



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

---

**CAMPUS CÓRDOBA**

**POSTGRADO EN INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE**

**FLUJO DE NUTRIMENTOS Y DINÁMICA DE  
CRECIMIENTO EN SISTEMAS  
DE PRODUCCIÓN ACUAPÓNICOS**

**NADIA ELIZABETH ORTEGA LÓPEZ**

**T E S I S**

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

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ**

2016

La presente tesis titulada: “Flujo de nutrimentos y dinámica de crecimiento en sistemas de producción acuapónicos” realizada por la alumna: **Nadia Elizabeth Ortega López**, 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 EN  
INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE**

**CONSEJO PARTICULAR**

**CONSEJERO:**



**DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ-MERINO**

**DIRECTORA:**




**DRA. LIBIA IRIS TREJO-TÉLLEZ**

**ASESOR:**



**DR. JUAN SALAZAR-ORTIZ**

**ASESOR:**



**DR. ALEJANDRO ALONSO-LÓPEZ**

Amatlán de los Reyes, Veracruz. Marzo del 2016

## FLUJO DE NUTRIMENTOS Y DINÁMICA DE CRECIMIENTO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ACUAPÓNICOS

Nadia Elizabeth Ortega-López, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2016

La acuaponía es la integración de dos tipos de cultivo: la acuicultura (cultivo de animales acuáticos), con hidroponía (cultivo de plantas sin suelo), en sistemas ya sea cerrados o abiertos. Las tilapias (*Oreochromis niloticus*) son los peces más utilizados en acuicultura, y el agua que se utiliza para la producción de estos peces es rica en nutrientes, que pueden ser aprovechados para la producción de hortalizas, lo que permite un uso más eficiente del agua. En la presente investigación se evaluaron nueve tratamientos que derivaron del uso de tres diferentes tipos de sustratos: 100% de tezontle, 100% de composta y una mezcla de tezontle con composta en proporción 1:1 (v/v) y tres diferentes tipos de agua de riego: 100% acuícola con tilapias, 100% potable y una mezcla de agua acuícola y potable en proporción 1:1 (v/v), en indicadores de crecimiento y nutrición de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivar *Saladette*, en la Microrregión de Atención Prioritaria (MAP) Zona Centro del Campus Córdoba, ubicada en el municipio de Cuitláhuac, Veracruz (18° 05' LN, 96° 42' LO, y 380 msnm). Las tilapias se crecieron durante 116 días, en tanto que las plantas de tomate se crecieron por 85 días. Los resultados de este trabajo permiten concluir que el mayor crecimiento de las plantas de tomate se tuvo en composta, regadas con el agua proveniente del cultivo de peces; por lo que esta agua funciona como un complemento a la nutrición de las plantas. Así también este trabajo permite confirmar la viabilidad de establecer sistemas acuapónicos en pequeña escala y a bajo costo que hacen posible un uso más eficiente de los insumos y una reducción de los impactos negativos de la acuicultura en el ambiente. Se recomienda evaluar este tipo de sistema con especies vegetales menos demandantes en nutrientes que el tomate, considerando aspectos de inocuidad en los productos a obtener.

**Palabras clave:** Acuaponía, *Lycopersicum esculentum*, *Oreochromis niloticus*

# NUTRIENT FLUX AND GROWTH DINAMICS IN AQUAPONIC PRODUCTION SYSTEMS

Nadia Elizabeth Ortega-López, M. Sc.

Colegio de Postgraduados, 2016

Aquaponics is the integration of two kinds of cultures: aquaculture (production of aquatic animals) with hydroponics (plant crops in soilless cultures), in either open or close systems. Tilapias (*Oreochromis niloticus*) are the fishes mostly used for these purposes; and the water used for the production of these fishes can be further reutilized for the production of horticultural crops, which contributes to a more efficient use of water resources. In this study we evaluated nine treatments derived from the test of three kinds of substrates: 100% tezontle, 100% compost and a mixture of tezontle with compost in proportions of 1:1 (v/v) and three kinds of irrigation water: 100% derived from aquaculture with tilapias, 100% tap water and a mixture of aquaculture of tilapias and tap water in proportions 1:1 (v/v), on indicators of growth and nutrient contents in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette, in the Priority Attention Microregion (MAP, for its Spanish acronym) Zona Centro of Campus Córdoba, situated in the municipality of Cuitláhuac, Veracruz (18° 05' NL, 96° 42' WL, y 380 masl). Tilapias grew for 116 days, whereas tomato plants did so for 85 days. Results from this study demonstrate that the highest growth of tomato plants was observed in those plants grown in compost, irrigated with water provides by the aquaculture system, which indicates that this sort of water serves as a complement for tomato plant nutrition. As well, this research confirms the feasibility of establishing this kinds of aquaponic systems at low scale and low costs, which makes it possible to use agricultural supplies such as substrates, water and fertilizers in a more efficient manner, reducing the negative impacts of aquaculture to the environment. We strongly encourage evaluating this kind of systems with horticultural species which demand less amounts of fertilizers in comparison to tomato, considering aspects of food safety and innocuousness.

**Keywords:** Aquaponics, *Lycopersicum esculentum*, *Oreochromis niloticus*

## DEDICATORIA

A **Dios** por permitirme seguir adelante, por ser mi guía en todo momento. Por darme salud y cuidar de los míos, y por permitirme hacer realidad este sueño.

Los sueños son metas que se alcanzan con perseverancia, esfuerzo y dedicación. “Si puedes soñarlo puedes hacerlo” (Walt Disney).

Todas las etapas de la vida nos dejan distintas enseñanzas y sin importar cuanto ha costado, he llegado al final de cada nueva meta. ¡Los límites los pones tú!

Agradezco el apoyo incondicional de las personas que creyeron en mí, que me apoyaron y que han estado siempre conmigo. Algunas desde mi corazón siempre presentes. Y sin importar donde estén les comparto esta dedicatoria.

“Por muy larga que sea la tormenta, el sol siempre vuelve a brillar entre las nubes” (Khalil Gibran).

### **A mis padres: J. Ricardo Ortega Manzanet y Graciela López López**

Gracias por creer en mí, y enseñarme que el éxito y la superación se alcanzan con perseverancia y esfuerzo día a día, les agradezco invaluablemente todas sus palabras, y su apoyo incondicional, gracias por orientarme siempre, y por todo el esfuerzo que han hecho por mi hermana y por mí, por iluminar mi camino, por ser mis guardianes, por corregirme. Por tomarme de la mano y jamás soltarme, por levantarme y guiarme de la forma correcta siempre. Y por dejarme seguir mis sueños sin ninguna limitante. Gracias por ser los pilares de mi vida. ¡Los amo y admiro; y me siento orgullosa de tenerlos como papás son los mejores! “Deje caminar a su hijo por donde su estrella le llame” (Miguel de Cervantes Saavedra).

### **A mi hermana: Ana Thalía Ortega López**

No hay mejor hermana en el mundo que TÚ! Eres mi persona favorita, mi compañera de vida. Mi alma gemela, mi cómplice y mejor amiga. ¡Contigo todo es perfecto! Te amo, gracias por todas las horas de locura, de paciencia, de momentos extraordinarios. No tengo palabras para agradecer todo el amor y apoyo que me das. No imagino mi vida sin tí. Por siempre juntas ¡Eres la mejor, y me siento muy orgullosa de tí! "Si yo pudiera darte una cosa en la vida, me gustaría darte la capacidad de verte a ti mismo a través de mis ojos. Solo entonces te darás cuenta de lo especial que eres para mí" (Frida Kahlo).

### **A mi prima: Karen Lizett Neri López**

Gracias por todos los momentos que hemos compartido y todos los que quedan por vivir, por todas aquellas pláticas, consejos, risas y enseñanzas que siempre nos das. Y sobre todo por nunca dejarnos solas. Siempre estaremos juntas, Dios nos dio la fortuna de tenerte a nuestro lado y te amamos como la hermana que siempre has sido para nosotras. Eres una de mis personas favoritas. Te amo y me siento muy orgullosa de tí. "Duda que sean fuego las estrellas, duda que el sol se mueva, duda que la verdad sea mentira pero no dudes jamás de que te amo" (William Shakespeare).

### **A Jesús Alí López G.**

Gracias por todo tu amor, y apoyo incondicional. Siempre has estado conmigo cuando te necesito. Gracias por no dejarme caer, y estar conmigo en las buenas y en las malas. Agradezco que seas parte de mi vida, tu paciencia, comprensión y respeto. Te amo y has sido un pilar importante en mi vida, gracias por dejarme compartir este logro a tu lado y por todos los momentos tan increíbles que hemos vivido juntos. "Amar no es mirarse el uno al otro; es mirar juntos en la misma dirección" (Antoine de Saint-Exupery).

### **A mi abuelita: Julita Manzanet Güereña †**

Leí una frase muy cierta “Si puedo recordarte siempre estarás conmigo” y es verdad, tú siempre estás conmigo. Doy gracias a Dios por tener un ángel como tú a mi lado abuelita, te amo y te extraño. Te llevamos siempre en nuestros corazones, gracias por todo el amor tan sincero que nos brindaste, los consejos y lecciones que me dejaste. Chula aunque ya no estás; tú toque y esencia se quedó en cada uno de los que te amamos. “Ni la ausencia ni el tiempo son nada cuando se ama” (Alfred de Musset).

### **A mi familia: Fam. Ortega Manzanet y Fam. López López**

Agradezco infinitamente todos los buenos momentos que hemos vivido y compartido juntos, gracias por su comprensión y apoyo. Los quiero mucho. Abuelitos: Trinidad López y José Lopéz, Julia Manzanet † y Benjamín Ortega †. Tías y tíos: María Elena, Lilia, María de Jesús, Yola, Ángeles, Luisa, Rosa, Vero, Obdulia, Beatriz, Marisela, Amalia; Gerardo, Armando, Guillermo, José, Benjamín, Alejandro, Rodolfo †, Mario, Gustavo, Marco, José Luis. Primos y primas: Armando Eduardo, Mario Daniel, Luis Ángel, Iván, Luis Ernesto, Miguel, Gustavo, Rodolfo, Karen, Mariana, Verónica, Alejandra, Julia. Y a mis sobrinos: Víctor Adolfo, Víctor Alejandro, María de Jesús, Rodolfo, Santiago e Ian. “A veces podemos pasarnos años sin vivir en absoluto, y de pronto toda nuestra vida se concentra en un solo instante” (Oscar Wilde).

### **A la Doctora Libia I. Trejo-Téllez:**

Doctora preciosa le doy infinitas gracias por todas sus atenciones y por estar siempre disponible para ayudarnos, es una increíble persona. Gracias por sus inolvidables consejos, aportaciones y momentos tan agradable, y por servirme de ejemplo al transmitir esa pasión por la ciencia de una forma tan agradable, es una directora increíble y me siento orgullosa de formar parte de su equipo de trabajo.

### **Al Doctor Fernando C. Gómez-Merino**

Doctor agradezco su amabilidad y disposición para enseñarme en cada duda que tuve, sin duda alguna este proyecto no hubiera sido posible sin su ayuda. Es una persona excepcional y me siento privilegiada de haber tenido un consejero como usted.

### **A la M.C Perla X. Olivares M.**

Maestra, gracias por hacer más amena mi estancia en el laboratorio, por su amistad, paciencia, y por los buenos momentos que pasamos, la quiero mucho, gracias por todos sus consejos y enseñanzas.

### **A mis amigas y amigos:**

A mis viejos amigos, que a pesar de la distancia y del tiempo siempre han estado presentes: Didiann Vera, Karla Barrañón, Jesica Hernández, Elizabeth Ronzón, Gloria Ramos, Paola Bedoy, Angelly Jiménez, Yosara García, Celia González, Liliana Montiel, Rosbeth Santiago, Sofía Barojas, Marissa Colorado, Ángela Muñoz, Susana Vázquez, Carmen Galván, Edgar Prado, Irving Colorado, Fernando Hernández, Ángel Zapata, Luis Colorado, Alicia Castañeda y al Maestro Osbaldo Guevara. Gracias por las experiencias vividas a lo largo de nuestra amistad, por los sueños compartidos, y su apoyo incondicional. Saben de antemano cuánto los quiero, gracias por acompañarme siempre. “Los amigos que tienes y cuya amistad ya has puesto a prueba, engánchalos a tu alma con ganchos de acero” (William Shakespeare).

### **A mis amigos y compañeros COLPOS (Campus Córdoba y Campus Montecillo):**

Gracias por su amistad a lo largo de esta aventura que emprendimos juntos, fue un placer coincidir con ustedes, mucho éxito para todos y a poner en alto al Colegio de Posgraduados. Margarita Galicia, Miriam Valencia, Anel López,



Susan Corzo, Rosario Pacheco, Gloria González, Araceli Valdivia, Sonia López, Mariel Vidaña, Araceli Gutiérrez, José Peña, Jorge Noriega, Luis Larriba, Oscar Duran, Eutiquio Rodríguez, Manuel Sánchez, Víctor Gaytán y demás compañeros COLPOS. “Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber” (Albert Einstein).

**A mis amigos Ma. de los Ángeles Jácome y Casildo Cuacua:**

Gracias por su amistad, confianza, apoyo incondicional y por todas las experiencias y momentos tan divertidos que vivimos juntos. Amigos gomitas; éxito para ustedes y que nuestra amistad sea eterna “Guarda a tu amigo bajo la llave de tu propia vida” (William Shakespeare).

**A todos mis profesores:**

No solo de la maestría; sino de toda mi vida académica, porque sus enseñanzas y exigencias forman una parte de lo que ahora soy. Gracias por contribuir fuertemente en mi educación. “Cuando la gratitud es tan absoluta las palabras sobran” (Álvaro Mutis).

Al **personal del COLPOS** que contribuyó en la realización de mi trabajo, gracias por su apoyo, su enseñanza y su tiempo. “La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica” (Aristóteles).

**Nadia Elizabeth Ortega López**

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) por haberme dado su apoyo al otorgarme una beca para el desarrollo de mi maestría (Registro 590805).

Al **Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba** por la confianza depositada para continuar con mi formación académica, y al **Campus Montecillo**, en especial al **laboratorio de Nutrición Vegetal “Dr. Salvador Alcalde Blanco”** por abrir las puertas de sus instalaciones para el desarrollo de mi trabajo.

Al **Dr. Fernando Carlos Gómez-Merino**. Agradezco encarecidamente su invaluable apoyo para la realización de mi trabajo y cada uno de los consejos brindados, le agradezco todas las atenciones que me brindo, su valioso tiempo, y sus enseñanzas durante el desarrollo de la maestría, gracias por su experiencia transmitida, y su apoyo incondicional. Y por poner a mi alcance las herramientas necesarias que contribuyeron en mi formación durante este postgrado. Me enseñó que los límites los ponemos nosotros, le agradezco por creer en mí y en este proyecto.

A la **Dra. Libia Iris Trejo-Téllez**. No tengo palabras para agradecer todo el apoyo incondicional que me ha brindado, por compartir todos sus consejos tan acertados y aportaciones incomparables, por todas sus enseñanzas, y por su valioso tiempo, por su amistad y confianza, por todas tus atenciones y por estar siempre pendiente de mí. Los admiro mucho como científicos y seres humanos, mi completa admiración y total respeto para ustedes.

Al **Dr. Juan Salazar Ortiz y al Dr. Alejandro Alonso López** gracias por sus valiosas aportaciones, por su tiempo, atención y consejos en la elaboración de mi trabajo, y por aceptar formar parte de mi consejo.

A la **Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento 1** en *Eficiencia y Sustentabilidad en la Producción Primaria en Sistemas Agroalimentarios* del programa de Maestría en Ciencias en Innovación Agroalimentaria Sustentable (IAS) del Campus Córdoba por su apoyo en la realización en esta investigación.

A la **Subdirección de Vinculación del Campus Córdoba**, al Sr. Raúl Orozco Beristain representante del “Centro Municipal Agroecoturístico e Investigación San Juan de la Punta” en la MAP zona Centro Cuitláhuac, Veracruz, y al Mtro. Ricardo Sánchez Páez y al Ing. Edgardo Zalazar Marcial, por los apoyos brindados para la realización de este trabajo.

**Nadia Elizabeth Ortega López**

## CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| PORTADA .....   |     |
| HOJA DE FIRMAS .....  | i   |
| RESUMEN.....  | ii  |
| ABSTRACT .....  | iii |
| DEDICATORIA .....   | iv  |
| AGRADECIMIENTOS .....   | ix  |
| CONTENIDO.....  | xi  |
| LISTA DE CUADROS.....   | xiv |
| LISTA DE FIGURAS.....   | xvi |
| MARCO TEÓRICO.....  | 1   |
| 1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....   | 1   |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....  | 4   |
| 2.1. TOMATE .....   | 4   |
| 2.2. HIDROPONÍA .....   | 5   |
| 2.3. ACUICULTURA .....  | 7   |
| 2.4. TILAPIA.....   | 9   |
| 2.4.1 Etapas de crecimiento .....   | 9   |
| 2.4.2 Condiciones de cultivo.....   | 9   |
| 2.4.3. Cultivo rentable.....  | 11  |
| 2.5. ACUAPONÍA.....   | 11  |
| 2.5.1. Fortalezas de la acuaponía .....   | 12  |
| 2.5.2 Componentes de un sistema acuapónico.....   | 12  |
| 2.5.3. Contribuciones acuapónicas .....   | 15  |
| 2.6. AGUA Y SU USO INDUSTRIAL .....   | 17  |
| 3. LITERATURA CITADA.....   | 18  |
| CAPÍTULO I.....   | 26  |
| CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA RÚSTICO ABIERTO DE PRODUCCIÓN<br>ACUAPONICA EN CUITLÁHUAC, VERACRUZ. .... | 26  |
| I.1. INTRODUCCIÓN.....  | 26  |
| I.2 OBJETIVOS .....   | 27  |
| I.2.1 Objetivo general.....   | 27  |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| I.2.2    | Objetivos específicos .....  | 27 |
| I.3      | HIPÓTESIS .....  | 27 |
| I.3.1    | Hipótesis general .....  | 27 |
| I.3.2    | Hipótesis específicas .....  | 27 |
| I.4      | MATERIALES Y MÉTODOS .....   | 28 |
| I.4.1    | Ubicación geográfica del experimento .....   | 28 |
| I.4.2    | Condiciones ambientales .....  | 28 |
| I.4.3    | Material vegetal.....  | 28 |
| I.4.4    | Sustratos utilizados .....   | 29 |
| I.4.5    | Agua de riego utilizada.....   | 30 |
| I.4.6    | Tratamientos evaluados en plantas .....  | 30 |
| I.4.7    | Manejo experimental de plantas .....   | 31 |
| I.4.7.1  | Fase de adaptación: Trasplante inicial .....   | 31 |
| I.4.7.2  | Fase experimental: Trasplante definitivo .....   | 32 |
| I.4.8    | Cultivo de tilapia.....  | 32 |
| I.4.9    | Alimentación de la tilapia .....   | 33 |
| I.4.10   | Variables evaluadas.....   | 35 |
| 1.4.10.1 | Análisis químico de aguas empleadas en el riego.....   | 35 |
| I.4.10.2 | Análisis químico de sustratos .....  | 36 |
| I.4.10.3 | Variables agronómicas .....  | 36 |
| I.4.10.4 | Análisis nutrimental en tejido vegetal .....   | 37 |
| 1.4.10.5 | Análisis químico de alimentos usados en la producción de tilapia .....   | 38 |
| I.4.10.6 | Biometría de tilapias .....  | 38 |
| I.4.11   | Diseño experimental .....  | 38 |
| I.4.12   | Análisis estadístico.....  | 39 |
| I.5      | RESULTADOS .....   | 39 |
| 1.5.1    | Caracterización química de aguas empleadas en el riego.....  | 39 |
| 1.5.2    | Caracterización química de los sustratos para el cultivo de tomate.....  | 44 |
| I.5.3    | Crecimiento de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) cv. <i>Saladette</i> en un sistema acuapónico abierto..... | 47 |
| I.5.4    | Análisis nutrimental de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) cv. <i>Saladette</i> .....                        | 57 |
| 1.5.4.1  | Significancia de factores de estudio en la concentración y acumulación nutrimental en hojas .....                  | 57 |
| I.5.4.2  | Significancia de factores de estudio en la concentración y acumulación nutrimental en tallos .....                 | 59 |

|   |     |
|---|-----|
| I.5.4.3. Significancia de factores de estudio en la concentración y acumulación nutrimental en frutos.....  | 61  |
| I.5.4.4. Significancia de factores de estudio en la concentración y acumulación nutrimental en raíces.....  | 63  |
| I.5.4.5 Comparación de concentraciones nutrimentales entre órganos de plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) cv. <i>Saladette</i> .....  | 65  |
| 1.5.4.6 Comparación de acumulación nutrimental de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) cv. <i>Saladette</i> divididos por órganos.....  | 101 |
| I.5.5. Caracterización química de los alimentos para la tilapia.....  | 136 |
| En esta investigación se emplearon tres alimentos para las tilapias en función de la etapa de crecimiento. En la etapa 1 se utilizó el alimento recomendado para peces de entre 5 y 30 g de peso. En la etapa 2, el alimento es para peces con 31 a 60 g. En la etapa tres el alimento usado es recomendado para peces entre 61 y 150 g (Cuadro I.2)..... |     |
| I.5.6 Análisis de biometría de tilapias.....  | 136 |
| I.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....  | 138 |
| I.7 LITERATURA CITADA .....   | 140 |

## LISTA DE CUADROS

### INTRODUCCIÓN GENERAL

|   |    |
|---|----|
| <b>Cuadro 1.</b> Productividad de cultivos hidropónicos (toneladas por año, 2003). .....      | 6  |
| <b>Cuadro 2.</b> Clasificación de sistemas de cultivo de acuerdo a su densidad de siembra. 10 |    |
| <b>Cuadro 3.</b> Parámetros fisicoquímicos óptimos para el cultivo de tilapia. ....           | 10 |
| <b>Cuadro 4.</b> Aportaciones de sistemas acuapónicos en México.....                          | 16 |

