



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**EVALUACIÓN TÉCNICO-
ECONÓMICA DE UN SISTEMA
ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA
ESCALA**

DELIA JAZMÍN SÁNCHEZ MORALES

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe, **Delia Jazmín Sánchez Morales**, alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del Profesor **Juan Enrique Rubiños Panta**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **Evaluación técnico - económica de un sistema acuapónico de pequeña escala**, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo con las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Texcoco, Edo. de México, a 28 de noviembre de 2018



Delia Jazmín Sánchez Morales



Vo. Bo. del Dr. Juan Enrique Rubiños Panta

La presente tesis titulada: **Evaluación técnico-económica de un sistema acuapónico de pequeña escala**, realizada por la alumna: **Delia Jazmín Sánchez Morales**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Juan Enrique Rubiños Panta

ASESOR



M.C. Guillermo Crespo Pichardo

ASESOR



Dr. Pedro Ríos González

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 28 de noviembre de 2018.

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA

**Delia Jazmín Sánchez Morales, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2018**

RESUMEN

El agua es un elemento finito y fundamental para el sostenimiento de la vida, por lo que es necesario optimizar el manejo y valor que se le da a este recurso tan limitado. A nivel mundial, el sector agrícola consume más del 70 por ciento del agua utilizada, lo que lo convierte en el nicho donde se pueden adoptar los mayores cambios tecnológicos, integrando sistemas de producción sostenibles. Una opción es la acuaponía, que integra la acuicultura con la hidroponía, es decir, el cultivo de especies acuáticas en un medio controlado y el cultivo de plantas en soluciones acuosas respectivamente. En este tipo de sistema de producción, las plantas aprovechan los residuos de la acuicultura mediante los nutrientes disueltos en el agua, y a su vez se crea una fitodepuración que permite reutilizar el agua por los peces, creando así un circuito cerrado de recirculación y aprovechamiento del recurso hídrico, combinando actividades productivas.

En el presente estudio, realizado en la unidad acuapónica de traspatio del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, se midió el consumo de agua para así determinar la productividad hídrica en este tipo de sistemas. Se evaluó lechuga (*Lactuca sativa*) durante tres ciclos y tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) durante cuatro meses. La unidad propuesta se desarrolló con los objetivos de reducir el consumo de agua, darle un segundo uso y aumentar su productividad, así como el minimizar costos, tanto en instalaciones, como en mano de obra, buscando también proveer alimentos de calidad e incrementar el ingreso de los productores sin dejar de ser sustentables.

El sistema se compone de cuatro tanques de cultivo acuícola, con un volumen total de 3.8 metros cúbicos, un sistema de filtración de agua seccionado para la sedimentación de sólidos, mineralización, nitrificación y desgasificación con un volumen total de 600 litros, seguido de un canal hidropónico constituido por cuatro balsas con sistema de raíz flotante, con una densidad de 11 plantas por metro cuadrado y un volumen total de 3.6 metros cúbicos. El flujo de agua fue de 30 litros por minuto, dado por gravedad hasta el punto más bajo donde se colocó un tanque tipo sumidero de 50 litros para retornar el agua tratada por los filtros y plantas hacia los peces, con ayuda de una bomba sumergible de 0.5 HP que mueve hasta 6 000 litros de agua por hora. Para el suministro de oxígeno se utilizó un blower de 0.5 HP. Se agregó una tina hidropónica de 70 litros con 10 plantas como unidad de control de la evapotranspiración.

Se mantuvo un control en la calidad del agua, con valores promedio de PH de 7.4, temperatura de 22.1 °C, oxígeno disuelto de 7.3 mg L⁻¹, conductividad eléctrica de 811.3 μS cm⁻¹, sólidos suspendidos totales (SST) de 15 mg L⁻¹, sólidos disueltos totales (SDT) de 349 mg L⁻¹, demanda bioquímica de oxígeno de 8.2 mg L⁻¹, nitrógeno amoniacal no ionizado NH₃-N (amoníaco) de 0.028 mg L⁻¹, nitrógeno de nitrato NO₃-N fue de 29 mg L⁻¹ y la temperatura ambiental promedio fue de 28.1 °C, con una máxima de 46.1 °C y una mínima de 13.7 °C.

El sistema tuvo una pérdida de agua diaria del 2.6% del volumen total y utilizó en promedio 211 L de agua diariamente para reponer dichas pérdidas. Los valores obtenidos según el potencial de captación de agua de lluvia indica que se puede reabastecer completamente las pérdidas de agua diarias en el sistema.

Analizando las entradas con las salidas, se requirieron 200 L de agua, 2.71 kg de alimento y 10.85 kWh de energía (\$ 5.43 en costos de energía) para producir 1 kg de lechuga; y se requirieron 100 L de agua, 1.33 kg de alimento y 5.35 kWh de energía (\$ 2.67 en costos de energía) para producir un aumento de 1 kg en la tilapia.

Se consumieron 21.5 L por cada planta de lechuga de aproximadamente 100 g y 24.5 L por cada 250 g de biomasa producida de pescado. En términos de productividad, el peso fresco producido en kilogramos por cada metro cúbico de agua consumida, obtuvimos en tilapia 10 kg m⁻³ y en lechuga 5 kg m⁻³.

Se analizaron los resultados productivos y económicos del sistema acuapónico de tilapia y lechuga, en términos de las variables financieras VAN, TIR, RBC, PRI que arrojó los valores de \$6,462.83, 13.74%, 1.04 y 4 años respectivamente.

Palabras clave: Acuaponía, Balsa Flotante, Consumo hídrico, Productividad del agua.

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA

Delia Jazmín Sánchez Morales, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

Water is a finite and fundamental element for life's support, so it is necessary to optimize the management and value that is given to this limited resource. At the global level, the agricultural sector consumes more than 70 percent of the water used, which makes it the niche where the greatest technological changes can be adopted, integrating sustainable production systems. One option is aquaponics, which integrates aquaculture with hydroponics, namely, the cultivation of aquatic species in a controlled environment and the cultivation of plants in aqueous solutions respectively. In this type of production system, the plants take advantage of the waste from aquaculture through the nutrients dissolved in the water, and in turn create a phytodepuration that allows to be reused the water by the fish, thus creating a closed circuit of recirculation and exploitation of the water resource, combining productive activities.

In the present study, implemented in the backyard aquaponics unit of the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, the water consumption was measured in order to determine the water productivity in this type of systems. Lettuce (*Lactuca sativa*) was evaluated during three cycles and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) during four months. The proposed unit was developed with the objectives of reducing water consumption, giving it a second use and increasing its productivity, as well as minimizing costs in installations and in manpower, also looking for to provide quality food and increase the producer's income without ceasing to be sustainable.

The system consists in four aquaculture tanks, with a total volume of 3.8 cubic meters; a sectioned water filtration system for the solids sedimentation, mineralization, nitrification and degassing with a total volume of 600 liters, followed by a channel hydroponic consisting of four rafts with floating root system, with a density of 22 plants per square meter and a total volume of 3.6 cubic meters. The water flow was 30 liters per minute, given by gravity to the lowest point where a 50-liter sump tank was placed to return the water treated by the filters and plants to the fish, with the help of a submersible pump of 0.5 HP that moves up to 6,000 liters of water per hour. For the oxygen supply, a 0.5 HP blower was used. A 70-liter hydroponic tank with 10 plants was added as an evapotranspiration control unit.

Water quality control was maintained, with average pH values of 7.4, temperature of 22.1 °C, dissolved oxygen of 7.3 mg L⁻¹, electrical conductivity of 811.3 µS cm⁻¹, total suspended solids of 15 mg L⁻¹, total dissolved solids of 349 mg L⁻¹, biochemical oxygen demand of 8.2 mg L⁻¹,

non-ionized ammonia nitrogen $\text{NH}_3\text{-N}$ (ammonia) of 0.028 mg L^{-1} , nitrate nitrogen $\text{NO}_3\text{-N}$ was 29 mg L^{-1} and the average environmental temperature was $28.1 \text{ }^\circ\text{C}$, with a maximum of $46.1 \text{ }^\circ\text{C}$ and a minimum of $13.7 \text{ }^\circ\text{C}$. The system had a daily water loss of 2.6% of the total volume and used an average of 211 L of water daily to replace these losses. The values obtained according to the rainwater collection potential indicates that the daily water losses in the system can be completely replenished.

Analyzing the inputs with the outputs, is required 200 L of water, 2.71 kg of food and 10.85 kWh of energy (\$5.43 in energy costs) to produce 1 kg of lettuce; and is required 100 L of water, 1.33 kg of food and 5.35 kWh of energy (\$2.67 in energy costs) to produce a 1 kg increase in tilapia.

It was consumed 21.5 L for each lettuce plant of approximately 100 g and 24.5 L for each 250 g of biomass produced from fish. In terms of productivity, the fresh weight produces in kilograms per cubic meter of water consumed, we obtained 10 kg m^{-3} of tilapia and 5 kg m^{-3} of lettuce.

The productive and economic results of the aquaponic system of tilapia and lettuce were analyzed, in terms of the financial variables VAN, TIR, RBC, PRI, which showed values of \$ 6,462.83, 13.74%, 1.04 and 4 years, respectively.

Key words: Aquaponics, Floating raft, Water consumption, Water productivity.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Postgrado de Hidrociencias por permitirme realizar mis estudios de Maestría en Ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de Maestría.

Al Dr. Enrique Rubiños Panta por su amistad, confianza, apoyo y consejos durante todo el proceso de investigación.

Al Dr. Pedro Ríos González y el M.C. Guillermo Crespo Pichardo por su colaboración y excelentes aportaciones al trabajo.

A mis colegas, el M.C. Carlos Toriz por todo su esfuerzo para construir el sistema y el Dr. Maciel Reyes por su orientación para manejar el sistema.

Al Ing. Plutarco Sánchez Velásquez⁺ y al Dr. Abel Quevedo Nolasco, un sincero agradecimiento por compartir amablemente sus conocimientos y experiencias.

A las estudiantes Valeria Cervantes e Ivonne Hernández que ayudaron con la recolección de datos y mantenimiento del sistema.

Y al personal de la Institución Don Porfirio y la señora Beatriz por su gran disposición siempre.

¡Muchas gracias!

DEDICATORIA

A mis padres:

María Delia Morales Pérez y Juan Rafael Sánchez Bravo

Por ser mi luz, mi guía y mi apoyo incondicional cada día.

*A mis hermanos, **Carlos, Deyra y Jenny** porque sé que siempre podré contar con ustedes.*

*A mis cuñadas **Mónica** y **Alicia** por cuidar de mi pequeña niña y ayudarme a ser mamá y profesionalista.*

*A mis amigos **Karina, Brenda** y **Valentín** por su apoyo y ánimos para seguir adelante y los momentos de trabajo y alegría compartidos.*

DEDICATORIA ESPECIAL

Simplemente no me alcanzan las palabras para agradecer a tan maravilloso ser, por compartir su vida conmigo, por todo el amor, apoyo y comprensión que me da, porque ha sido mi mejor decisión, mi amado esposo Abraham. Y lo más importante, por formar juntos un cálido hogar con la personita más linda del mundo, nuestra mayor inspiración Amanda y pronto seguirá creciendo la familia.

LOS AMO INFINITAMENTE.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE CUADROS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xv
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
II. OBJETIVO GENERAL	2
2.1 Objetivos particulares.....	2
III. HIPÓTESIS GENERAL	2
3.1 Hipótesis particulares	2
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	3
4.1 Descripción de la acuaponía.....	3
4.2 Historia de la acuaponía	3
4.3 Importancia y retos de la acuaponía.....	4
4.4 Componentes del sistema acuapónico.....	5
4.4.1 Subsistema acuícola	6
4.4.2 Subsistema hidropónico	7
4.4.3 Subsistema de filtración mecánica y biológica	9
4.5 Balance del sistema acuapónico	12
4.6 Recirculación de agua	15
4.7 Equipamiento del sistema acuapónico	15
4.8 Consumo de agua en acuaponía	15
4.9 Productividad hídrica en acuaponía	16
4.10 Acuaponía sustentable.....	17
4.11 Viabilidad económica.....	18
V. MATERIALES Y MÉTODOS	20
5.1 Localización del área de estudio	20
5.2 Diseño del sistema acuapónico	20

5.3	Manejo acuícola	22
5.4	Manejo hidropónico	22
5.5	Manejo hídrico	23
5.5.1	Evaporación y evapotranspiración	23
5.5.2	Reposición de agua.....	23
5.5.3	Potencial para el uso del agua de lluvia	23
5.6	Calidad del agua.....	24
5.7	Consumo de energía.....	24
5.8	Productividad	25
5.9	Análisis económico	25
VI.	RESULTADOS.....	27
6.1	Agua	27
6.1.1	Reposición de agua.....	27
6.1.2	Evaporación y evapotranspiración	29
6.1.3	Captación de agua de lluvia.....	30
6.1.4	Calidad del agua.....	31
6.2	Energía	34
6.3	Producción de tilapia.....	35
6.4	Producción de lechuga	36
6.5	Productividad	38
6.6	Análisis económico	39
VII.	CONCLUSIONES.....	42
VIII.	LITERATURA CITADA	43
	ANEXO A. ISOMÉTRICO DEL SISTEMA ACUAPÓNICO	48
	ANEXO B. LÍNEAS DE AGUA, AIRE Y MATERIAL UTILIZADO EN EL SISTEMA ACUAPÓNICO	49
	ANEXO C. LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE DEL SISTEMA ACUÍCOLA	50
	ANEXO D. MATERIAL UTILIZADO EN LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE POR TANQUE ACUÍCOLA.....	50

ANEXO E. LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE DEL SISTEMA HIDROPÓNICO	51
ANEXO F. MATERIAL UTILIZADO EN LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE POR Balsa HIDROPÓNICA.....	51
ANEXO G. MATERIAL UTILIZADO EN LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE EN FILTROS.....	52
ANEXO H. MATERIAL DE PVC UTILIZADO EN EL SISTEMA	52
ANEXO I. NMX-AA-028-SCFI-2001	53
ANEXO J. NMX-F-527-1992	54
ANEXO K. ÁLBUM FOTOGRÁFICO	55
Sistema acuapónico	55
Sistema acuícola	56
Sistema hidropónico	57
Sistema de filtración	59
Clarificador	59
Filtrador de finos.....	60
Mineralizador.....	60
Nitrificador.....	60
Desgasificador.....	61
Tanque de suministro y nivel piezométrico.....	61
Biometría de peces.....	62
Biometría de plantas	63
Análisis de laboratorio.....	64

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1. Condiciones para la producción acuapónica de Tilapia del Nilo (<i>Oreochromis Niloticus</i>), (modificado de Somerville <i>et al.</i> , 2014).	13
Cuadro 4.2. Condiciones para la producción acuapónica de lechuga, (modificado de Somerville <i>et al.</i> , 2014).	13
Cuadro 4.3. Condiciones generales en la calidad del agua para peces de agua caliente o fría, plantas hidropónicas, bacterias nitrificantes y para la acuaponía como un arreglo entre los tres organismos (Somerville, 2014).	13
Cuadro 4.4. Parámetros de calidad de agua para acuicultura (Timmons <i>et al.</i> , 2009)	14
Cuadro 4.5. Requerimiento nutrimental para plantas en hidroponía (Nelson y Pade, 2008).	14
Cuadro 6.1 Promedio por componente del sistema de oxígeno disuelto (OD), temperatura y pH.	32
Cuadro 6.2. Características de los componentes mecánicos del sistema y su demanda energética.	34
Cuadro 6.3. Incremento de biomasa por mes y factor de conversión alimenticia (FCA)	35
Cuadro 6.4. Biometrías de plantas y rendimientos por ciclo.....	37
Cuadro 6.5. Requerimiento promedio de agua, alimento suministrado y energía para producir 1 kilogramo de tilapia y 1 kg de lechuga en un sistema acuapónico de pequeña escala.	38
Cuadro 6.6. Costo de los activos fijos del sistema acuapónico de pequeña escala y vida útil considerada para la depreciación.	39
Cuadro 6.7. Costo de Operación (C.O.) Anual del sistema acuapónico de pequeña escala.....	40
Cuadro 6.8. Ingresos Anuales del sistema acuapónico de pequeña escala.....	40
Cuadro 6.9. Flujo neto de efectivo del sistema acuapónico de pequeña escala	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Configuración general de un sistema acuapónico, direccionando el sentido de circulación del agua (Modificado de Rakocy y Hargreaves, 1993).	6
Figura 4.2. Esquema de pequeña unidad de cultivo con la técnica de a) balsa flotante, b) película nutriente y c) cama con sustrato como medios de filtración (Modificado de Somerville, 2014).	8
Figura 4.3. Diagrama de un separador mecánico de sólidos con deflectores (Somerville, 2014). 10	
Figura 4.4. Pantalla de malla para una filtración mecánica adicional y mineralización (Somerville, 2014).	10
Figura 4.5. Diagrama de biofiltro con película de nutrientes a pequeña escala (Somerville, 2014).	11
Figura 4.6. Componentes biológicos importantes en acuaponía (Somerville, 2014).....	12
Figura 5.1. Localización de la unidad acuapónica instalada para la investigación en el Colegio de Postgraduados campus Montecillo.....	20
Figura 5.2. Diseño y dimensiones del sistema acuapónico instalado en el Colegio de Postgraduados.	21
Figura 6.1. Normales climatológicas de la estación 15170-Chapingo sobre evaporación total, precipitación y temperatura media del periodo 1951-2010 (SMN, 2010).....	27
Figura 6.2. Relación del volumen perdido de agua por las diferentes causales.....	28
Figura 6.3. Relación del volumen perdido medido contra el volumen suministrado de agua.	28
Figura 6.4. Promedio diario de temperatura ambiental.....	29
Figura 6.5. Promedio diario de evaporación en tanques y evapotranspiración en balsas.	30
Figura 6.6. Relación mensual del volumen potencial de captación de agua de lluvia de la zona contra el volumen perdido de agua en el sistema, durante el periodo de análisis (abril-julio, 2018).	30
Figura 6.7. Promedio general semanal en el sistema de oxígeno disuelto (OD).	31
Figura 6.8. Promedio general semanal en el sistema de temperatura.	31
Figura 6.9. Promedio general semanal en el sistema de pH.	32
Figura 6.10. Concentración mensual de nitrógeno amoniacal no ionizado $\text{NH}_3\text{-N}$ (amoníaco)....	33
Figura 6.11. Concentración mensual de nitrógeno de nitrato $\text{NO}_3\text{-N}$	33
Figura 6.12. Conductividad eléctrica (C.E.) mensual	34
Figura 6.13. Biomasa y alimento suministrado mensualmente.	36
Figura 6.14. Peso inicial y final total en plantas por cada ciclo de cosecha.	37

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El sector agrícola, utiliza alrededor del 70% del agua dulce disponible a nivel mundial tendiendo este recurso cada vez más hacia su escasez y deterioro, lo que impactaría gravemente sobre la economía, la seguridad alimentaria y el sostenimiento en general de la vida. Bajo este escenario, ahorrar agua no es únicamente una buena práctica, pronto podría ser la única alternativa, por lo que resulta determinante lograr formas innovadoras y sustentables para producir nuestros alimentos (FAO, 2018).

Uno de los sistemas que permite reducir el uso de agua e incrementar su productividad es la acuaponía, perteneciente a la rama de la agro-agricultura integrada (AAI), la cual combina sistemas de producción para generar varios productos a la vez utilizando menos recursos, en este caso se maneja la cría de peces y el cultivo de plantas sin suelo, mediante un sistema multitrófico y de recirculación. El pez es alimentado y sus excretas fluyen en el agua hacia un filtro mecánico que elimina las partículas sólidas, seguido por un biofiltro con bacterias que descomponen el amoníaco producido por los peces y por la descomposición de la materia orgánica en nitrato, para luego ser aprovechados los nutrientes por las plantas, quienes terminan de filtrar el agua antes de ser retornada a los peces (Timmons *et al.*, 2009).

Para lograr una estabilidad en el sistema acuapónico y maximizar la producción, se deben controlar factores tales como la luz solar, los micro y macronutrientes, la calidad de agua en sus rangos óptimos de temperatura, pH, oxígeno disuelto y niveles no tóxicos de amoníaco.

En cuanto a la productividad del agua, denota la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida. La producción se puede expresar en términos de peso de producto final, biomasa, dinero etc., y la cantidad de agua utilizada en valores de evapotranspiración, agua total entregada para la producción, agua recibida como riego más lluvia, etc., (Molden *et al.*, 2003; Pereira, 2012). Para este tema lo expresaremos como kg m^{-3} .

Los sistemas acuapónicos ofrecen varias ventajas; se manejan en un medio acuoso por lo que disminuyen la degradación de los suelos, disminuyen el consumo de agua ya que operan con un recambio diario mínimo, reducen el volumen de desechos descargados al medio ambiente, provee dos productos, es decir pez y planta, genera una mayor densidad de producción, se puede cultivar localmente, disminuye la cantidad de fertilizantes utilizados en plantas y el pez provee proteína de alto valor nutricional. Al final, se trata de generar prácticas agronómicas sostenibles que provean de mayor productividad al agua incrementando la producción por unidad de agua utilizada sin perjudicar a otros usuarios y si contamos con datos sobre los diversos sistemas de producción se facilita la planificación del aprovechamiento hídrico con ayuda de la formulación

de políticas de asignación de agua y en casos viables, la transferencia de tecnología con un buen plan de negocio agrícola.

El objetivo de esta investigación es determinar la productividad del agua en el sistema acuapónico de pequeña escala, para lo cual se construyó un sistema de traspatio instalado en el Colegio de Postgraduados, Estado de México, México, en donde se trabajó con lechuga en balsa flotante y tilapia del Nilo, durante cuatro meses.

II. OBJETIVO GENERAL

Determinar la productividad hídrica, sostenibilidad y factibilidad económica de un sistema acuapónico recirculante de pequeña escala, para el cultivo de tilapia del Nilo y de lechuga sostenida en un medio de balsa flotante.

2.1 Objetivos particulares

- a. Estimar el consumo de agua en el sistema.
- b. Monitorear la calidad del agua y mantenerla en niveles óptimos de producción.
- c. Determinar el requerimiento alimenticio de los peces.
- d. Realizar un análisis económico del sistema.

III. HIPÓTESIS GENERAL

La productividad hídrica incrementa si se le incorpora el uso múltiple del recurso hídrico con la combinación de dos actividades productivas (agricultura y acuicultura), específicamente con la acuaponía que resulta una práctica agronómica sostenible y económicamente viable.

