Lettuce breeding. *In*: Bassett M. Breeding Vegetable Crops. Westport, AVI Publishing Company. U.S.A. 433-474 p.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana*. 14: 3-21.
- Saldias, C. 2011. Efluentes y balance de nutrientes en piscinas camaroneras con diferentes prácticas de manejo. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. 39 p.
- Sánchez, J. 2008. Caracterización del flujo de masa de un sistema cerrado, para el aprovechamiento de sus efluentes en hidroponía. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California, México. 110 p.
- Sanders, D. y M. McMurtry. 1988. Fish increase greenhouse profits. *American Vegetable Grower*. 36(2): 30-33.
- Sandoval, C. 2008. Evaluación de la calidad del agua en los canales de Xochimilco para su recuperación Ecológica. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. 96 p.
- Santerre, A., R. Reynoso y E. López. 2006. Las Poliaminas como indicadores de estrés en tilapia (*Oreochromis spp*). *Avances en la Investigación Científica en el CUCBA*. XVII Semana de la Investigación Científica. 673-678 p.

- Sastre, O., G. Hernández y P. Cruz. 2004. Influencia del peso corporal y de la temperatura del agua sobre el consumo de oxígeno de la Cachama Blanca (*Piaractus brachypomus*). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 17: 11-16.
- Savidov, N. y M. Nichols. 2008. Recent Developments in Aquaponics. Proceedings. Simposio Internacional de Hidroponía y Cultivo Sin Suelo. Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 113 p.
- Shearer, K. 1994. Factors affecting the proximate composition of cultured fishes with emphasis on salmonids. *Aquaculture*. 119(1): 63-88.
- Shiau, S. 2002. *Nutrients requirements and feeding of finfish for aquaculture*. Webster. Wallingford, U. K. 418 p.
- Spanopoulos, M., C. Martínez, R. Vanegas, C. Rosas y L. Ross. 2005. The combined effects of salinity and temperature on the oxygen consumption of juvenile shrimps *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874). *Aquaculture* . 244: 341-348.
- Sreenivasula, P. y T. Pushpalatha. 2007. Effect of serotonin on hemolymph glucose regulation in the fresh water edible crab *Oziotelphusa senex senex*. *Aquaculture*. 266: 274-278.
- Stephenson, M. y A. Knight. 1980. The Effect of Temperature and Salinity on Oxygen Consumption of Post-Larvae of *Macrobrachium rosenbergii* (De Man) (Crustacea: Palaemonidae). *Comparative Biochemistry and Physiology*. 67(A): 699-703.
- Stern, S. y D. Cohen. 1982. Oxygen consumption and ammonia excretion during the molt cycle of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man). *Comparative Biochemistry and Physiology*. 73(A): 417-419.

- Telford, M. 1974. Blood Glucose in Crayfish. II. Variations Induced by Artificial Stress. *Comparative Biochemistry and Physiology*. 48(A): 555-560.
- Telford, M. 1974. Blood Glucose in Crayfish. III. The Source of Glucose and Role of the Eyestalk Factor in Hyperglycemia of *Cambarus robustus*. *Comparative Biochemistry and Physiology*. 51(B): 69-73.
- Timmons, M., J. Ebeling, F. Wheaton, S. Summerfelt y B. Vinci. 2002. *Recirculating Aquaculture Systems, Northeastern Regional Aquaculture Center, NRAC Publication No. 01-002, Ithaca, NY, U.S.A. 769 p.*
- Toscano, A. 2010. Evaluación de diferentes tipos de fertilización de estanques para crianza de tilapia. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Pecuarias. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 152 p.
- Valbuena, R. y P. Cruz. 2006. Efecto del peso corporal y temperatura del agua sobre el consumo de oxígeno de tilapia roja (*Oreochromis sp*). *Orinoquia*. 10: 57-63.
- Vargas, F. y M. Barranco. 2001. Mecanismos de defensa de los moluscos bivalvos, con énfasis en pectínidos. *In: Los Moluscos Pectínidos de Iberoamérica: Ciencia y Acuicultura*. 7: 127-146.
- Vega, V., L. Cortés, M. Zúñiga, B. Ceballos, L. Galindo, R. Basto y S. Nolasco. 2010. Cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) a pequeña escala ¿alternativa alimentaria para familias rurales y periurbanas de México?. *Revista Electrónica de Veterinaria*. 11: 907-915.
- Vera, J. 2008. Adaptación y comportamiento agronómico de diferentes híbridos de lechuga (*Lactuca sativa*) sembradas mediante sistemas hidropónicos de raíz flotante en la zona de Babahoyo. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador. 71 p.

- Villalobos, A. 1983. *Crayfishes of Mexico (Crustacea:Decapoda)*. Smithsonian Institution Libraries and the National Science Foundation. American Publishing, New Delhi. 276 p.
- Villareal, H. 1990. Effect of temperature on oxygen consumption and heart rate of the Australian crayfish *Cherax tenuimanus* (Smith). *Comparative Biochemistry and Physiology*. 95: 189-193.
- Villareal, H. y L. Ocampo. 1993. Effect of size and temperature on the oxygen consumption of the brown shrimp *Penaeus californiensis* (Holmes, 1900). *Comparative Biochemistry and Physiology*. 106: 97-101.
- Villareal, H., P. Hinojosa y J. Naranjo. 1994. Effect of temperature and salinity on the oxygen consumption of laboratory produced *Penaeus vannamei* postlarvae. *Comparative Biochemistry and Physiology*. 108: 331-336.
- Villarreal, M. 2010. Evaluación de diferentes niveles de fitasa aplicados mediante aspersión líquida al alimento de *Oreochromis sp* (tilapia roja) en estado juvenil. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Pecuarias. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 70 p.
- Villaseñor, J., P. Maeda, J. Colin y E. Ortiz. 2005. Estimación de la riqueza de especies de Asteraceae mediante extrapolación a partir de datos de presencia-ausencia. Boletín de la Sociedad Botánica de México 76: 5-18.
- Wayne, A. y B. Kenneth. 1961. The oxygen consumption of the crayfish *Orconectes immunis* and *Orconectes nais* in response to temperature and to oxygen saturation. *Physiological Zoology*. 34: 39-54.

- Weber, R. 2009. Efecto del estrés y de la anestesia sobre indicadores primarios y secundarios de estrés y sobre los neurotransmisores monoaminérgicos cerebrales en el lenguado *Solea senegalensis* (Kaup, 1858) Tesis doctoral. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela, España. 241 p.
- Wilson, G. 2002. Aquaponics proves profitable in Australia. Barramundi and lettuce combination increases revenues. *Aquaponics Journal*. 6(1): 8-12.
- Wilson, G. 2006. Canadian RyD should inspire hydroponic growers to convert to aquaponics. *Aquaponics Journal*. 40: 26-28.
- Wilson, L. 2010. A New Look at NFT Aquaponics. *Aquaponics Journal*. 56: 16-19.
- Zamora, S. 2008. Respuestas fisiológicas al estrés por hipoxia en pez blanco *Menidia estor*. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. 52 p.
- Zanotto, F. y M. Wheatly. 1993. The effect of ambient pH on electrolyte regulation during the postmolt period in freshwater crayfish *Procambarus clarkii*. *Journal of Experimental Biology*. 178: 1-19.
- Zollner, N. y K. Kirsch. 1962. Microdetermination of lipids by the sulphophosphanillin reaction. *Experimental Medicine*. 135: 545-61.
- Zweig R., J. Morton y 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.