### CAPÍTULO I

|  |    |
|--|----|
| <b>Cuadro I. 1</b> Tratamientos utilizados en el experimento acuapónico abierto para probar el efecto de los sustratos y el agua de riego en la producción de tilapias ( <i>Oreochromis niloticus</i> L.) var. Spring y tomate rojo ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) cv. Saladette..... | 30 |
| <b>Cuadro I. 2.</b> Alimentos empleados para pre-engorda de tilapias ( <i>Oreochromis niloticus</i> L.) durante su cultivo en un sistema rústico.....  | 34 |
| <b>Cuadro I.3.</b> Porcentaje de alimento diario para tilapia de acuerdo a su intervalo de peso.....   | 34 |
| <b>Cuadro I. 4</b> Propiedades químicas de sustratos utilizados en el cultivo de tomate rojo con diferente tipo de agua de riego. ....   | 45 |
| <b>Cuadro I.5.</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable altura de planta de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto. ....  | 51 |
| <b>Cuadro I.6.</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable diámetro de tallo de plantas tomate en un sistema acuapónico rústico abierto. ....   | 51 |
| <b>Cuadro I.7.</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable número de hojas en plantas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto. ....  | 55 |
| <b>Cuadro I. 8</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la concentración de macronutrientes en hojas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto. ....  | 57 |
| <b>Cuadro I. 9</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración foliar de micronutrientes y sodio en tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....  | 58 |
| <b>Cuadro I. 10</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de macronutrientes en hojas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....   | 58 |
| <b>Cuadro I. 11</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable de acumulación de micronutrientes y sodio en hojas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....  | 59 |
| <b>Cuadro I.12.</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de macronutrientes en tallos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....  | 59 |
| <b>Cuadro I. 13</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de micronutrientes y sodio en tallos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....  | 60 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Cuadro I.14.</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de macronutrientos en tallos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....           | 60  |
| <b>Cuadro I. 15</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de micronutrientos y sodio en tallos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....   | 61  |
| <b>Cuadro I. 16</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de macronutrientos en frutos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....         | 61  |
| <b>Cuadro I.17.</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de micronutrientos y sodio en frutos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto..... | 62  |
| <b>Cuadro I.18.</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de macronutrientos en frutos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....           | 62  |
| <b>Cuadro I.19</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de micronutrientos y sodio en frutos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....    | 63  |
| <b>Cuadro I. 20</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de macronutrientos en raíces de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....         | 63  |
| <b>Cuadro I. 21</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de micronutrientos y sodio en raíces de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto..... | 64  |
| <b>Cuadro I. 22</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de macronutrientos en raíces de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....           | 64  |
| <b>Cuadro I.23.</b> Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de micronutrientos y sodio en raíces de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.....   | 65  |
| <b>Cuadro I. 24</b> Caracterización química de alimentos suministrados a las tilapias a lo largo de la experimentación.....   | 136 |



## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura I. 1</b> Plántulas de tomate rojo cv. Saladette germinadas 14 días en composta con riego acuícola. ....   | 28 |
| <b>Figura I. 2</b> Colecta y tamizado de tezontle (A), composta proporcionada por productor (B).....  | 29 |
| <b>Figura I. 3</b> Sustratos tezontle (A) y composta (B) pesados en báscula TORREY® modelo MFQ-40 Aut. No. 2907 Monterrey N.L.) y (C) esterilizados en autoclave (1 atm de presión, 121 °C).....  | 29 |
| <b>Figura I. 4</b> Fase de adaptación de plántulas de tomate rojo. Corte de bolsas para preparación previa al trasplante. (A) Plántulas de tomate rojo de 14 días de emergidas, previo al trasplante. (B) Plántulas en fase de adaptación en sustrato de esferas de unicel de 20 mm y riego de agua acuícola 100 %(C). ....   | 31 |
| <b>Figura I. 5</b> Sustratos utilizados. Homogeneización de sustrato (A). Etiquetado de sustratos de acuerdo al Cuadro I.1 (B). Llenado de bolsas con sustratos estériles y homogeneizados (C). Trasplante de dos plántulas de tomate rojo cv. Saladette por unidad experimental en el ejemplo con tezontle al 100 %(D). .... | 32 |
| <b>Figura I. 6</b> Estanque utilizado en el cultivo de tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> L.).....  | 33 |
| <b>Figura I. 7</b> . Manejo de muestreo de agua de riego utilizada. Muestreo de agua acuícola 100 % (A). Etiquetado de frascos de muestras de agua de riego. (B). Se procede a congelar las muestras para trasladarlas al laboratorio (C). ....   | 35 |
| <b>Figura I. 8</b> Variables de crecimiento de tomate rojo. Altura de planta (A), diámetro de tallo (B) y número de hojas (C).....  | 37 |
| <b>Figura I. 9</b> Medición de la altura de tilapias ( <i>Oreochromis niloticus</i> L.) var. Spring a los 120 días de edad.....   | 38 |
| <b>Figura I. 10</b> Esquema del desarrollo cronológico del cultivo de tilapia y tomate en esta investigación.....   | 39 |
| <b>Figura I. 11</b> Evaluación del pH (A) y conductividad eléctrica (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate.....  | 40 |
| <b>Figura I. 12</b> Concentración de $\text{NO}_3^-$ (A) y $\text{NH}_4^+$ (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate.....   | 41 |
| <b>Figura I. 13</b> Concentración de P (A) y K (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate .....  | 42 |
| <b>Figura I. 14</b> Concentración de Ca (A) y Mg (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate. ....  | 43 |
| <b>Figura I. 15</b> Concentración de S en las aguas utilizadas para el riego de tomate .....  | 43 |
| <b>Figura I. 16</b> Concentración de Na (A) y Cl (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate. ....  | 44 |
| <b>Figura I. 17</b> Planta de tomate establecida en composta y regada con agua acuícola por 85 días.....  | 48 |
| <b>Figura I.18.</b> Variables de crecimiento de plantas de tomate 85 días después del trasplante.....   | 49 |
| <b>Figura I. 19</b> Altura de planta de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto a los 41 (A), 46 (B), 53 (C), 60 (D), 67 (E), 74 (F), 81 (G), 87 (H), 102 (I), 116 (J), días de cultivo de tilapia en función del sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada subfigura con   |    |

|   |    |
|---|----|
| letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle .....  | 53 |
| <b>Figura I. 20</b> Diámetro de tallo de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto a los 41 (A), 46 (B), 53 (C), 60 (D), 67 (E), 74 (F), 81 (G), 87 (H), 102 (I), 116 (J), días de cultivo de tilapia en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada subfigura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....          | 54 |
| <b>Figura I. 21</b> Número de hojas en plantas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto a los 41 (A), 46 (B), 53 (C), 60 (D), 67 (E), 74 (F), 81 (G), 87 (H), 102 (I), 116 (J), días de cultivo de tilapia en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada subfigura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. .... | 56 |
| <b>Figura I. 22</b> Concentración de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función del sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....   | 66 |
| <b>Figura I. 23</b> Concentración de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 66 |
| <b>Figura I. 24</b> Concentración de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato y el agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 67 |
| <b>Figura I. 25</b> Concentración de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 68 |
| <b>Figura I. 26</b> Concentración de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 68 |
| <b>Figura I. 27</b> Concentración de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 69 |
| <b>Figura I. 28</b> Concentración de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 70 |
| <b>Figura I. 29</b> Concentración de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 71 |
| <b>Figura I. 30</b> Concentración de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y el agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.5$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 72 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura I. 31</b> Concentración de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 72 |
| <b>Figura I. 32</b> Concentración de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 73 |
| <b>Figura I. 33</b> Concentración de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 74 |
| <b>Figura I. 34</b> Concentración de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 74 |
| <b>Figura I. 35</b> Concentración de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 75 |
| <b>Figura I. 36</b> Concentración de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y el agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 76 |
| <b>Figura I. 37</b> Concentración de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 77 |
| <b>Figura I. 38</b> Concentración de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 78 |
| <b>Figura I. 39</b> Concentración de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....   | 79 |
| <b>Figura I. 40</b> Concentración de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 80 |
| <b>Figura I. 41</b> Concentración de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 81 |
| <b>Figura I. 42</b> Concentración de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. .... | 82 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura I. 43</b> Concentración de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 83 |
| <b>Figura I. 44</b> Concentración de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 84 |
| <b>Figura I. 45</b> Concentración de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. .... | 85 |
| <b>Figura I. 46</b> Concentración de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ) C= composta; T= tezontle. ....   | 86 |
| <b>Figura I. 47</b> Concentración de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 87 |
| <b>Figura I. 48</b> Concentración de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 88 |
| <b>Figura I. 49</b> Concentración de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 89 |
| <b>Figura I. 50</b> Concentración de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ) AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 90 |
| <b>Figura I. 51</b> Concentración de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= Composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. .... | 91 |
| <b>Figura I. 52</b> Concentración de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....  | 92 |
| <b>Figura I. 53</b> Concentración de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= Agua acuícola. ....  | 93 |
| <b>Figura I. 54</b> Concentración de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada  |    |

|  |     |
|--|-----|
| órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 94  |
| <b>Figura I. 55</b> Concentración de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ) C= composta; T= tezontle.....   | 95  |
| <b>Figura I. 56</b> Concentración de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ) AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 96  |
| <b>Figura I. 57</b> Concentración de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ) C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 97  |
| <b>Figura I. 58</b> Concentración de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....   | 98  |
| <b>Figura I. 59</b> Concentración de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 99  |
| <b>Figura I. 60</b> Concentración de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. .... | 100 |
| <b>Figura I. 61</b> Acumulación de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ) C=: Composta; T= tezontle. .  | 101 |
| <b>Figura I. 62.</b> Acumulación de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 102 |
| <b>Figura I. 63</b> Acumulación de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 103 |
| <b>Figura I. 64</b> Acumulación de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...  | 104 |
| <b>Figura I. 65</b> Acumulación de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 104 |
| <b>Figura I. 66</b> Acumulación de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada   |     |

|  |     |
|--|-----|
| órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 105 |
| <b>Figura I. 67</b> Acumulación de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...  | 106 |
| <b>Figura I. 68</b> Acumulación de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 107 |
| <b>Figura I. 69</b> Acumulación de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 108 |
| <b>Figura I. 70</b> Acumulación de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...   | 109 |
| <b>Figura I. 71</b> Acumulación de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 110 |
| <b>Figura I. 72</b> Acumulación de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. .... | 111 |
| <b>Figura I. 73</b> Acumulación de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...   | 112 |
| <b>Figura I. 74</b> Acumulación de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 112 |
| <b>Figura I. 75</b> Acumulación de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....     | 113 |
| <b>Figura I. 76</b> Acumulación de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...  | 114 |
| <b>Figura I. 77</b> Acumulación de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 115 |
| <b>Figura I. 78</b> Acumulación de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....      | 116 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura I. 79</b> Acumulación de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....   | 117 |
| <b>Figura I. 80</b> Acumulación de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 118 |
| <b>Figura I. 81</b> Acumulación de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....              | 119 |
| <b>Figura I. 82</b> Acumulación de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle. ....   | 120 |
| <b>Figura I. 83</b> Acumulación de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 121 |
| <b>Figura I. 84</b> Acumulación de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias $\pm$ DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. .... | 122 |
| <b>Figura I. 85</b> Acumulación de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...   | 123 |
| <b>Figura I. 86</b> Acumulación de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 124 |
| <b>Figura I. 87</b> Acumulación de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 125 |
| <b>Figura I. 88</b> Acumulación de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...   | 126 |
| <b>Figura I. 89</b> Acumulación de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP: agua potable; Ac: agua acuícola. ....  | 127 |
| <b>Figura I. 90</b> Acumulación de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada  |     |

|  |     |
|--|-----|
| órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....   | 128 |
| <b>Figura I. 91</b> Acumulación de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...   | 129 |
| <b>Figura I. 92</b> Acumulación de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 129 |
| <b>Figura I. 93</b> Acumulación de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. .... | 130 |
| <b>Figura I. 94</b> Acumulación de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...  | 131 |
| <b>Figura I. 95</b> Acumulación de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP: agua potable; Ac: agua acuícola. ....   | 132 |
| <b>Figura I. 96</b> Acumulación de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 133 |
| <b>Figura I. 97</b> Acumulación de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle...   | 134 |
| <b>Figura I. 98</b> Acumulación de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola. ....  | 134 |
| <b>Figura I. 99</b> Acumulación de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias $\pm$ DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola. .... | 135 |
| <b>Figura I. 100</b> Cultivo de tilapia en estanque de cemento. ....   | 137 |
| <b>Figura I. 101</b> Aspecto de las tilapias de 30 (A) y 85 (B) días de edad. ....   | 137 |



## **INTRODUCCIÓN GENERAL**

## MARCO TEÓRICO

### 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La reducción de pobreza y hambre; son desafíos importantes para los sistemas agroalimentarios a nivel mundial, una de las proyecciones para próximas décadas es asegurar el suministro suficiente de alimentos para la población. El crecimiento constante de la población y la demanda de alimento, constituyen una prioridad a atender, poniendo mayor atención en el crecimiento económico y desarrollo de agroindustrias, seguridad alimentaria y estrategias para acabar con la pobreza (FAO, 2013).

Aunado a lo anterior, el bajo incremento de la actividad económica, el aumento del precio en los alimentos y los malos salarios que se perciben, hacen difícil la vida de millones de personas en situación de extrema pobreza (Banco Mundial, 2015).

El crecimiento estimado de la población a nivel mundial, tiene dos puntos importantes repercutiendo en problemas de salud alimentaria, siendo la producción y la demanda de alimentos los principales (Foresight, 2011). La población mundial irá en aumento siendo que para 2050 serán 9,100 millones de personas (FIDA, 2011; Foresight, 2011; FAO, 2015a).

En la actualidad aproximadamente 842 millones de personas siguen padeciendo hambre crónica, debido a que no pueden costearse una alimentación adecuada, más del 70 % viven en zonas rurales, la agricultura es una de sus principales fuentes de sostenimiento, sin embargo muchos trabajadores aún tienen dificultades para satisfacer las necesidades alimenticias de su familia (FAO, 2015a).

En México debido a la riqueza del clima, se oferta una extensa cantidad de alimentos, para 2014 se cultivaron alrededor de 540 especies, de los más de 800 productos agroalimentarios que es posible producir; el valor de la producción total agrícola fue de 396 mil millones de pesos. México ocupa el lugar veintiuno a nivel mundial por el número de personas que trabajan en el sector agropecuario y pesquero, siendo China el primer lugar con 500 millones de trabajadores (SIAP Atlas Agroalimentario, 2014).

La alternativa para poder solventar estos problemas, es buscar sistemas de producción que sean sostenibles, y accesibles no solo para las personas de recursos limitados, sino también para aquellas personas que deseen cultivar en espacios reducidos, a fin de poder satisfacer futuras necesidades de alimentos (FAO, 2015b).

En México, de los 49.6 millones de personas que trabajan en la producción agropecuaria y pesquera, solo 5.8 millones lo hace en actividades agrícolas, 796 mil en la cría y explotación de ganado y 105 mil en pesca y agricultura (SIAP Atlas Agroalimentario, 2014). Los pequeños agricultores pueden contribuir notablemente al crecimiento económico, así como a la reducción de la pobreza y a la seguridad alimentaria y nutricional.

El fomento de la agricultura constituye el punto de partida más efectivo para combatir el hambre y la pobreza en el área rural, siendo la agricultura orgánica una forma estratégica para mitigar el hambre por pobreza (Boza, 2010).

Las personas actualmente han cambiado su alimentación optando por un consumo potencial de alimentos orgánicos, adoptando estilos de vida más saludables (Márquez-Hernández *et al.*, 2006).

Los alimentos orgánicos son considerados más saludables debido a que garantizan un origen “natural” (existiendo una baja o inexistente carga de pesticidas en su producción) manteniendo un equilibrio benéfico con el cuidado del consumidor y del medio ambiente, y en consecuencia a esta ventaja, los consumidores están dispuestos a pagar más por este tipo de productos (García-Casal, 2007; Márquez-Hernández *et al.*, 2008). Las proyecciones de SAGARPA son que la demanda de alimentos se intensificará por el crecimiento de la población; y son notorios los cambios en los patrones de consumo hacia alimentos más saludables, inocuos, y de mejor calidad, producidos de forma amigable con el medio ambiente, cuyo origen pueda ser rastreado por cuestiones de salud y que contengan información especializada en su etiquetado (SAGARPA, 2010).

La mayor provisión de alimentos viene de la actividad agrícola a cielo abierto, y poco a poco ha cobrado importancia, la llamada agricultura en sistemas protegidos (Bielinski *et al.*, 2010). La agricultura protegida es una alternativa que consiste en producir productos agrícolas en espacios cerrados o semicerrados con cubiertas transparentes

o semitransparentes para propiciar condiciones artificiales de microclima, los cuales utilizan menor superficie y de igual forma optimizan agua ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

En los sistemas de agricultura protegida de precisión se mantienen condiciones controladas principalmente de temperatura, iluminación y humedad, precipitación pluvial, además de cuestiones sanitarias, las cuales permiten obtener escenarios climáticos adaptados para el cultivo que se requiera, de acuerdo a las condiciones más optimas y pudiendo manipular de igual forma las condiciones de suelo, permitiendo un desarrollo más controlado de los cultivos ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#); [Bielinski et al., 2010](#)).

Respecto a la agricultura protegida de precisión, ésta incluye el uso de tecnologías como los sistemas de información geográfica y sensores remotos; de componentes como control y automatización, y sistemas electrónicos de administración; y de aplicaciones como los sistemas para el monitoreo del rendimiento, mapeo y monitoreo de suelos, sustratos y aguas, así como exploración de calidad de las cosechas, entre otros, todo en sofisticados sistemas de invernaderos.

Se estima que la agricultura de precisión rebase los 6 mil millones de dólares en producción para 2022 ([Wood, 2014](#)), lo cual representa grandes perspectivas de crecimiento en todo el mundo, incluyendo México.

Los principales productos que se cultivan en este tipo de sistemas son: pepino, rosas, chile morrón y tomate rojo. Siendo China el principal productor con 2.76 millones de hectáreas en este tipo de sistemas; México ocupa el séptimo lugar con 21,358 hectáreas ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)). El valor del mercado de la producción nacional en sistemas de agricultura de precisión es de 16,319 millones de pesos, en una superficie total de 21,358 hectáreas, siendo Sinaloa el mayor productor en México en agricultura protegida con un total de 9,390 hectáreas ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. TOMATE

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es originario de la parte central de América del Sur; también es llamado “jitomate” el cual procede del náhuatl “*xictli*” ombligo y “*tomatl*”, lo cual significa tomate de ombligo (SIAP Atlas Agroalimentario, 2014; PROFECO, 2014).

Los tipos más conocidos y comercializados de tomate en México son el *Saladette*, *cherry* y de *bola*. Siendo que el de mayor distribución comercial es el *Saladette* (PROFECO, 2014).

En la industria alimenticia, esta hortaliza es utilizada para infinidad de procesos, envasados, pelados, jugos, concentrados en pasta, conservas, purés, salsas, así como para la elaboración de saborizantes, entre otros productos; siendo su uso principal en fresco (SAGARPA, 2010).

En los últimos cuatro años el tomate rojo incrementó su volumen en casi 44 %, teniendo un aumento de 1.9 a 2.7 millones de toneladas, su éxito productivo se basa en las mejoras de las técnicas para su cultivo (SIAP Atlas Agroalimentario, 2014).

Para el año agrícola 2013 en la modalidades de riego y temporal, la superficie sembrada de tomate rojo fue de 48,234 hectáreas, lo que dio como resultado una cosecha de 2,694,358 toneladas, siendo su equivalente en valor de producción, poco más de 15 mil millones de pesos dentro del ranking a nivel federal; el principal productor de tomate rojo a nivel nacional es Sinaloa, aportando un 36.5 % del fruto con 983,288 toneladas, teniendo una producción cinco veces mayor en volumen que Baja California siendo el segundo mayor productor de México con 196,453 toneladas reportadas. Veracruz se colocó en la posición catorce con una producción de 50,043 toneladas, y el Distrito Federal en el último lugar con una producción de 135 toneladas. Teniendo una producción total nacional de 2,694,358 toneladas (SIAP Atlas Agroalimentario, 2014).

Mundialmente China es el principal productor de tomate rojo con 50,125,055 toneladas, aportando el 31 % de la producción mundial, seguido de India con un volumen equivalente al 8.3 %. México está posicionado en el ranking mundial como el décimo productor aportando un 2.1 %, del cual se tiene un consumo anual per cápita de 6.7 kg.

El principal mercado potencial de tomate rojo es Rusia, seguido de Alemania y Francia. Dentro de los principales destinos de exportación de tomate rojo mexicano son Estados Unidos y Canadá adquiriendo 95 y 4 % de la producción, respectivamente ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

Las zonas con alto potencial productivo para este cultivo se ubican entre los 0 a 1800 m de altitud, con precipitaciones de 600 a 1300 mm, con una temperatura media entre los 15 a 30 °C, con suelos limosos y profundos, con un pH entre 5.0 y 7.0, y bien drenados ya que el tomate es muy susceptible a enfermedades y el encharcamiento en algunos casos propicia el desarrollo de éstas ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

## **2.2. HIDROPONÍA**

Dentro de los componentes más importantes de la agricultura protegida de precisión se encuentra la hidroponía, cuyo uso se ha incrementado de manera significativa en años recientes, dado que permite un mejor manejo del agua y los fertilizantes, así como un mejor control del clima, las plagas y las enfermedades. Además, la hidroponía incrementa la calidad y productividad de los cultivos, lo que resulta en mejores índices de competitividad e ingresos económicos ([Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012](#)).

La hidroponía consiste en el cultivo de plantas sin suelo ([Alcántar-González y Trejo-Téllez, 2013](#)) y constituye una técnica de producción intensiva de plantas aumentando su calidad y productividad. La cual se basa en abastecer de agua a los cultivos y la aplicación de los nutrimentos de forma controlada; de esta forma proporciona a la planta las cantidades adecuadas de acuerdo a sus requerimientos a través de una solución de elementos esenciales.