3.1 Hipótesis particulares

- a. El consumo de agua diario en sistemas acuapónicos se puede reducir hasta un 10% del volumen total del sistema.
- b. Mantener una calidad del agua dentro de los rangos óptimos para la producción acuícola, disminuye su desperdicio y aumenta la productividad.
- c. La alimentación de los peces basada en un análisis de biometrías disminuye el desperdicio de comida y aumenta la productividad.
- d. Con la combinación de producción de tilapia y lechuga se obtienen beneficios económicos adicionales.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

En esta presente revisión, se muestran los fundamentos y técnicas sobre la acuaponía, su importancia como un sistema sustentable de producción y para el desarrollo económico, cómo determinar su productividad hídrica y los retos que conlleva esta práctica.

4.1 Descripción de la acuaponía

La acuaponía, es la combinación de la recirculación de acuicultura e hidroponía, es decir, el cultivo de especies acuáticas en un medio controlado y el cultivo de plantas en soluciones acuosas respectivamente. En este tipo de sistema de producción, las plantas aprovechan los residuos de la acuicultura mediante los nutrientes disueltos en el agua, y a su vez se crea una fitodepuración que permite reutilizar el agua por los peces. El pez es alimentado y sus excretas fluyen en el agua hacia un filtro mecánico que elimina las partículas sólidas, seguido por un biofiltro con bacterias que descomponen el amoníaco producido por los peces y por la descomposición de la materia orgánica en nitrato, para luego ser aprovechados los nutrientes por las plantas, quienes terminan de filtrar el agua antes de ser retornada a los peces.

Actualmente hay una conciencia de la población enfocada a la agricultura sustentable, por lo que la acuaponía ha ganado atención por sus prácticas innovadoras y amigables con el ambiente además de que nos proporciona alimentos limpios y de buena calidad. Esto promueve el interés en su estudio, mejoramiento y adopción como nuevo sistema de producción.

4.2 Historia de la acuaponía

La acuaponía se remonta a la antigüedad de la cultura azteca en México entre los siglos XIII y XV, donde se practicaba mediante la crianza de peces junto a las cosechas, situando los peces en lagos someros y en canales y las plantas sobre islas construidas artificialmente denominadas “chinampas”, los desechos de los peces que caían al fondo de los canales eran recuperados para fertilizar las plantas. No se conoce con exactitud su origen pero está suficientemente aceptado que en la antigua China ya se practicaba el cultivo de arrozales con la integración de peces desde la dinastía Shang entre el 1401 y 1154 AC (Li, 1992).

La acuaponía moderna, nace de la industria de la acuicultura, la cual por la gran explotación existente necesita seguir produciendo pez sin depender de la tierra, el agua y otros recursos, para esto se empezó a producir bajo sistemas cerrados de recirculación con la disminución de contaminantes y la implementación de energías renovables. Estos sistemas reducen costos según el nivel de tecnificación, por lo que pueden ser implementados por pequeños y grandes agricultores. Las primeras y principales investigaciones de la nueva era que se remontan a los años 70's, son las siguientes (Nelson y Pade, 2008):

En 1977, en Alemania, Naegel analizó la reducción de los compuestos nitrogenados nocivos de los efluentes de la acuicultura al integrar una cama hidropónica con cultivo de tomates.

En 1977, en Illinois, Estados Unidos, William Lewis y colaboradores trabajaron con el primer sistema acuapónico de jitomate y de alta densidad de bagre.

En 1984, en las Islas Vírgenes, Estados Unidos, Watten y Busch desarrollaron un sistema que utiliza agregados de arena para los cultivos hidropónicos cultivando tomates y tilapia.

En 1993, en Marseilles, Francia, Quilleré y colaboradores determinaron que para que la acuaponía funcione en el pico de producción, el sistema debe recircular.

Desde 1980 a la fecha, en la Universidad de las Islas Vírgenes el Dr. James Rakocy y colaboradores han trabajado para el desarrollo de un sistema acuapónico que sea viable económicamente.

Desde 2003 a la fecha, el Centro de Diversificación de Cultivos, en Alberta, Canadá, se ha investigado en acuaponía el estudio de nuevas especies de peces y plantas, sistemas de clima frío y comparaciones de hidroponía y acuaponía.

A principios de 1990, Tom y Paula Speraneo, propietarios y operadores de S & S Aqua Farm en Missouri perfeccionaron su sistema acuapónico simplificado llamado "El Speraneo" y escribieron un manual de instrucciones sobre el sustrato, que sirvió como plataforma de lanzamiento para muchos sistemas acuapónicos de pequeña escala en todo el mundo, aunque no contenía información financiera sustancial (Diver, 2006).

Otro de los desarrollos de la acuaponía es su aplicación en las escuelas, y es perfecto para mostrar muchos principios científicos y motivar a aprenderlos como la ciencia, agricultura, matemáticas, ingeniería, economía, entre otros y sobre la concientización de cuidar nuestros recursos.

4.3 Importancia y retos de la acuaponía

A lo largo del tiempo, la pesca de captura se ha mantenido constante mientras que, en los últimos 30 años, la acuicultura ha aumentado exponencialmente. China ha sido importante en este crecimiento, ya que actualmente representa más del 60 % de la producción acuícola mundial, sin embargo, el resto del mundo sigue creciendo en este sector. En 2016, la producción acuícola mundial llegó a los 80 millones de toneladas, aportando el 46.8% de todo el pescado destinado al consumo humano, el restante lo aporta la pesca de captura (FAO, 2018). Además, el consumo de pescado per cápita a nivel mundial registró un aumento de un promedio de 9.9 kg en la década de 1960 a 20.4 kg en 2016 (FAO, 2016). Con todo este crecimiento, la acuaponía de la mano con la acuicultura despunta como una de las actividades que aliviará la demanda de esta proteína con un menor impacto ambiental.

La acuaponía tiene muchos beneficios ya que al ser un sistema multitrófico de plantas, peces y bacterias ofrece diversas cosechas en sólo una infraestructura y un cuerpo de agua, maneja un uso eficiente del agua, el uso de fertilizantes es menor porque los desechos del pez proveen la mayoría de los nutrientes que la planta necesita. Como no hay uso de agricultura en suelo se elimina la aparición de malezas y esto evita el uso de herbicidas y la degradación de suelos. Se utilizan controles biológicos en lugar de pesticidas. El agua diaria utilizada es mínima. Se incrementa la producción y disminuye el espacio requerido para los trabajos. Hay más variedad de especies acuícolas para cultivar. Las proporciones planta-pez se han optimizado, así como las metodologías de trabajo y los diseños de sistemas (Nelson y Pade, 2008).

Por otro lado, existen retos y controversias que enfrentar, por ejemplo, el combinar sistemas de producción incrementa los problemas de manejo. Es costoso para la puesta en marcha, exigente de energía y recursos, requiere mantenimiento diario y acceso a peces y semillas de plantas. Es una práctica que sostiene varios ecosistemas a la vez (planta, peces y bacterias) por lo que se vuelven codependientes, si uno es mal manejado afectará el rendimiento del otro; el medio ambiente y las necesidades de desarrollo de cada cultivo son diferentes y los errores o accidentes pueden resultar en un colapso catastrófico del sistema.

Los beneficios deben superar las limitaciones de la acuaponía ofreciendo sostenibilidad ambiental, factibilidad económica para el productor, beneficios para la sociedad y contar con paquetes tecnológicos de fácil transferencia, para esto es necesario seguir con las investigaciones que permitan resolver las dudas aún existentes y contar con datos precisos en el uso de los recursos, análisis de costo-beneficio y evaluación del ciclo de vida de la acuaponía.

4.4 Componentes del sistema acuapónico

Un sistema acuapónico se basa en la recirculación y puede diseñarse de diferentes formas, pero como elementos principales encontramos los tanques para el cultivo de peces, una unidad para eliminar sólidos sedimentables y suspendidos, un biofiltro, un componente hidropónico y un tanque receptor o sumidero (Figura 4.1).

El agua de los tanques de peces, cargada de materia orgánica, pasa al sistema de filtrado mecánico en donde a través de los clarificadores se remueven los sólidos sedimentables y suspendidos, producto de residuos fecales y restos de alimento no consumido; que de no retirarse se acumula y descompone anaeróbicamente en el fondo del tanque, provocando la liberación de productos tóxicos que deterioran el agua y dañan a los peces. Después el agua pasa a los biofiltros donde se forman colonias de bacterias nitrificantes para convertir el amonio tóxico, liberado por los peces, en nitrato; además para retener sólidos finos. Esta agua cargada de nutrientes y tratada se direcciona al sistema hidropónico donde es aprovechada por las plantas. Por último, es común un

tanque receptor donde el agua se recolecta y redirecciona nuevamente al tanque de los peces (Rakocy *et al.*, 2006).

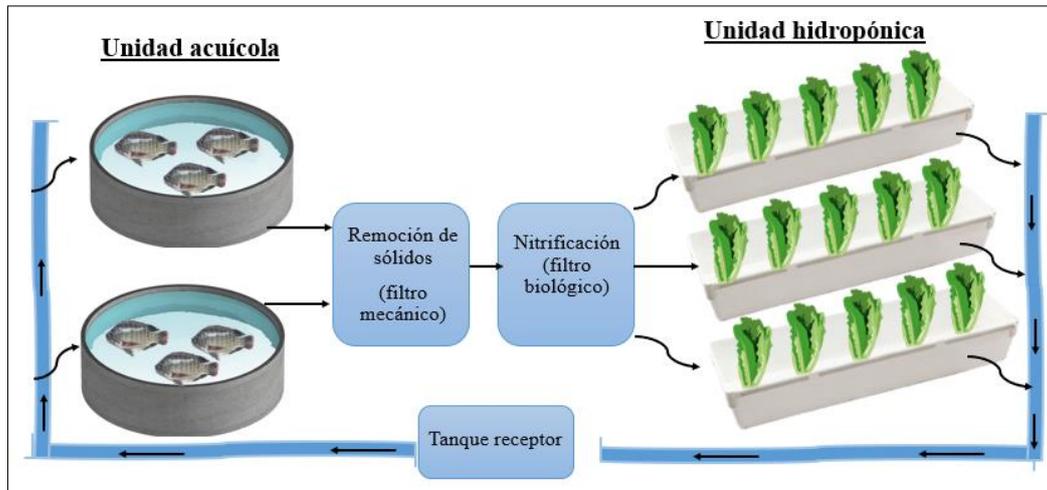


Figura 4.1. Configuración general de un sistema acuapónico, direccionando el sentido de circulación del agua (Modificado de Rakocy *et al.*, 1993).

4.4.1 Subsistema acuícola

Se define a la acuicultura como el cultivo en condiciones controladas de organismos acuáticos y tiene como objetivos importantes: la producción de alimentos de alto valor nutritivo para el consumo humano; la contribución a la formación del ingreso y a la creación de empleo rurales; el mejoramiento de la captura y la pesca deportiva; el cultivo de especies ornamentales con propósitos estéticos; el control de malezas acuáticas o los riesgos de plagas y enfermedades, tanto para la agricultura como para los seres humanos; la desalinización y otras formas de recuperación de suelos agrícolas.

Existen diferentes sistemas y tipos de producción de acuicultura, en ambiente marino y de superficie, de agua salobre o dulce, para el cultivo de una amplia variedad de organismos acuáticos, (Halwart M. *et al.*, 2000).

Los sistemas de base terrestre comprenden principalmente estanques, arrozales y otras instalaciones construidas en la superficie, siendo los estanques los más comunes, y varían en tamaños, desde pequeños, rudimentarios, con equipos de alimentación por gravedad, hasta los grandes geométricos, construidos empleando maquinarias y que implican un sofisticado régimen de gestión del agua y de tecnificación. Los sistemas de base acuática incluyen recintos, corrales, jaulas y balsas, y se sitúan habitualmente en costas protegidas o aguas interiores. Los recintos son formados mediante el cierre de una bahía natural, con una barrera sólida, de red o malla.

De manera semejante a los sistemas de producción ganaderos que varían desde los sistemas pastorales extensivos hasta los sistemas de cría en establo, la acuicultura también es practicada con diferentes grados de intensidad.

Los sistemas de acuicultura extensivos y semi-intensivos son los que generan la mayor parte de la producción acuícola. Habitualmente, los sistemas de producción extensivos utilizan tecnologías poco sofisticadas, emplean alimentos naturales producidos por el propio medio y usan una baja proporción de insumos por unidad de producto.

Los sistemas intensivos tienen una producción mayor que los sistemas anteriores por unidad productiva o de explotación. Esto es obtenido a través de un más alto nivel tecnológico y de gestión. Peces y otros organismos acuáticos son criados desde el huevo hasta el estado adulto, en altas densidades y en pequeñas y bien concebidas instalaciones. Comúnmente, las altas densidades exigen el tratamiento profiláctico con productos químicos para mantener el buen estado sanitario de los peces. Los alimentos balanceados de origen industrial, en forma de pellets, entran más frecuentemente en la base de la alimentación. La calidad del agua es cuidadosamente controlada a través del empleo de filtros, purificadores, bombas y aireadores.

Hoy en día, la acuicultura es una verdadera ganadería, de agua dulce y salada, con una gran expansión, que utiliza procesos productivos cada vez más perfeccionados y tecnificados (parques flotantes o fijos en el fondo, balsas de cultivo, esteros o balsas naturales que aprovechan el agua de las mareas, estanques en tierra) para el cultivo de moluscos, crustáceos, peces o algas. En este desarrollo tecnológico interviene un amplio abanico de profesionales entre los que destaca la labor del biólogo implicado tanto en la gestión diaria de los animales o plantas (control de la alimentación, seguimiento de los crecimientos y parámetros de cultivo, etc.) como en la gestión técnica y administrativa de las empresas. (Rueda, 2011)

4.4.2 Subsistema hidropónico

La hidroponía se refiere al cultivo de plantas en soluciones acuosas. Existen tres diseños principales en estos sistemas, la balsa o raíz flotante, la técnica de película nutriente (NFT por sus siglas en inglés) y la cama con sustrato, ilustradas en la Figura 4.2.

En un sistema de balsa, las plantas se cultivan en tablas flotantes de espuma de poliestireno que flotan sobre el agua. Comúnmente, este es un tanque extra, separado de la pecera y debe contar con aireación para una buena oxigenación de la raíz de la planta y la correcta asimilación de los nutrientes disueltos en el agua.

En el NFT las plantas crecen en canales largos y angostos, con el tamaño justo de la planta, donde corre continuamente una fina película agua con nutrientes que apenas toca las raíces de la planta, propiciando con este movimiento la incorporación de oxígeno.

Para la cama de sustrato se utiliza un tanque o contenedor que se llena de grava, perlita u otro medio para el lecho de la planta. Esta cama se inunda periódicamente con agua y luego se drena, también se puede mantener un flujo constante o aplicar riego por goteo.

Cada uno de estos tres sistemas tiene muchas variaciones según la aplicación, la ubicación y el diseñador o constructor, así mismo existen ventajas y desventajas de cada sistema.

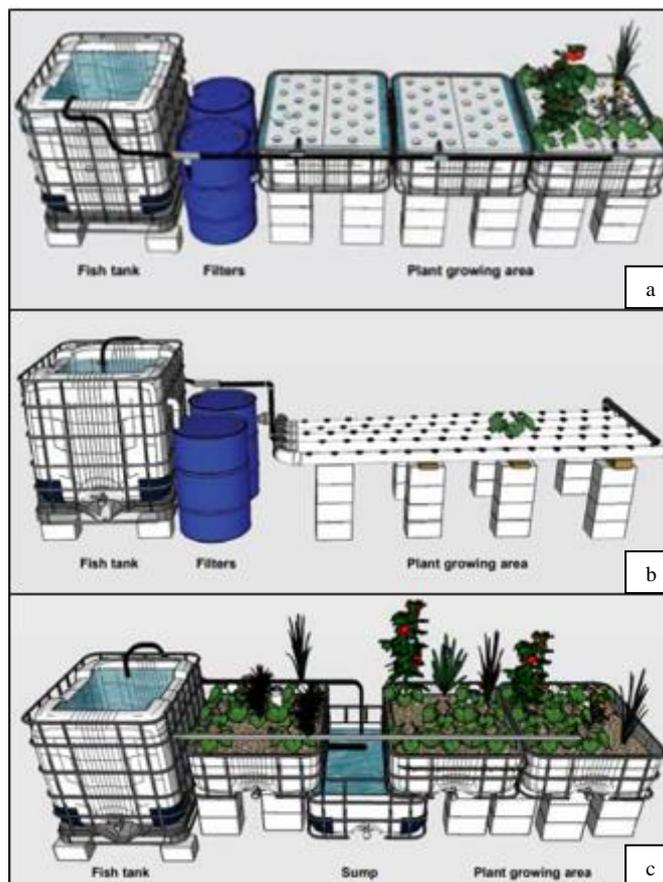


Figura 4.2. Esquema de pequeña unidad de cultivo con la técnica de a) balsa flotante, b) película nutritiva y c) cama con sustrato como medios de filtración (Modificado de Somerville, 2014).

En cuanto al concepto acuapónico, estas técnicas de hidroponía se pueden integrar viablemente como se muestra en las Figuras anteriores y así aprovechar los desechos acuícolas para nutrir a las plantas. En estos casos, el equipamiento requerido, así como los niveles de producción varían con cada sistema.

Generalmente, los sistemas de mayor potencial comercial son los de balsa y NFT debido a que las densidades de siembra y plantación son más altas, lo que resulta en un mayor rendimiento de peces y vegetales, pero se necesita una mayor filtración y más aportes para sostener tanto a los peces como a las plantas. En la acuaponía el área de producción de la planta por metro cuadrado es mucho más grande que el área de cría de peces por metro cúbico. Así bien, estos sistemas son adaptables, complejos y albergan múltiples componentes. Alterar la entrada, función o tamaño de

cualquier componente afectará el resultado o el comportamiento del sistema como un todo. Es importante tener en cuenta este concepto al considerar cambios o alteraciones a cualquier factor, variable o componente de un sistema (Nelson y Pade, 2008).

4.4.3 Subsistema de filtración mecánica y biológica

En los sistemas acuapónicos de recirculación, la filtración es necesaria para mantener la calidad y salud de todo el sistema.

4.4.3.1 Filtración mecánica

La filtración mecánica es quizás la condición más importante ya que separa y elimina mucho de los desechos sedimentables y suspendidos que genera la acuicultura. Los desperdicios sólidos, en caso de no ser removidos, podrían liberar gases tóxicos al acumularse y descomponerse por medio de bacterias anaeróbicas dentro del tanque de los peces y podrían alcanzar a las raíces de las plantas, saturándolas lo que fomentaría condiciones anóxicas e impediría una correcta absorción de los nutrientes. Además, los desechos pueden obstruir varias partes del sistema y alterar el flujo de agua. Algunos de los filtros mecánicos son, tanques de sedimentación, clarificadores de flujo radial, filtros de arena o perlas, entre otros; se eligen de acuerdo con la cantidad de desechos sólidos que deben eliminarse.

Un clarificador es un recipiente que utiliza las propiedades del agua para separar las partículas. Los clarificadores bien diseñados pueden eliminar hasta 60 por ciento del total de sólidos removibles (Timmons *et al.*, 2002). Actúan bajo el principio de que el agua que se mueve más despacio no puede transportar tantas partículas como el agua que fluye más rápido (Somerville *et al.*, 2014). Por lo tanto, el clarificador está construido de tal manera que acelera y ralentiza el agua para que las partículas se concentren en el fondo y se puedan eliminar.

En un clarificador de turbulencia, el agua del tanque de peces entra cerca del medio inferior del clarificador a través de una tubería. Esta tubería está posicionada tangencialmente al contenedor, forzando así al agua a girar en un movimiento circular dentro del contenedor. La fuerza centrípeta creada por el movimiento circular del agua fuerza los desechos sólidos en el agua al centro y al fondo del contenedor, porque el agua en el centro del vórtice es más lenta que la del exterior. Una vez que estos residuos se recogen en el fondo, se puede abrir periódicamente una tubería unida al fondo del contenedor, lo que permite que los residuos sólidos salgan del contenedor. El agua depurada sale del clarificador en la parte superior, a través de un tubo de salida ranurado grande cubierto con un filtro de malla secundario, y fluye al siguiente tratamiento. Los clarificadores pueden incluir deflectores para retener los sólidos que flotan (Figura 4.3). Una recomendación general para unidades de pequeña escala es dimensionar el filtro mecánico para que sea

aproximadamente un sexto del volumen del tanque de peces, pero esto depende de la densidad de población y el diseño exacto (Somerville, 2014).

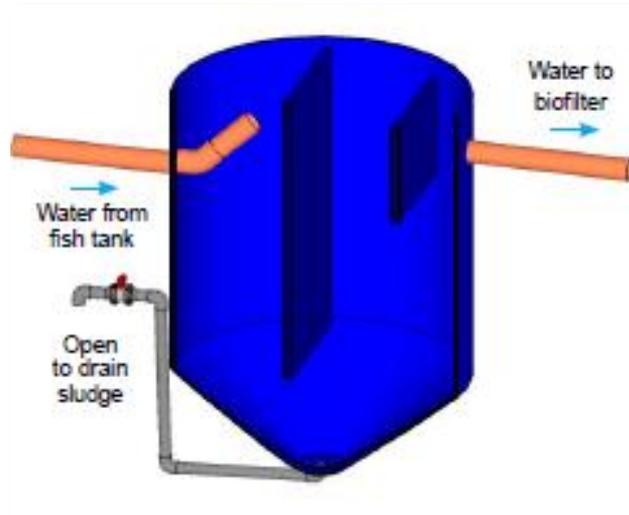


Figura 4.3. Diagrama de un separador mecánico de sólidos con deflectores (Somerville, 2014).

4.4.3.2 Mineralización

La mineralización, es el proceso de liberación de nutrientes al agua. Es un proceso previo a la filtración biológica y ambas son sistemas aeróbicos. Se lleva a cabo mediante la acción de microorganismos como bacterias heterotróficas, hongos y otros organismos superiores, que utilizan el carbono orgánico como fuente de su alimento; involucrándose centralmente en la descomposición de los desperdicios sólidos y dejando disponibles micronutrientes esenciales que aprovechan las plantas. Estas bacterias se adhieren a una superficie, como mallas, para crear colonias (Figura 4.4).



Figura 4.4. Pantalla de malla para una filtración mecánica adicional y mineralización (Somerville, 2014).