Los nutrimentos están divididos en macronutrimentos (primarios y secundarios) y micronutrimentos. Las plantas necesitan en mayores cantidades de los macronutrimentos primarios: (nitrógeno, fósforo y potasio). Los macronutrimentos secundarios (calcio, magnesio y azufre) son consumidos por las plantas en cantidades intermedias. Existen nutrimentos que las plantas los requieren en cantidades muy pequeñas llamados micronutrimentos (cobre, boro, hierro, manganeso, zinc, molibdeno, cloro y níquel) ([Alcántar-González y Trejo-Téllez, 2013](#)). Existe otro grupo de elementos que son llamados benéficos, los cuales sin ser elementos esenciales pueden mejorar el

crecimiento y el desarrollo de las plantas (aluminio, cerio, cobalto, iodo, sodio, lantano, selenio, silicio, titanio y vanadio) (Pilon-Smits *et al.*, 2009; Alcántar-González y Trejo-Téllez, 2013; Gómez-Merino *et al.*, 2015).

El factor más importante que afecta a los cultivos en hidroponía es sin duda la solución nutritiva a la que están sometidos, teniendo impacto en su rendimiento en la cosecha y en la calidad del producto final. Otro factor importante es el pH al que se encuentre la solución de nutrimentos (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012). El sustrato puede o no intervenir en el proceso de la nutrición de la planta y disponibilidad de agua, los sustratos son los materiales que sirven de soporte para el cultivo vegetal, los cuales son colocados en forma pura o en mezcla (Ortega-López *et al.*, 2015).

La comparación de la productividad de cultivos hidropónicos y de cultivos en forma tradicional se muestra a continuación, teniendo una mayor producción de toneladas por año en el cultivo hidropónico (**Cuadro 1**).

**Cuadro 1.** Productividad de cultivos hidropónicos (toneladas por año, 2003).

| Cultivo  | Hidropónico | Tradicional |
|----------|-------------|-------------|
| Tomate   | 375         | 100         |
| Pepino   | 750         | 30          |
| Lechuga  | 313         | 52          |
| Pimentón | 96          | 16          |
| Repollo  | 172         | 30          |

**Fuente:** Marulanda e Izquierdo, 2003.

En la absorción de nutrimentos en las plantas; es de vital importancia la oxigenación en la solución, la calidad del agua, y las fuentes de fertilizantes (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012).

Dado que la hidroponía basa su tecnología en el uso del agua y los fertilizantes, en términos de producción agroalimentaria existe una estrecha relación entre ésta y la acuicultura, y la forma en que actualmente se están fusionando es a través de acuaponía.

### **2.3. ACUICULTURA**

La acuicultura consiste en el cultivo o cría de animales acuáticos en espacios de agua designados de forma controlada ([Jung-Yuan y Yew-Hu, 2013](#)) empleando métodos y técnicas aptas para su desarrollo biológico fundamentadas en actividades dirigidas en su reproducción controlada, ya sea pre-engorda o engorda, las cuales se realizan en instalaciones de agua dulce, marinas o salobres; siendo susceptibles a la explotación comercial, ornamental o recreativa; al mismo tiempo son de más rápido crecimiento ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

Al tener un alto potencial y un buen desarrollo, proyecta beneficios sociales y económicos ([Campos-Pulido \*et al.\*, 2013](#)). La acuicultura adquirió mayor importancia en los últimos años convirtiéndose en una fuente de alimentación con elevado valor nutrimental y con costos accesibles ([Norzagaray \*et al.\*, 2012](#)).

Los sistemas de cultivo utilizados en acuicultura son: jaulas flotantes, líneas largas, camas, estanques y estanques rústicos. De esta forma constituyen sistemas de producción de alimentos importantes en el contexto mundial; aumentando la producción de plantas y animales acuáticos de consumo humano, por medio del control de organismos y de su medio ambiente ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

Para lograr la sostenibilidad en los cultivos acuícolas es recomendable recurrir a sistemas de recirculación y tratamiento del agua utilizada; de esta forma se optimiza su uso ([Rodríguez-González \*et al.\*, 2015](#)), produciendo mayor biomasa en un espacio reducido.

La producción mundial pesquera ha venido en aumento constante, siendo que para el 2014 el suministro de peces de consumo humano ha aumentado a una tasa media anual del 3.2 % ([FAO, 2014](#); [Gómez-Merino \*et al.\*, 2015](#)).

En México la producción nacional pesquera en acuicultura tiene una aportación del 15.8 % del volumen y genera el 40 % del valor total de la producción ([SHCP, 2014](#);



[Gómez-Merino et al., 2015](#)). En términos de volumen, la tilapia participa con el 4.6 % y en términos de valor generan el 7.3 %, en ambos casos, de la producción pesquera ([SHCP, 2014](#)).

El destino final incluye consumo humano directo con 65 %, indirecto (harinas y otros derivados) con 34 % y uso industrial (cosmético y farmacéutico) con 1 % del volumen total en peso vivo. El principal destino de exportación es EE.UU con un volumen total de producción de 25 %. En cuanto a las importaciones el principal lugar de proveniencia es China representando cerca del 19 % del consumo aparente ([SHCP, 2014](#)).

Las principales entidades federativas en producción acuícola en miles de toneladas en el 2013 fueron: Sinaloa con un 38.1 %, seguidas de Veracruz, Jalisco, Tabasco y Sonora, con 29.8, 29.7, 19.0 y 18.5 %, respectivamente; teniendo un volumen total de producción acuícola de 246 mil toneladas ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

La producción mundial acuícola fue de 83.7 millones de toneladas siendo China el mayor productor. Dentro de las principales especies acuícolas producidas en México se encuentra la mojarra tilapia con un 96.8 %, seguido de camarón, ostión, carpa y trucha con 60.3, 38.7, 26.9 y 6.7 %, respectivamente ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

La acuicultura creció en el lapso del primer trimestre de 2014 en comparación con el mismo trimestre del 2013 en el cual sus actividades fueron del 72.8 % de los cuales pasó de dar una ocupación directa a 11 mil trabajadores a más de 18 mil ([SIAP, 2014](#)).

El sector pesca alcanzó una producción de 406 mil toneladas, teniendo como principales capturas a la sardina, seguida del camarón, atún y mojarra, respectivamente ([SIAP, 2015](#)).

En las últimas dos décadas la acuicultura se ha desarrollado en las aguas interiores de México, representando una actividad estratégica en el sector social del campo mexicano ya que además de representar una fuente de alimentación para los pequeños productores, también se ha combinado con ecoturismo, incrementado los ingresos de las familias campesinas. Los estados que han desarrollado más esta actividad son: Estado de México, Durango, Puebla, Hidalgo, Guanajuato y Zacatecas ([FAO, 2009](#)).

## 2.4. TILAPIA

Egipto es el principal productor de tilapia con un 14 % de la producción mundial aportando 102,186 toneladas. Por otro lado; México se colocó como el tercer productor con un 8.1 % aportando 77,547 toneladas. La estimación de consumo per cápita actual a nivel mundial es de 1.3 kg ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

La acuicultura en México aporta el 94.9 % del volumen pesquero de tilapia, siendo los tres principales productores en este tipo de sistema de cultivo: Jalisco, Chiapas y Veracruz con 20,927, 16,445 y 11,482 toneladas, respectivamente. ([SIAP Atlas Agroalimentario, 2014](#)).

### 2.4.1 Etapas de crecimiento

El ciclo de vida de la tilapia está dividido en etapas básicas: ([Cantor, 2007](#)).

- a) **Desarrollo embrionario:** Es cuando se lleva a cabo la fecundación hasta que se forma el embrión y eclosiona.
- b) **Alevín:** Dura alrededor de 3 a 5 días tiene un tamaño aproximado de 0.5 a 1 cm.
- c) **Cría:** Cuando alcanzan una talla de 1 a 5 cm y ya acepta alimento balanceado.
- d) **Juvenil:** Cuando alcanzan los 2 meses de edad; tienen una talla aproximada de 5 a 10 cm.
- e) **Adulto:** Es la última etapa del desarrollo y tienen una edad aproximada de 3 meses y medio, presentan tallas entre 10 y 18 cm y pesan de 70 a 100 g.

### 2.4.2 Condiciones de cultivo

Su hábitat es diverso, puede ser en agua salobre así como también en ambientes dulceacuícolas, en ríos, lagos e incluso en el mar sin diluir el agua, algunos espacios de agua son naturales y los otros son sistemas elaborados por el hombre para el cultivo de especies acuáticas, los cuales son equipados ([Akongyuure et al., 2015](#)).

El ciclo de maduración de los machos va de 4 a 6 meses y de las hembras de 3 a 5 meses. Su incubación es bucal en un tiempo aproximado de 3 a 6 días. Los sistemas de cultivo son clasificados de acuerdo a la densidad de siembra (**Cuadro 2**), los sistemas utilizados son: extensivo, intensivo, y semi-intensivo ([FAO, 2015d](#)).

**Cuadro 2.** Clasificación de sistemas de cultivo de acuerdo a su densidad de siembra.

| <b>Etapas de cultivo</b> | <b>Superficie de cultivo (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Densidad de siembra en sistemas con aireación (organismo por m<sup>2</sup>)</b> |
|--------------------------|--|--|
| <b>Siembra</b>           | 350-850                                      | 100-150  |
| <b>Pre- engorda</b>      | 450-1500                                     | 20-50  |
| <b>Engorda</b>           | 1000-5000                                    | 10-30  |

Fuente: [Carta Nacional Acuícola \(2012\)](#); [FAO \(2015d\)](#).

En el mercado, para presentación en platillo; su talla promedio es de 250 a 300 g. Para su reproducción debe contar con ciertos parámetros óptimos en el desarrollo del cultivo (**Cuadro 3**). El tiempo de cultivo promedio es de ocho a nueve meses, con un peso de cosecha de 300 a 350 g ([FAO, 2015d](#); [Carta Nacional Acuícola, 2012](#)).

**Cuadro 3.** Parámetros fisicoquímicos óptimos para el cultivo de tilapia.

| <b>Parámetro</b>                           | <b>Óptima</b> | <b>Límites</b> |
|--|---------------|----------------|
| <b>Temperatura, °C</b>                     | 24 a 29       | < 22 a < 32    |
| <b>Oxígeno disuelto, mg L<sup>-1</sup></b> | 3             | 10             |
| <b>CO<sub>2</sub> mg L<sup>-1</sup></b>    | 0             | 2              |
| <b>pH</b>                                  | 7.5           | > 6.5 a < 8.5  |
| <b>Amonio, mg L<sup>-1</sup></b>           | 0.1           | <0.1           |
| <b>Nitrito, mg L<sup>-1</sup></b>          | 4.6           | < 5            |

Fuente: ([Carta Nacional Acuícola, 2012](#); [Cantor, 2007](#)).

Sin embargo, es posible su reproducción en un intervalo de temperaturas de 12 a 42 °C, siendo su hábitat principal en agua dulce (Cantor, 2007; FAO, 2014).

### **2.4.3. Cultivo rentable**

Los sistemas de producción acuícolas de pequeña escala, contribuyen en la seguridad alimentaria; la pobreza y son vías de generación de empleo (FAO, 2012; Ortega-López *et al.*, 2015). La tilapia es considerada uno de los cultivos acuáticos más rentables en la acuicultura y de mayor producción (Rakocy *et al.*, 2006), la cual por sus características de adaptabilidad también es la especie más usada en acuaponía, debido a su rápido crecimiento, su alta resistencia a las enfermedades y su elevada productividad. Además posee características que la hacen más rentable como lo es su tolerancia a condiciones de alta densidad de organismos, así como su capacidad de sobrevivencia en ambientes con bajas concentraciones de oxígeno y a diferentes salinidades (organismos eurihalinos) (Iturbide-Dormon, 2008; Jung-Yuan y Yew-Hu, 2013; Gómez-Merino *et al.*, 2015) y su tolerancia al estrés inducido por manipulación (Akongyuure *et al.*, 2015).

Su alimentación puede ser diversa, desde natural (fitoplancton, algas, zooplancton, detritus, pequeños insectos, plantas acuáticas) y artificial como lo son los alimentos comerciales (migajas, extruido flotante y pellets) el cual varía el tamaño de acuerdo a la etapa de cultivo) (Carta Nacional Acuícola, 2012).

A nivel mundial la escasez de agua dulce requiere de sistemas de producción altamente eficientes. El 70 % de las reservas mundiales de agua potable se utilizan en la agricultura. Actualmente se han implementado innovaciones tecnológicas en esta práctica, entre las que destacan la hidroponía (Rodríguez-González *et al.*, 2015).

Siendo dos sistemas de producción de cultivos la hidroponía y la acuicultura, surge un nuevo modelo de producción alternativo, que se basada en la interacción de ambas técnicas, de una forma sustentable y eficiente dando lugar a la acuaponía.

## **2.5. ACUAPONÍA**

La acuaponía es un sistema de producción de cultivos, el cual integra eficientemente la hidroponía y la acuicultura dando como resultado una técnica innovadora, de forma que

incrementan la producción y diversidad de los productos vegetales a base de soluciones nutritivas (Rakocy *et al.*, 2004; García-Ulloa *et al.*, 2005; Gómez-Merino *et al.*, 2015) aprovechando al máximo la energía en forma de nutrientes por todos los componentes del cultivo (bacterias, peces y plantas) que además de producir biomasa, contribuyen a mantener limpio el ambiente acuático (Rodríguez-González *et al.*, 2015), en México aún está en crecimiento y desarrollo.

Los efluentes del cultivo de los peces contienen metabolitos que son convertidos por la actividad microbiana en nutrientes absorbibles y asimilables por las plantas, quienes además de aprovecharlos mantienen la calidad de agua adecuada para el desarrollo de los peces (Roosta y Hamidpour, 2011; Rodríguez-González *et al.*, 2015).

### **2.5.1. Fortalezas de la acuaponía**

Los sistemas acuapónicos surgen como una solución a la producción de alimentos, sin deteriorar el suelo y reutilizando el agua, reduciendo de esta forma costos de transporte y contaminación generada por el mismo, teniendo producciones a un bajo costo (Ramírez *et al.*, 2009).

Una de sus ventajas es su adaptación a pequeña escala en espacios reducidos, generando mayor cantidad de alimentos de forma más natural, con alto valor nutritivo y de una forma sostenible. De esta forma, generando en la misma unidad de producción, animales acuáticos y plantas para consumo humano. Otra ventaja destacable es la optimización del uso del agua y fertilizantes, reduciéndose de esta forma, parte de la contaminación que genera la acuicultura. De esta forma se obtienen productos con un importante impacto socioeconómico a nivel local, lográndose mayores ingresos (Adler *et al.*, 2003; Iturbide-Dormon, 2008; Aguilera-Morales *et al.*, 2012; Borrero *et al.*, 2013; Gómez-Merino *et al.*, 2015; Ortega-López *et al.*, 2015).

### **2.5.2 Componentes de un sistema acuapónico**

Los módulos acuapónicos cuentan con partes importantes que hacen que funciones de la manera más eficiente y correcta (Colagrosso, 2014) los cuales se describen a continuación:

**Estanque.** Los estanques son los lugares en donde se aloja el cultivo de animales acuáticos. Las recomendaciones para el cultivo acuícola son de 10 a 15 g de peces por litro de agua, debiendo considerarse para ese cálculo, la longitud o peso final de los peces. Para saber cuántas unidades acuícolas se pueden cultivar, se hace de la siguiente forma: gramos de peso inicial por los litros de la capacidad del estanque; entre el peso del cual desea sacar las tilapias a la venta, el peso comercial suele ser de 300 a 500 g. Antes de iniciar el cultivo de los animales acuáticos en el estanque, se deja madurar el sistema aproximadamente un mes antes de incluir los animales acuáticos en el mismo, para que se desarrollen en el sistema, las colonias bacterianas necesarias para su correcto funcionamiento ([Borrero et al., 2013](#)).

El tipo de estanque más común suelen ser circular, pudiendo ser de tipo industrial o rústico, de diferentes tipos de materiales, entre los más comunes son los de geomembrana, jaulas flotantes o estanques de concreto.

**Sistemas de cultivos hidropónicos.** Los sistemas acuapónicos utilizan principalmente tres tipos de sistemas de crecimiento para las plantas, los mismos que son utilizados en hidroponía: camas con sustrato sólido, sistemas de raíz flotante y técnicas de solución nutritiva recirculante (NFT.- Nutrient Film Technique) ([Ramírez et al., 2008](#)).

**Sustratos.** Existe una gran diversidad de sustratos que pueden ser utilizados en hidroponía ([Rakocy et al., 2006](#)). Los cuales se agrupan en dos tipos, orgánicos e inertes. Los sustratos inertes son aquellos en donde el sustrato no tiene ninguna interacción con la solución nutritiva lo cual quiere decir que no aporta ningún nutrimento al cultivo vegetal como es en el caso de los orgánicos. Todos los sustratos pueden ser utilizados separados o mezclados, de acuerdo a su compatibilidad y disponibilidad (SAGARPA, s.f). A continuación se describen los sustratos más comunes.

**Sustratos inertes:** grava, tezontle, perlita, zeolita, arena, ladrillo quebrado, agrolita, piedra pómez, lana de roca, vermiculita, poliestireno, y poliacrilamida (crystal soil o hidrogel).

**Sustratos orgánicos:** turba vegetal (peat moss), composta orgánicas y vermicomposta, fibra de coco, cascarilla de arroz y aserrín.

**Reutilización de agua.** Los animales acuáticos aportan dos tipos de desechos al agua, las excretas y los pellets o alimento que no se comen, los cuales en teoría tienen nutrientes que no son aprovechados y de esta forma el agua está siendo enriquecida. El objetivo de la acuaponía es poder utilizar esa agua y al mismo tiempo que las plantas puedan ser beneficiadas de los nutrientes en ella ([Gómez-Merino et al., 2015](#)), lo que representa una de las formas de producción agrícola más sustentables y respetuosas con el medio ambiente ([Falcón, 2010](#)), mediante la recirculación del agua entre ambos componentes con ayuda de la gravedad o por sistemas de aireación y bombeo de agua. Existen dos formas de poder recircular el agua, de forma manual (la cual es ejercida por el encargado del sistema conectando la bomba), o automatizada (con un temporizador) dependiendo de las necesidades de cada planta y cada especie de animal acuático.

El porcentaje de recambio de agua varía del 5 al 20 % según la etapa y el sistema de cultivo utilizado así como la transpiración que se tenga a lo largo del día ([FAO, 2015c](#)).

**Bomba de agua.** La bomba de agua tiene como función permitir que el agua pueda ser recirculada desde el tanque de los peces a los cultivos hidropónicos y de éstos la reenvía de vuelta al estanque en un sistema cerrado de recirculación. Lo anterior garantiza que las plantas reciban los nutrientes existentes en el agua, de esta forma se filtra y mejora la calidad del agua que los peces recibirán una vez que ésta complete su recorrido al regresar al estanque ([Colagrosso, 2014](#)).

**Bomba de aireación.** Para la sobrevivencia de los animales acuáticos y completar su ciclo de vida, se necesita la presencia de oxígeno en el agua. Siendo también beneficiadas las raíces de las plantas por la presencia de oxígeno disuelto en el agua del sistema. Es necesario que la bomba funcione las 24 horas sin interrupciones ([Colagrosso, 2014](#)).

**Biofiltro, conversión de residuos.** Los biofiltros están comúnmente elaborados de materiales porosos, los cuales tienen la función de albergar bacterias nitrificadoras proporcionándoles una superficie de supervivencia en la cual pueden alojarse. Los materiales comunes para los biofiltros puede ser esponja, piedra porosa, cuentas de plástico, redes enrolladas, y bioesferas o materiales porosos. Los residuos son convertidos por acción bacteriana en nitrito (*Nitrosomonas*) y en nitrato (*Nitrobacter*), sirviendo como fuente de alimentación a las plantas (Nelson, 2007; Parker, 2012; Arroyo-Padilla, 2012; Borrero *et al.*, 2013). Las raíces de las plantas y las rizobacterias remueven los nutrientes del agua, actuando como un biofiltro, lo cual es benéfico para ambas partes; tanto para los peces como para las plantas (Rakocy *et al.*, 2003; Diver, 2006; Iturbide-Dormon, 2008; Grande y Luna, 2010; Gómez-Merino *et al.*, 2015; Ortega-López *et al.*, 2015).

### **2.5.3. Contribuciones acuapónicas**

Este tipo de técnica aún está en crecimiento y particularmente en México existen muy pocos trabajos acerca de ésta y de su experimentación (**Cuadro 4**); sin embargo, su implementación ha ido en aumento, siendo una de las causas principales la limitación de agua así como la contaminación de la misma (Gómez-Merino *et al.*, 2015).

Por su parte el CONACyT (2014) promueve la Red de Biotecnología para la Agricultura y la Alimentación (BioRed) la cual tiene una iniciativa para la integración eficiente de expertos en acuicultura y en hidroponía para poder hacer más eficiente el sistema acuapónico.

En el Campus Córdoba del Colegio de Postgraduados esta investigación forma parte de una caracterización de sistemas acuapónicos cerrados y abiertos que se han puesto en marcha en la zona centro del estado de Veracruz (Gómez-Merino *et al.*, 2015).



**Cuadro 4.** Aportaciones de sistemas acuapónicos en México.

| <b>Institución</b>  | <b>Año</b> | <b>Animal acuático</b>         | <b>Cultivo vegetal</b>   |
|---|------------|--------------------------------|--|
| Universidad Autónoma de Guadalajara                                 | 2001       | Tilapia y langosta australiana | Pepinos, lechugas y tomate   |
| Empresa Acuicultura del Desierto S. de P. R. de R. L.               | 2004       | Tilapia y trucha arcoíris      | Hortalizas orgánicas y especies aromáticas como albahaca   |
| Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora                  | 2005       | Tilapia                        | Tomate, pepino europeo, lechuga y forraje verde hidropónico  |
| BOFISH  | 2006       | Tilapia nilótica               | Lechuga y albahaca fresca, tomate cherry, betabel, acelga, espinaca, brócoli, pepino, calabaza, etc. |
| Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada | 2011       | Tilapia nilótica               | Fresa variedad Camarosa  |
| Instituto Tecnológico de Boca del Río                               | 2012       | Langostino malayo              | Albahaca   |
| Colegio de Postgraduados Campus Veracruz                            | 2013       | Tilapia nilótica               | Diversas especies aromáticas y hortícolas.   |

**Fuente:** Datos tomados de [Gómez-Merino et al., 2015](#).

La experimentación acuapónica en el mundo también tiene avances relevantes; en los Estados Unidos de América, particularmente en Montello, Wisconsin se cuentan con investigaciones importantes en acuaponía realizadas por Nelson y Pade. Así mismo en la Universidad de las Islas Vírgenes (UVI) se cuenta con investigaciones relevantes realizadas por el Dr. James Rakocy. En Alemania se cuenta con un proyecto de

elevado perfil tecnológico coordinado por INAPRO, llamado (Innovative model and demonstration based water management for resource efficiency in integrated multitrophic agriculture and aquaculture systems), con sede en el Instituto Leibniz de Ecología de Agua Dulce y Pesca Continental (IGB, Berlín), cuyos científicos se destacan en esta área por haber desarrollado anteriormente la tecnología de ASTAF (“Aquaponics system for emission free tomato- and fish production in greenhouses”) ([www.igb-berlin.de](http://www.igb-berlin.de)).