Dejar los desechos más tiempo permite una mayor mineralización, por consiguiente, a que se retengan más nutrientes en el sistema (Rakocy *et al.*, 2006). Sin embargo, este mismo desecho

sólido, si no se maneja y mineraliza adecuadamente, bloqueará el flujo de agua, consumirá oxígeno y conducirá a condiciones anóxicas, que a su vez conducirán a la producción de gas de sulfuro de hidrógeno y a la desnitrificación (Somerville, 2014).

4.4.3.3 Filtración biológica

La biofiltración es cualquier técnica de filtración que involucra organismos biológicos para eliminar impurezas del agua. El nitrógeno es un nutriente esencial para todos los organismos vivos. En la acuicultura, el nitrógeno es un componente residual derivado del cultivo de los peces que tiene varias fuentes principales: urea, ácido úrico, aminoácidos excretados por los peces, detritos orgánicos de organismos muertos, alimento no consumido y heces fecales. La descomposición de estas especies nitrogenadas en los sistemas de recirculación acuícolas es particularmente importante debido a la toxicidad del nitrógeno amoniacal total $NAT = N-NH_4^+ + N-NH_3$ (Gallego-Alarcón *et al.*, 2017).

El proceso de remoción de amonio por filtración biológica es llamado nitrificación y consiste en una oxidación secuencial del amonio (NH_3) el cual es tóxico para los peces, a nitritos (NO_2^-) y finalmente a nitratos (NO_3^-), siendo este último elemento el fertilizante para las plantas. Participan en este proceso dos grupos de bacterias autótrofas quimiosintetizadoras. Las bacterias oxidantes del NAT incluyen géneros como Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrospira, Nitrosolobus y Nitrosovibrio. Aquellas oxidantes de nitritos comprenden géneros como Nitrobacter, Nitrococcus y Nitrospina (Timmons *et al.*, 2009). Estas bacterias nitrificantes se fijan a medios filtrantes formando una biopelícula (Figura 4.5), se debe evitar la exposición a la luz solar directa ya que inhibe el crecimiento y ocupan un ambiente aerobio con un rango de oxígeno disuelto de 4 a 8 $mg L^{-1}$, niveles adecuados de pH que en acuaponía va de 6 a 7 para sostener plantas, peces y bacterias, y un rango de temperatura de 17 a 34 °C (Somerville *et al.*, 2014).

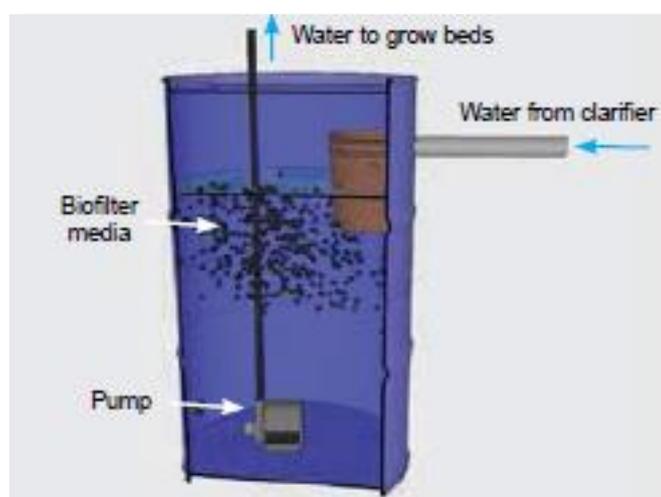


Figura 4.5. Diagrama de biofiltro con película de nutrientes a pequeña escala (Somerville, 2014).

4.5 Balance del sistema acuapónico

Para tener éxito en un sistema de producción acuapónico es necesario tener un equilibrio dinámico entre los tres principales grupos de organismos involucrados peces, plantas y bacterias (Figura 4.6). No es fácil lograr este equilibrio ni mantenerlo en el tiempo, requiere un buen manejo, seleccionar correctamente la densidad y cantidad en los peces y plantas, tener un volumen adecuado para la biofiltración con una población sana de bacterias, monitorear y mantener los parámetros físicos y químicos en el agua adecuados para la combinación de los tres ecosistemas, implementar prácticas de sanidad, entre otros mecanismos, para obtener un rendimiento cercano a la máxima capacidad de carga del sistema, mejorando el potencial de ganancias.

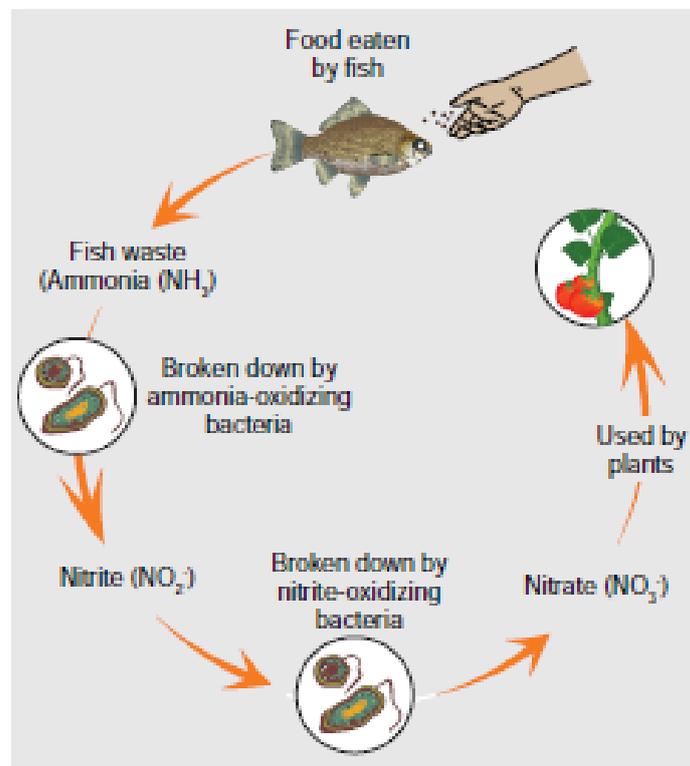


Figura 4.6. Componentes biológicos importantes en acuaponía (Somerville, 2014).

Se debe monitorear con regularidad el estado de los sistemas acuapónicos porque modifican regularmente las tasas de alimentación, la retención de sólidos, y la tasa de mineralización; por lo cual, los niveles de nutrientes en el agua son variables.

Para equilibrar el sistema, se cuantifica la cantidad de alimento ingresado diariamente ya que de este dependen los nutrientes y desechos generados y relacionarla con la superficie del cultivo vegetal. También se cuantifica el potencial del sistema de biofiltrado, que actuará como un intermediario obligado. Enfermedades, mortandades y deficiencias nutricionales son síntomas de un sistema desbalanceado.

Cada organismo cultivado en una unidad acuapónica tiene diferentes requerimientos individuales para su óptimo desarrollo, como la Tilapia del Nilo (*Oreochromis Niloticus*) y la lechuga (*L. sativa*) (Cuadro 4.1 y 4.2 respectivamente).

Cuadro 4.1. Condiciones para la producción acuapónica de Tilapia del Nilo (*Oreochromis Niloticus*), (modificado de Somerville *et al.*, 2014).

Especie	Temperatura (°C)		pH	OD (mg L ⁻¹)	Nitrógeno NAT (mg L ⁻¹)	Nitritos (mg L ⁻¹)	Proteína en alimento (%)	Tiempo de crecimiento
	vital	óptima						
Tilapia del Nilo (<i>Oreochromis Niloticus</i>)	14 - 36	27 - 30	6 - 8.5	> 4	< 2	< 1	28 - 32	600 g en 7 meses

Cuadro 4.2. Condiciones para la producción acuapónica de lechuga, (modificado de Somerville *et al.*, 2014).

Especie	Temperatura (°C)	pH	Planta / m ²	Tiempo de crecimiento (semanas)	Exposición solar
Lechuga	15 - 22	6 - 7	20 - 25	4 - 5	Moderada - Alta

Para fines del estudio, se trabajó dentro de los rangos establecidos por Somerville, (2014) ya que es una integración mejorada para la producción acuapónica (Cuadro 4.3), y se consideraron los parámetros especiales de agua para acuicultura (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.3. Condiciones generales en la calidad del agua para peces de agua caliente o fría, plantas hidropónicas, bacterias nitrificantes y para la acuaponía como un arreglo entre los tres organismos (Somerville, 2014).

Organismo	Temperatura (°C)	pH	Amoníaco (mg L ⁻¹)	Nitritos (mg L ⁻¹)	Nitratos (mg L ⁻¹)	OD (mg L ⁻¹)
Pez de agua caliente	22 - 32	6 - 8.5	< 3	< 1	< 400	4-6
Pez de agua fría	10 - 18	6 - 8.5	< 1	< 0.1	< 400	6-8
Plantas	16 - 30	5.5 - 7.5	< 30	< 1	-	> 3
Bacterias	14 - 34	6 - 8.5	< 3	< 1	-	4-8
Acuaponía	18 - 30	6 - 7	< 1	< 1	5 - 150	5 - 8

Cuadro 4.4. Parámetros de calidad de agua para acuicultura (Timmons *et al.*, 2009)

Parámetro	Concentración (mg L ⁻¹)
Alcalinidad como CaCO ₃	50-300
Dióxido de Carbono CO ₂ especies tolerantes	< 60
Dureza total como CaCO ₃	> 100
Sólidos disueltos totales SDT	< 400
Sólidos suspendidos totales SST	10-80

En acuaponía, los nutrientes disponibles para la planta están directamente relacionados los peces: por su tamaño, su densidad y la cantidad y calidad de alimento que se les suministra. Las plantas usan los macronutrientes en mayor cantidad (nitrógeno, fósforo, calcio, potasio, sulfuro, magnesio, hierro) y los micronutrientes en menor suma (manganeso, boro, zinc, cobre, molibdeno). El pH es muy importante para el crecimiento de las plantas ya que la mayoría de los nutrientes se encuentran disponibles en un rango de pH de 6 a 7.5. Para un crecimiento sano de la planta, se puede trabajar con una concentración promedio de elementos en el agua (Cuadro 4.5) donde el carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H) serán suplidos por agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂).

Cuadro 4.5. Requerimiento nutrimental para plantas en hidroponía (Nelson y Pade, 2008).

Elemento	Cantidad (partes por millón)
Nitrógeno (N) en forma de nitrato	70 – 300
Nitrógeno (N) en forma de amonio	0 – 31
Potasio (K)	200 – 400
Fósforo (P)	30 – 90
Calcio (Ca)	150 – 400
Sulfuro (S)	60 – 330
Magnesio (Mg)	25 – 75
Hierro (Fe)	0.5 – 5.0
Boro (B)	0.1 – 1.0
Manganeso (Mn)	0.1 – 1.0
Zinc (Zn)	0.02 – 0.2
Cobre (Cu)	0.02 – 0.2
Molibdeno (Mo)	0.01 – 0.1

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días. Es un indicador importante para el control de la contaminación de las corrientes donde la carga orgánica se debe restringir para mantener los niveles deseados de oxígeno disuelto. Es útil para medir la capacidad de purificación de las corrientes monitoreadas y sirve para orientar normas de control de calidad de los efluentes descargados. En acuicultura, la DBO raramente excede los 30 mg L⁻¹, la mayoría de los valores estarán por debajo de 10 mg L⁻¹.

4.6 Recirculación de agua

Los períodos de recirculación de agua (número de recirculaciones por día), el flujo de agua (volumen transportado por unidad de tiempo) y la carga hidráulica (elevación de la superficie líquida) son factores importantes en el rendimiento de los sistemas acuapónicos.

En un sistema piloto, Sreejariya *et al.*, (2016), utilizaron tilapia híbrida (*Oreochromis niloticus*, X *O. mossambicus* X *O. hornorum* X *O. aureus*) y lechuga en balsa flotante para probar tres regímenes de recirculación de agua diurna de 11 horas, nocturna de 13 horas y circadiana de 24 horas. La duración de la recirculación no influyó significativamente en la calidad del agua, el crecimiento y la calidad de la lechuga, lo que sugiere que la recirculación se puede reducir de 24 horas a un rango de 11 a 13 horas lo que disminuye costos. Por otro lado, la velocidad del flujo de agua a través de las raíces aporta mayor número de moléculas frescas lo que promueve mayores rendimientos en las plantas, aunque sigue sin ser concluyente esta versión (Maucieri *et al.*, 2018).

4.7 Equipamiento del sistema acuapónico

El movimiento del agua es fundamental en los sistemas acuapónicos para mantener vivos y sanos a todos los organismos residentes. El equipo más utilizado para este fin es la bomba sumergible y su capacidad dependerá del volumen total en el sistema a recircular.

Otro componente dominante es el contenido de oxígeno disuelto en el agua y para mantenerlo óptimo se utilizan bombas aireadoras que inyectan aire en el agua a través de tuberías y piedras aireadoras sumergidas ambas en el fondo de los tanques. Las burbujas pequeñas ocupan una mayor superficie por unidad cúbica que las burbujas grandes, por lo tanto, liberan más oxígeno; esto hace que al sistema de aireación más eficiente.

4.8 Consumo de agua en acuaponía

El agua consumida, se refiere, al volumen de agua que no está disponible para otros usos existentes o potenciales. En la acuaponía existen un volumen de agua perdido diariamente, causado por el intercambio de agua de mala a buena calidad, la eliminación de lodos, la evaporación, la evapotranspiración y las salpicaduras de los peces durante la alimentación. La

tasa de recambio generalmente está dentro de un rango de 2 y 10% en acuicultura intensiva (Hu *et al.*, 2015) y menos del 1% para los modernos sistemas de recirculación (Turcios y Papenbrock, 2014).

El consumo también se rige por la relación de la superficie hidropónica contra el volumen del tanque de peces, al incrementar de 0.67 a 2.25 también aumentó el reemplazo diario de agua de 1.2 a 4.7% (McMurtry *et al.*, 1997). Lennard y Leonard (2004, 2006) obtuvieron un consumo diario de 2.65% en acuaponía con cama de grava para el cultivo de *L. sativa* durante 21 días y no observaron influencia por el manejo de la sección hidropónica ni por el tipo de hidroponía.

Durante los recambios, si el agua cargada de materia orgánica y nutrientes que es eliminada del sistema se usa para riego, no se considera "consumida", sino que es "mejorada" por el estanque de peces. Sin embargo, si se libera directamente a un cuerpo de agua, es posible que tengamos que calcular la tasa de dilución necesaria antes de que la calidad del agua esté suficientemente restaurada. La cantidad total de agua consumida es importante y el beneficio que proveen los efluentes de la piscicultura es, por lo tanto, un determinante importante del denominador en el cálculo de la productividad del agua, así como la escala considerada, que varía según el sistema utilizados; es decir: en el estanque de peces, el agua consumida es el volumen evaporado mas la salida contaminada; por otro lado en un sistema de estanque con campo irrigado el consumo es la evaporación del estanque más la evapotranspiración del campo y el riego; mientras que en un sistema de estanque con río el agua consumida es igual a la evaporación, mas la salida contaminada, mas el agua de dilución (Lemoalle, 2008).

4.9 Productividad hídrica en acuaponía

El concepto de Productividad del Agua (WP por sus siglas en inglés) fue inicialmente desarrollado en la agricultura de regadío para convertir el agua en alimento y luego se aplicó a otras actividades agrícolas como la pesca y silvicultura

Siendo más precisos, la WP indica la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida, resumido a $WP = \text{producción} / \text{agua consumida}$ (González-Robaina *et al.*, 2015). La producción se puede expresar en términos de peso de producto final, biomasa, dinero etc., y la cantidad de agua utilizada se da en valores de evapotranspiración, agua total entregada para la producción, agua recibida como riego más lluvia, etc., (Molden *et al.*, 2003; Pereira, 2012). En realidad, no existe una definición única de productividad y el valor considerado en el numerador podría depender del enfoque, así como de la disponibilidad de datos. Sin embargo, la productividad del agua definida en kilos por gota es un concepto útil, en este caso, podemos utilizar la relación del peso comestible de los cultivos alimentarios por cada volumen de agua consumida en el proceso de producción.

Si la productividad del agua se pudiera aplicar a todas las actividades rurales, y especialmente a la variedad de sistemas de producción de alimentos, una métrica común permitiría comparar los diferentes sistemas de producción dentro de un sistema de unidad única. Esto facilitaría la formulación de políticas de asignación de agua (Lemoalle, 2008).

Los animales nutridos con dietas formuladas consumen indirectamente grandes cantidades de agua ya que es utilizada para cultivar los granos utilizados para crear estos alimentos. Además, cada especie animal tiene diferente factor de conversión alimenticia (FCA) que se refiere a cuanto peso gana por cada unidad de alimento ofrecido, para pollos, cerdo y vacunos ronda alrededor de 2.0, 2.5 y 3.0 respectivamente, mientras que en los peces está en valores cercanos a 1.0 por lo que en términos de agua asociado a la alimentación, lo convierten en el animal más eficiente en la conversión de energía a peso corporal (Timmons *et al.*, 2009).

Sin embargo, el uso del agua relacionado al manejo de granjas acuícolas puede ser muy alto, pero la intensificación de la acuicultura reduce su uso y sólo los sistemas intensivos son igualmente eficientes hídricamente como los sistemas de cría de animales terrestres (Verdegem, 2006; Love *et al.*, 2016).

En cuanto a las plantas, la evapotranspiración aporta una medida directa del agua consumida por un cultivo durante una temporada de crecimiento y, cuando se relaciona con la biomasa y el rendimiento de los cultivos, permite calcular la productividad del agua en estos últimos.

El valor de la productividad hídrica en acuaponía como mencionaba es variable, y depende de diversos factores como el nivel de tecnificación, el tamaño del sistema, la densidad de los cultivos, las especies cultivadas, el plan de manejo, entre otros. Por ejemplo, el agua consumida para obtener un kilogramo de *Oreochromis niloticus* según Brummet (2007) es de 3.3 m³; Love *et al.* (2015a) y Delaide *et al.* (2017) obtuvieron consumos similares de 0.292 y 0.278 m³ respectivamente para sistemas de pequeña escala, mientras que Tokunaga *et al.* (2015) consumió 0.0027 m³ obteniendo la mejor productividad hídrica con su sistema intensivo.

4.10 Acuaponía sustentable

Actualmente la sociedad se preocupa más por coexistir amigablemente con la naturaleza por lo que se adopta en lugar de la agricultura tradicional a los nuevos agroecosistemas ya que estos equilibran e integran la interacción ambiental, social y económica. Existe otra competencia dada por la tierra, el agua y la energía que igualmente buscan la sinergia sustentable.

No es fácil lograr un esquema acuapónico sustentable de acceso rápido y fácil ya que las condiciones sociales, económicas, institucionales, culturales y del medio físico, varían de un lugar a otro y, consecuentemente, será siempre necesario analizarlas cuidadosamente ya que lo que para alguien es sostenible para otros podría no serlo por las diferencias en la disponibilidad de recursos

productivos o de insumos, por la falta de capital para la inversión, por el nivel de conocimientos de los agricultores, por los tipos de mercados de la zona, por el arraigo a las prácticas agrícolas tradicionales, entre otros (Halwart, 2000).

En sistemas acuapónicos de pequeña escala podemos adoptar ciertas prácticas sustentables para manejar y complementar los requerimientos del sistema, Se pueden compostar desechos vegetales y aplicarlos a las plantas para complementar su nutrición. El alimento alternativo y complementario para peces se puede cultivar y producir a pequeña escala, incluyendo la lenteja de agua, *Azolla spp.*, insectos y moringa. Las semillas se pueden recolectar y almacenar usando técnicas simples para reducir los costos de resiembra. El agua acuapónica residual se puede utilizar para fertilizar y regar otros cultivos terrestres. Podemos recolectar y el almacenar el agua de lluvia para reponer las pérdidas de agua del sistema (Somerville, 2014).

4.11 Viabilidad económica

La acuaponía, se perfila para ser una solución sostenible en algunos países para la demanda de alimentos ya que produce plantas y peces a la vez en un mismo espacio reutilizando el agua mediante su tratamiento; sin embargo, todavía presenta desafíos y problemas económicos ya que al combinar sistemas de producción incrementa los problemas en su manejo. En la parte económica, Love *et al.* (2015b), evaluaron 257 empresas de acuaponía en todo el mundo y concluyeron que la mayoría de las pequeñas empresas de acuaponía sufrieron pérdidas, por esto es necesaria una cuidadosa planificación financiera y fortalecer los datos sobre las diferentes producciones acuapónicas.

Los indicadores económicos más utilizados para evaluar la rentabilidad de un proyecto son: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), el periodo de la recuperación de la inversión (PRI) y la relación beneficio-costos (RBC).

El VAN consiste en llevar al presente todos y cada uno de los beneficios netos a ocurrir o estimados en la vida útil u horizonte de evaluación del proyecto (beneficios netos futuros), con el fin de conocer el efecto neto del proyecto en el momento de la toma de decisión. Los beneficios netos son los ingresos menos los costos en un período en particular, posteriormente se actualizan utilizando una tasa de descuento y luego se suman para la duración del proyecto. El VAN deberá ser mayor a cero para que se acepte el proyecto, si es menor se rechaza ya que no se estaría ganando el rendimiento mínimo solicitado.

La TIR es la tasa de descuento que al calcular el VAN de los flujos de caja lo iguala a cero, nos indica el punto hasta el cual se puede aumentar la tasa de descuento y el proyecto resulta aún rentable. El VAN y la TIR se utilizan a menudo para determinar el atractivo de una inversión o empresa comercial.

El PRI es el número de años que tomará el proyecto para recuperar la inversión inicial (Baca, 2007), es decir, hasta que el flujo de efectivo acumulado sea positivo.

La RBC es la razón del beneficio que se puede acumular en algún momento y el costo en el cual se incurrirá por un proyecto. La RBC es un indicador de la rentabilidad de una inversión: cuando es mayor que 1 indica las ganancias que se obtendrán, cuando es menor que 1 no se recomienda iniciar un proyecto ya que los costos son mayores que los ingresos.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente sección, se describen los componentes y funcionamiento del sistema acuapónico implementado, así como el trabajo in situ para el monitoreo y adquisición de datos sobre la producción.

5.1 Localización del área de estudio

El experimento se ubicó en las instalaciones del Colegio Postgraduados campus Montecillo, específicamente en el invernadero del lote 17 E, con latitud: $19^{\circ}27'59.5''$ N, longitud: $98^{\circ}55'01.5''$ W, y altitud aproximada de 2250 m.s.n.m (Figura 5.1).

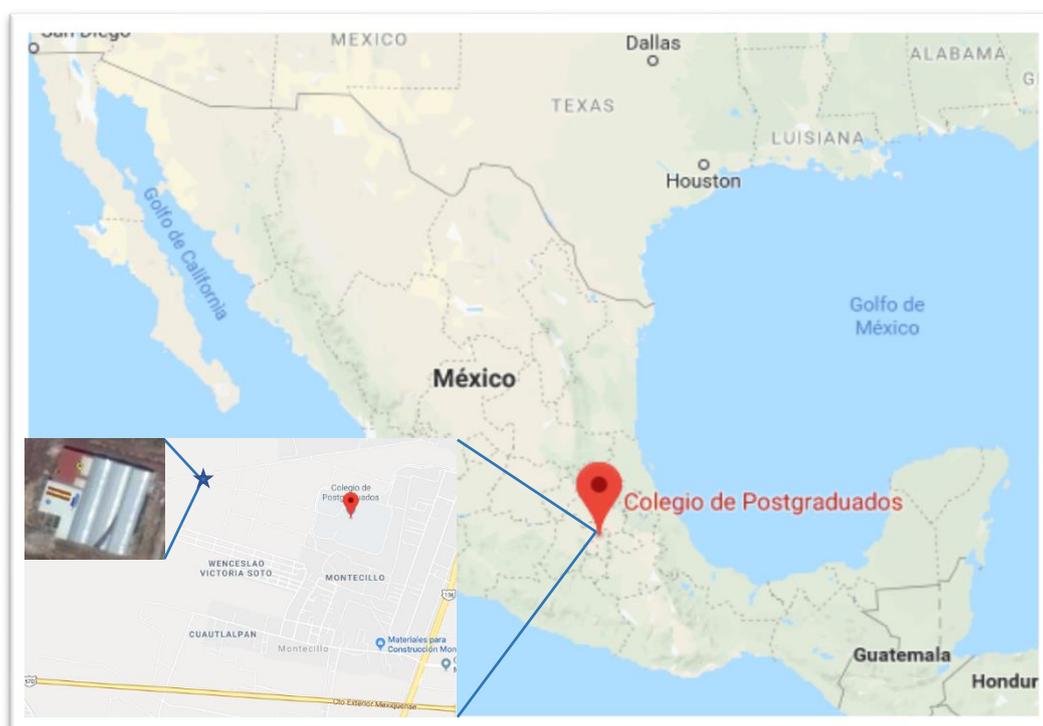


Figura 5.1. Localización de la unidad acuapónica instalada para la investigación en el Colegio de Postgraduados campus Montecillo.

5.2 Diseño del sistema acuapónico

El sistema acuapónico de 8.05 m^3 se instaló dentro de un invernadero de 91 m^2 , el cual mantuvo durante el experimento una temperatura ambiental promedio de 28.1°C , con una máxima de 46.1°C y una mínima de 13.7°C , medida diariamente con un termómetro digital para exteriores.

Este sistema consta para la parte acuícola de cuatro contenedores IBC de polietileno con la capacidad de manejar un volumen neto de 950 litros cada uno; en el sistema de filtrado se utilizaron 5 tambos de plástico, donde el de mayor volumen lo ocupó el primer clarificador con 200 litros, mientras que los siguientes tratamientos (segunda clarificación, mineralización, nitrificación y desgasificación), residieron en tambos de 100 litros cada uno; en el sistema

hidropónico se instalaron cuatro balsas rectangulares con un volumen utilizado de 3.6 m³ y una superficie de 18 m² por 30 cm de altura recubierta con geomembrana de polietileno de alta densidad de 0.75 mm. Todo el movimiento de agua en el sistema se daba por gravedad por lo que al final en un tanque de 50 litros tipo sumidero se agregó una bomba sumergible para que el agua tratada por los filtros y las plantas fuera regresada hacia los peces. En la conducción de agua y aire se utilizaron tuberías hidráulicas de PVC de 38 mm y 25 mm respectivamente. Para la aireación de peces, plantas y biofiltros se utilizó manguera difusora de 13 mm de diámetro. El 20 de febrero de 2018 el sistema comenzó operaciones, inicialmente se trabajó durante 40 días con peces y agua como un sistema de recirculación acuícola, lo que permitió que el biofiltro madurara y los niveles de nutrientes aumentaran, después de este lapso se sembraron las plantas el 1 de abril para dar inicio a la investigación y se tomaron datos durante cuatro meses. Las excreciones sólidas de los peces y el alimento no consumido se eliminaron diariamente del sistema. El diseño y las especificaciones del sistema se presentan en la Figura 5.2.

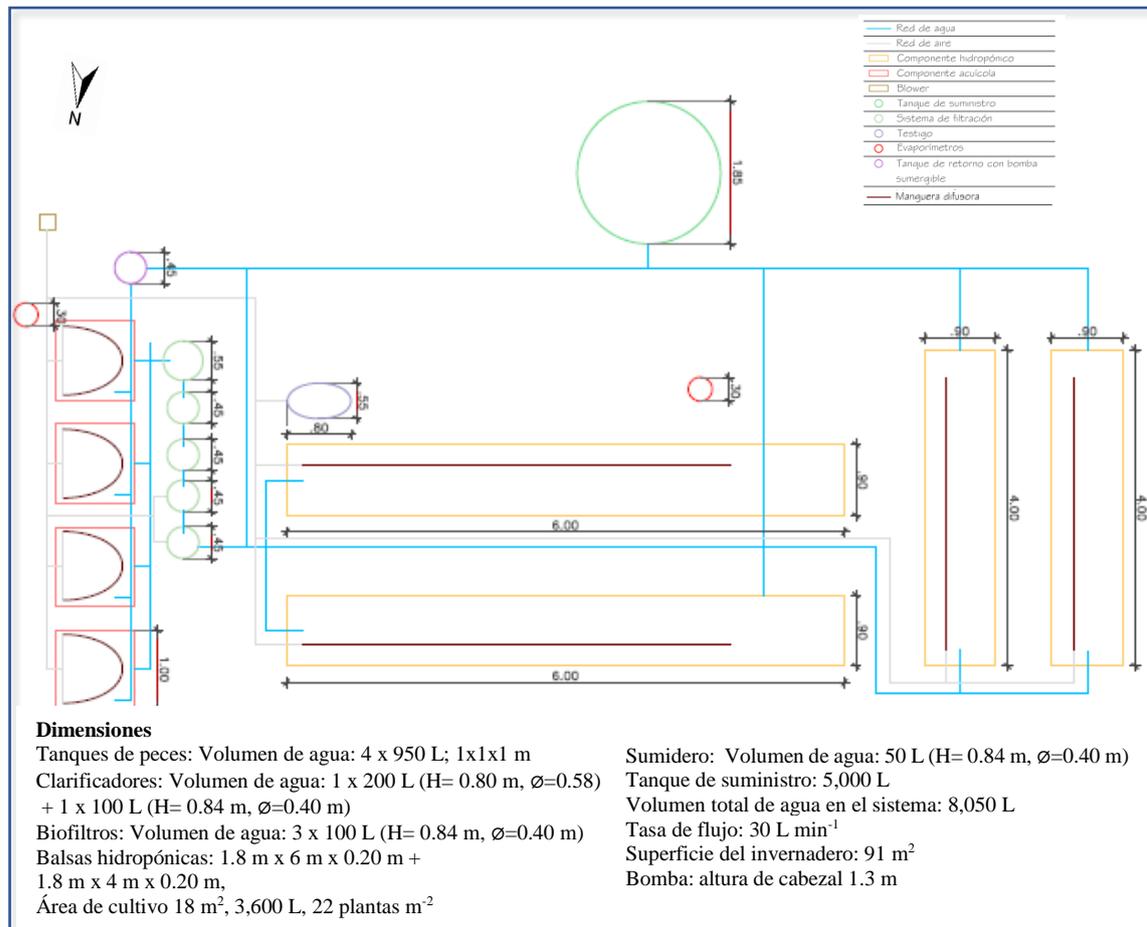


Figura 5.2. Diseño y dimensiones del sistema acuapónico instalado en el Colegio de Postgraduados.

5.3 Manejo acuícola

El análisis de datos en peces comenzó con una población de 530 tilapias del Nilo (*Oreochromis niloticus*), con un peso promedio inicial en la investigación de 50 g para un total de 30.25 kg. Fueron distribuidas en los tanques con aireación de acuerdo a su talla. Su dieta consistió en un alimento balanceado para engorda con extruido flotante en partícula de 4.8 mm, disponible comercialmente de la marca Purina® NUTRIPEC®, compuesto de 32 % proteína y 6 % grasa.

Los peces fueron alimentados diaria y manualmente a las 9:00 y 15:00 horas, la cantidad se suministró con base en aumento de masa de pescado calculado mensualmente. Las biometrías se realizaron en cada uno de los tanques, tomando una muestra del 10% de peces y se pesaban en una balanza portátil, este dato se dividía entre el número de peces de la muestra para calcular el peso unitario, y se multiplicaba por el número total de peces en el tanque para obtener la biomasa total, al cual se le aplicaba un porcentaje variable entre el 2 y 1% (según la etapa de desarrollo del pez) que sería la ración diaria para ofrecer.

El rendimiento de la producción se determinó con base en el factor de conversión alimenticia (FCA), dado por la relación entre el alimento total administrado y la ganancia total de biomasa obtenida durante el experimento. Por último, se obtuvo la tasa de crecimiento (GR), es decir, la ganancia total de biomasa por el número de días del experimento.

5.4 Manejo hidropónico

El cultivo utilizado fue lechuga de cabeza (*Lactuca sativa var.*) bajo un sistema de balsa flotante durante tres ciclos.

La siembra se realizó en cuatro balsas rectangulares de geomembrana con sistema de raíz flotante y aireación, dos de ellas tenían una dimensión de 0.9 x 6 x 0.3 metros, mientras que las otras dos de 0.9 x 4 x 0.3 metros y el volumen neto utilizado para agua fue de 3.6 m³ ya que se dejó un bordo libre de 10 cm en todas las balsas. La planta se sostuvo sobre placas de poliestireno expandido de densidad media de 1” de espesor, con perforaciones de 4.5 cm de diámetro a cada 30 cm siguiendo un diseño zigzag, y se colocaron dentro de vasos desechables del número 0 (diámetro de 42 mm y altura de 39 mm), rellenos con grava para sostener el tallo y con un corte en cruz del fondo para liberar la raíz completamente en el agua. Las plántulas fueron transferidas al sistema acuapónico 12 días después de la siembra. La cosecha se realizó a los 40 días, y se reemplazó con nuevas plántulas. Para medir el rendimiento del cultivo, se utilizó una balanza portátil para pesar inmediatamente después de la cosecha la biomasa fresca de los brotes en una población muestra de 40 lechugas, donde se calculó el peso por pieza y se multiplicó por 200 el total de plantas cultivadas por ciclo, se sumaron el total producido de los tres ciclos para obtener la biomasa total producida.

5.5 Manejo hídrico

Se mantuvo en el sistema un flujo de agua promedio de 30 L min^{-1} , en condiciones de recirculación cada 2 horas, lo que permitía circular el volumen total de los tanques acuícolas 11 veces al día. Las fuentes de pérdida de agua fueron evaporación, evapotranspiración, drenado para la eliminación de lodos, recambio de agua y salpicaduras (por peces y limpieza). La reposición de agua se suministró a través de un tanque de almacenamiento de 5 m^3 que contenía el agua previamente bombeada desde un pozo localizado cerca de la instalación. Aunado al invernadero se recubrió el área de los tanques de peces con un micro túnel plastificado para mantener el calor y disminuir la pérdida de agua debido a la evaporación de la parte superior de los tanques.

5.5.1 Evaporación y evapotranspiración

La evaporación se midió en milímetros de altura de lámina de agua evaporada. Se utilizaron tinajas circulares bajo el principio de los tanques evaporímetros, donde se señaló con una marca indeleble el nivel de referencia inicial que debía mantener el agua, diariamente a las 10 am se medía con un vernier la disminución del nivel por la evaporación e inmediatamente se rellenaba la tina al nivel de referencia original. Para la evapotranspiración se instaló una tina hidropónica testigo de 70 litros con 10 plantas, con la aplicación de la misma agua, planta y oxigenación que las del experimento, y se realizó la misma técnica de medición que en la evaporación.

5.5.2 Reposición de agua

La reposición de agua desde el tanque de almacenamiento al sistema se midió con una manguera transparente conectada a un costado del tanque, funcionando como tubo piezométrico, donde el nivel se elevaba hasta la altura equivalente a la presión del agua contenida y al reponer el agua se medía la variación de este nivel con una cinta métrica acondicionada sobre la manguera.

5.5.3 Potencial para el uso del agua de lluvia

Dado que se busca tener un sistema sustentable, se evaluó si el volumen potencial de captación de agua de lluvia es suficiente para reponer las pérdidas diarias en el sistema, ya que es una tecnología de bajo costo y grandes beneficios de reutilización de agua. Se calculó en función de los datos de precipitación mensual de la zona más cercana al punto de la investigación (estación climatológica 15170-Chapingo), la superficie del invernadero de 91 m^2 y una eficiencia de recolección estimada del 70%. Se determina según Brown-Manrique *et al.* (2009) como:

$$V_c = A_c * P_m * K \quad (1)$$

Donde:

V_c = volumen de captación (m^3),

A_c = área de la captación disponible (m^2)

P_m = precipitación promedio del periodo de déficit (m)

K = coeficiente de almacenamiento para las condiciones del lugar

5.6 Calidad del agua

La calidad del agua se conservó mediante un tren de tratamiento de cinco etapas. Primeramente, se circulaba por dos clarificadores cilíndricos de 200 y 100 litros, seguidos por dos tambos de biofiltro de 100 litros cada uno, al primero se le introdujo una malla antipájaro de 6 m² con cuadrícula de 1.5 x 1.5 cm y al segundo se le agregó aireación y 1500 tramos de 3 cm de poliducto corrugado estándar de ¾"; para finalizar con un tambo con aireación para la desgasificación.

Las revisiones en el agua de pH, temperatura y oxígeno disuelto (OD) se tomaron semanalmente y la conductividad eléctrica una vez al mes a las 10 a.m., se utilizó un medidor multiparamétrico (Hanna 9828, HANNA Instruments, Woonsocket, RI, EE. UU.). Las medidas se realizaron en todos los componentes del sistema, (4 tanques de peces, 5 tanques de filtración, 4 balsas y 1 sumidero).

Mensualmente se recolectaron muestras para determinar la concentración de compuestos de nitrógeno en amoníaco con un medidor de rango medio de NH₃-N (Hanna 715, HANNA Instruments, Woonsocket, RI, EE. UU.) con reactivos HANNA HI 715A-0 y HI 715B-0, y nitratos NO₃-N con un fotómetro multiparámetro (Hanna C 214, HANNA Instruments, Woonsocket, RI, EE. UU.) con reactivos HANNA HI 94766-50. Los sólidos disueltos y suspendidos se determinaron bajo los procedimientos de la NMX-F-527-1992, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) siguió los de NMX-AA-028-SCFI-2001 con el método yodométrico y para los coliformes totales y fecales se tomó la metodología de la NMX-AA-042-SCFI-2015, todo esto se realizó en un laboratorio con el equipo y reactivos necesarios. Las muestras se tomaron a las 11 a.m. en tres puntos del sistema, a la salida del drenaje de los tanques de peces, a la salida del sistema de filtración y a la salida de las balsas hidropónicas y se trasladaron inmediatamente al laboratorio para su análisis.

5.7 Consumo de energía

Los componentes mecánicos que requieren suministro eléctrico incluyen una bomba de agua, un soplador de aire y un foco fluorescente, todos con demandas de energía variable y se ocuparon diariamente durante toda la investigación. Para la ventilación del invernadero se abrían dos puertas opuestas para generar mayor circulación del viento. En el caso de un corte de energía, la energía de respaldo fue suministrada por un generador de gasolina. No se instalaron ventiladores para generar corrientes de aire extras ni calentadores de agua.

El consumo de electricidad diario (kW*h día⁻¹), se estableció a partir de la potencia nominal de cada equipo (especificado por el fabricante) por la cantidad de horas que se utiliza al día. Los costos de energía se calcularon según las tarifas locales para electricidad de CFE, (2018).

5.8 Productividad

El concepto de Productividad del Agua (WP por sus siglas en inglés) indica la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida, resumido a $WP = \text{producción} / \text{agua consumida}$ (González-Robaina *et al.*, 2015). La producción se puede expresar en términos de peso de producto final, biomasa, dinero etc., y la cantidad de agua utilizada se da en valores de evapotranspiración, agua total entregada para la producción, agua recibida como riego más lluvia, etc., (Molden *et al.*, 2003; Pereira, 2012). Para esta investigación utilizaremos el volumen de agua consumida para obtener un kilogramo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y un kilogramo de lechuga (*Lactuca sativa*) en términos de kg m^{-3} .

5.9 Análisis económico

Con el fin de validar la viabilidad financiera del sistema acuapónico de pequeña escala que produce tilapia y lechuga, se realizó un análisis económico comparativo del Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), la Relación Beneficio Costo (RBC) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI). Se utilizaron las funciones financieras del programa Excel 2016 para analizar el flujo de efectivo que resulta de los costos por infraestructura, materiales, equipo y operación, y de los ingresos obtenidos por el valor de los rendimientos de la producción de peces y plantas, no se incluyó el precio de la tierra.

Los costos de operación incluyeron los gastos de mantenimiento, mano de obra, peces, alimento balanceado, plántulas, agua y energía eléctrica. En los costos fijos se consideró la depreciación de los activos fijos (invernadero y sistema acuapónico) con el método de depreciación lineal y no se consideró el valor de rescate. Se utilizó una tasa estándar de descuento del 10% y se estableció una vida útil mínima de cinco años del proyecto según recomendación de Pena, (2007), para proyectos productivos.

El Valor Actual Neto (VAN), deberá ser mayor que cero para aceptar el proyecto y está dado por la siguiente relación:

$$VAN = -P + \sum_{t=1}^n \frac{Y_t - C_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (2)$$

Donde:

P = inversión inicial en el año cero

Y_t = ingresos obtenidos en el año t ;

C_t = costo en el año t ;

I_0 = inversión en el año cero;

i = tasa de descuento

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero:

$$VAN = 0 \quad (3)$$

Para calcular el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) se estableció el mismo flujo de efectivo para todos los años.

$$PRI = \frac{I_0}{Y_t} \quad (4)$$

Donde:

I_0 = inversión inicial en el año cero

Y_t = ingresos obtenidos

La Relación Beneficio Costo (RBC) deberá ser mayor que 1 para aceptar el proyecto y se determina con la siguiente relación:

$$RBC = \frac{Y}{C} \quad (5)$$

Donde:

Y = ingresos actualizados

C = costos actualizados

El análisis de los mercados regionales formales e informales, mostraron que el mejor precio para la tilapia es viva y a pie de granja (Lango *et al.*, 2015). Se estableció el importe comercial de venta por kilogramo de lechuga y pescado en \$14 y \$71 respectivamente, utilizando los precios promedios del último periodo disponible (Julio de 2018) del Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) calculados y publicados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

VI. RESULTADOS

6.1 Agua

El sistema necesitó inicialmente un volumen de 8050 L para llenarse, y en total durante el experimento se utilizó un volumen de 982.1 m³. Al inicio, existieron problemas para mantener una carga hidráulica constante debido a un rápido flujo del agua recirculante lo que provocaba algunos desbordamientos y mayor demanda de agua para rellenar el sistema, por lo que fue necesario reducir la velocidad del fluido; para evitar taponamientos en el drenaje de los tanques de peces se hacía limpieza cada quince días de las tuberías con la apertura de una toma de drenaje exclusiva para este punto lo que permitía una salida directa del agua con mayor presión para una mejor remoción de suciedad adherida.

El periodo de evaluación (abril - julio) corresponde a la época del año con mayor temperatura y tasa de evaporación de la zona según el Servicio Meteorológico Nacional, de la estación 15170-Chapingo (Figura 6.1), por lo que los datos reportados reflejarían las máximas pérdidas de agua por evaporación y evapotranspiración, y sería la mejor temporada para producir tilapia sin necesidad de calentadores de agua. La reposición de agua será mayor en los meses más cálidos que en los más fríos.

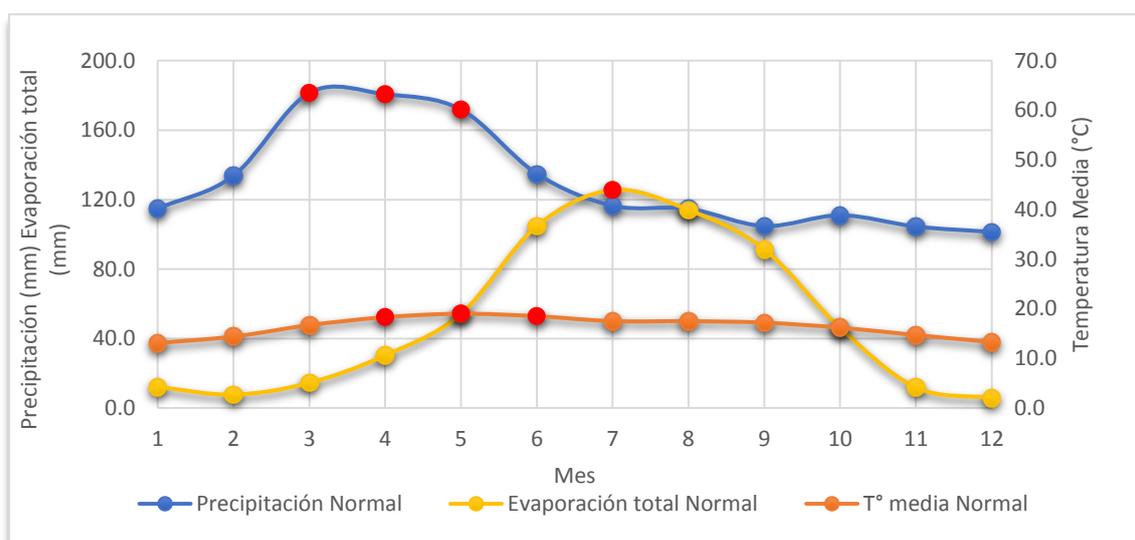


Figura 6.1. Normales climatológicas de la estación 15170-Chapingo sobre evaporación total, precipitación y temperatura media del periodo 1951-2010 (SMN, 2010).