## 2.6. AGUA Y SU USO INDUSTRIAL

El agua es empleada para diversas actividades, uno de los usos más importantes es el agrícola, principalmente el riego de cultivos, ocupando un 76.6 %, el otro 23.4 % es utilizado para el abastecimiento público, industria autoabastecida y energía eléctrica (excluyendo hidroelectricidad) con un 14.5, 4 y 4.9 % respectivamente (CONAGUA, 2015).

Las industrias suelen utilizar metales pesados en sus funcionamientos siendo perjudiciales para la salud humana y al mismo tiempo transformando el equilibrio de los sistemas ambientales (López-Ceballos *et al.*, 2010).

El Golfo de México es una de las zonas que se encuentra en alto riesgo, por la contaminación en carne de especies acuáticas, siendo algunas de las causas, las aguas industriales y residuales urbanas no tratadas, también las actividades agropecuarias de la zona, de las cuales derivan fuentes potenciales de contaminantes de metales pesados en los sistemas marinos y costeros (Mendoza-Díaz *et al.*, 2013). Hay pocos estudios sobre contaminación de metales pesados en organismos acuáticos siendo que existe una preocupación por el consumo de especies acuáticas contaminadas por metales pesados y metaloides (Mendoza-Díaz *et al.*, 2013). Actualmente se desconoce la cantidad de nutrimentos disponibles en el agua acuapónica la cual estando enriquecida con nutrimentos aportados por los desechos de los animales acuáticos, que en cierta forma incrementa la calidad del agua, los cuales resultan ser necesarios y de utilidad para mantener a la planta viva.

### 3. LITERATURA CITADA

- Adler PR, Summerfelt ST, Glenn DM, Takeda F. 2003. Mechanistic approach to phytoremediation of water. *Ecol. Eng.* 20: 251-264.
- Aguilera-Morales ME, Hernández-Sánchez F, Mendieta-Sánchez E, Herrera-Fuentes C. 2012. Producción integral sustentable de alimentos. *Ra Ximhai* 8(3): 71-74.
- Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI. 2013. *Nutrición de Cultivos*. 1ª Edición, 5ta. Reimpresión. México, D. F. Colegio de Postgraduados. 454 p. ISBN 978-607-715-183-8.
- Akongyuure DN, Agbeko E, Delwin AE. 2015. Preliminary study on growth of mixed sex Nile tilapia (Akosombo strain) in a reservoir-based fish cage in Ghana. *International Journal of Farming and Allied Sciences* 4(1): 13-18.
- Arroyo-Padilla J. 2012. Acuaponía. Tepalcates Tercera Época. *Revista de Divulgación Científica y Humanística para Profesores y Alumnos del CCH*. Febrero 1: 2-7.
- Banco Mundial. 2015. Informe sobre el desarrollo mundial 2015: Mente, sociedad y conducta, cuadernillo del "Panorama general", Banco Mundial, Washington D. C. Disponible en línea en <http://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/Publications/WDR/WDR%2015/Overview-Spanish.pdf>. Consultado: octubre 26, 2015.
- Bielinski MS, Obregón-Olivas HA, Salamé-Donoso TP, 2010. Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: Estructuras para la Agricultura Protegida. Disponible en línea en: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/HS/HS118200.pdf> Consultado: octubre 18, 2015.
- Borrero C, Martínez-Silva M, Baigorri A, Rico L. 2013. Acuapónicos: Una alternativa productiva en el hogar. *FIATMAR Revista Marina* 3(1): 4-5.
- Boza MS. 2010. Desafío del desarrollo: la agricultura orgánica como parte de una estrategia de mitigación de la pobreza rural en México. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades* 19(7): 92-111.
- Carta Nacional Acuícola. 2012. *Diario Oficial de la Federación*, actualización de la Carta Nacional Acuícola. Disponible en línea en:

- <http://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/2011/06062012%20SAGARPA.pdf> Consultado: octubre 26, 2014.
- Cantor AF. 2007. Manual de producción de tilapia. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla. Puebla, México. 135 pp. Disponible en línea en: <http://www.tecnopedia.org/contents/manual-de-produccion-de-tilapia-biol-fernando-cantor-atlatenco.html> Consultado: junio 14, 2015
- Campos-Pulido R, Alonso-López A, Avalos-de la Cruz DA, Asiain-Hoyos A, Reta-Mendiola JL. 2013. Caracterización fisicoquímica de un efluente salobre de tilapia en acuaponia. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp.* 5: 939-950. ISSN 2007-0934.
- Colagrosso, A. 2014. Instalación y manejo de sistemas de cultivo acuapónico a pequeña escala. Disponible en línea en: [http://www.elfinancierocr.com/negocios/Manual-desarrollo-cultivo-acuaponico\\_ELFFIL20140113\\_0001.pdf](http://www.elfinancierocr.com/negocios/Manual-desarrollo-cultivo-acuaponico_ELFFIL20140113_0001.pdf) Consultado: marzo 10, 2015.
- CONACYT. 2014. Biored. Red de Biotecnología para la Agricultura y la Alimentación. Disponible en línea en: <http://biored-conacyt.mx/> Consultado: febrero 2, 2015.
- CONAGUA, 2015. Cuidemos y valoremos el agua que mueve a México. Agua y desarrollo sostenible. Día mundial del agua. Disponible en línea en: [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/carrera\\_agua\\_2015.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/carrera_agua_2015.pdf). Consultado: agosto 25, 2015.
- Diver S. 2006. Aquaponics-integration of hydroponics with aquaculture, ATTRA - National Sustainable Agriculture Information Service (National Center for Appropriate Technology) Disponible en línea en: <http://www.backyardaquaponics.com/Travis/aquaponic.pdf>. Consultado: enero 20, 2015.
- Falcón E. 2010. Más vida en el desierto. *Revista Día Siete* 502(11): 40-47.
- FAO. 2009. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2009. Roma. 196 pp. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/011/i0250s/i0250s00.htm> abril 2014 (Consultado en Diciembre 2014). ISBN 978-92-5-306029-0

- FAO. 2012. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2012. Roma. 231 pp. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/016/i2727s/i2727s04.pdf> (Consultado en Diciembre 2014).
- FAO. 2013. Agroindustrias para el desarrollo Editado por Carlos A. da Silva, Doyle Baker, Andrew W. Shepherd, Chakib Jenane y Sergio Miranda da Cruz ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA Roma, 2013 ISBN 978-92-5-307413-6 316p <http://www.fao.org/docrep/017/i3125s/i3125s00.pdf> Consultado: 20 Abril, 2015
- FAO. 2014. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Oportunidades y desafíos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3720s.pdf> Consultado: 20 Abril, 2015
- FAO. 2015a. El año internacional de la agricultura familiar y la alimentación. Innovación en la agricultura familiar. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4040s.pdf> Consultado: 16 Octubre, 2015
- FAO. 2015b. Sistema de información sobre alimentos y recursos fertilizantes para la acuicultura. Tilapia del Nilo. Disponible en línea en: <http://www.fao.org/fishery/affris/perfiles-de-las-especies/nile-tilapia/fertilizantes-y-fertilizacion/es/>. Consultado: enero 18, 2015.
- FAO. 2015c. Programa de Información de Especies Acuáticas. *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). Disponible en línea en: [http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis\\_niloticus/es](http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis_niloticus/es) Consultado: agosto 30, 2015.
- FAO. 2015d. Visión general del sector acuícola nacional - México. Disponible en línea en: [http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso\\_mexico/es](http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_mexico/es) Consultado: agosto 15, 2015.
- FIDA. 2011. El futuro de la seguridad alimentaria y nutrición mundial. Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola. Disponible en línea en: [http://www.ifad.org/pub/factsheet/food/foodsecurity\\_s.pdf](http://www.ifad.org/pub/factsheet/food/foodsecurity_s.pdf). Consultado: diciembre 10, 2014.

- Foresight. 2011. El futuro de los alimentos y la agricultura. Retos y opciones para la sostenibilidad a nivel mundial. Resumen ejecutivo. Oficina del Gobierno para la Ciencia, Londres. Disponible en línea en: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/288132/11-927-future-of-food-and-farming-summary-spanish.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/288132/11-927-future-of-food-and-farming-summary-spanish.pdf). Consultado: noviembre 28, 2014.
- García-Casal MN. 2007. La alimentación del futuro: Nuevas tecnologías y su importancia en la nutrición de la población. *Anales Venezolanos de Nutrición* 20(2): 108-114.
- García-Ulloa M, León C, Hernández F, Chávez R. 2005. Evaluación de un sistema experimental de acuaponía. *Avances en Investigación Agropecuaria* 9(1): 1-5.
- Gómez-Merino FC, Ortega-López NE, Trejo-Téllez LI, Sánchez-Páez R, Salazar-Marcial E, Salazar-Ortiz J. 2015. La acuaponía: Alternativa sustentable y potencial para producción de alimentos en México. *Agroproductividad* 8(8): 60-65.
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez, LI, Cuacua-Temiz, C, Jácome-Chacón MA, Senties-Herrera HE. 2015. Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *AGROENTORNO* 166: 19-20.
- Grande E, Luna P. 2010. Comparación de la producción de lechuga a 6, 12 y 18 plantas/m<sup>2</sup> con 40 y 70 ppm de nitrógeno total en acuaponía con tilapia. Tesis Lic. Zamorano, HN, Escuela Agrícola Panamericana. 23 p.
- Iturbide-Dormon K. 2008. Caracterización de los efluentes de dos sistemas de producción de tilapia y el posible uso de plantas como agentes de biorremediación. Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente. Universidad de San Carlos de Guatemala. Disponible en línea en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0157\\_MT.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0157_MT.pdf). Consultado: agosto 10, 2014.
- Jung-Yuan L, Yew-Hu Ch. 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system. *Int. Biodeterioration and Biodegradation* 85: 693-700.

- López-Ceballos CR, García N, Valdez R. 2010. Evaluación de la presencia de metales en residuales líquidos y su efecto potencial para una comunidad. *Avances en Investigación Agropecuaria* 14(3): 33-46.
- Márquez-Hernández C, Cano-Ríos P, Chew-Madinavítia YI, Moreno-Reséndez A, Rodríguez-Dimas N. 2006. Sustratos en la producción orgánica de tomate cherry bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12(2): 183-189.
- Márquez-Hernández C, Cano-Ríos P, Rodríguez-Dimas N. 2008. Uso de sustratos orgánicos para la producción de tomate en invernadero. *Agricultura Técnica en México* 34(1): 69-74.
- Marulanda C, Izquierdo J. 2003. Manual Técnico. La huerta hidropónica popular. FAO. Santiago, Chile. Tercera edición. Disponible en línea en: <http://www.fao.org/3/a-ah501s/>. Consultado: abril 14, 2014.
- Mendoza-Díaz F, Serrano A, Cuervo-López L, López-Jiménez A, Galindo JA, Basañez Muñoz A. 2013. Concentración de Hg, Pb, Cd, Cr y As en hígado de *Carcharhinus limbatus* (Carcharhiniformes: Carcharhinidae) capturado en Veracruz, México. *Revista Biología Tropical* 61: 821-828.
- Nelson RL. 2007. Acuaponia. Nelson and Pade, Inc. Montillo, WI. USA. 75 p.
- Norzagaray CM, Muñoz-Sevilla P, Sánchez-Velasco L, Capurro-Filograsso L, Llánés-Cárdenas O. 2012. Acuacultura: estado actual y retos de la investigación en México. *Revista AquaTIC* 37: 20-25.
- Ortega-López NE, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alonso-López A, Salazar-Ortiz J. 2015. Crecimiento de tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en un sistema acuapónico abierto. *Agroproductividad* 8(3): 20-25.
- Parker R. 2012. *Aquaculture Science*. Third Edition. N.Y. USA= Delmar. pp. 672.
- Pilon-Smits EAH, Quinn CF, Tapken W, Malagoli M, Schiavon M. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion in Plant Biology*. 12: 267-274.
- PROFECO. 2014. Jitomate. Conoce más de este nutritivo y sabroso fruto. Disponible en línea en: [http://www.profeco.gob.mx/lacanasta/pdf/LA\\_CANASTA\\_No.4.pdf](http://www.profeco.gob.mx/lacanasta/pdf/LA_CANASTA_No.4.pdf). Consultado: febrero 20, 2014.

- Rakocy J, Shultz RC, Bailey DS, Thoman ES. 2003. Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Horticulturae* 648: 63-69.
- Rakocy J, Bailey DS, Shultz RC, Thoman ES. 2004. Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. In: Bolivar R, Mair G, Fitzsimmons k, (eds.). *Proceedings of the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture*. Bureau of Fisheries and Aquatic Resources, Manila, Philippines, and American Tilapia Association, Charles Town, West Virginia. pp. 676-690.
- Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM. 2006. *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*. Southern Regional Aquaculture Center Publication (SRAC) Publication No. 454. 16 p.
- Ramírez D, Sabogal D, Jiménez P, Hurtado-Giraldo H. 2008. La acuaponía: Una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas* 4(1): 32-51.
- Ramírez D, Sabogal D, Gómez E, Rodríguez-Caicedo D, Hurtado-Giraldo H. 2009. Montaje y evaluación preliminar de un sistema acuapónico gold-fish lechuga. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas* 5(1): 154-170.
- Rodríguez-González H, Rubio-Cabrera SG, García-Ulloa M, Montoya-Mejía M, Magallón-Barajas FJ. 2015. Análisis técnico de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en dos sistemas de acuaponía. *Agroproductividad*. 8(3):15-19.
- Roosta HR, Hamidpour M. 2011. Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae* 129: 396-402.
- SAGARPA. 2010. Monografía de cultivos. Jitomate. Subsecretaria de fomento a los agronegocios. Disponible en línea en: <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/Monografias/Jitomate.pdf>. Consultado: diciembre 3, 2014.



- SHCP. 2014. Panorama de la pesca y la acuacultura. Disponible en línea en: [http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Panoramas/Panorama%20Pesca%20\(abr%202014\).pdf](http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Panoramas/Panorama%20Pesca%20(abr%202014).pdf). Consultado: abril 12, 2014.
- SIAP. 2014. Análisis del producto interno bruto. Segundo trimestre de 2014. Disponible en línea en: <http://www.siap.gob.mx/inpc-correspondiente-a-la-primera-quincena-de-agosto-2014/>. Consultado: enero 20, 2015.
- SIAP. 2015. Análisis del producto interno bruto en el cuarto trimestre de 2014. Disponible en línea en: <http://www.siap.gob.mx/analisis-del-producto-interno-bruto-pib-cuarto-trimestre/>. Consultado: febrero 3, 2015.
- SIAP Atlas Agroalimentario. 2014. Con los pies en la tierra. Primera edición. ISBN: 978-607-9350-03-1 Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/pdfjs/web/pdfs/Atlas%20Agroalimentario%202014.pdf> Consultado: mayo 29, 2015.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC. 2012. Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. *In*: Asao T. (ed.), Hydroponics-A Standard Methodology for Plant Biological Researches, InTech. Disponible en línea en: <http://www.intechopen.com/books/hydroponics-a-standardmethodology-for-plant-biological-researches/nutrient-solutions-for-hydroponic-systems> Consultado: noviembre 20, 2015.
- Wood L. 2014. Global Precision Agriculture Market Analysis & Forecast (2015-2022) Technology (VRA, Soil Mapping, Yield Monitoring, Precision Irrigation, Others), Components and Systems. Disponible en línea en: <http://www.prnewswire.com/news-releases/global-precision-agriculture-market-analysis--forecast-2015-2022-technology-vra-soil-mapping-yield-monitoring-precision-irrigation-others-components-and-systems-300002169.html>. Consultado: enero 15, 2015.

**CAPÍTULO I.**  
**CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA RÚSTICO ABIERTO DE PRODUCCIÓN**  
**ACUAPÓNICA EN CUITLÁHUAC, VERACRUZ**

# CAPÍTULO I.

## CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA RÚSTICO ABIERTO DE PRODUCCIÓN ACUAPÓNICA EN CUITLÁHUAC, VERACRUZ.

### I.1. INTRODUCCIÓN

La acuaponía es una técnica de cultivo innovadora considerada un sistema sustentable por el aprovechamiento de los desechos orgánicos de los animales acuáticos siendo utilizados como fuente de nutrimentos beneficiando a los cultivos vegetales ([Gómez-Merino et al., 2015](#)).

Es importante considerar la cantidad de nutrimentos que se producen en el sistema acuícola, ya que las plantas deben cubrir sus requerimientos, siendo necesario evaluar qué plantas pueden asociarse con el sistema acuapónico de acuerdo con las condiciones climáticas, el tamaño de los sistemas, la biomasa en cultivo y la producción de nutrimentos aportados en el agua, y de ser el caso en el sustrato proporcionado a la planta ([Ronzón-Ortega et al., 2012](#); [Buzby y Lian-Shin, 2014](#); [Rodríguez-González et al., 2015](#)).

Los sistemas de producción hidropónicos se consideran de tipo abierto cuando la solución nutritiva es utilizada; pero no es recirculada; permitiendo la infiltración en el sitio ([Sánchez-Del Castillo et al., 2014](#)). Los sistemas de producción acuapónicos, son manejados como en los sistemas de hidroponía habiendo de tipo abierto y cerrado.

Las tilapias se consideran ideales para las condiciones de un sistema de cultivo rural debido a sus características y adaptabilidad; por su aparente facilidad de su cultivo y alta resistencia a enfermedades, han sido introducidas alrededor del mundo, soportando condiciones de manejo rústico ([PIC TILAPIA, 2012](#)).

La variación de nutrimentos en las plantas, indican su grado de absorción en sus órganos, lo cual es importante porque sirven de referencia en la planificación de fertilización, debido a que se conoce la distribución interna de los nutrimentos ([Galindo-Reyes et al., 2011](#)).

En este capítulo se realiza la caracterización de un sistema rústico acuapónico de tipo abierto. Se evaluaron las concentraciones nutrimentales tanto en el agua proveniente del sistema de producción de las tilapias como en el tejido de plantas de tomate; los

datos de biomasa seca obtenidos permitieron también evaluar la acumulación nutrimental por órgano de las plantas.

## **I.2 OBJETIVOS**

### **I.2.1 Objetivo general**

- Evaluar un sistema rústico acuapónico de tipo abierto, con producción de tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) var. Spring, y de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette establecido en 3 distintos sustratos.

### **I.2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar pH, CE y concentración de nutrimentos en el agua proveniente del sistema de producción de tilapias.

- Valorar el uso del agua proveniente del sistema de producción de tilapias en el riego de plantas de tomate, considerando crecimiento de la planta, concentración y acumulación de nutrimentos por órganos.

## **I.3 HIPÓTESIS**

### **I.3.1. Hipótesis general**

El sistema de producción acuapónico, es eficiente dado que permite el flujo de nutrimentos desde el módulo de producción de tilapia para la nutrición de plantas de tomate establecidas en distintos sustratos.

### **I.3.2. Hipótesis específicas**

- El agua proveniente del sistema de producción de tilapias tiene potencial para usarse de manera directa y en combinación con agua potable como fuente de nutrimentos para la producción de tomate establecido en distintos sustratos.

▪ Las plantas de tomate muestran crecimiento adecuado cuando son irrigadas con agua proveniente de la producción de tilapias, así también tienen adecuadas concentraciones y acumulaciones nutrimentales.

## **I.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **I.4.1. Ubicación geográfica del experimento**

El experimento se llevó a cabo en una parcela del Centro Agroecoturístico San Juan de la Punta, localizado a 18° 05' latitud norte, 96° 42' longitud oeste, y 380 m de altitud, en la localidad de Puente Chico, municipio de Cuitláhuac, Veracruz, dentro de la Microrregión de Atención Prioritaria (MAP) Zona Centro del Campus Córdoba del Colegio de Postgraduados. La zona tiene un clima cálido húmedo, con una temperatura promedio de 25 °C; y su precipitación media anual es de 2612.2 mm ([INAFED, 2010](#)).

### **I.4.2. Condiciones ambientales**

Algunos parámetros del clima fueron medidos en el sitio experimental empleando un HOBO<sup>®</sup>, los valores de éstos fueron los siguientes: 1) Humedad relativa media 72.7%, máxima 100.0 % y mínima 25.7 %; 2) Temperatura media 25.0 °C, máxima 35.7 °C y mínima 16.7 °C; 3) Intensidad luminosa media de 71.4 Lúmenes, máxima de 754.0 lm y mínima de 1.0 lm.

### **I.4.3. Material vegetal**

Se emplearon plántulas de tomate rojo (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette las cuales fueron germinadas en botellas de plástico cortadas por la mitad utilizando como sustrato composta y regadas con agua 100 % acuícola (**Figura I.1**)



**Figura I. 1** Plántulas de tomate rojo cv. Saladette germinadas 14 días en composta con riego acuícola.

#### I.4.4. Sustratos utilizados

Se emplearon tres sustratos:

1) Tezontle, con tamaño de partícula de 3 a 7 mm, que fue lavado con agua potable (**Figura I.2A**).

2) Composta, proporcionada por los productores de la zona, la cual fue preparada con residuos vegetales resultantes del chapeo del predio, hojas de roble y residuos de cosechas (**Figura I.2B**).

3) Mezcla de tezontle y composta, en una proporción de volumen 1:1.

Los sustratos empleados, fueron depositados en bolsas negras de polietileno de alto calibre (120 x 70 cm) para ser pesados en una báscula (TORREY® modelo MFQ-40 Aut. No.2907 Monterrey N.L.) (**Figura I.3A y I.3B**) y posteriormente ser esterilizados en autoclave (CP 66642) a 1 atm de presión y 121 °C (**Figura I.3C**).



**Figura I. 2** Colecta y tamizado de tezontle (A), composta proporcionada por productor (B).



**Figura I. 3** Sustratos tezontle (A) y composta (B) pesados en báscula TORREY® modelo MFQ-40 Aut. No. 2907 Monterrey N.L.). y (C) esterilizados en autoclave (1 atm de presión, 121 °C).

#### I.4.5. Agua de riego utilizada

Para esta experimentación fueron utilizados tres tipos de agua para el riego:

- 1) Agua 100 % potable.
- 2) Agua potable y agua acuícola (relación 1:1, v:v).
- 3) Agua 100 % acuícola.

#### I.4.6. Tratamientos evaluados en plantas

En plantas se evaluaron nueve tratamientos en un experimento factorial 3x3, siendo los factores de estudio el sustrato y el agua empleada para riego, descritos en los apartados I.4.3 y I.4.4. Los nueve tratamientos son presentados en el **Cuadro I.1**.

Cada tratamiento tuvo cinco repeticiones. La unidad experimental consistió en una bolsa negra de polietileno (17 x 25 cm); conteniendo alguno de los tres sustratos descritos y dos plantas de tomate.

**Cuadro I. 1** Tratamientos utilizados en el experimento acuapónico abierto para probar el efecto de los sustratos y el agua de riego en la producción de tilapias (*Oreochromis niloticus* L.) var. Spring y tomate rojo (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette.

| Tratamientos | Sustrato                          | Agua de riego                           |
|--------------|-----------------------------------|---|
| T1           |                                   | Agua potable (100 %)                    |
| T2           | Composta                          | Agua potable y agua acuícola (1:1, v:v) |
| T3           |                                   | Agua acuícola (100 %)                   |
| T4           |                                   | Agua potable (100 %)                    |
| T5           | Composta y<br>tezontle (1:1, v:v) | Agua potable y agua acuícola (1:1, v:v) |
| T6           |                                   | Agua acuícola (100 %)                   |
| T7           |                                   | Agua potable (100 %)                    |
| T8           | Tezontle                          | Agua potable y agua acuícola (1:1, v:v) |
| T9           |                                   | Agua acuícola (100 %)                   |

Los riegos fueron diarios tres veces al día y cada unidad experimental se regó aproximadamente con 250 mL diarios del agua de riego correspondiente.

## I.4.7. Manejo experimental de plantas

### I.4.7.1. Fase de adaptación: Trasplante inicial

Las plántulas de tomate se trasplantaron a los 14 d de emergidas, y se dejaron 7 d en bolsas de polietileno color negras (15 x 12 cm) a las cuales se le hicieron cortes en la parte media inferior para que pudieran drenar el agua y que se pudieran realizar los riegos normales (**Figura I.4A**), tales bolsas contenían como sustrato perlita con diámetro medio de partículas de 20 mm, las cuales fueron puestas en un vaso de plástico transparente con capacidad de 1 L y trasplantando dos plántulas por vaso (**Figura I.4B**). En esta fase las plántulas se regaron con agua proveniente del cultivo de peces (agua acuícola) hasta antes del trasplante definitivo. Los contenedores con las plántulas fueron colocados en una red para delimitar y evitar el contacto con cualquier visitante del “Centro Agroecoturístico San Juan de la Punta” (**Figura I.4C**).



**Figura I. 4** Fase de adaptación de plántulas de tomate rojo. Corte de bolsas para preparación previa al trasplante. (A) Plántulas de tomate rojo de 14 días de emergidas, previo al trasplante. (B) Plántulas en fase de adaptación en sustrato de esferas de unigel de 20 mm y riego de agua acuícola 100 %(C).



#### I.4.7.2. Fase experimental: Trasplante definitivo

El trasplante definitivo se hizo a los 21 días de emergidas las plantas; usando el sustrato estéril y homogeneizado correspondiente en cada tratamiento (**Figura I.5A**). Se etiquetaron y llenaron las bolsas de acuerdo al tratamiento (**Figuras I.5B y I.5C**). Se trasplantaron dos plántulas por unidad experimental (**Figura I.5D**). Se extendió un hule blanco de calibre grueso debajo de las unidades experimentales para evitar que tengan contacto con el suelo.



**Figura I. 5** Sustratos utilizados. Homogeneización de sustrato (A). Etiquetado de sustratos de acuerdo al Cuadro I.1 (B). Llenado de bolsas con sustratos estériles y homogeneizados (C). Trasplante de dos plántulas de tomate rojo cv. Saladette por unidad experimental en el ejemplo con tezontle al 100 %(D).

#### I.4.8. Cultivo de tilapia

En un estanque circular de cemento de 2.5 m de diámetro por 1 m de alto (**Figura I.6**) se establecieron, 150 tilapias (*Oreochromis niloticus* L.) var. Spring de 30 días de edad. El estanque contó con una bomba de aireación (DHC80-12S Covron® N°610959 de 12

V Aquatic Eco- Systems, Inc. Since 1978 Diaphragm blower), para la oxigenación de las tilapias diariamente en periodos de entre 3 y 5 h. La energía para el funcionamiento de esta bomba fue generada a través de un panel solar casero. El estanque cuenta también con una toma de agua potable para realizar los recambios de agua en el estanque; el volumen de recambio diario corresponde aproximadamente al 5 % de la capacidad total (**Figura I.6**).



**Figura I. 6** Estanque utilizado en el cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus* L.).

#### **I.4.9. Alimentación de la tilapia**

Se emplearon tres alimentos comerciales de la marca NUTRIPEC PURINA® como fuente de alimentación de las tilapias, y se fueron administrando conforme la fase de crecimiento de éstas. Los contenidos y recomendaciones de uso de los alimentos empleados se presentan en el **Cuadro I.2**. Los alimentos empleados son aptos para etapa de desarrollo de pre-engorda, con una presentación de extruidos flotantes con diferentes diámetros descritos de acuerdo a la recomendación por su peso promedio (**Cuadro I.2**).

**Cuadro I. 2.** Alimentos empleados para pre-engorda de tilapias (*Oreochromis niloticus* L.) durante su cultivo en un sistema rústico.

| Etapa | Proteína (%) | Grasa, (%) | Presentación (mm) | Recomendación para peces con peso promedio (g) |
|-------|--------------|------------|-------------------|--|
| 1     | 44           | 15         | 1.5               | De 5 a 30                                      |
| 2     | 44           | 15         | 2.4               | De 31 a 60                                     |
| 3     | 44           | 13         | 3.5               | De 61 a 150                                    |

Fuente: [NUTRIPEC PURINA®](#), 2015

La alimentación de las tilapias depende del peso promedio como se muestra en el **Cuadro I.3.** Cuando las tilapias fueron ingresadas al estanque tenían un peso promedio de 30 g se les administraban 2 kg de alimento, divididos en 3 raciones por día; cuando alcanzaron los 140 g en peso promedio se les administraban 6 kg diarios divididos en dos raciones al día.

**Cuadro I.3.** Porcentaje de alimento diario para tilapia de acuerdo a su intervalo de peso.

| Intervalo de peso (g) | Ración de alimento (%) |
|-----------------------|------------------------|
| 5 -10                 | 6.3                    |
| 10-20                 | 5.3                    |
| 20-50                 | 4.6                    |
| 70-100                | 3.3                    |
| 100-150               | 2.8                    |
| 150-200               | 2.2                    |
| 200-300               | 1.7                    |
| 300-900               | 1.3                    |

Fuente: [Toledo-Pérez y García-Capote \(2000\)](#)

## I.4.10. Variables evaluadas

### 1.4.10.1. Análisis químico de aguas empleadas en el riego

Para el análisis nutrimental del agua, se realizaron muestreos (**Figura I.7A**); cada quince días de los tres tipos de agua de riego descritos en el **Cuadro I.1**. Las muestras fueron depositadas en frascos etiquetados (**Figura 1.7B**); y posteriormente colocados en bolsas Ziploc® (para evitar contaminación) e inmediatamente se procedió a congelarlas (**Figura I.7**). Cada muestreo fue de 100 mL con una repetición. Se transportan congeladas para su posterior análisis químico.



**Figura I. 7 .** Manejo de muestreo de agua de riego utilizada. Muestreo de agua acuícola 100 % (A). Etiquetado de frascos de muestras de agua de riego. (B). Se procede a congelar las muestras para trasladarlas al laboratorio (C).

El pH de las tres soluciones usadas para riego se determinó usando un potenciómetro (OAKTON® pH/mV/°C meter, Series 43291). La conductividad eléctrica se determinó con un conductímetro de mesa (Hanna®, HI 4312).



Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  se determinaron en el extracto de pasta de saturación mediante el método Kjeldahl.

Los nutrimentos (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Ni y B) y Na en solución y fueron medidos empleando un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (Agilent® 725 Series ICP-OES).

La concentración de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  fue determinada por volumetría de neutralización; mientras que, la concentración de  $\text{Cl}^-$  fue determinada por volumetría de precipitación.

#### **I.4.10.2. Análisis químico de sustratos**

Se realizaron dos muestreos de los sustratos utilizados para realizar análisis químico en éstos. El primer muestreo fue después de que los sustratos fueron homogeneizados; es decir, al inicio de tratamientos. El segundo muestreo fue al finalizar el experimento, después de extraer los cultivos vegetales de las unidades experimentales. En ambos muestreos se tomaron tres repeticiones por sustrato.

El pH y la CE de los sustratos se midieron en el extracto de pasta de saturación, utilizando agua destilada como extractante con un potenciómetro (OAKTON® pH/mV/°C meter, Series 43291) y un conductímetro de mesa (Hanna®, Mod. HI 4312), respectivamente.

En el extracto de la pasta de saturación se midieron los iones en solución de la misma manera descrita en el apartado anterior para aguas; así también se emplearon las metodologías antes indicadas para  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ .

En los sustratos también se determinó la capacidad de intercambio catiónico por el método del acetato de amonio; en el extracto resultante además se determinaron cationes intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ).

#### **I.4.10.3. Variables agronómicas**

Después del trasplante definitivo se evaluaron semanalmente las variables de crecimiento siguientes:

Altura de planta, medida con flexómetro (Foy tols® de 3 m) medida desde la base de la planta hasta el nudo más alto (**Figura I.8A**).

Diámetro de tallo, medido con vernier digital justo en la base de la planta (**Figura I.8B**).  
Número de hojas.  
Largo y ancho de hojas empleando con un vernier digital (**Figura I.8C**).



**Figura I. 8** Variables de crecimiento de tomate rojo. Altura de planta (A), diámetro de tallo (B) y número de hojas (C).

#### **I.4.10.4. Análisis nutrimental en tejido vegetal**

Al finalizar la fase experimental, después de 85 días a partir del trasplante definitivo; las plantas de tomate fueron divididas en hojas, tallos, frutos y raíces. Cada órgano por planta se pesó en una báscula digital (SCIENTECH® modelo SA210, serial 26968, U.S.A) y el peso fue registrado.

Posterior al pesado se pusieron a secar por órganos por unidad experimental durante 72 h a una temperatura de 70 °C en bolsas de papel; en un horno de secado (TERLAB® modelo TE-H68D, serie 090325). Después del secado se determinó el peso de la biomasa seca.

La concentración de N fue determinada mediante la técnica Semimicro-Kjendahl descrita por [Alcántar y Sandoval \(1999\)](#). La concentración de P, K, Ca, Mg, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Na en cada órgano de la planta fue determinado en el extracto proveniente de la digestión húmeda diácida ([Alcántar y Sandoval, 1999](#)), utilizando un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (Agilent 725 Series ICP-

OES). Las acumulaciones por órganos se estimaron considerando las concentraciones de cada elemento y el peso de biomasa seca correspondiente.

#### **1.4.10.5. Análisis químico de alimentos usados en la producción de tilapia**

En los alimentos utilizados se determinó la concentración de N total por el método Semimicro-Kjendahl . Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Na se determinaron en el extracto resultante de la digestión húmeda, empleando un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (Agilent 725 Series ICP-OES).

#### **1.4.10.6. Biometría de tilapias**

Después de 85 días a partir del trasplante de las plántulas, se evaluó la biometría de las tilapias (*Oreochromis niloticus* L.) var. Spring (120 días de edad), considerando las variables siguientes: peso, largo (desde la boca hasta la aleta caudal), alto y ancho (Figura I.9).



**Figura I. 9** Medición de la altura de tilapias (*Oreochromis niloticus* L.) var. Spring a los 120 días de edad.

#### **1.4.11 Diseño experimental**

Se utilizó un experimento factorial para análisis de tomate, donde los factores de estudio fueron el sustrato y el agua empleada para el riego; dando como resultado 9 tratamientos (**Cuadro I.1**). Los tratamientos fueron distribuidos completamente al azar, cada uno con cinco repeticiones cada uno, lo que generó 45 unidades experimentales.

Los datos de crecimiento de las tilapias fueron evaluados cada 8 días y de éstos solo se presentan valores medios.

#### I.4.12. Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos se realizaron análisis de varianza y prueba de comparación de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) utilizando el programa estadístico SAS® (Statistical Analysis System).

### I.5. RESULTADOS

Se inicia la sección de resultados presentando un esquema que permite entender el desarrollo simultáneo del cultivo de tilapia y del cultivo de tomate **Figura I.10.**; a continuación se presentarán en primera instancia resultados relacionados con la producción de tomate y finalmente aquellos relacionados con la producción de tomate.

|                                       |    |    |    |    |    |     |     |
|---------------------------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|
| Días de cultivo de tilapia            | 27 | 46 | 60 | 74 | 87 | 102 | 116 |
| Días después del trasplante de tomate | 0  | 19 | 33 | 47 | 60 | 75  | 89  |

**Figura I. 10** Esquema del desarrollo cronológico del cultivo de tilapia y tomate en esta investigación.

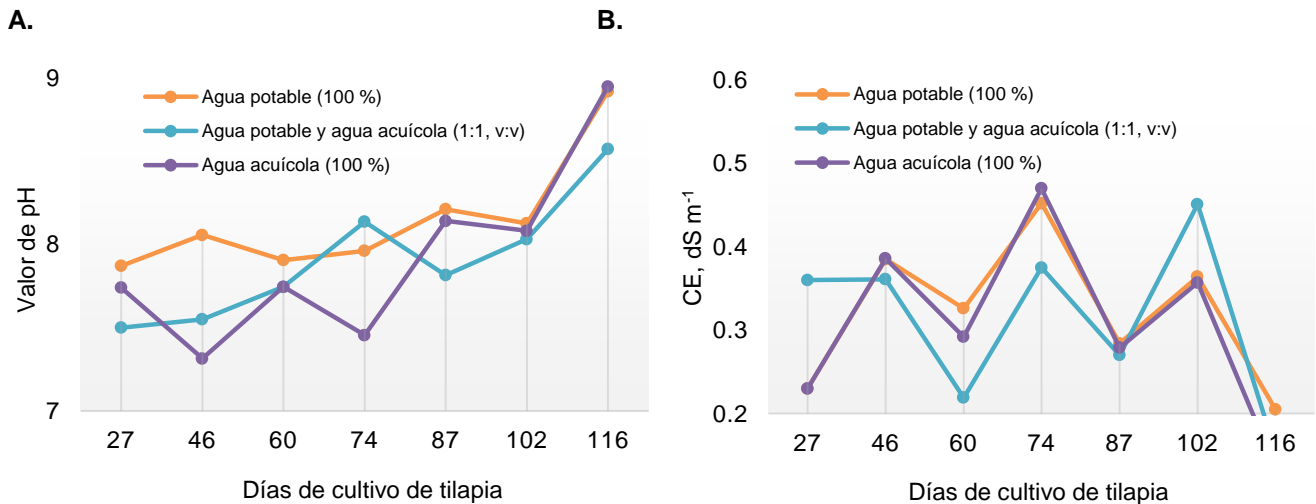
#### 1.5.1. Caracterización química de aguas empleadas en el riego

El pH de las aguas provenientes del cultivo de tilapia, del agua potable y de la combinación de la acuícola y potable y que fueron utilizadas para el riego de las plantas de tomate, osciló entre 7.32 a 8.95 durante la fase experimental; valores considerados como ligeramente y moderadamente alcalinos. Entre soluciones, la acuícola fue la de mayor pH. Se observa tendencia a incrementar a medida que el ciclo de producción avanzó (**Figura I.11A**). El valor de pH de una solución nutritiva apropiado para la mayor disponibilidad nutrimental de nutrientes se encuentra entre 5.5 y 6.5. Valores superiores a 7 restringen la disponibilidad nutrimental, debido a la precipitación de  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $PO_3^{-4}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012). Estos resultados indican que el uso de esta agua para producción de plantas para integrar un sistema acuapónico, precisa su acidificación. Si bien la literatura reporta un rango óptimo de pH



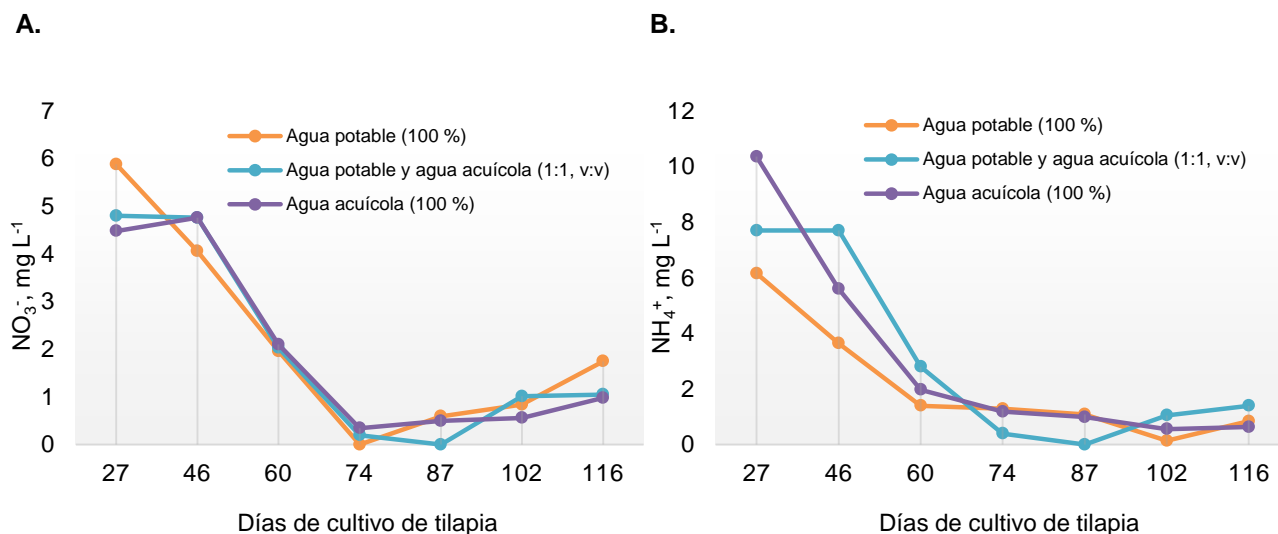
que oscila entre 5.5 y 6.5 dependiendo del genotipo a cultivar, un valor de 5.8 es considerado como el mejor para la disponibilidad nutrimental en cultivos hidropónicos (Bugbee, 2003).

La CE es un índice de la concentración de sales en solución (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012); este parámetro osciló en las tres soluciones empleadas para riego entre 0.135 y 0.470 dS m<sup>-1</sup> (Figura I.11B). Estos valores no representarían problema para el establecimiento del cultivo hidropónico, dado que el intervalo considerado como óptimo para sistemas hidropónicos va de 1.5 a 2.5 dS m<sup>-1</sup> (Sonneveld y Voogt, 2009). Así también previo conocimiento de la composición de estas aguas, es viable realizar adición de nutrimentos necesarios según la especie vegetal a utilizar en la conformación del sistema acuapónico.



**Figura I. 11** Evaluación del pH (A) y conductividad eléctrica (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate.

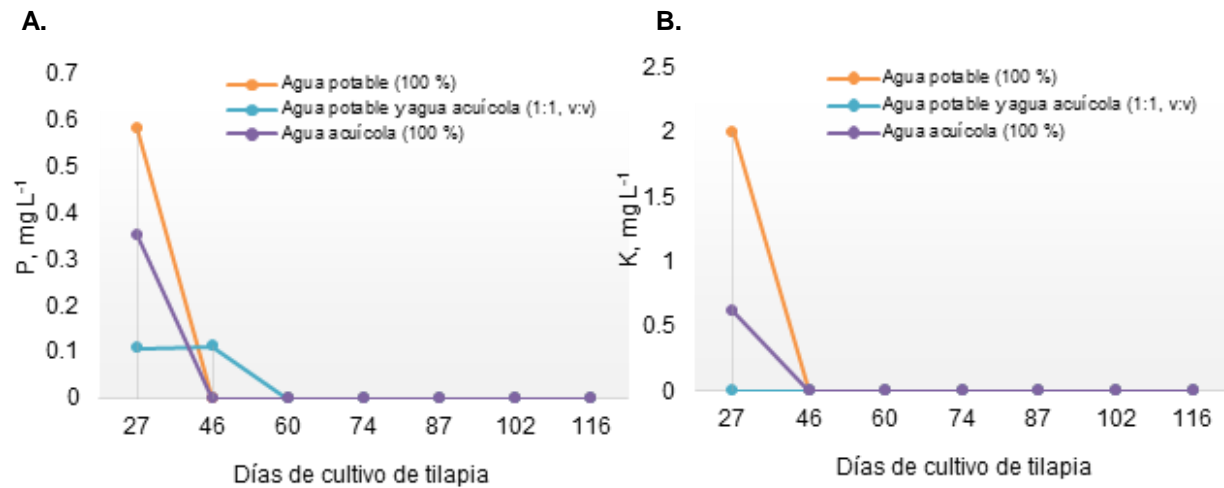
Las concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en las aguas utilizadas en el riego del tomate, mostraron la misma tendencia durante el ciclo de producción de las tilapias; es decir, las mayores concentraciones se tuvieron al inicio del ciclo, posteriormente las concentraciones descienden hasta los 74 días, punto en el cual se observa en todos los casos incrementos ligeros de éstas (Figura I.12).