6.1.1 Reposición de agua

Se utilizó un volumen total de 25.7 m³ para reponer las pérdidas de agua, esto significa una necesidad diaria promedio de 211 L y una tasa de recambio diaria promedio del 2.6 % situándola dentro del rango de 0.5 a 10% determinado para acuaponía por Rakocy *et al.*, (2006) y está por

debajo del rango de 5 a 20% de los sistemas de recirculación acuícola dado por Timmons *et al.* (2013).

Las pérdidas de agua (25.7 m³) del volumen total manejado durante el experimento (982.1 m³) correspondieron a evaporación en un 0.1%, evapotranspiración en un 0.4%, intercambios de agua en un 1.3%, limpieza en un 0.4% y otras pérdidas (derrames y salpicaduras no medidas) en un 0.5% (Figura 6.2). El total de las pérdidas medidas fue de 21.2 m³ y el volumen repuesto fue mayor al inicio por los derrames y fueron disminuyendo con el tiempo (Figura 6.3). La reposición se hacía según fuese necesario, diario o semanalmente. En el intercambio de agua se incluye el drenado de lodos que arrojó en promedio 25 L con 15 % de sólidos de pescado al día.

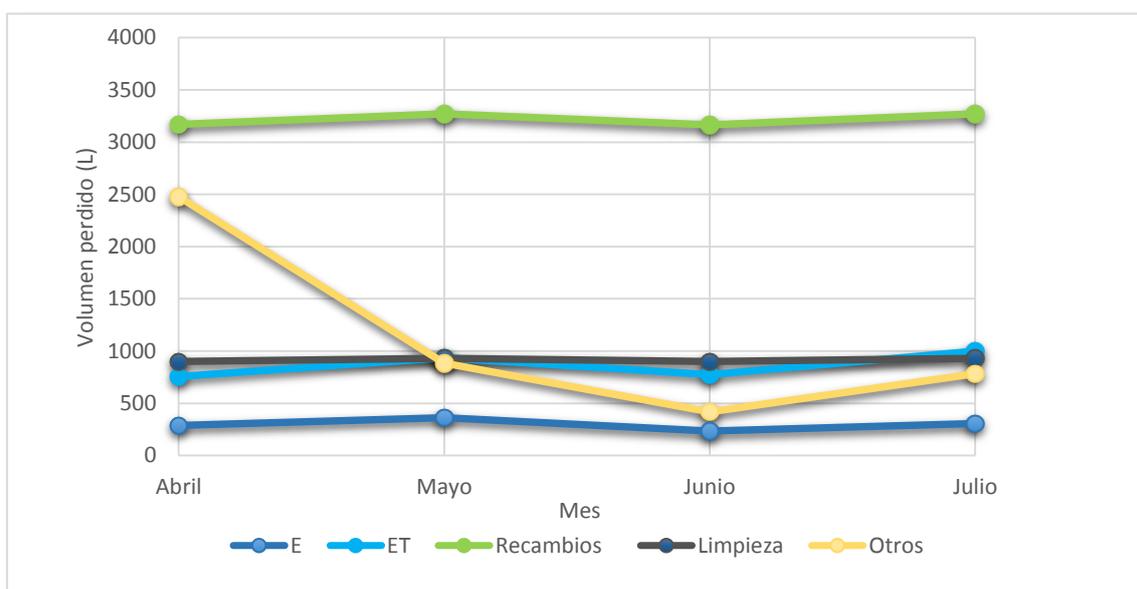


Figura 6.2. Relación del volumen perdido de agua por las diferentes causales.

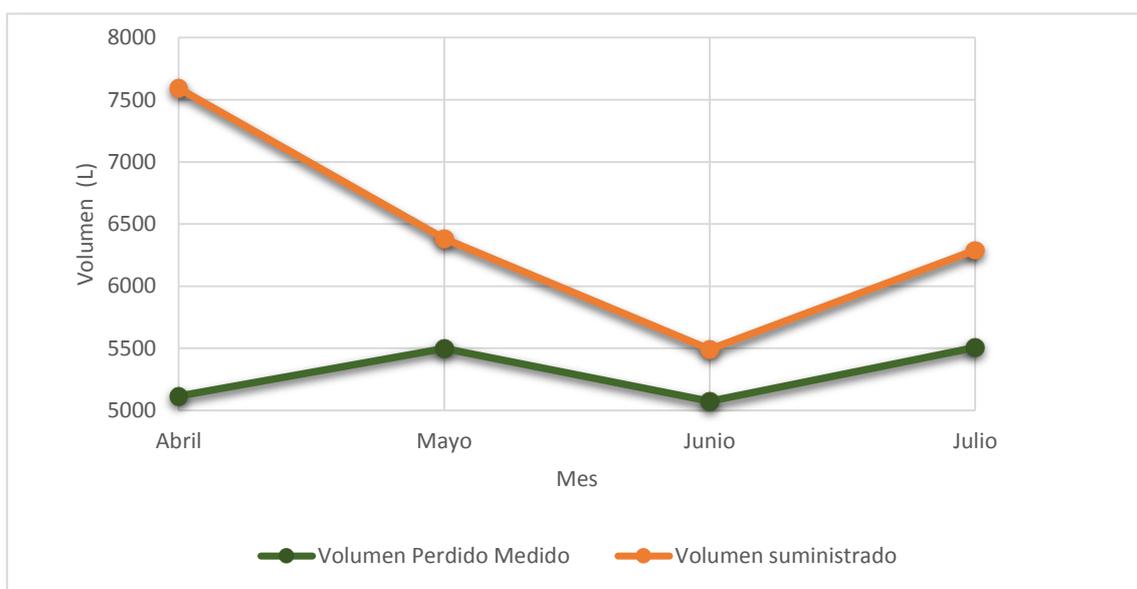


Figura 6.3. Relación del volumen perdido medido contra el volumen suministrado de agua.

6.1.2 Evaporación y evapotranspiración

La temperatura ambiental osciló en el rango de 13.7 y 46.1 °C con una media de 28.1 °C (Figura 6.4). El volumen total evaporado durante todo el periodo de experimentación fue de 1,190 L con un promedio de 9.75 L diarios y el volumen total evapotranspirado fue de 3,465 L con un promedio de 28.4 L diarios (Figura 6.5). La evaporación y evapotranspiración tuvieron una correlación media con un coeficiente de determinación de 0.6, pero entre la temperatura ambiental y su correlación con la evaporación y evapotranspiración fue tan solo de 0.2 y 0.15 respectivamente, lo cual podría deberse al periodo corto de evaluación y a que la tasa de evaporación depende de otros factores como: la disponibilidad de energía (radiación solar), la capacidad de la atmósfera de recibir humedad (poder evaporante de la atmósfera), la humedad atmosférica, entre otros, y la evapotranspiración depende también de las variables climáticas anteriores, de factores del cultivo como: tipo, variedad, etapa de desarrollo, entre otros y del manejo y condiciones ambientales como: salinidad, uso limitado de fertilizantes, densidad de cultivo, entre otros (Allen *et al.*, 2006). No se relacionó estrechamente la evaporación y evapotranspiración con la temperatura, así que es necesario medirlas directa e individualmente para tener certeza de su volumen perdido en el sistema, como se realizó en esta investigación, donde los datos fueron tomados diariamente.

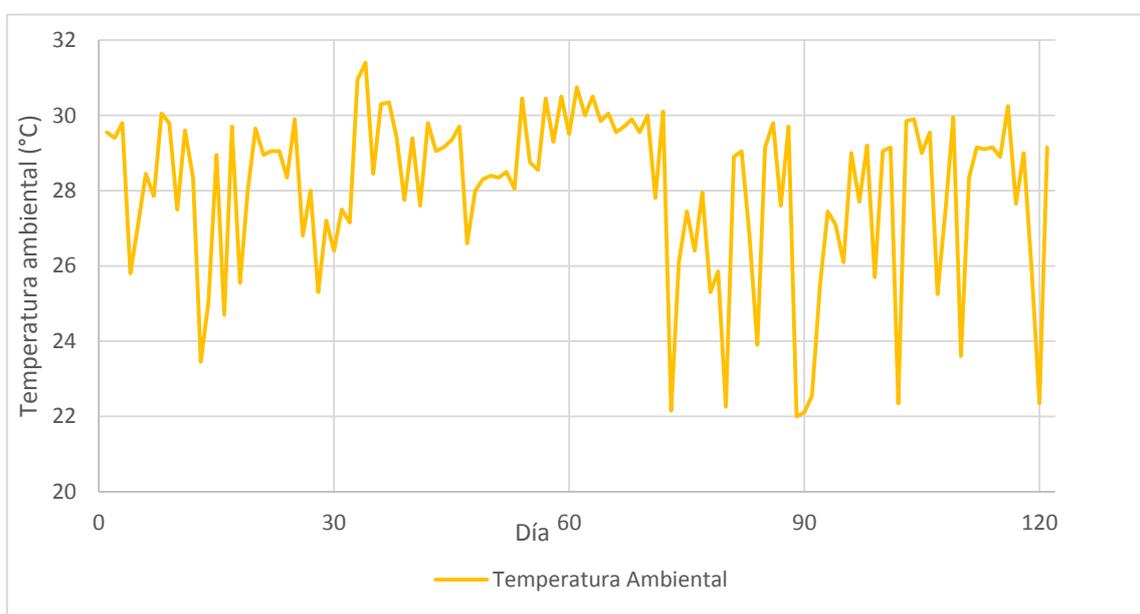


Figura 6.4. Promedio diario de temperatura ambiental.

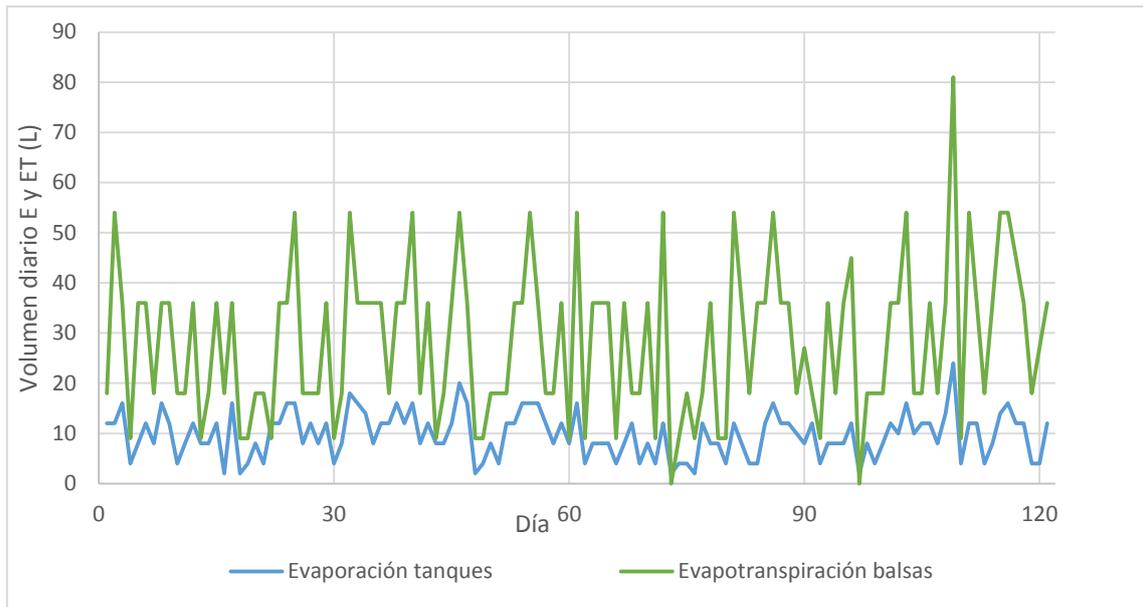


Figura 6.5. Promedio diario de evaporación en tanques y evapotranspiración en balsas.

6.1.3 Captación de agua de lluvia

La captación de agua de lluvia permite aprovechar el recurso natural para complementar o reemplazar nuestras pérdidas hídricas en el sistema. Según los cálculos del potencial de captación de agua de lluvia mensual con base en las normales climatológicas de la estación 15170-Chapingo, se determinó que éste siempre es mayor que las pérdidas totales mensuales registradas durante el experimento (Figura 6.6), lo que lo convierte a esta técnica en una opción ecológicamente sostenible a utilizar es los sistemas acuapónicos recirculantes de pequeña escala.

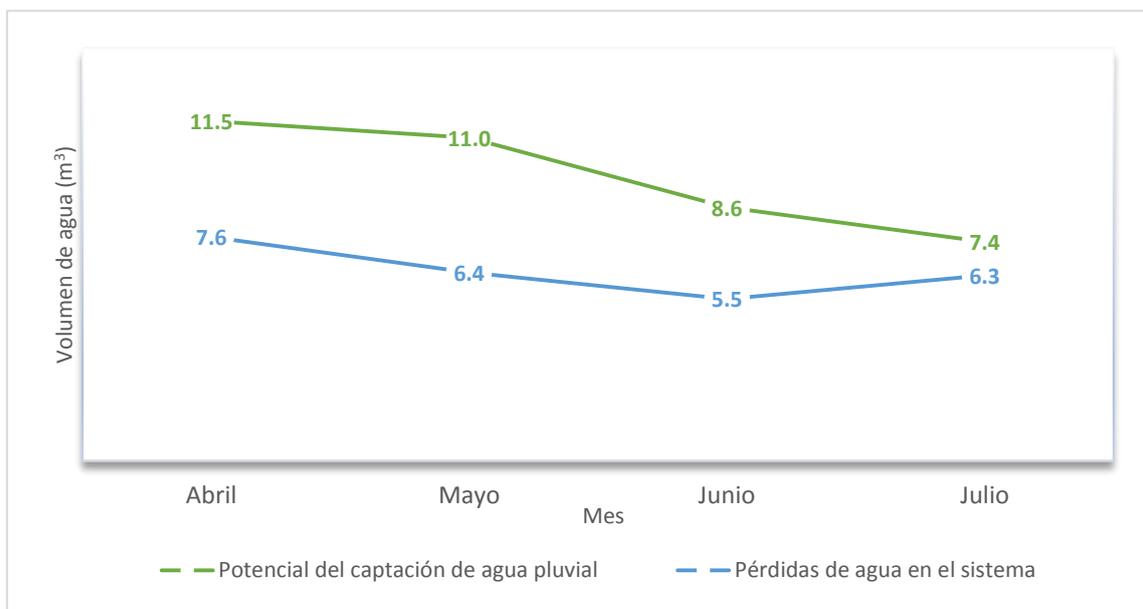


Figura 6.6. Relación mensual del volumen potencial de captación de agua de lluvia de la zona contra el volumen perdido de agua en el sistema, durante el periodo de análisis (abril-julio, 2018).

6.1.4 Calidad del agua

A lo largo de la investigación, se mantuvieron valores medios viables para los tres organismos según los rangos de Somerville, (2014) en las variables de: oxígeno disuelto (OD) de 7.4 mg L^{-1} con un rango de 4.5 a 8.9 mg L^{-1} (Figura 6.7), temperatura de $22.1 \text{ }^\circ\text{C}$ con un rango de 20.4 a $22.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 6.8) y pH de 7.3 con un rango de 6.9 a 7.7 (Figura 6.9).

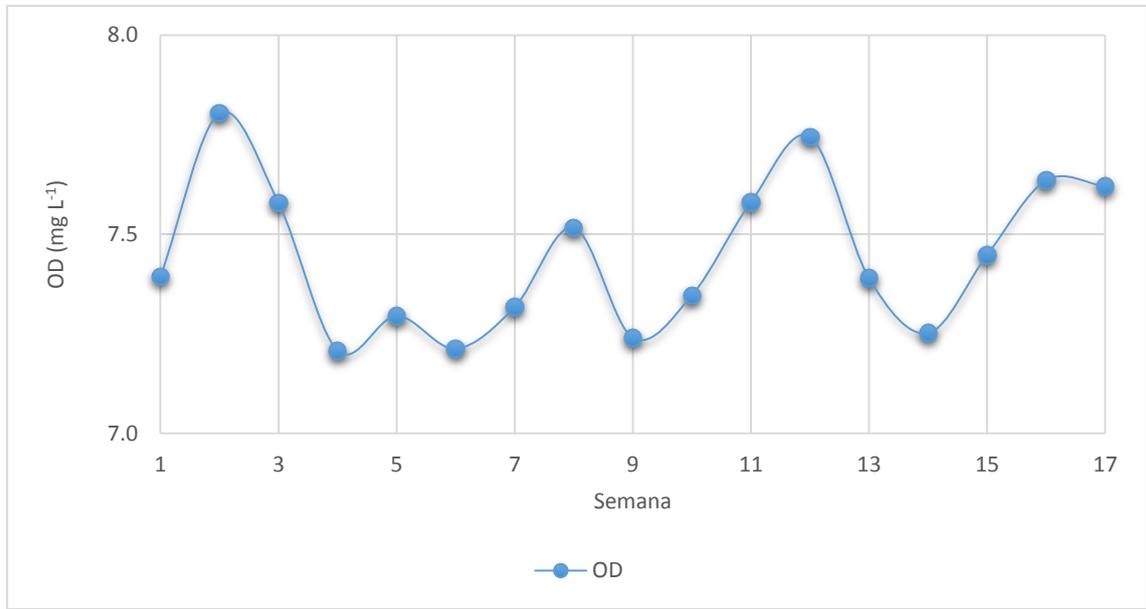


Figura 6.7. Promedio general semanal en el sistema de oxígeno disuelto (OD).

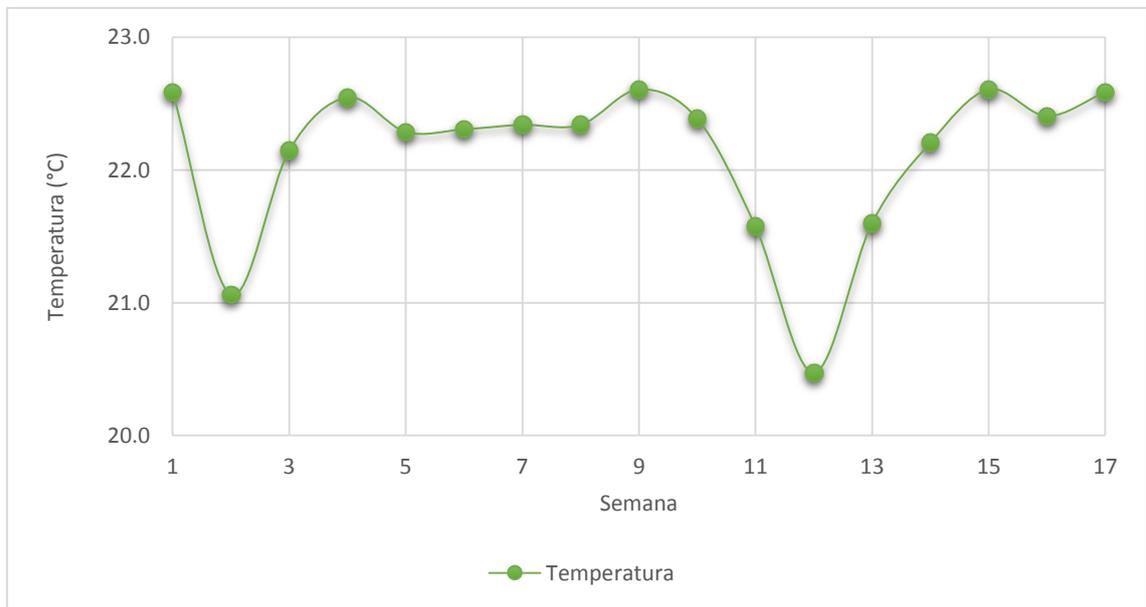


Figura 6.8. Promedio general semanal en el sistema de temperatura.

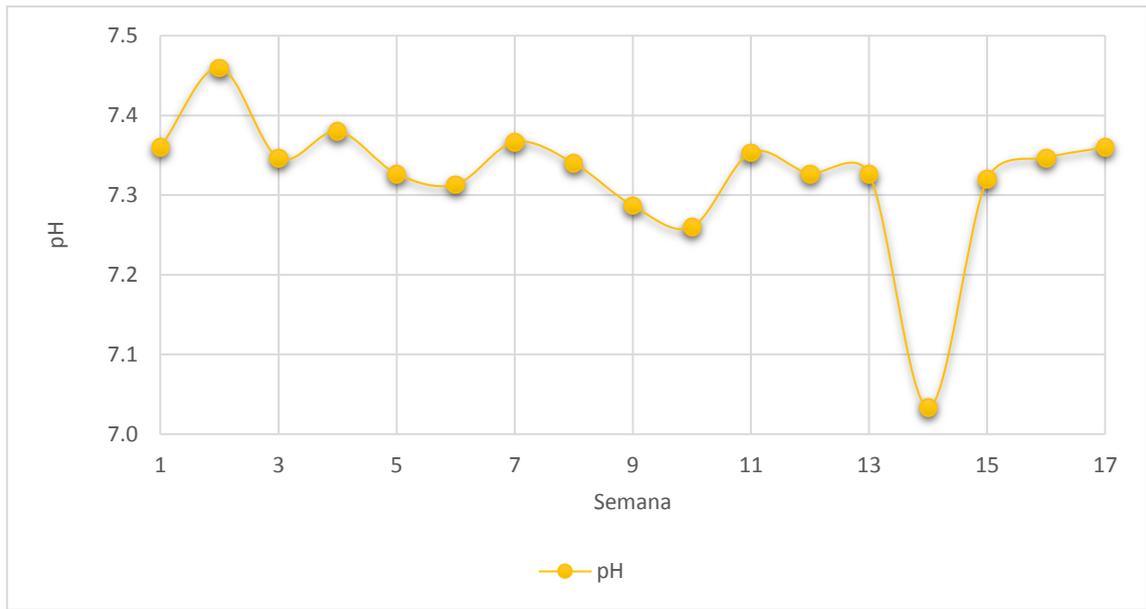


Figura 6.9. Promedio general semanal en el sistema de pH.

Las mediciones de oxígeno disuelto, temperatura y pH mostraron variaciones en cada componente del sistema ya que sus organismos residentes tenían las condiciones más afines a su requerimiento de desarrollo (Cuadro 6.1).

Cuadro 6.1 Promedio por componente del sistema de oxígeno disuelto (OD), temperatura y pH.

Variable	Tanques	Filtros anaeróbicos	Filtros aeróbicos	Balsas
OD (mg L ⁻¹)	8.0	6.2	7.9	7.6
T (°C)	22.1	22.1	22.2	22.1
pH	7.3	7.3	7.2	7.4

La concentración promedio de nitrógeno amoniacal no ionizado NH₃-N (amoníaco) fue de 0.028 mg L⁻¹ con variaciones mensuales que no excedieron el recomendado por Timmons *et al.* (2009) de 0.05 mg L⁻¹ (Figura 6.10), este ion tiene un efecto directo sobre el crecimiento de los peces y provoca su muerte por toxicidad si las concentraciones son altas.

La concentración promedio de nitrógeno en forma de nitrato NO₃-N fue de 29 mg L⁻¹ (Figura 6.11), conocer el suministro de este ion para el crecimiento de las lechugas es importante debido a que su acumulación excesiva en las hojas podría ser peligrosa para la salud humana ya que están relacionados con agentes cancerígenos (Byrne *et al.*, 2001), en este caso el resultado fue bajo ya que el rango requerido por las plantas es de 70 a 300 mg L⁻¹ (Nelson y Pade, 2008), lo que se reflejó en una pigmentación amarillenta de algunas lechugas y bajo crecimiento por lo que es necesario complementar este nutriente.

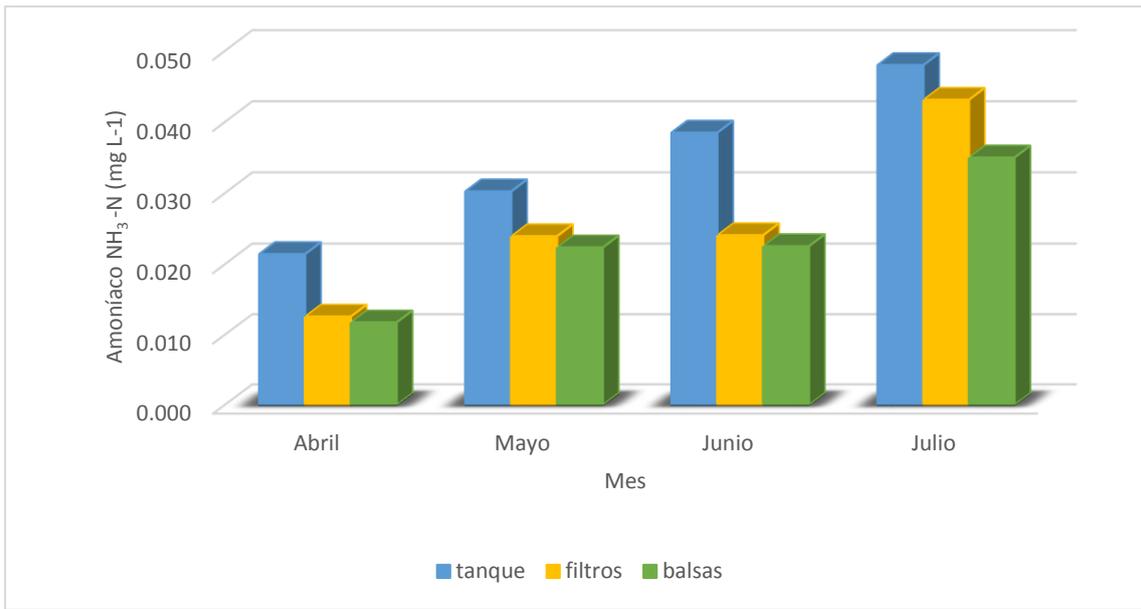


Figura 6.10. Concentración mensual de nitrógeno amoniacal no ionizado NH₃-N (amoníaco).

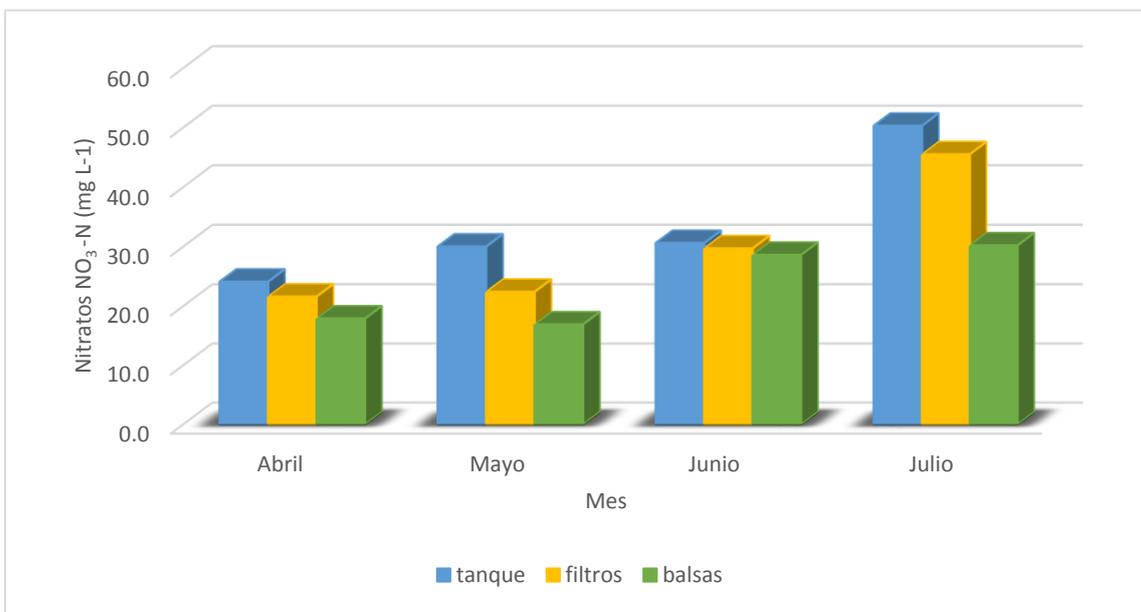


Figura 6.11. Concentración mensual de nitrógeno de nitrato NO₃-N.

La conductividad eléctrica pasó de 597 a 1024 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Figura 6.12) lo que indica que con el paso del tiempo los macro y micronutrientes presentes en el agua se fueron acumulando y aumentando en concentración, lo que pudo provocar su estancamiento y condiciones anóxicas en ciertos puntos del sistema.

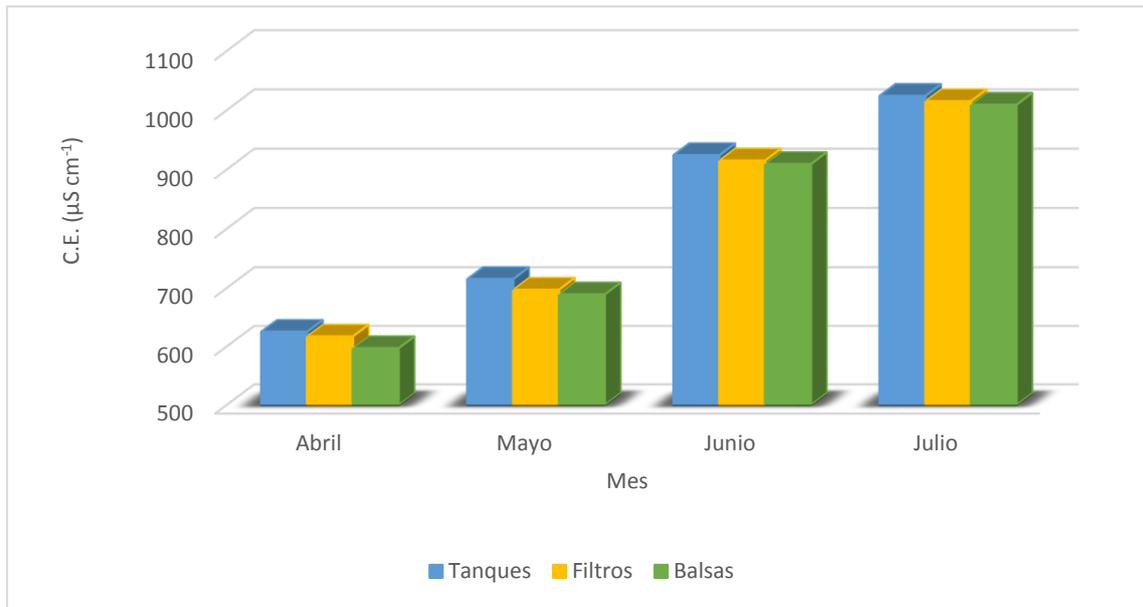


Figura 6.12. Conductividad eléctrica (C.E.) mensual

Al final del experimento, la cantidad promedio de Sólidos Suspendidos Totales (SST) fue de 15 mg L⁻¹, y de Sólidos Disueltos Totales (SDT) fue de 349 mg L⁻¹, ambos dentro del rango establecido por Timmons *et al.* (2009) de 10 a 80 mg L⁻¹ para SST y menor a 400 mg L⁻¹ para SDT. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en los tanques de peces fue de 7.1, en los filtros de 8.9 y en las balsas de 8.5 mg L⁻¹, todos por debajo de los 10 mg L⁻¹ mostrados normalmente en acuicultura, y no hubo presencia de coliformes totales ni fecales.

6.2 Energía

El único medio utilizado en el suministro de energía a los equipos para su funcionamiento fue la electricidad y su consumo estimado diario llegó a 11.46 kW h día⁻¹, donde el mayor consumidor fue el soplador de aire con un 84% del total diario (Cuadro 6.2). El consumo eléctrico total estimado en la investigación fue de 1,398.1 kWh.

Cuadro 6.2 Características de los componentes mecánicos del sistema y su demanda energética.

Equipo	Modelo y Marca	Consumo (W)	Uso diario (h día ⁻¹)	Consumo diario (Wh día ⁻¹)	Proporción del consumo diario (%)
Bomba de agua	4221, 6500L/H-4M, AquaSub.	65	24	1,560	14
Soplador de aire	SA-RB30-510, 0.5 HP, Sino-Aqua	400	24	9,600	84
Luz fluorescente	CFL mini-lynx espiral, Sylvania	25	12	300	3

A finales del 2017 en México se autorizaron las tarifas finales del suministro básico de estímulo acuícola para la energía eléctrica consumida en instalaciones acuícolas por los sujetos productivos

inscritos en el padrón de beneficiarios de energéticos agropecuarios, el precio se fijó en \$0.50 por kWh consumido, casi un 50% de descuento sobre las tarifas normales del país, lo que resulta en un costo total de energía eléctrica del proyecto de \$699.06.

6.3 Producción de tilapia

La tilapia ganó un total de 131 kg durante los 122 días del experimento (Cuadro 6.3) con un peso final promedio por organismo de 250 g y una tasa de mortalidad del 1%.

Cuadro 6.3. Incremento de biomasa por mes y factor de conversión alimenticia (FCA)

Mes →	0	1	2	3	4	FCA
Biomasa acumulada (kg)	30.25	62.64	95.45	128.46	160.95	1.33
Incremento de masa fresca (%)		1.07	0.52	0.35	0.25	

El factor de conversión alimenticia (FCA) fue de 1.33, mejor que el reportado por Rakocy *et al.* (2006) de 1.7 a 1.8 para tilapia criada en acuaponía, pero podría llegar a ser menor que 1 como el reportado por Alcarraz-Quispe *et al.*, (2018) quienes obtuvieron un 0.75 en acuicultura de recirculación productiva de lechuga (*Lactuca sativa L.*) con trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

El crecimiento diario fue de 1.07 gramos por día que fue bajo con relación al 2 reportado por Timmons *et al.* (2013) lo que podría deberse a la temperatura del agua ya que tiene una alta correlación con la tasa de crecimiento del pescado, a menor temperatura menor tasa de crecimiento, la temperatura óptima de crianza es de 28°C y en el sistema se mantuvo un promedio de 22.1 °C, por otra parte, las temperaturas altas afectan a las plantas, lo que requiere hacer un balance de las necesidades del productor señalando el sector al que se le quiere dar preferencia afectando lo menos posible la productividad de cada cultivo.

La cantidad de alimento suministrado en todo el experimento fue de 174 kg, inicialmente la ración diaria se administraba sobre el 2% de la biomasa total, pero se observó que los peces no consumían todo lo que podría ser ocasionado también por la baja temperatura ya que disminuían su actividad física y apetito, así que el porcentaje disminuyó hasta llegar al 1%. La biomasa total ganada creció linealmente mientras que el alimento suministrado tuvo ligeras variaciones (Figura 6.13).

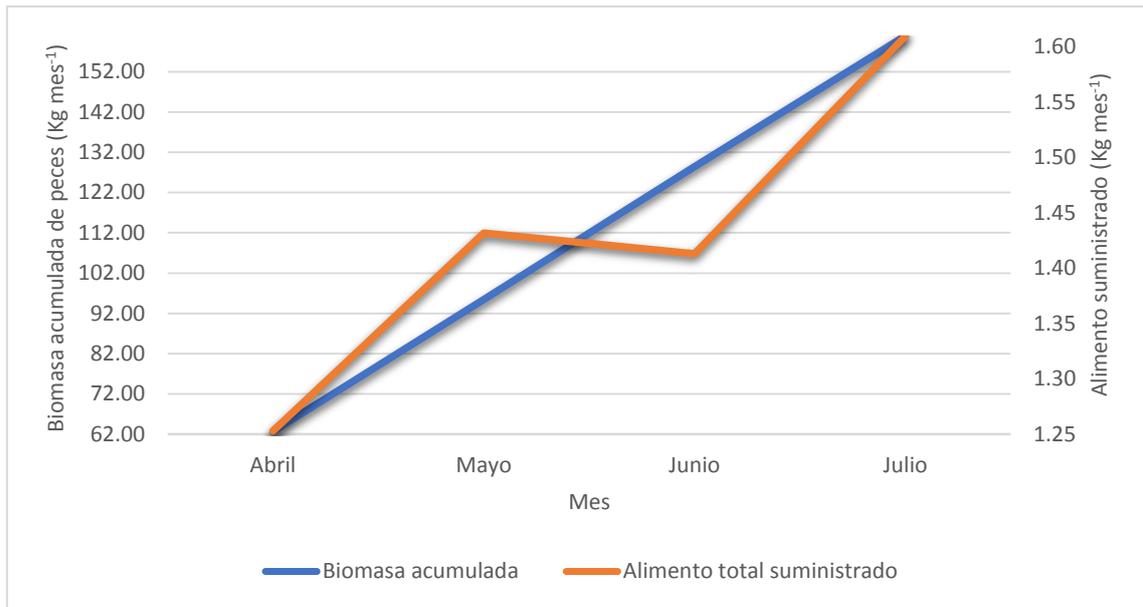


Figura 6.13. Biomasa acumulada y alimento suministrado en peces mensualmente.

6.4 Producción de lechuga

Se obtuvo una producción total de 64.4 kg de lechugas durante tres ciclos de 40 días cada uno, de abril a julio, con una densidad de 11 plantas por metro cuadrado, en total 200 plantas por ciclo.

Aunque en el primer ciclo la masa promedio de los brotes fue buena no se mantuvo en el tiempo (Figura 6.14) y el promedio durante todo el experimento fue de 111 g, menor a lo obtenido en sistemas hidropónicos tradicionales que reportan un promedio anual 144.6 g para ciclos completos de 30 días (Barbosa *et al.*, 2015) y menor de los 175.08 g obtenidos por Delaide *et al.* (2017) en ciclos de quince días para un sistema acuapónico de recirculación con lechuga de cabeza (*Lactuca sativa* var. Capitata cv. 'Grosse Blonde Paresseuse') y tilapia (*Oreochromis niloticus*); se atribuyen las altas cosechas a la calidad del agua y a las condiciones ambientales apropiadas, en otros casos se han registrado pesos de hasta 0.55 kg por planta en cosechas de 59 días de lechuga romana en hidroponía (Jacques-Hernández, C. *et al.*, 2005).

El rendimiento de brotes de lechugas promedio fue de 1.2 kg m⁻², debajo de lo reportado por Panatela *et al.* (2012) quienes obtuvieron un rendimiento de 2.71 kg m⁻² a los 21 días después del trasplante de lechugas romana cultivadas por la técnica de raíz flotante con residuos de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus* L.) con una densidad de peces de 8 kg m⁻², Lennard & Leonard (2006), reportaron 4.47 kg m⁻² de lechuga hoja de roble con la técnica raíz flotante empleando residuos de bacalao Murray a una densidad de 40 plantas m⁻²; Barbosa *et al.*, (2015) indicaron que se pueden alcanzar rendimientos mensuales de 3.4 kg m⁻² durante todo el año; el menor fue Delaide *et al.* (2017) de 2.4 kg m⁻² con una densidad de 14 plantas m⁻². La densidad de plantas es factor muy importante para el rendimiento ya que los que obtuvieron valores altos de este último,

en gran parte fue resultado de una mayor densidad de plantas por metro cuadrado en la configuración convencional de las balsas.

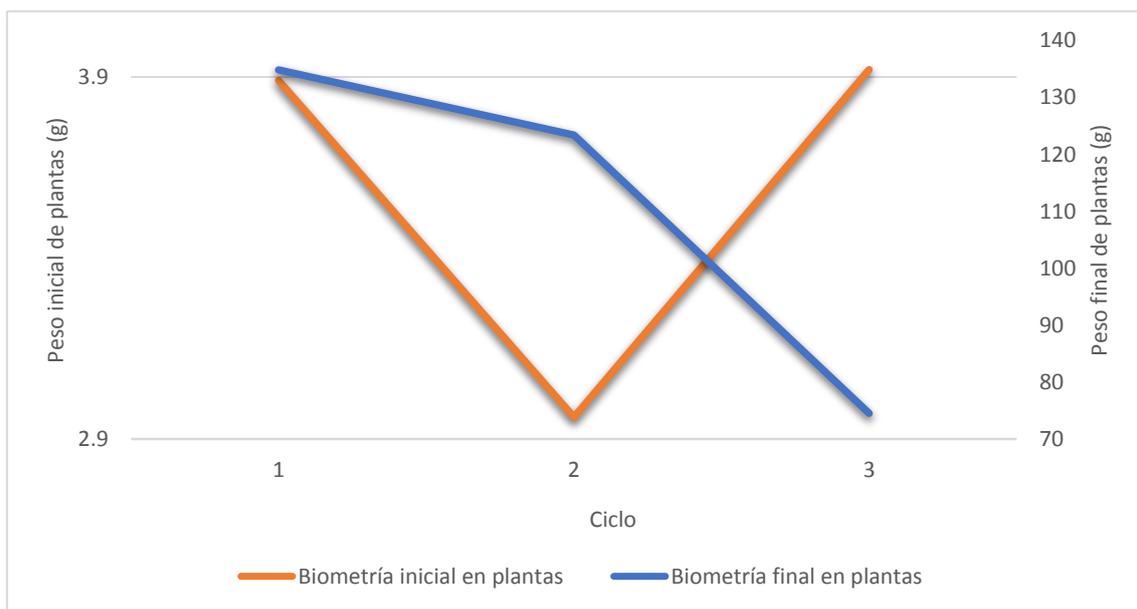


Figura 6.14. Peso inicial y final total en plantas por cada ciclo de cosecha.

En la primer y segunda cosecha se obtuvieron buenos datos de rendimiento del cultivo, pero en el último ciclo bajó (Cuadro 6.4), reflejándose en las biometrías y en el color amarillento de algunas plantas con un bajo rendimiento, lo que podría relacionarse con la disminución de nutrientes y plagas de pulgón (aphididae) que se controló sin uso de pesticidas, pero fue difícil su erradicación.

Cuadro 6.4. Biometrías de plantas y rendimientos por ciclo

Biomasa	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Promedio
Peso inicial por planta (g)	3.89	2.96	3.92	3.6
Peso inicial total (kg)	0.78	0.59	0.78	
Peso final por planta (g)	134.86	123.43	74.50	111
Peso final total (kg)	26.972	24.686	14.9	
Rendimiento (kg m⁻²)	1.48346	1.35773	0.8195	1.2

Delaide *et al.* (2017) observó que del 50 al 88 % de los nutrientes en el agua de acuaponía se pierden bajo una tasa de intercambio diario del 3.6%, debido en mayor proporción a las pérdidas por recambio de agua, pero algunos nutrientes podrían haber quedado atrapados en otra parte del sistema, como en las paredes de los tanques, el fondo de las balsas, en medios de filtración, en el biofilm, etc. En este sistema se perdió al día un promedio de 25 L con 15% de sólidos.

6.5 Productividad

Para determinar la productividad en kg m^{-3} se requieren los datos de consumo total de agua y energético en el sistema, y la biomasa total ganada en tilapia y lechuga, para el período de 122 días de experimento.

El volumen total repuesto fue de 25.7 m^3 de agua y el consumo total de energía eléctrica fue de 1,398 kWh. El peso neto ganado de pescado fue de 130.7 kg y de lechuga fue de 64.4 kg. Se tuvo un consumo de 197.03 L y 10.7 kWh por kilogramo de pescado, pero conjuntamente se producían 0.5 kg de lechuga por lo que se compartirían los consumos reduciéndose a la mitad para cada actividad productiva, lo que significa que para producir 1 kg de tilapia se requieren 98.52 L y proporcionalmente 1 kg de lechuga requiere 199.93 L. El consumo de energía para producir 1 kg de biomasa fue de 5.35 kWh en tilapia y de 10.85 kWh en lechuga con costos de \$2.67 y \$5.43 respectivamente, bajo un régimen tarifario tipo EA de CFE, (Cuadro 6.5). El consumo de energía en el sistema fue muy bajo debido al menor equipo manejado ya en otros experimentos donde se utilizaron calentadores y ventiladores, aumentó el consumo a 56 kWh para la producción de 1 kg de plantas, y a 159 kWh para la producción de 1 kg de peces según Love *et al.* (2015a).

Cuadro 6.5. Requerimiento promedio de agua, alimento suministrado y energía para producir 1 kilogramo de tilapia y 1 kg de lechuga en un sistema acuapónico de pequeña escala.

Variable	Unidad	Consumo para 1 kg de Tilapia	Consumo para 1 kg de Lechuga
Agua	(m^3)	0.1	0.2
Alimento suministrado	(kg)	1.33	2.71
Energía	(kWh)	5.35	10.85
Costo de energía	(\$)	2.67	5.43

Para producir 1 kg de tilapia y lechuga se suministraron 1.33 y 2.71 kg de alimento respectivamente. La eficiencia para convertir alimento en biomasa en la tilapia fue de 0.75 kg de peso fresco por cada kilogramo de alimento suministrado, mientras que en las plantas fue de 0.4 por el menor rendimiento en biomasa obtenido.