**Figura I. 12** Concentración de  $\text{NO}_3^-$  (A) y  $\text{NH}_4^+$  (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate.

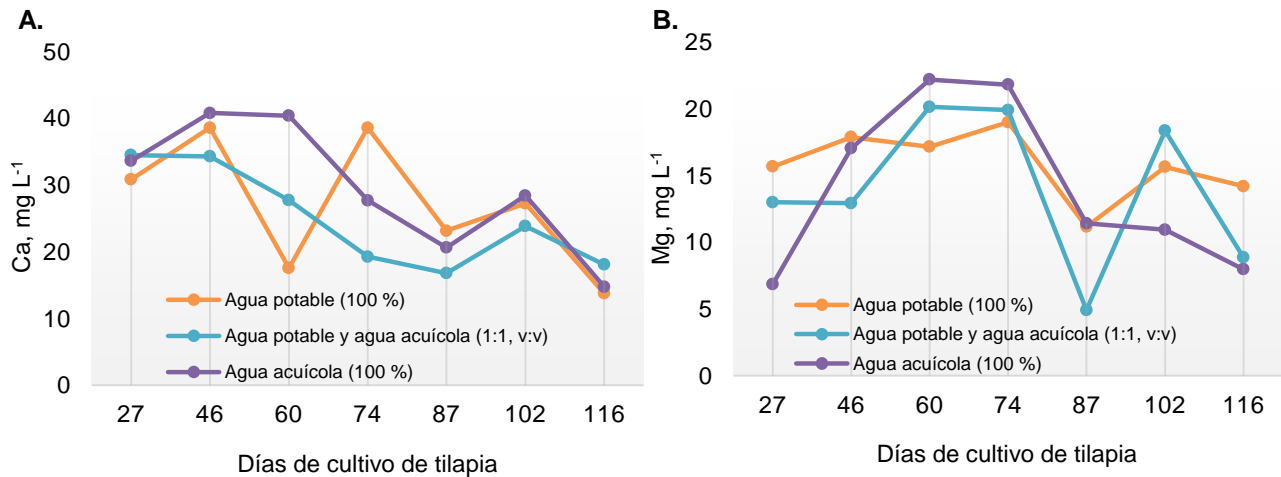
Así también es evidente que las de  $\text{NH}_4^+$  fueron superiores en soluciones conteniendo agua acuícola, ya sea de manera exclusiva o en combinación con agua potable (**Figura I.12**).

La solución nutritiva de Steiner al 100% de su concentración, posee 170 mg de N (Jones, 2014), esta solución nutritiva es empleada de manera frecuente en la producción de tomate, cultivo en el que fue evaluada (Steiner, 1984). En este estudio a los 27 días, se estimaron 6.11 y 9.06 mg de N en el agua potable y en el agua acuícola, respectivamente; lo cual indica la reducida concentración de N disponible para la planta. Las concentraciones tanto de P como de K fueron abatidas en las tres aguas para riego a partir de los 46 días de cultivo de tilapia coincidiendo con 19 días después del trasplante (**Figura 1.13**). Los valores más altos se registraron en el primer muestreo (27 dct) en el agua potable para P y K; empero estos valores son muy bajos, en comparación con las concentraciones en una solución nutritiva de Steiner al 100% (Steiner, 1984), con valores de 50 y 320 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente (Jones, 2014).



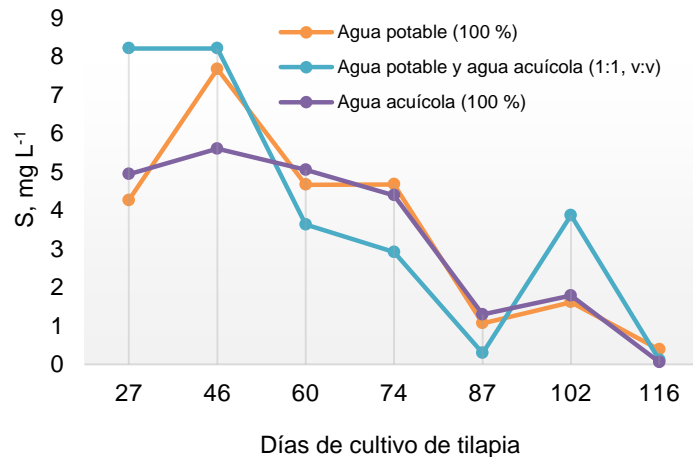
**Figura I. 13** Concentración de P (A) y K (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate

En la **Figura I.14** se presentan las concentraciones de Ca y Mg obtenidas en las tres soluciones empleadas para el riego. De manera general se observa que la mayor concentración de ambos cationes se tuvo en el agua acuícola, particularmente en la primera mitad del experimento. Los valores más altos de Ca y Mg registrados fueron de 48.8 y 22. 2 mg L<sup>-1</sup> respectivamente, mismo que representan solo el 26.7 y 44% de las concentraciones de Ca y Mg en la solución nutritiva universal de Steiner ([Jones, 2014](#)).



**Figura I. 14** Concentración de Ca (A) y Mg (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate.

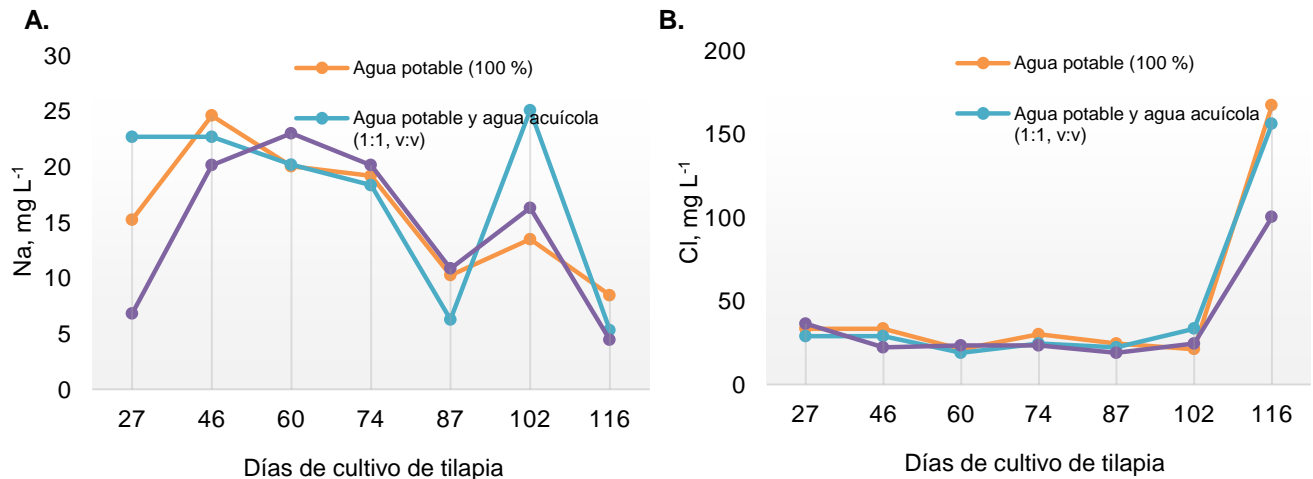
En lo que respecta a S, sus concentraciones fueron bajas en las tres aguas de riego; con valores máximo en el primer muestreo realizado (27 dct) en la solución consistente en la mezcla de agua acuícola con agua potable (**Figura I.15**).



**Figura I. 15** Concentración de S en las aguas utilizadas para el riego de tomate

El Na y Cl son dos elementos que en concentraciones altas en el agua de riego, pueden causar toxicidad en plantas superiores, reduciendo en consecuencia el crecimiento y el potencial productivo. Las concentraciones deseables de Na y Cl en el agua de riego comprenden los rangos de 0 a 50 mg L<sup>-1</sup> y de 0 a 140 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente ([Soil](#)

First Consulting, 2016). Tomando estos intervalos de referencia, se advierte que la concentración de Na en las tres aguas empleadas para el riego no representa riesgo alguno para el crecimiento del tomate; por el contrario, en el caso del Cl, las concentraciones particularmente del agua potable y de la solución consistente en ésta con el agua acuícola, son superiores al rango recomendado (**Figura I.16**).



**Figura I. 16** Concentración de Na (A) y Cl (B) en las aguas utilizadas para el riego de tomate.

Los elementos Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B y Ni, que son esenciales para plantas superiores no fueron detectados en las tres aguas empleadas para el riego.

### 1.5.2. Caracterización química de los sustratos para el cultivo de tomate

En el **Cuadro I.4** se presentan los resultados de la caracterización química de los sustratos empleados en la producción de tomate; éstos al inicio de la fase experimental y al final, es decir, después de que cada uno de ellos fue regado con las tres soluciones (agua potable, agua potable + agua acuícola y agua acuícola).

**Cuadro I. 4** Propiedades químicas de sustratos utilizados en el cultivo de tomate rojo con diferente tipo de agua de riego.

| Sustratos  | Composta |        |        |        | 50% composta + 50% tezontle |        |        |        | Tezontle |       |       |       |
|--|----------|--------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|----------|-------|-------|-------|
|  | Inicial  | AP     | AP+AA  | AA     | Inicial                     | AP     | AP+AA  | AA     | Inicial  | AP    | AP+AA | AA    |
| <b>pH</b>  | 7.76     | 7.88   | 8.12   | 8.04   | 8.31                        | 8.01   | 8.07   | 7.95   | 9.09     | 7.99  | 7.93  | 7.75  |
| <b>CE, dS m<sup>-1</sup></b>                           | 1.95     | 1.31   | 1.24   | 1.09   | 0.94                        | 0.59   | 0.49   | 0.48   | 0.10     | 0.19  | 0.15  | 0.14  |
| <b>N, %</b>  | 0.50     | 0.55   | 0.41   | 0.49   | 0.18                        | 0.04   | 0.48   | 0.46   | 0.01     | 0.05  | 0.02  | 0.01  |
| <b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mg kg<sup>-1</sup></b>  | 56.70    | 15.40  | 12.60  | 1.40   | 53.90                       | 394.80 | 151.20 | 130.20 | 11.90    | 50.40 | 39.20 | 51.80 |
| <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, mg kg<sup>-1</sup></b>  | 32.90    | 74.90  | 97.30  | 46.90  | 27.30                       | 18.90  | 14.70  | 39.90  | 21.70    | 10.50 | 7.70  | 3.50  |
| <b>P, mg kg<sup>-1</sup></b>                           | 292.58   | 198.83 | 193.86 | 208.77 | 83.74                       | 44.37  | 41.75  | 69.59  | 3.02     | 15.41 | 17.90 | 25.85 |
| <b>K<sup>+</sup>, cmol kg<sup>-1</sup></b>             | 9.94     | 0.20   | 0.16   | 0.13   | 4.08                        | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.08     | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <b>Ca<sup>+2</sup>, cmol kg<sup>-1</sup></b>           | 16.30    | 22.60  | 27.55  | 29.95  | 7.16                        | 5.80   | 6.55   | 9.45   | 0.69     | 2.30  | 2.10  | 1.10  |
| <b>Mg<sup>+2</sup>, cmol kg<sup>-1</sup></b>           | 8.25     | 10.40  | 10.65  | 11.15  | 3.80                        | 1.10   | 2.65   | 2.65   | 0.86     | 0.00  | 0.80  | 0.85  |
| <b>Na<sup>+</sup>, cmol kg<sup>-1</sup></b>            | 0.76     | 0.64   | 0.76   | 0.84   | 0.52                        | 0.53   | 0.49   | 0.56   | 0.22     | 0.48  | 0.48  | 0.46  |
| <b>Cl<sup>-</sup>, mg kg<sup>-1</sup></b>              | 14.13    | 35.50  | 37.72  | 24.41  | 4.75                        | 26.63  | 22.19  | 19.97  | 0.38     | 19.97 | 24.41 | 19.97 |
| <b>CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, mg kg<sup>-1</sup></b> | 0.00     | 10.00  | 14.55  | 12.12  | 0.00                        | 0.00   | 3.03   | 3.03   | 0.00     | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| <b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mg kg<sup>-1</sup></b> | 518.29   | 134.15 | 134.15 | 115.85 | 289.63                      | 33.54  | 30.49  | 35.37  | 60.98    | 29.27 | 26.22 | 12.20 |

AP=Agua potable; AA=Agua acuícola

En un sustrato el pH y la CE son parámetros de fundamental importancia ya que influyen en disponibilidad nutrimental y procesos de absorción. El pH alcalino se asocia con baja disponibilidad de micronutrientes y con alta concentración en solución de iones alcalinos (Brito y Mourão, 2012). En sustratos los valores aceptables de pH y CE se encuentran en los intervalos de 5.2 a 6.3 y de 0.75 a 1.99 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente (Noguera *et al.*, 2003); en comparación con (Tjalling, 2006) que reporta rangos óptimos de pH en suelo para el cultivo de tomate de 6.0 a 6.5.

En los tres sustratos usados, el pH inicial es clasificado como alcalino (**Cuadro I.4**) lo que se traduce en baja disponibilidad para las plantas, en específico de micronutrientes. De manera particular el pH del tezontle fue muy alto, con un valor de 9.09, en contraste con lo reportado por Trejo-Téllez *et al.* (2013) para este mismo material con valor de 7.35. Esta diferencia probablemente es debida al origen de este material volcánico y al manejo dado a éste previo a su utilización. Se observó también, que independientemente del agua de riego empleada los valores de pH fueron superiores al inicial al final del ciclo cuando el sustrato contenía composta, sola o en combinación con tezontle; la excepción fue el tezontle que al final del ciclo mostró una reducción en el valor de pH en alrededor de una unidad.

En lo que se refiere a la CE, ésta fue más alta en la composta y la menor en el tezontle, como era esperado. Las CE registradas no son consideradas altas, por tanto no causan efectos negativos en el crecimiento y metabolismo vegetal (Brito y Mourão, 2012). Al igual que los valores de pH en dos de los sustratos empleados (composta y composta + tezontle), el valor de la CE inicial fue reducido al final de la investigación. En el tezontle el valor de CE se mantiene constante durante el ciclo de cultivo (**Cuadro I.4**).

Las concentraciones de N total como era esperado son superiores en la composta, en comparación con los otros dos sustratos. De manera interesante se aprecia acumulación de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a través del tiempo en el sustrato consistente en la mezcla de composta y tezontle, particularmente cuando se regó con agua potable (**Cuadro I.4**). Abad *et al.* (1993) reporta como valores de referencia de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en sustratos orgánicos el intervalo de 100 a 199 mg kg<sup>-1</sup>; por tanto solo el sustrato composta + tezontle, en la evaluación realizada al final de la fase experimental, mostró valores suficientes.

Se observan incrementos importantes en la concentración de  $\text{NH}_4^+$  en el sustrato composta, cuando ésta fue regada con la mezcla de agua potable y agua acuícola. En el tezontle se tuvieron las menores concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  (**Cuadro I.4**). Los valores de concentración de  $\text{NH}_4^+$  de referencia para sustratos orgánicos oscilan de 0 a 20  $\text{mg kg}^{-1}$  (Abad *et al.*, 1993); por lo que todos los sustratos, incluso el tezontle, se encuentran dentro del rango referido.

La concentración de P fue también superior en los sustratos con composta (composta y composta + tezontle), que en el tezontle. Así también en los dos primeros sustratos referidos, el abatimiento de P fue menor al final del ciclo cuando éstos se regaron con agua acuícola. En el tezontle se observa por el contrario, incremento en la concentración de P en los sustratos, de manera especial cuando éstos se regaron con agua acuícola (**Cuadro I.4**). El intervalo de referencia para P en sustratos orgánicos va de 6 a 10  $\text{mg kg}^{-1}$  (Abad *et al.*, 1993); por tanto, solo la concentración inicial de este elemento en P se encuentra por debajo de éste rango.

Los valores de cationes intercambiables iniciales en los sustratos, fueron superiores en la composta y muy bajos en el tezontle, al ser el primero activo y el segundo inerte (**Cuadro I.4**); así los valores finales son más altos en el sustrato consistente en solo composta. El valor de los cationes intercambiables en un sustrato es de suma importancia, dado que éste es proporcional a la capacidad de amortiguamiento de los cambios en el valor de pH y en las concentraciones nutrimentales (Argo, 1998).

Los valores de Na intercambiable y de  $\text{Cl}^-$  en solución son considerados aceptables para la producción agrícola (**Cuadro I.4**). Por último, debido a los valores de pH registrados en los sustratos solo se apreció de manera predominante la presencia de  $\text{HCO}_3^-$  sobre la de  $\text{CO}_3^{2-}$  (**Cuadro I.4**).

### **I.5.3. Crecimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. *Saladette* en un sistema acuapónico abierto**

Al final del estudio (89 días después del trasplante de tomate) se pudo observar que la combinación de la composta como sustrato y el agua del sistema acuícola en riego; tiene el mejor efecto en el crecimiento de las plantas; en este caso, las plantas lograron mayor altura y producción de biomasa (**Figura I.17**). Es de destacar que las plantas

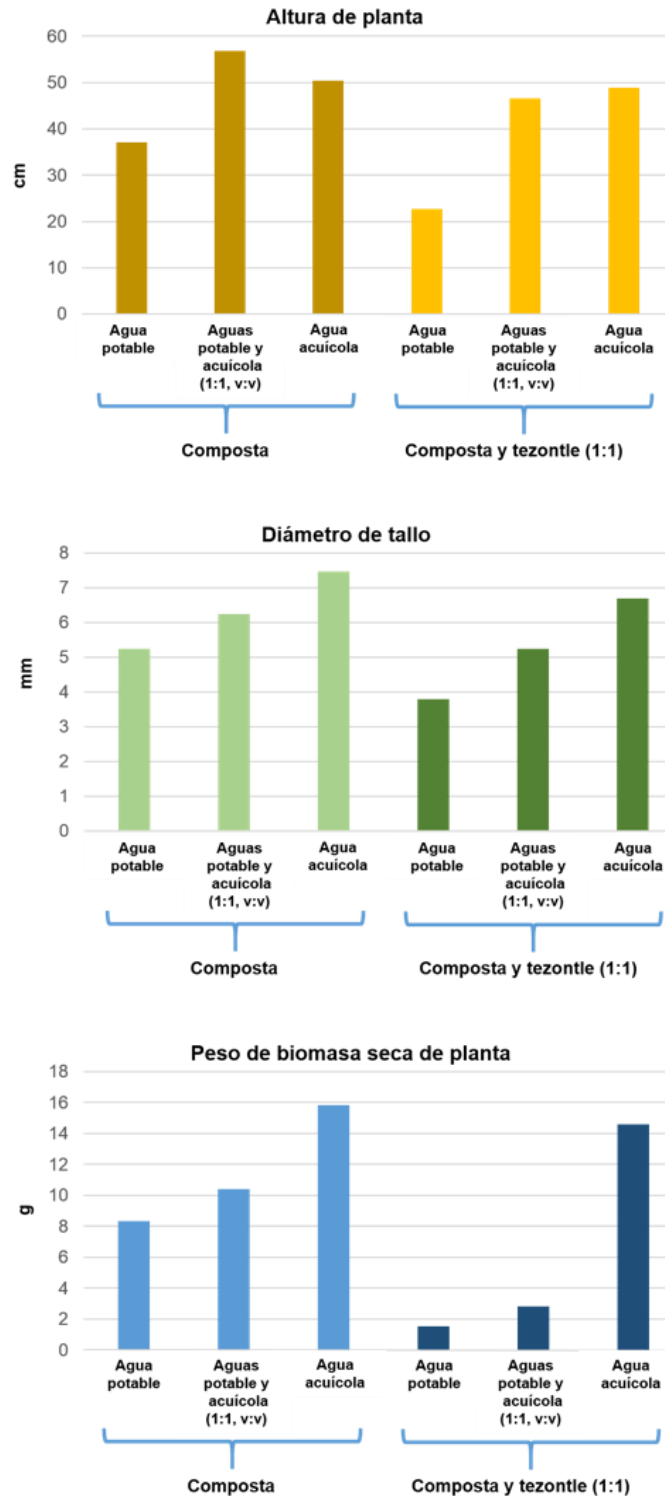


desarrolladas en tezontle, independientemente del agua usada para el riego (los tratamientos 7, 8 y 9) mostraron la mayor tasa de senescencia en etapas tempranas de desarrollo, y por tanto no se presentan resultados de crecimiento de éstas.



**Figura I. 17** Planta de tomate establecida en composta y regada con agua acuícola por 85 días.

Los resultados de las variables de crecimiento de las plantas de tomate al final de la fase experimental se presentan de manera resumida en la **Figura I.18**. Las plantas establecidas en tezontle (tratamientos 7, 8 y 9) fueron excluidas de este análisis, dada la senescencia observada y que ya fue previamente referida. Cuando se usó como sustrato composta, la altura de planta fue superior en 36.27 % con el riego con agua acuícola en comparación con el riego con agua potable. Con el uso del sustrato composta y tezontle, el riego con agua acuícola incrementó la altura de planta en más de dos veces, en comparación del uso de agua potable en el riego (**Figura I.18**). El diámetro de tallo tuvo un efecto positivo con el agua de riego acuícola en el cual se observa en mayor magnitud cuando se usó composta y tezontle, siendo que este sustrato nos proporciona menos nutrimentos que la composta sola (**Figura I.18**). La misma tendencia registrada en el diámetro de tallo, se observó en el peso de biomasa seca; con ambos sustratos se obtuvo el mayor peso cuando se regó con agua acuícola, seguido del riego con la combinación de agua potable con agua acuícola en el riego (**Figura I.18**).



**Figura I.18.** Variables de crecimiento de plantas de tomate 85 días después del trasplante.

A continuación se presentan los resultados de cada una de las variables, analizadas estadísticamente de acuerdo al diseño de tratamientos y experimental empleado. Se presentan los resultados solo de aquellos factores e interacciones que fueron significativas.