Con relación a la entrada diaria de alimento, la tasa de intercambio de agua fue de 148 L por cada kg de alimento agregado al día, que se encuentra en el rango de 100–1000L / kg de alimento / d de los sistemas de recirculación de acuicultura convencionales (Martins *et al.*, 2010). Estos resultados confirman que la acuaponía es un método eficiente en el uso de agua para la producción de plantas y peces.

En las plantas se obtuvo un consumo de agua por kg de lechuga de 0.2 m^3 mayor al 0.1 m^3 obtenido por Love *et al.* (2015a) pero menor al reportado por Delaide *et al.* (2017) de 0.24 m^3 .

El consumo de agua con respecto a cada unidad de peso en tilapia producida fue de 0.1 m³, que resulta buena por la buena densidad de peces manejada de 25 kg m⁻³; mientras que Brummet (2007) obtuvo un consumo de 3.3 m³; Love *et al.* (2015a) y Delaide *et al.* (2017) obtuvieron consumos de 0.292 y 0.278 m³ respectivamente para sistemas de pequeña escala, sólo Tokunaga *et al.* (2016) mantuvieron un consumo mínimo de 0.0027 m³ de agua, obteniendo la mejor productividad hídrica con su sistema intensivo. Individualmente se consumieron 24.5 L por cada pescado de aproximadamente 300 g.

Se consumieron 21.5 L por cada planta de lechuga de aproximadamente 100 g siendo mayor que en hidroponía ya que sus pérdidas de agua se dan solo por evaporación, evapotranspiración y limpieza, un ejemplo es lo reportado en hidroponía con un consumo de 13.8 L de agua por pieza de lechuga romana (Jacques-Hernández, C. *et al.*, 2005) manejando una densidad de 5.9 plantas m⁻² con peso de cosecha de 500 g; por otro lado el consumo de agua por planta de lechuga en riego rodado y por goteo es de 360 L y 252 L respectivamente lo que significa un enorme ahorro del recurso hídrico en acuaponía (Díaz-Espino L.F. *et al.*, 2011).

En términos de productividad, al final obtuvimos 10 kg de tilapia y 5 kg de lechuga por cada metro cúbico de agua empleado que, basado en los análisis anteriores, resulta un aumento en la productividad del agua comparada con otros sistemas de producción, pero podría aumentarse la productividad en las plantas incrementando la densidad por metro cuadrado.

6.6 Análisis económico

El costo total de los activos fijos para el sistema acuapónico de pequeña escala incluye, el costo del sistema acuapónico de traspatio, el costo de los equipos y el costo del invernadero, con un total de \$59,443.13 (Cuadro 6.6).

Cuadro 6.6. Costo de los activos fijos del sistema acuapónico de pequeña escala y vida útil considerada para la depreciación.

Concepto	Costo (\$)	Vida útil (años)
Sistema acuapónico	22,543.13	20
Invernadero	26,390.00	20
Equipos		
Bomba sumergible	1,000.00	6
Aireador	9,500.00	6

Los costos de operación incluyeron los gastos de mantenimiento, mano de obra, peces, alimento balanceado, plántulas, agua y energía eléctrica (Cuadro 6.7). Para la mano de obra se tabuló el precio de la jornada laboral de ocho horas en \$88.36 pesos (SAT, 2018), \$11.05 pesos por hora, y el tiempo requerido de trabajo al año fue de 360 horas. El costo de mantenimiento anual se obtuvo como porcentaje del 2% sobre el costo del invernadero más el 1% sobre el costo del sistema acuapónico y los equipos. Se fijaron 9 ciclos de 40 días para la cosecha de lechuga y se utilizaron en total 1,800 plántulas con un costo de \$0.40 por unidad; en el caso de tilapia, fueron 3 ciclos de 4 meses con una necesidad total de 1,590 crías con un costo de \$3 por organismo. Se requerirían anualmente 77 m³ de agua y 522 kg de alimento balanceado con un costo de \$13.36 por kilo. El consumo eléctrico anual en el sistema es de 4,183 kWh, con un costo de \$0.50 por kwh (CFE, 2018). Se hizo la suposición simplificada de que los costos de operación serían constantes durante todo el año. Las variables que más contribuyeron a los costos totales fueron la mano de obra, las crías de peces y el alimento balanceado.

Cuadro 6.7. Costo de Operación (C.O.) Anual del sistema acuapónico de pequeña escala

Concepto	Costo Anual (\$)
Mantenimiento	1,169
Mano de obra	4,029
Plántulas de Lechuga	720
Crías de Tilapia	4,770
Alimento balanceado	6,973
Agua	600
Electricidad	2,092
Costo de Producción	20,353

Los ingresos resultaron de la suposición de una venta total de tilapia y lechuga (Cuadro 6.8). Se obtuvieron cosechas por ciclo de 162 kg y 22.2 kg, en tilapia y lechuga, respectivamente. Se obtuvo un menor rendimiento en planta por la baja densidad por metro cuadrado y por la falta de nutrientes disponibles, lo que ocasionó afectaciones a los ingresos del proyecto.

Cuadro 6.8. Ingresos Anuales del sistema acuapónico de pequeña escala

Cultivo	Cantidad (kg)	Precio (\$)	Ingreso Anual (\$)
Tilapia	485	\$71	34,422
Lechuga	200	\$14	2,897
Total			37,319

El flujo neto de efectivo se dio por tres ciclos de tilapia y nueve de lechuga, considerando la inversión inicial, capital de trabajo, costos y ganancias obtenidas (Cuadro 6.9).

Cuadro 6.9. Flujo neto de efectivo del sistema acuapónico de pequeña escala

Año	Ingresos (\$)	Egresos (\$)	Flujo de Efectivo Neto (\$)
0	-	64,154.98	- 64,154.98
1	37,319.52	20,305.60	17,013.92
2	39,185.49	21,320.88	17,864.61
3	41,144.77	22,386.93	18,757.84
4	43,202.01	23,506.27	19,695.74
5	45,362.11	24,681.59	20,680.52
Total	206,213.90	176,356.25	29,857.65

La proyección financiera a 5 años del proyecto acuapónico de pequeña escala tiene un VAN estimado de \$6,462.83, siendo un valor positivo mayor a cero se considera que el proyecto es viable (Pena, 2007). En relación con la TIR se obtuvo un 13.74% lo que señala una rentabilidad mayor al costo del capital (10%), por lo que sería aprobado el proyecto desde el punto de vista de negocio y no sólo de autoconsumo. En cuanto a la RBC nos dio un valor de 1.04 lo que significa que por cada peso invertido en el proyecto se tiene un excedente y recuperación de 4 centavos. El periodo de recuperación de la inversión es de 4 años.

Estos resultados fueron buenos pero menores a los obtenidos por Iriarte-Rodríguez *et al.*, (2017) en la evaluación de tres réplicas del cultivo acuapónico compuesto del policultivo animal de tilapia con caracol y de cultivos vegetales de tomate cherry, chile dulce y cebollín donde los resultados promedio de la VAN fueron de \$11,364, la TIR de 35% y la RBC de 1.19.

Los ingresos en nuestro sistema mejorarían al incrementar la densidad de plantas y de peces, es decir, manejar un sistema más intensivo.

VII. CONCLUSIONES

En términos de consumo de agua diario en el sistema acuapónico de pequeña escala se concluye que fue eficiente, al reducir el volumen a un 2.6% del volumen total del sistema ya que las pérdidas fueron mínimas en evaporación, evapotranspiración, limpieza, recambios, derrames y salpicaduras.

Las condiciones físicas en la calidad del agua (temperatura, pH y oxígeno disuelto) se mantuvieron dentro de los rangos óptimos para la producción acuícola, pero en los componentes químicos se tuvo baja presencia de nitratos lo que vio afectado el desarrollo de la planta, por lo que se buscaría complementar la nutrición vegetal, también se incrementaría la densidad de plantas por metro cuadrado para obtener mayores rendimientos, aun así la productividad del agua en acuaponía aumenta con relación a las técnicas de cultivo tradicional sobre suelo.

La ración alimenticia de los peces fue optimizada según las mediciones biométricas lo que disminuyó el desperdicio de comida, dando un buen factor de conversión alimenticia y buen crecimiento de los peces en el periodo de investigación, lo que aumentó la productividad del agua.

El proyecto muestra resultados positivos en el análisis financiero, pero estos números podrían mejorar al incrementar la densidad de peces y plantas en el sistema, ya que con la cantidad de oxígeno disuelto se permite sostener más organismos por litro, y la superficie en balsas permite incrementar el número de plantas por metro cuadrado.

VIII. LITERATURA CITADA

- Alcarraz-Quispe, E.W., Tapia-Figueroa, M.L., Bustamante-Pezoa, A., Tapia-Laguna, O., Wacyk-Gonzales, J. y Escalona-Contreras, V.H. 2018. Evaluación de la concentración de nitratos, calidad microbiológica y funcional en lechuga (*Lactuca sativa L.*) cultivadas en los sistemas acuapónico e hidropónico. Perú. Anales Científicos. 79(1): 101 – 110.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO, Roma. 298 pp.
- Baca-Urbina, G. 2007. Fundamentos de ingeniería económica cuarta edición. Mc Graw Hill. México. 593: 83-115.
- Barbosa, G.L., Gadelha, F.D.A., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G.M. y Halden, R.U. 2015. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. Estados Unidos. International Journal of Environmental Research and Public Health. 12(6): 6879-6891.
- Brown-Manrique, O., Gallardo-Ballat, Y., Navas, F., Companioni-Sanderson, J. y Pérez-Duarte, W. 2009. Estimación del volumen potencial de agua pluvial con fines agropecuarios. Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 18(1): 55-58.
- Byrne, C., Maher, M.J., Hennerty, M.J., Mahon, M.J. y Walshe, P.A. 2001. Reducing the nitrate content of protected lettuce. Irlanda. End of Project Reports. Teagasc. 1-21 pp.
- Delaide, B., Delhay, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H. y Jijakli, M.H. 2017. Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. Bélgica. Aquacultural Engineering. 78: 130–139.
- Díaz-Espino, L.F., Arévalo-Valenzuela, A., García-Leaños, L. y Bujanos-Muñiz, R. 2011. Fertilización en el cultivo de lechuga en Guanajuato. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Primera edición. México, Folleto 3. 5-19 pp.
- Diver, S. 2006. Aquaponics-Integration of hydroponics with aquaculture. ATTRA- National Sustainable Agriculture Information Service. 1-28.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2016. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. Roma. 2-9 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2018. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 - Meeting the sustainable development goals. Rome 11-16 pp.

- Gallego-Alarcón, I. y García-Pulido, D. 2017. Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: percolador-columna de arena. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1): 81-93.
- González-Robaina, F., López-Seijas, T. y Herrera-Puebla, J. 2015. Indicadores de productividad del agua por cultivos y técnicas de riego en Cuba. *Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 24(4): 57-63.
- Halwart, M., Martínez-Espinosa, M. y Schöckler, A. 2000. Los pequeños estanques, grandes integradores de la producción agropecuaria y la cría de peces. FAO, Roma 2-4 pp.
- Hu, Z., Lee, J.W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A.C. y Khanal, S.K. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology*. 188: 92-8.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Consultado 30-09-2018 en <http://www.beta.inegi.org.mx/app/preciospromedio/>
- Iriarte-Rodríguez, F.V., Mendoza-Carranza, M., Gómez-Álvarez, R., Wal, J.C. y Perera-García, M.A. 2017. Viabilidad técnica-financiera de un Sistema Acuapónico de Baja Intensidad (SABI) para la seguridad alimentaria familiar. *Academia Journals. Aplicación del Saber: Casos y Experiencias*. 3: 1429- 1434.
- Jaques-Hernández, C. y Hernández, J.L. 2005. Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). México. *Naturaleza y Desarrollo*. 3(1): 11-17.
- Lango-Reynoso, V., Reta-Mendiola, J. y Asiain-Hoyos, A. 2015. Estrategia local de comercialización de tilapia viva (*Oreochromis sp.*) en Veracruz México ante la competencia internacional. *Agroproductividad*. 8(3): 33-37
- Lemoalle, J. 2008. Water productivity of aquatic systems. Final report for the Project: Improved fisheries productivity and management in tropical reservoirs. Program on Water and Food and the WorldFish Center. Malaysia. 32 pp.
- Lewis, W. M., Yopp, J. H., Jr. Schramm, H. L. y Brandenburg, A. M. 1978. Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. *Transactions of the American Fisheries Society*. 107: 92-99.
- Li, K. 1992. Rice-fish farming in China: past, present and future. Lightfoot, C.A. Costa-Pierce, V.R. Rice-fish research and development in Asia. Conferencia ICLARM. 24: 17-26.
- Lennard W.A. y Leonard B.V. 2004. A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponic test system. *Aquaculture International*. 12: 539-53.

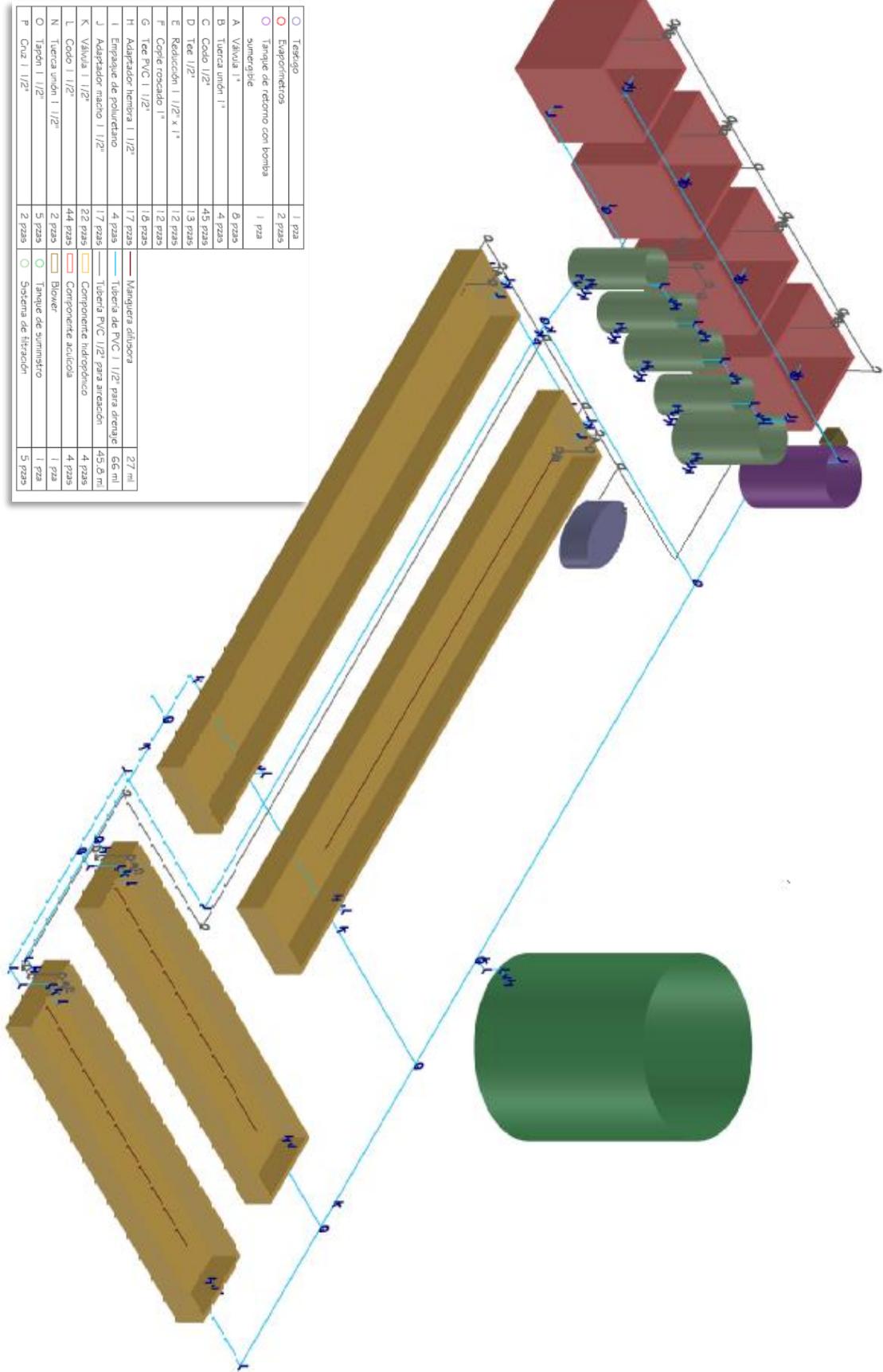
- Lennard W.A. y Leonard B.V. 2006. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. *Aquaculture International*. 14: 539–550.
- Love, D.C., Uhl, M.S. y Genello L. 2015a. Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering*. 68: 19–27
- Love, D.C., Fry, J.P., Li Ximin Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K. y Thompson, K.E. 2015b. Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. *Aquaculture*. 435: 67–74.
- Love, D.C. y Tokunaga K. 2016. Water use and economics of small-scale commercial aquaponics. *Global Water Forum*. 22(1): 1-7.
- Martins, C.I.M., Eding, E.H., Verdegem, M.C.J., Heinsbroek, L.T.N., Schneider, O., Blancheton, J.P., d’Orbcastel, E.R. y Verreth, J.A.J. 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: a perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*. 43(3): 83–93
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P. y Borin, M. 2018. Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*. 13: 1-11.
- McMurtry, M.R., Sanders, D.C., Cure, J.D., Hodson, R.G., Haning, B.C. y St Amand, E.C. 1997. Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. *J. World Aquaculture Society*. 28: 420-8.
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R. y Makin, I. 2003. A water productivity framework for understanding and action. In Kijne, J. W., Barker, R. y Molden. D. *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. Wallingford, UK: CABI, Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 1-18 pp.
- Naegel, L. 1997. Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture*. 10(1): 17-24.
- Nelson, R.L. y Pade, J. S. 2008. *Aquaponic food production*. Nelson and Pade, Inc., Montello, WI, USA. 1-218 pp.
- Pena, V. J. 2007. *Plan de negocios para el establecimiento de una empresa acuícola*. Montevideo. DINARA - FAO. 25 pp.
- Pereira, L.S., Cordery, I. y Iacovides, I. 2012. “Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving”. *Agricultural Water Management*. 108: 39– 51.

- Quilleré, I., Marie, D., Roux, D., Gosse, F. y Morot-Gaudry, J.F. 1993. An artificial productive ecosystem based on a fish/bacteria/plant association. 1. Design and management. *Agricultural, ecosystems and environment*. 47(1): 13-30.
- Rakocy, J.E., Hargreaves, J. A. y Bailey, D. S. 1993. Nutrient accumulation in a recirculating aquaculture system integrated with hydroponic vegetable production. 148-158 in J.K. Wang, editor. *Proceedings of the Aquaculture Engineering Conference on Techniques for Modern Aquaculture*. Aquacultural Engineering Group. American Society of Agricultural Engineers.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P. y Losordo, T. M. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. *Southern Regional Aquaculture Center*. 454: 1-16.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Consultado 01-10-2018 en <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex>
- Servicio de Administración Tributaria (SAT) Consultado 01-10-2018 en http://omawww.sat.gob.mx/informacion_fiscal/tablas_indicadores/Paginas/salarios_minimos.aspx
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., y Lovatelli, A. 2014. Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 262 pp.
- Sreejariya, P., Raynaud, T., Dabbadie, L. y Yakupitiyage, A. 2016. Effect of water recirculation duration and shading on lettuce (*Lactuca sativa*) growth and leaf nitrate content in a commercial aquaponic system. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 16: 311-319.
- Timmons M.B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W. Summerfelt, S. T. y Vinci B. J. 2002. *Recirculating aquaculture systems*. Second edition. NRAC Publication. 959 pp.
- Timmons, M.B., Ebeling, J.M. y Piedrahita, R.H. 2009. *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Cayuga Aqua Ventures. Ithaca, USA. 959 pp.
- Timmons, M.B. y Ebeling, J.M. 2013. *Recirculating Aquaculture*. Ithaca Publishing Company LLC. Tercera edición. USA. 788 pp.
- Tokunaga, K., Tamaru, C., Ako, H. y Leung, P. 2015. Economics of Small-scale Commercial Aquaponics in Hawai'i. *Journal of the World Aquaculture Society*. 46(1): 20-32
- Turcios, A.E. y Papenbrock, J. 2014. Sustainable treatment of aquaculture effluents - what can we learn from the past for the future?. *Sustainability*. 6(2): 836-856.

Verdegem, J., Bosma, R. H. y Verreth, J. A. J. 2006. Reducing Water Use for Animal Production through Aquaculture. *International Journal of Water Resources Development*. 22: 101-113.

Watten, B. J. y Busch R. L. 1984. Tropical production of tilapia (*Sarotherodon aurea*) and tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in a small-scale recirculating water system. *Aquaculture*. 41: 271-283.

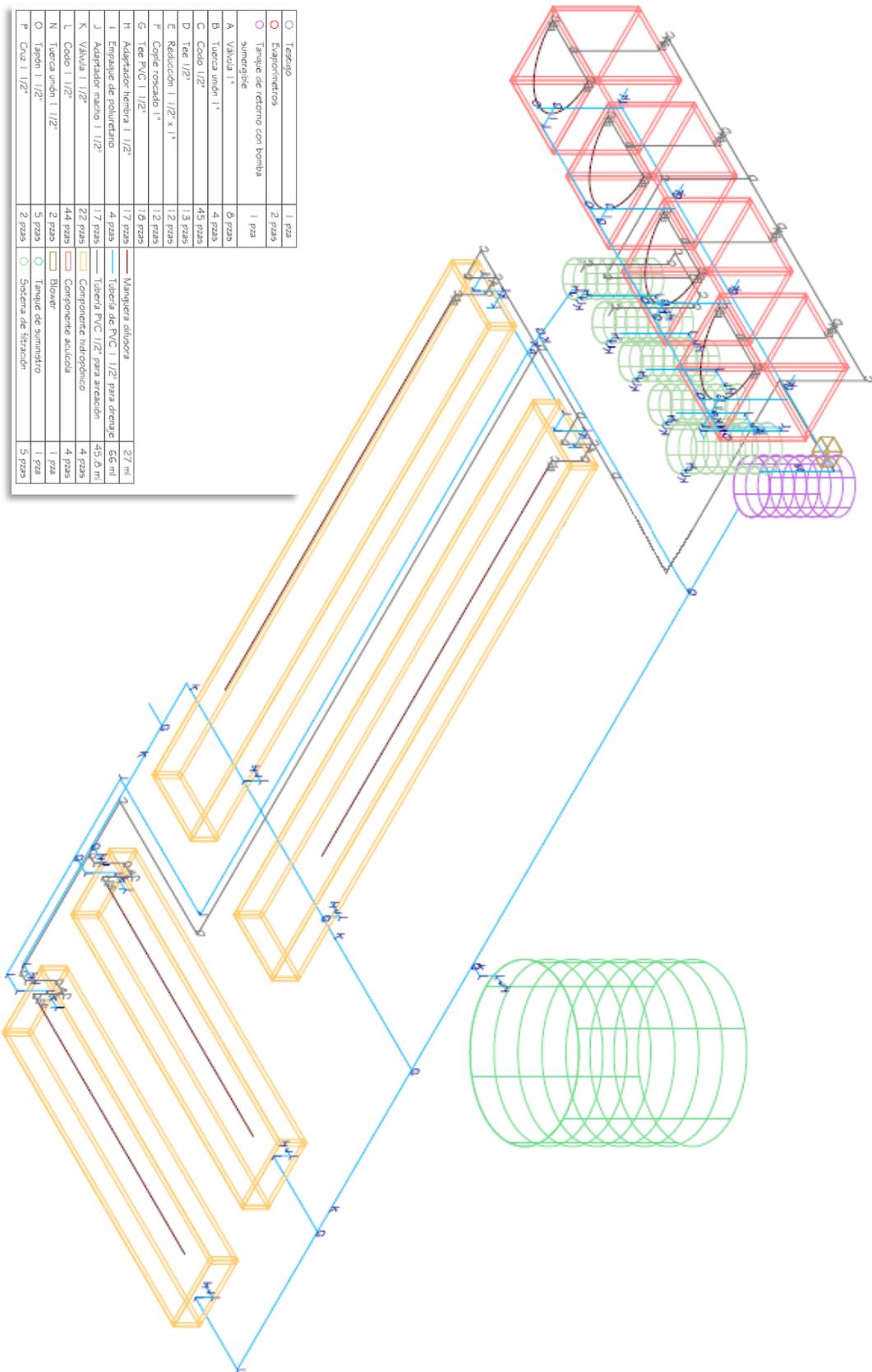
ANEXO A. ISOMÉTRICO DEL SISTEMA ACUAPÓNICO



○ Teórico	1 pza		
○ Evaporímetros	2 pzas		
○ Tanque de retorno con bomba sumergible	1 pza		
A. Valvula 1"	8 pzas		
B. Tuerca unión 1"	4 pzas		
C. Codo 1/2"	45 pzas		
D. Tee 1/2"	13 pzas		
E. Reducción 1 1/2" x 1"	12 pzas		
F. Corde roscaado 1"	12 pzas		
G. Tee PVC 1 1/2"	18 pzas		
H. Adaptador hembra 1 1/2"	17 pzas		
J. Empaque de poluretano	4 pzas		
J. Adaptador macho 1 1/2"	17 pzas		
K. Valvula 1 1/2"	32 pzas		
L. Codo 1 1/2"	44 pzas		
N. Tuerca unión 1 1/2"	2 pzas		
O. Tapón 1 1/2"	5 pzas		
P. Cruz 1 1/2"	2 pzas		

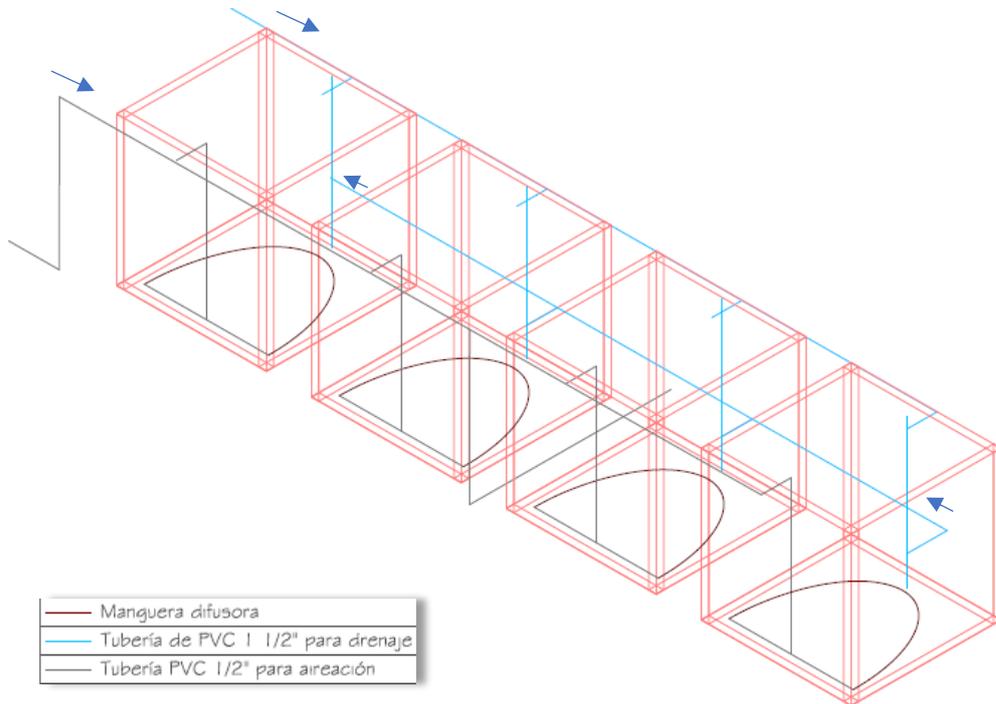
—	Manguera difusora	27' m
—	Tubería de PVC 1 1/2" para drenaje	66' m
—	Tubería PVC 1/2" para aireación	45' 8" m
—	Componente hidrónico	4 pzas
—	Componente acústico	4 pzas
—	Blower	1 pza
—	Tanque de suministro	1 pza
—	Sistema de filtración	5 pzas

ANEXO B. LÍNEAS DE AGUA, AIRE Y MATERIAL UTILIZADO EN EL SISTEMA ACUAPÓNICO

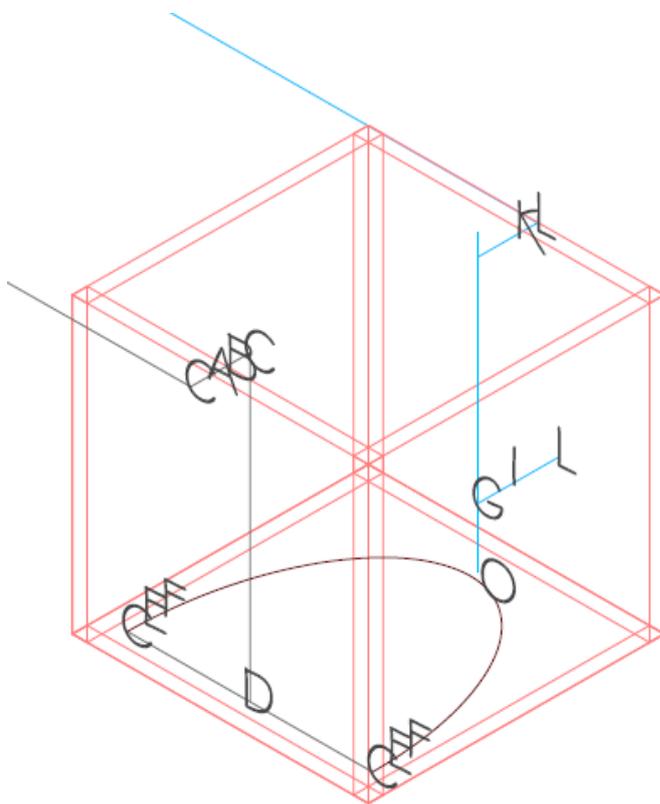


○	Tesajo	1 pza	○	Manejera alisora	27 ml
○	Evaporímetros	2 pzas	○	Tubería de PVC 1/2" para drenaje	66 ml
○	Tanque de retorno con bomba sumergible	1 pza	○	Tubería PVC 1/2" para arriación	45.8 ml
A	Valvula 1"	8 pzas	○	Componente hidrófónico	4 pzas
B	Tuerca unión 1"	4 pzas	○	Componente acústica	4 pzas
C	Codo 1/2"	45 pzas	○	Blower	1 pza
D	Tee 1/2"	13 pzas	○	Tanque de suministro	1 pza
E	Reducción 1 1/2" x 1"	12 pzas	○	Sistema de filtración	5 pzas
F	Copie roscado 1"	12 pzas			
G	Tee PVC 1 1/2"	16 pzas			
H	Adaptador hembra 1 1/2"	17 pzas			
I	Empuje de poluretano	4 pzas			
J	Adaptador macho 1 1/2"	17 pzas			
K	Valvula 1 1/2"	22 pzas			
L	Codo 1 1/2"	44 pzas			
N	Tuerca unión 1 1/2"	2 pzas			
O	Tapón 1 1/2"	5 pzas			
P	Cruz 1 1/2"	2 pzas			

ANEXO C. LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE DEL SISTEMA ACUÍCOLA

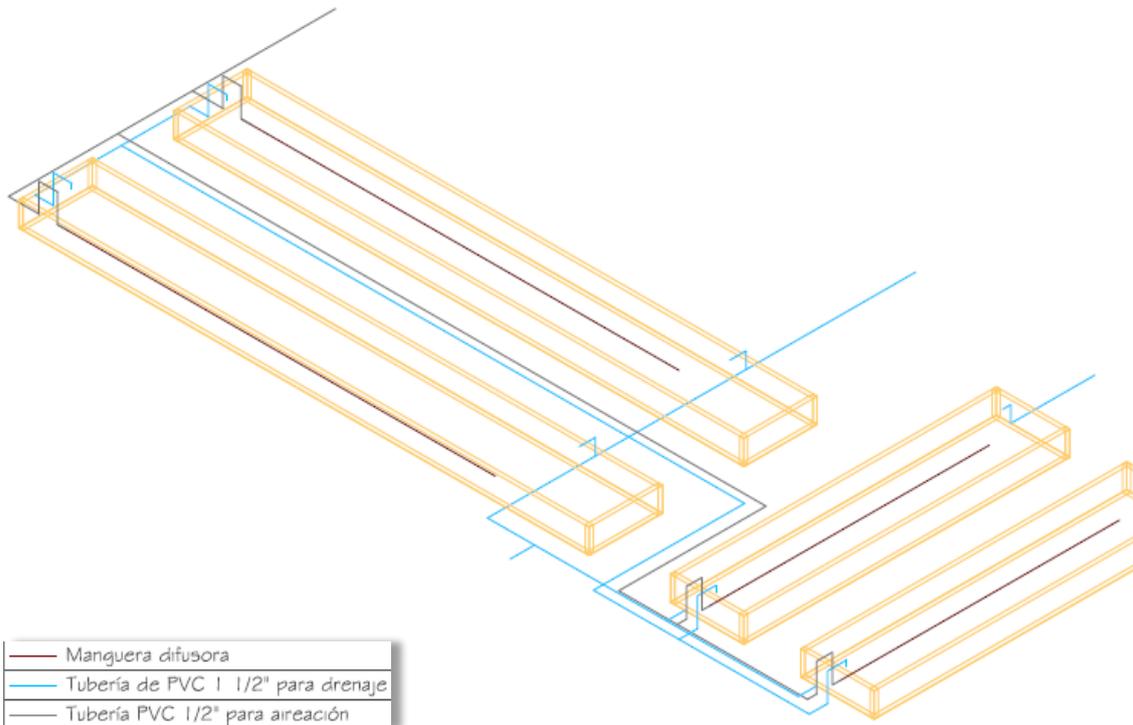


ANEXO D. MATERIAL UTILIZADO EN LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE POR TANQUE ACUÍCOLA

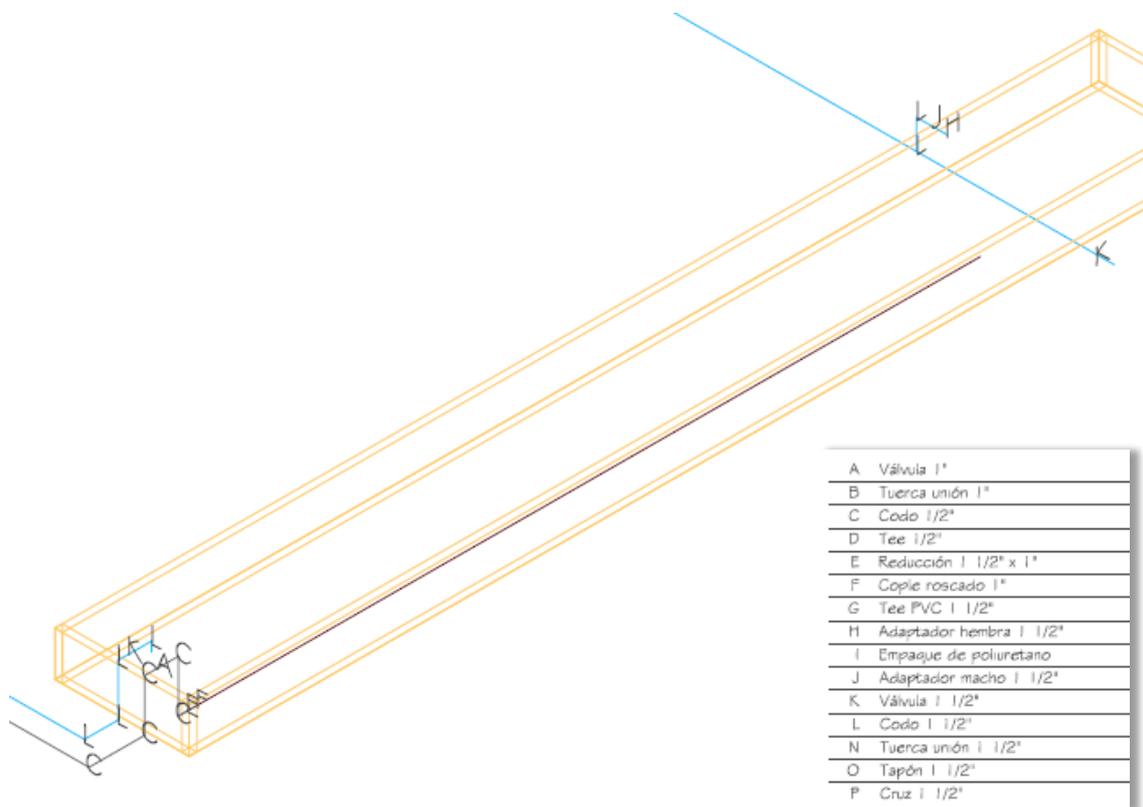


A	Válvula 1"
B	Tuerca unión 1"
C	Codo 1/2"
D	Tee 1/2"
E	Reducción 1/2" x 1"
F	Cople roscado 1"
G	Tee PVC 1/2"
H	Adaptador hembra 1/2"
I	Empaque de poliuretano
J	Adaptador macho 1/2"
K	Válvula 1/2"
L	Codo 1/2"
N	Tuerca unión 1/2"
O	Tapón 1/2"
P	Cruz 1/2"

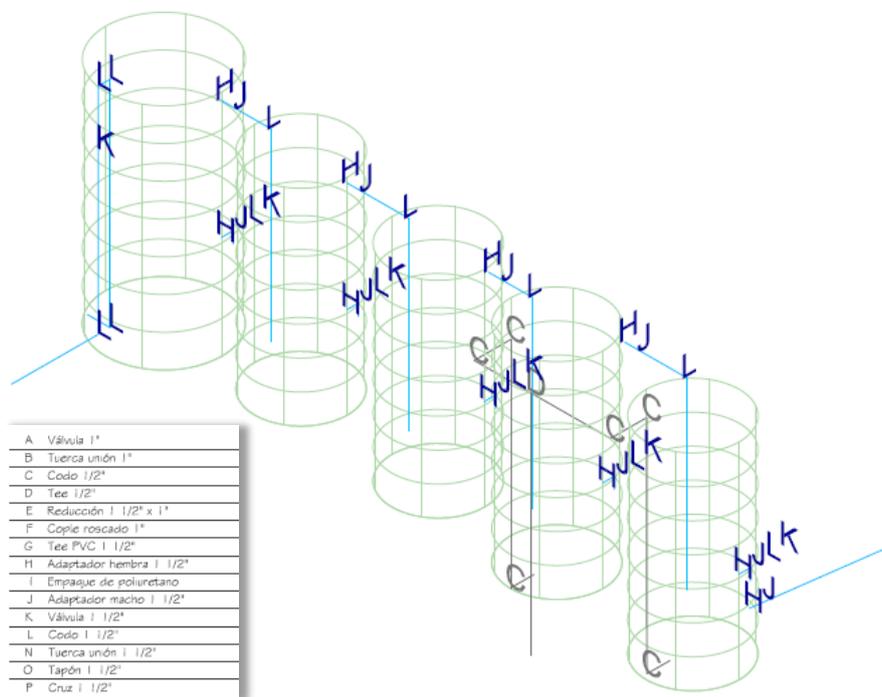
ANEXO E. LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE DEL SISTEMA HIDROPÓNICO



ANEXO F. MATERIAL UTILIZADO EN LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE POR BALSA HIDROPÓNICA



ANEXO G. MATERIAL UTILIZADO EN LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE EN FILTROS



ANEXO H. MATERIAL DE PVC UTILIZADO EN EL SISTEMA

MATERIAL PVC	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Total
Tubería de PVC 1 1/2" para drenaje	66	ml	\$ 19.00	\$ 1,254.00
Tubería de PVC 1" para aireación	45.8	tramo	\$ 15.00	\$ 687.00
Válvula 1"	8	pzas	\$ 44.00	\$ 352.00
Tuerca unión 1"	4	pzas	\$ 40.00	\$ 160.00
Codo 1" x 90°	45	pzas	\$ 6.00	\$ 270.00
Tee 1"	13	pzas	\$ 8.00	\$ 104.00
Reducción 1" x 3/4"	12	pzas	\$ 10.00	\$ 120.00
Cople roscado 3/4"	12	pzas	\$ 2.00	\$ 24.00
Cople unión 1 1/2"	3	pzas	\$ 15.00	\$ 45.00
Cople hidráulico de 1/2"	3	pzas	\$ 4.31	\$ 12.93
Tee PVC 1 1/2"	18	pzas	\$ 14.00	\$ 252.00
Adaptador hembra 1 1/2"	17	pzas	\$ 13.50	\$ 229.50
Empaque de poliuretano	13	pzas	\$ 10.00	\$ 130.00
Adaptador macho 1 1/2"	17	pzas	\$ 8.00	\$ 136.00
Válvula esfera PVC 1 1/2"	22	pzas	\$ 81.00	\$ 1,782.00
Codo 1 1/2"	44	pzas	\$ 10.50	\$ 462.00
Tuerca unión 1 1/2"	2	pzas	\$ 193.00	\$ 386.00
Tapón hembra 1 1/2"	5	pzas	\$ 7.00	\$ 35.00
Cruz 1 1/2"	2	pzas	\$ 35.85	\$ 71.70
Silicón	8	pzas	\$ 56.00	\$ 448.00
Total				\$ 6,513.13

ANEXO I. NMX-AA-028-SCFI-2001

ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES (DBO5) Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-028-1981)

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5): Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos.

Esta norma mexicana establece el método de análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

El método se basa en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C.

La determinación del OD inicial se realiza por medio del método yodométrico de azida modificado, de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-012-SCF.

Después de 5 días de incubación determinar el OD en las diluciones de la muestra, en los controles y en los blancos. La medición del OD debe ser realizada inmediatamente después de destapar la botella de Winkler, para evitar la absorción de oxígeno del aire por la muestra.

Para calcular la DBO₅ cuando no se utiliza inóculo ni diluciones se utiliza la fórmula:

$$DBO_5(mg/L) = OD_i mg/L - OD_5 mg/L$$

Donde

$OD_i mg/L$ = oxígeno disuelto inicial

$OD_5 mg/L$ = oxígeno disuelto al quinto día

Para calcular la DBO₅ se utiliza una dilución se utiliza la fórmula:

$$DBO_5(mg/L) = \frac{OD_i mg/L - OD_5 mg/L}{\% \text{ de dilución expresado en decimales}}$$

ANEXO J. NMX-F-527-1992

ALIMENTOS. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES, SÓLIDOS DISUELTOS Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN AGUA.

El término "sólidos" se refiere a la materia sólida suspendida o disuelta en agua. Los sólidos pueden alterar el sabor del agua y provocar una reacción fisiológica desagradable momentánea en el consumidor.

Esta Norma Mexicana establece el método para la determinación de sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos en suspensión en agua.

La determinación del contenido de sólidos totales se basa en la evaporación total de una muestra de agua. Separando por filtración el material suspendido, se puede conocer por diferencia, el contenido de este último y del material disuelto.

PROCEDIMIENTO

Sólidos totales: Agitar la muestra para eliminar el gas. Tomar 50 ml con pipeta volumétrica y colocarlos en una cápsula de porcelana puesta a peso constante y pesada previamente. Evaporar la muestra en baño maría y secar en estufa a 110°C hasta peso constante. Al término de esto, pesar la cápsula con los sólidos.

Sólidos disueltos: Tomar 50 ml de la muestra previamente agitada y filtrada a través de papel Whatman No. 41. Colocarlos en una cápsula de porcelana puesta a peso constante y pesada previamente. Evaporar la muestra en baño maría y secar en estufa a 110°C. y a 180°C en caso de agua mineral, hasta peso constante. Al término de esto, pesar la cápsula con los sólidos.

Sólidos en suspensión: La diferencia entre los sólidos totales y los sólidos disueltos nos proporcionan una estimación de los sólidos en suspensión existentes.

EXPRESIÓN DE RESULTADOS

El contenido de sólidos en la muestra se calcula con las siguientes fórmulas:

$$mg/l \text{ Sólidos Totales} = \frac{\text{peso del residuo en g} \times 10^6}{ml \text{ de muestra}}$$

$$mg/l \text{ Sólidos disueltos} = \frac{\text{peso del residuo en g} \times 10^6}{ml \text{ de muestra}}$$

$$mg/l \text{ Sólidos en suspensión} = mg/l \text{ Sólidos totales} - mg/l \text{ Sólidos disueltos}$$

ANEXO K. ÁLBUM FOTOGRÁFICO

Sistema acuapónico



Sistema acuícola



Sistema hidropónico





Sistema de filtración



Clarificador



Filtrador de finos



Mineralizador



Nitrificador



Desgasificador



Tanque de suministro y nivel piezométrico



Biometría de peces



Biometría de plantas



Análisis de laboratorio