El **Cuadro I.5** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la variable altura de planta a lo largo del ciclo de producción. Se observa que el factor sustrato influyó significativamente esta variable en la mayoría de las fechas de evaluación; por el contrario, el riego y la interacción sustrato con riego no fueron significativos.

El **Cuadro I.6** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en el diámetro de tallo. Se observa que el factor sustrato influyó significativamente desde el día 40 a partir del trasplante; por el contrario, el riego y la interacción sustrato con riego no fueron significativos. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos en la variable altura de planta.

**Cuadro I.5.** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable altura de planta de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuente de variación | Días de cultivo de tilapia   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|---------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                     | 41                           | 46        | 53        | 60        | 67        | 74        | 81        | 87        | 102       | 116       |
|                     | Días de trasplante de tomate |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|                     | 14                           | 19        | 26        | 33        | 40        | 47        | 54        | 60        | 75        | 89        |
| Sustrato (S)        | 0.0003 *                     | 0.0729 ns | 0.3186 ns | 0.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  |
| Riego (R)           | 0.4736 ns                    | 0.6549 ns | 0.3022 ns | 0.0476 *  | 0.9002 ns | 0.6813 ns | 0.2313 ns | 0.3019 ns | 0.4118 ns | 0.3904 ns |
| S x R               | 0.7310 ns                    | 0.4074 ns | 0.0905 ns | 0.3266 ns | 0.8828 ns | 0.6649 ns | 0.5036 ns | 0.4939 ns | 0.4458 ns | 0.4673 ns |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo.

**Cuadro I.6.** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable diámetro de tallo de plantas tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Días de cultivo de tilapia   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|----------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | 41                           | 46        | 53        | 60        | 67        | 74        | 81        | 87        | 102       | 116       |
|                      | Días de trasplante de tomate |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|                      | 14                           | 19        | 26        | 33        | 40        | 47        | 54        | 60        | 75        | 89        |
| Sustrato (S)         | 0.1162 ns                    | 0.9186 ns | 0.5284 ns | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | 0.0771 ns | <.0001 *  |
| Riego (R)            | 0.2593 ns                    | 0.7137 ns | 0.6743 ns | 0.7492 ns | 0.5539 ns | 0.5398 ns | 0.2659 ns | 0.1043 ns | 0.2012 ns | 0.1843 ns |
| S x R                | 0.6211 ns                    | 0.8489 ns | 0.6068 ns | 0.1456 ns | 0.4634 ns | 0.7699 ns | 0.5039 ns | 0.2863 ns | 0.2505 ns | 0.4874 ns |

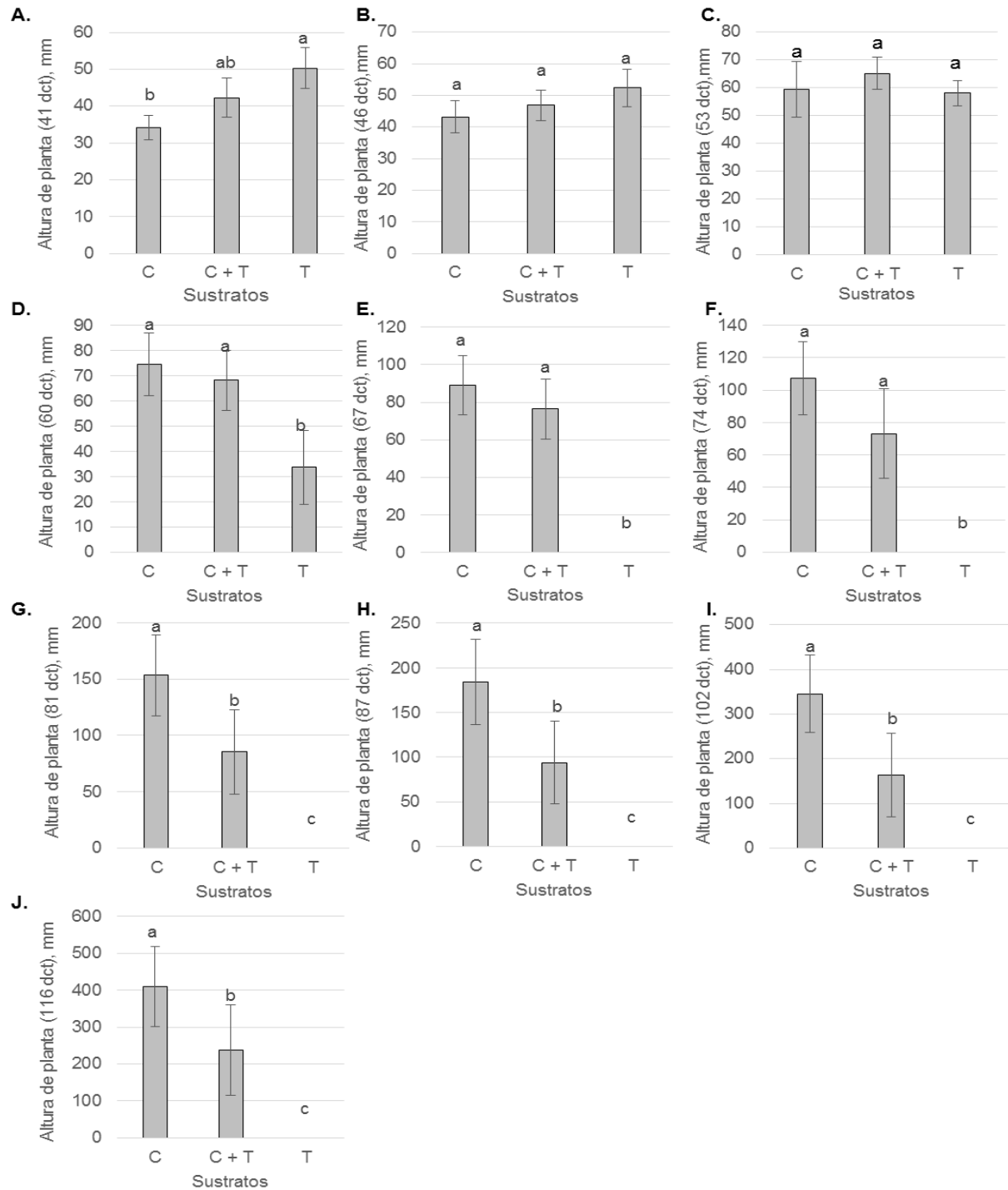
\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

En la **Figura 1.19** se presentan los resultados de las evaluaciones de la altura de planta durante la fase experimental, en función del sustrato empleado, factor que fue el de influencia significativa en esta variable.

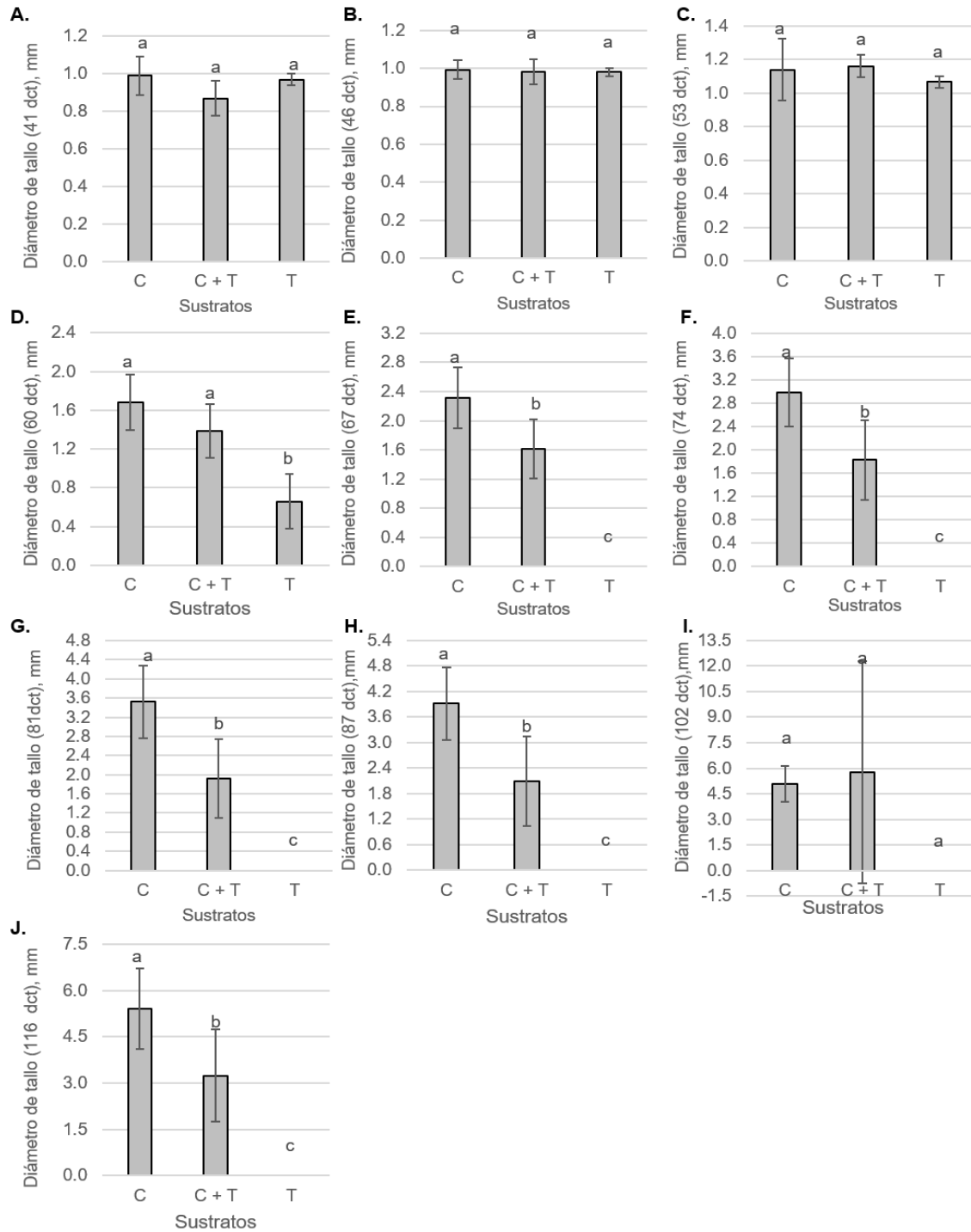
De manera interesante se observa que en las dos evaluaciones iniciales (**Figuras 1.19A y 1.19B**), las plantas establecidas en tezontle fueron las de mayor altura. A partir de la cuarta evaluación (**Figura 1.19D**), la tendencia en altura cambia, favoreciéndose en aquellas plantas establecidas en composta y en el sustrato consistente en la mezcla de composta y tezontle. Este resultado está asociado con la mayor concentración de nutrimentos presentes en estos sustratos, descrita anteriormente.

Por otra parte, como ya se mencionó anteriormente, a medida que el ciclo fenológico del tomate avanzó, las plantas establecidas en tezontle mostraron senescencia que condujo a la muerte de éstas; por lo que a partir de la quinta medición ya no se consideraron.

En la **Figura 1.20** se presenta la evolución en el diámetro de tallo de plantas de tomate en función del sustrato en el que fueron establecidas a lo largo de la investigación. Solo se presentan estos resultados dado que fue el factor que significativamente afectó esta variable. Se puede observar que el sustrato tuvo una diferencia estadística significativa hasta la cuarta semana, de manera especial, se evidenció el efecto negativo del sustrato tezontle, dado que para la quinta semana ya no había planta viva. Al igual que para la altura de planta, el sustrato composta se destacó desde la tercera semana existiendo un mayor diámetro de tallo.



**Figura I. 19** Altura de planta de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto a los 41 (A), 46 (B), 53 (C), 60 (D), 67 (E), 74 (F), 81 (G), 87 (H), 102 (I), 116 (J), días de cultivo de tilapia en función del sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada subfigura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle



**Figura I. 20** Diámetro de tallo de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto a los 41 (A), 46 (B), 53 (C), 60 (D), 67 (E), 74 (F), 81 (G), 87 (H), 102 (I), 116 (J), días de cultivo de tilapia en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada subfigura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

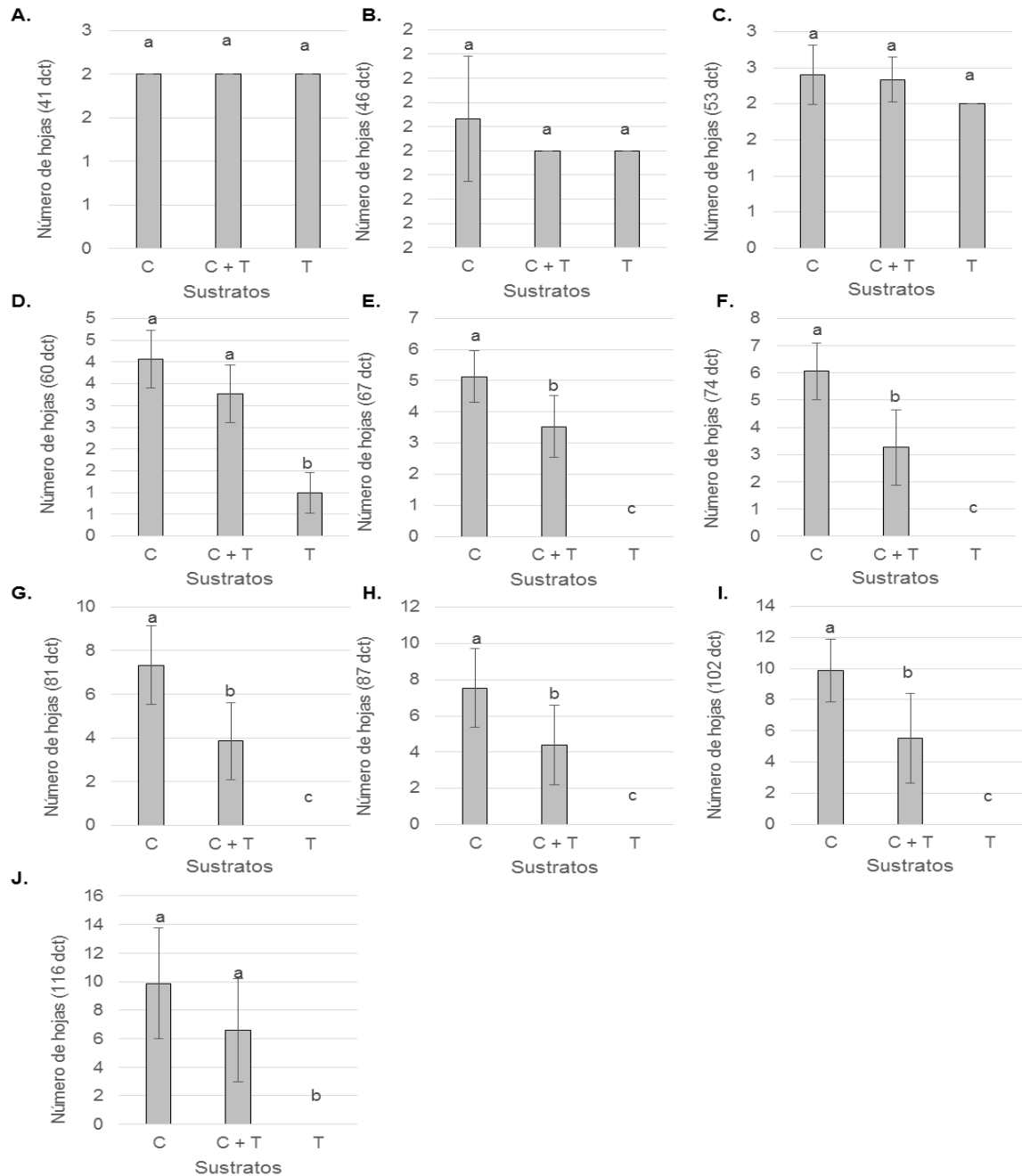
El **Cuadro I.7** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en el número de hojas. Se observa que el factor sustrato influyó significativamente esta variable en la mayoría de las fechas de evaluación; por el contrario, el riego y la interacción sustrato con riego no fueron significativos en esta variable. En la **Figura I.21** se presentan los resultados de número de hojas en función del sustrato utilizado.

**Cuadro I.7.** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable número de hojas en plantas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Días de cultivo de tilapia   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|----------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | 41                           | 46        | 53        | 60        | 67        | 74        | 81        | 87        | 102       | 116       |
|                      | Días de trasplante de tomate |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|                      | 14                           | 19        | 26        | 33        | 40        | 47        | 54        | 60        | 75        | 89        |
| Sustrato (S)         | --                           | 0.3779 ns | 0.1675 ns | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  |
| Riego (R)            | --                           | 0.3779 ns | 0.4625 ns | 0.4219 ns | 0.6349 ns | 0.9623 ns | 0.2585 ns | 0.1411 ns | 0.1518 ns | 0.0163 ns |
| S x R                | --                           | 0.4203 ns | 0.5407 ns | 0.6340 ns | 0.6352 ns | 0.2680 ns | 0.6031 ns | 0.5306 ns | 0.4312 ns | 0.3100 ns |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo





**Figura I. 21** Número de hojas en plantas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto a los 41 (A), 46 (B), 53 (C), 60 (D), 67 (E), 74 (F), 81 (G), 87 (H), 102 (I), 116 (J), días de cultivo de tilapia en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada subfigura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

#### 1.5.4. Análisis nutrimental de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. *Saladette*

##### 1.5.4.1. Significancia de factores de estudio en la concentración y acumulación nutrimental en hojas

El **Cuadro I.8** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la concentración de macronutrientes en hojas. Se observa que la variable sustrato no fue significativa para la concentración de macronutrientes, con excepción del N. Por el contrario, la concentración de P solo no fue influenciada por el sustrato. Para K y S el único factor de estudio significativo fue el riego; mientras que para Ca y Mg la interacción de sustrato con riego causó efectos significativos.

**Cuadro I. 8** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la concentración de macronutrientes en hojas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Concentración foliar |           |           |           |           |           |
|----------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | N                    | P         | K         | Ca        | Mg        | S         |
| Sustrato (S)         | 0.0113 *             | 0.8606 ns | 0.7286 ns | 0.6675 ns | 0.5915 ns | 0.6921 ns |
| Riego (R)            | 0.1921 ns            | 0.0129 *  | 0.0042 *  | 0.2641 ns | 0.7586 ns | 0.0347 *  |
| S x R                | 0.3884 ns            | 0.0487 *  | 0.1438 ns | 0.0230 *  | 0.0555 *  | 0.1459 ns |

\*Significativo (Tukey  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El **Cuadro I.9** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la concentración de micronutrientes en hojas. Se observa que para Cu, Mn y Mo las fuentes de estudio y su interacción, tuvieron efecto significativo; por el contrario, las concentraciones de Fe y Zn no fueron influenciadas por los factores de estudio.

**Cuadro I. 9** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración foliar de micronutrientes y sodio en tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Concentración foliar |          |           |          |          |           |           |
|----------------------|----------------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
|                      | Fe                   | Cu       | Zn        | Mn       | Mo       | B         | Na        |
| Sustrato (S)         | 0.6004 ns            | <.0001 * | 0.2309 ns | <.0001 * | <.0001 * | 0.4402 ns | 0.9961 ns |
| Riego (R)            | 0.6338 ns            | <.0001 * | 0.6357 ns | 0.0145 * | <.0001 * | <.0001 *  | 0.0003 *  |
| S x R                | 0.8097 ns            | <.0001 * | 0.4427 ns | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 *  | 0.8412 ns |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El **Cuadro I.10** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la acumulación de macronutrientes en hojas. Se observa que el sustrato y la interacción sustrato con riego no fueron significativos en la acumulación de macronutrientes en hojas, sin embargo la variable riego si tuvo significancia para la acumulación de N, Mg y S.

**Cuadro I. 10** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de macronutrientes en hojas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Acumulación foliar |           |           |           |           |           |
|----------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | N                  | P         | K         | Ca        | Mg        | S         |
| Sustrato (S)         | 0.1106 ns          | 0.5598 ns | 0.7128 ns | 0.612 ns  | 0.8103 ns | 0.4759 ns |
| Riego (R)            | 0.0005 *           | 0.0737 ns | 0.3868 ns | 0.1178 ns | 0.0369 *  | 0.0313 *  |
| S x R                | 0.1249 ns          | 0.8499 ns | 0.8954 ns | 0.5334 ns | 0.6136 ns | 0.8204 ns |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El **Cuadro I.11** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la acumulación de nutrientes en hojas. Se observa que la acumulación de micronutrientes en hojas. En Cu los factores de estudio y su interacción tuvieron significancia, y para Mg las variables riego y sustrato tuvieron significancia. Para los demás micronutrientes, las variables mostradas no fueron significativas. El factor riego afectó al Na acumulado en hojas.

**Cuadro I. 11** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable de acumulación de micronutrientes y sodio en hojas de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Acumulación foliar |          |          |          |           |           |           |
|----------------------|--------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | Fe                 | Cu       | Zn       | Mn       | Mo        | B         | Na        |
| Sustrato (S)         | 0.5963ns           | 0.0300*  | 0.6586ns | 0.0134 * | 0.0165 *  | 0.4498 ns | 0.7726 ns |
| Riego (R)            | 0.3609ns           | 0.0426 * | 0.0026 * | 0.0004 * | 0.0915ns  | 0.1817 ns | <.0001 *  |
| S x R                | 0.7648ns           | 0.0181 * | 0.4370ns | 0.7619ns | 0.6109 ns | 0.0707 ns | 0.0811 ns |

\*Significativo (Tukey  $P, \leq 0.05$ ); ns no significativo

#### I.5.4.2. Significancia de factores de estudio en la concentración y acumulación nutrimental en tallos

El **Cuadro I.12** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la concentración de macronutrientes en tallos. Se observa que para la concentración de K mostró significancia estadística entre tratamientos en todos los casos; para Ca y S solo la interacción de riego y sustrato causó diferencias estadísticas, esta interacción también fue significativa para la concentración de Mg y P. El sustrato fue significativo para la concentración de Mg, el riego fue significativo para las concentraciones de N y P.

**Cuadro I.12.** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de macronutrientes en tallos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Concentración en tallos |           |          |           |           |           |
|----------------------|-------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | N                       | P         | K        | Ca        | Mg        | S         |
| Sustrato (S)         | 0.7757 ns               | 0.9866 ns | 0.0075 * | 0.9593 ns | 0.0277 *  | 0.4046 ns |
| Riego (R)            | 0.0036 *                | 0.0003 *  | <.0001 * | 0.4402 ns | 0.3405 ns | 0.9172 ns |
| S x R                | 0.6668 ns               | 0.0165 *  | 0.0073 * | 0.0036 *  | 0.0023 *  | 0.0001 *  |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El **Cuadro I.13** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la concentración de micronutrientos en tallos. Se observa que la concentración de B y Na se ven influenciadas por el sustrato, el riego y por su interacción. La concentración de Mo por el contrario, no fue afectada por los tratamientos- La concentración de Zn solo fue influenciada por el sustrato usado. El riego afectó las concentraciones de Fe y Mn.

**Cuadro I. 13** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de micronutrientos y sodio en tallos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Concentración en tallos |           |           |           |           |          |          |
|----------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
|                      | Fe                      | Cu        | Zn        | Mn        | Mo        | B        | Na       |
| Sustrato (S)         | 0.0717 ns               | 0.8667 ns | 0.0055 *  | 0.1472 ns | 0.2086 ns | 0.0091 * | <.0001 * |
| Riego (R)            | 0.0024 *                | 0.0985 ns | 0.2668 ns | 0.0402 *  | 0.0997 ns | <.0001 * | <.0001 * |
| S x R                | <.0001 *                | 0.0055 *  | 0.4929 ns | 0.0003 *  | 0.2492 ns | 0.0135 * | 0.0204 * |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El **Cuadro I.14** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la acumulación de macronutrientos en tallos. En todos los macronutrientos solo se registró significancia por efectos principales de los factores de estudio.

**Cuadro I.14.** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de macronutrientos en tallos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Acumulación en tallos |           |           |           |           |           |
|----------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | N                     | P         | K         | Ca        | Mg        | S         |
| Sustrato (S)         | 0.0446 *              | <.0001 *  | <.0001 *  | 0.0421 *  | 0.0002 *  | 0.0003 *  |
| Riego (R)            | <.0001 *              | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  |
| S x R                | 0.4927 ns             | 0.6229 ns | 0.7446 ns | 0.1678 ns | 0.9642 ns | 0.3706 ns |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El **Cuadro I.15** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la acumulación de micronutrientes en tallos. Se observa que el tipo de riego influyó significativamente en la acumulación de micronutrientes en tallos. El Fe con todas las fuentes de variación mostró diferencia estadística.

**Cuadro I. 15** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de micronutrientes y sodio en tallos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Acumulación en tallos |           |           |           |           |           |           |
|----------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | Fe                    | Cu        | Zn        | Mn        | Mo        | B         | Na        |
| Sustrato (S)         | 0.0257 *              | <.0001 *  | 0.2684 ns | 0.1454 ns | 0.1135 ns | 0.0029 *  | <.0001 *  |
| Riego (R)            | 0.0047 *              | <.0001 *  | <.0001 *  | <.0001 *  | 0.075 ns  | <.0001 *  | <.0001 *  |
| S x R                | 0.0007 *              | 0.6249 ns | 0.4815 ns | 0.0029 *  | 0.1061 ns | 0.0682 ns | 0.1145 ns |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

#### I.5.4.3. Significancia de factores de estudio en la concentración y acumulación nutrimental en frutos

El sustrato afectó la concentración de macronutrientes en fruto, excepto la de K. Se observa que el riego tuvo efecto en la concentración de los macronutrientes en frutos. En la interacción de los factores de estudio no se mostraron resultados dado que no se tuvieron frutos en todos los tratamientos (**Cuadro I.16**).

**Cuadro I. 16** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de macronutrientes en frutos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Concentración en frutos |          |           |           |          |          |
|----------------------|-------------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
|                      | N                       | P        | K         | Ca        | Mg       | S        |
| Sustrato (S)         | 0.0053 *                | 0.002 *  | 0.5529 ns | 0.8680 ns | <.0001 * | <.0001 * |
| Riego (R)            | 0.0122 *                | 0.0001 * | 0.0402 *  | 0.0074 *  | <.0001 * | 0.0045 * |
| S x R                | .                       | .        | .         | .         | .        | .        |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El tipo de riego tuvo influencia significativa en la concentración de la mayoría de los micronutrientes, excepto Mo. Para el caso del factor sustrato, éste es significativo en la concentración de Cu y B (**Cuadro I.17**).

**Cuadro I.17.** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de micronutrientes y sodio en frutos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Concentración en frutos |          |           |           |           |          |           |
|----------------------|-------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|                      | Fe                      | Cu       | Zn        | Mn        | Mo        | B        | Na        |
| Sustrato (S)         | 0.1145 ns               | <.0001 * | 0.4474 ns | 0.5340 ns | 0.7865 ns | 0.0216 * | 0.6313 ns |
| Riego (R)            | 0.0197 *                | <.0001 * | <.0001 *  | 0.0019 *  | 0.0696 ns | 0.0002 * | 0.0027 *  |
| S x R                | .                       | .        | .         | .         | .         | .        | .         |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

Los efectos principales del sustrato y del riego afectaron significativamente la acumulación de macronutrientes en fruto de tomate (**Cuadro I.18**).

**Cuadro I.18.** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de macronutrientes en frutos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Acumulación en frutos |          |          |          |          |          |
|----------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | N                     | P        | K        | Ca       | Mg       | S        |
| Sustrato (S)         | <.0001 *              | <.0001 * | 0.0003 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * |
| Riego (R)            | <.0001 *              | <.0001 * | 0.0045 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * |
| S x R                | .                     | .        | .        | .        | .        | .        |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

De la misma manera, la acumulación de micronutrientes (**Cuadro I.19**) en frutos fue influenciada de manera significativa por los factores de estudio.

**Cuadro I.19** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de micronutrientes y sodio en frutos de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Acumulación en frutos |          |          |          |           |          |          |
|----------------------|-----------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                      | Fe                    | Cu       | Zn       | Mn       | Mo        | B        | Na       |
| Sustrato (S)         | 0.0004 *              | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | 0.1281 ns | <.0001 * | <.0001 * |
| Riego (R)            | 0.0179 *              | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | 0.4948 ns | <.0001 * | <.0001 * |
| S x R                | .                     | .        | .        | .        | .         | .        | .        |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

#### I.5.4.4. Significancia de factores de estudio en la concentración y acumulación nutrimental en raíces

Las concentraciones de K, Ca, Mg y S fueron influenciadas de manera significativa por los factores de estudio y por su interacción; mientras que la de P fue afectada por el riego y la interacción de éste con el sustrato. En la concentración de N no se tuvieron efectos significativos en las fuentes de variación (**Cuadro I.20**).

**Cuadro I. 20** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de macronutrientes en raíces de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto

| Fuentes de variación | Concentración en raíces |           |          |          |          |          |
|----------------------|-------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | N                       | P         | K        | Ca       | Mg       | S        |
| Sustrato (S)         | 0.9227 ns               | 0.8756 ns | <.0001 * | <.0001 * | 0.002 *  | 0.0039 * |
| Riego (R)            | 0.1955 ns               | <.0001 *  | <.0001 * | 0.035 *  | 0.004 *  | 0.0054 * |
| S x R                | 0.1633 ns               | <.0001 *  | <.0001 * | <.0001 * | 0.0084 * | <.0001 * |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El **Cuadro I.21** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la concentración de micronutrientes en raíces. Se observa que solo el Fe y el Na fueron influenciados por los factores de estudio y su interacción.



Efectos significativos del sustrato y del riego se observaron en las concentraciones de Mn y B.

Las concentraciones de Cu y Zn no fueron estadísticamente diferentes entre tratamientos.

**Cuadro I. 21** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable concentración de micronutrientos y sodio en raíces de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Concentración en raíces |           |           |           |           |           |          |
|----------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|                      | Fe                      | Cu        | Zn        | Mn        | Mo        | B         | Na       |
| Sustrato (S)         | 0.0025 *                | 0.3322 ns | 0.4462 ns | <.0001 *  | 0.0070 *  | <.0001 *  | 0.0123 * |
| Riego (R)            | 0.0059 *                | 0.3975 ns | 0.0997 ns | 0.0024 *  | 0.1282 ns | <.0001 *  | <.0001 * |
| S x R                | 0.6246 ns               | 0.3957 ns | 0.2441 ns | 0.1040 ns | 0.6861 ns | 0.0761 ns | <.0001 * |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

Los factores de estudio y su interacción afectaron de manera significativa la acumulación de macronutrientos en raíces (**Cuadro I.22**).

**Cuadro I. 22** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de macronutrientos en raíces de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Acumulación en raíces |          |          |          |          |          |
|----------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | N                     | P        | K        | Ca       | Mg       | S        |
| Sustrato (S)         | 0.0002 *              | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * |
| Riego (R)            | 0.0081 *              | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * |
| S x R                | 0.0076 *              | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * | <.0001 * |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

El **Cuadro I.23** muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos en la acumulación de micronutrientos en raíces. Se observa en general que los efectos principales de los factores de estudio y su interacción fueron significativas en la acumulación de micronutrientos en raíces; excepto en Cu.

**Cuadro I.23.** Significancia estadística de factores de estudio y su interacción en la variable acumulación de micronutrientos y sodio en raíces de tomate en un sistema acuapónico rústico abierto.

| Fuentes de variación | Acumulación en raíces |           |           |          |           |          |          |
|----------------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
|                      | Fe                    | Cu        | Zn        | Mn       | Mo        | B        | Na       |
| Sustrato (S)         | <.0001 *              | 0.3294 ns | 0.7547 ns | <.0001 * | 0.0003 *  | <.0001 * | <.0001 * |
| Riego (R)            | 0.0035 *              | 0.398 ns  | 0.0491 *  | 0.0003 * | 0.2138 ns | 0.0026 * | <.0001 * |
| S x R                | 0.0024 *              | 0.3969 ns | 0.1788 ns | 0.0001 * | 0.3244 ns | <.0001 * | <.0001 * |

\*Significativo (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns no significativo

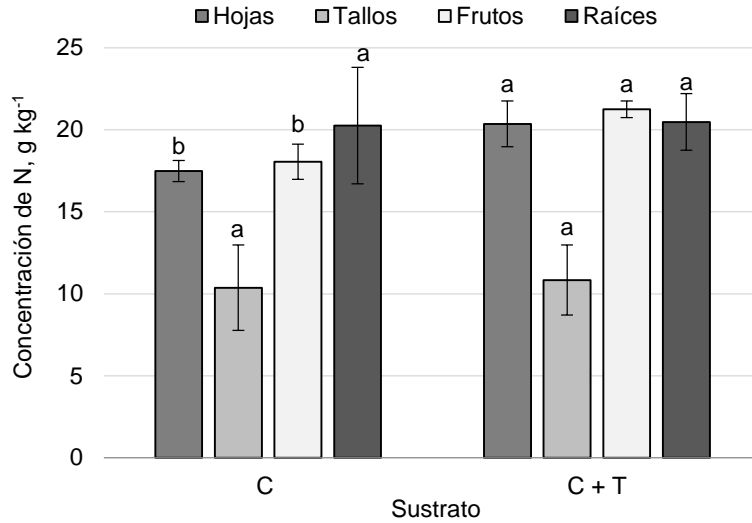
#### **I.5.4.5 Comparación de concentraciones nutrimentales entre órganos de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. *Saladette***

Es pertinente mencionar que en las figuras que a continuación se presentan, no se consideraron a las plantas establecidas en el sustrato tezontle debido a la senescencia temprana que se observó en éstas.

#### **Concentración de N**

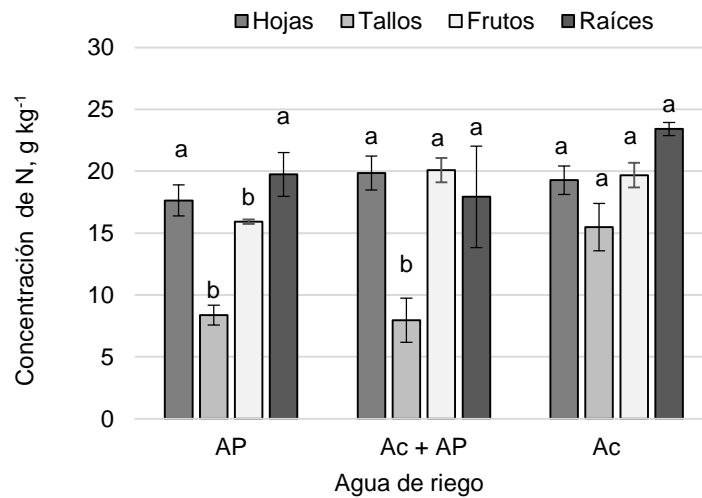
El sustrato utilizado afectó significativamente la concentración de N en hojas y frutos de tomate, siendo el sustrato consistente en composta el que incrementa estos valores (**Figura I.22**). Estos resultados se relacionan de manera positiva con las concentraciones de N total en el sustrato, que fueron superiores en la composta, en comparación con los otros dos sustratos (**Cuadro I.4**). Se ha reportado que las compostas adicionadas al suelo o medios de crecimiento, particularmente en sistemas de producción intensiva de hortalizas mejoran la fertilidad y la calidad; así también mejoran las propiedades químicas y físicas del suelo y proveen de un control biológico efectivo contra enfermedades causadas por fitopatógenos ([Ghorbani et al. 2008](#)).

Las concentraciones registradas en tallos y en raíces no son diferentes entre tratamientos (**Figura I.22**).



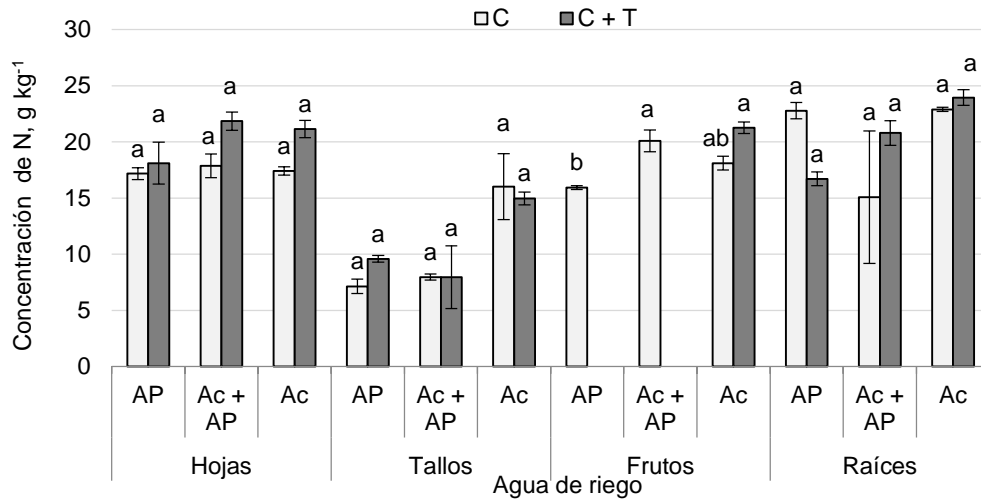
**Figura I. 22** Concentración de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función del sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La Figura I.23 nos muestra la concentración de N, en función al agua de riego usada, en ésta se puede observar que hubo una diferencia significativa solo en tallos y frutos; en ambos casos cuando las plantas fueron regadas con el agua proveniente de la producción de tilapia. En hojas y raíces no se tienen diferencias estadísticas.



**Figura I. 23** Concentración de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

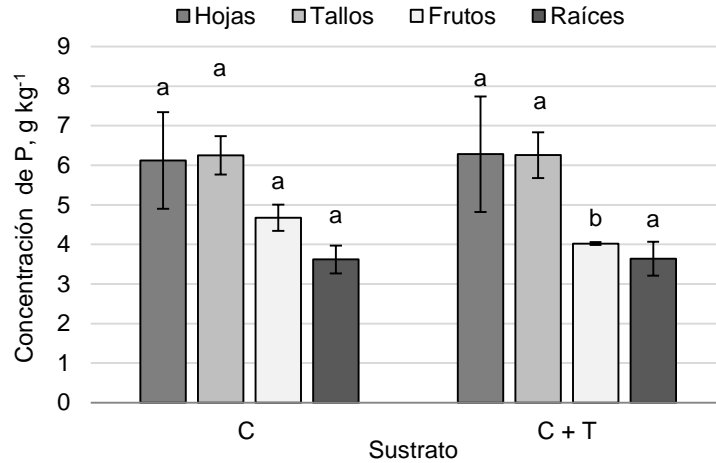
La interacción de los factores de estudio (sustrato y riego) no tuvo efecto significativo en la concentración de N en hojas, tallos y raíces. En frutos la concentración de N fue mayor en ambos sustratos cuando éstos se regaron con agua proveniente de la producción de tilapias (**Figura I.24**).



**Figura I. 24** Concentración de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato y el agua de riego. Medias ± DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

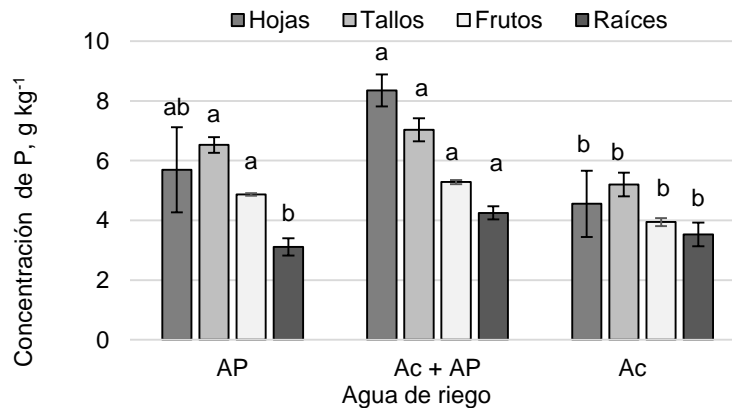
### Concentración de P

En la **Figura I.25** se muestra la concentración de P en función a los sustratos en el cual se aprecia solo diferencia significativa en los frutos, siendo superior en el sustrato composta.



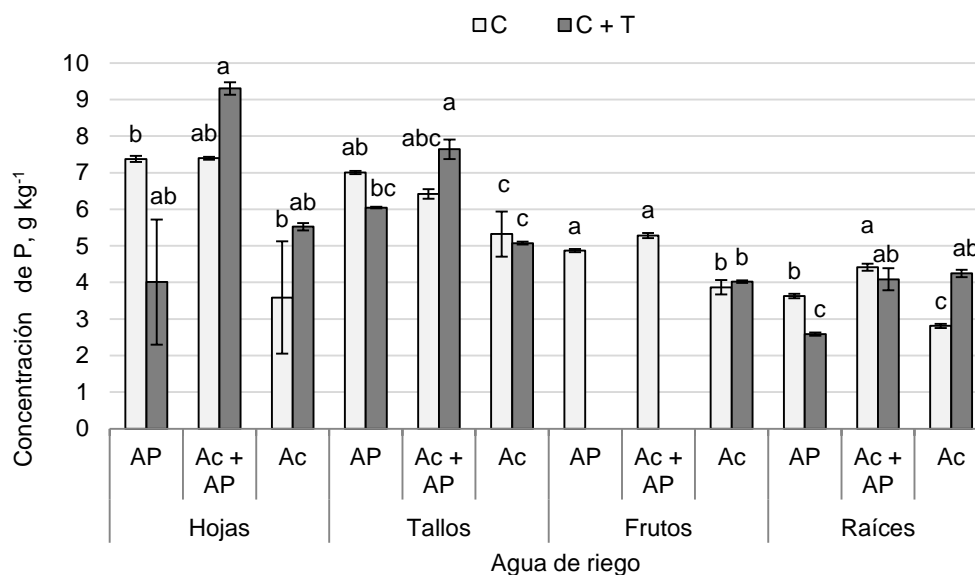
**Figura I. 25** Concentración de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T: tezontle.

La concentración de P en los órganos de la planta fue estadísticamente diferente en función del agua empleada para el riego. La mayor concentración de P en general se obtuvo cuando las planta se regaron con la mezcla de agua potable con agua acuícola, seguida por el agua potable. En particular, en tallos y frutos la menor concentración de P se registró en plantas regadas con agua acuícola (**Figura I.26**).



**Figura I. 26** Concentración de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

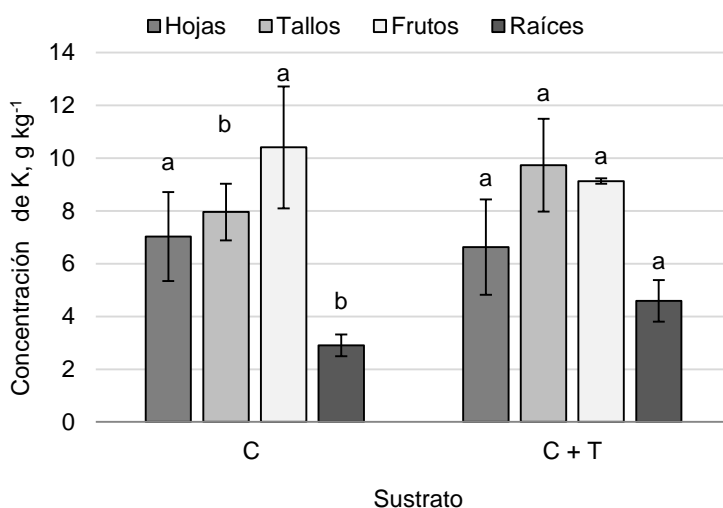
En la **Figura I.27** se puede observar que existe una diferencia significativa en todas sus variables; esta figura nos muestra la concentración de P en función a la interacción entre los factores de estudio sustrato y agua de riego. En el caso de las hojas, tallos y raíces, hubo una mayor concentración en la mezcla de agua acuícola con agua potable en sustrato composta, seguido del mismo tipo de agua de riego y con la mezcla de sustratos (composta y tezontle). Para el caso de los frutos la mayor concentración se presentó en el agua de riego acuícola con agua potable y con composta como sustrato, sin embargo es posible observar que la mezcla de sustrato composta y tezontle solo presento frutos en el riego acuícola, y no habiendo frutos con los otros dos tipos de agua de riego en este sustrato (composta y tezontle).



**Figura I. 27** Concentración de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

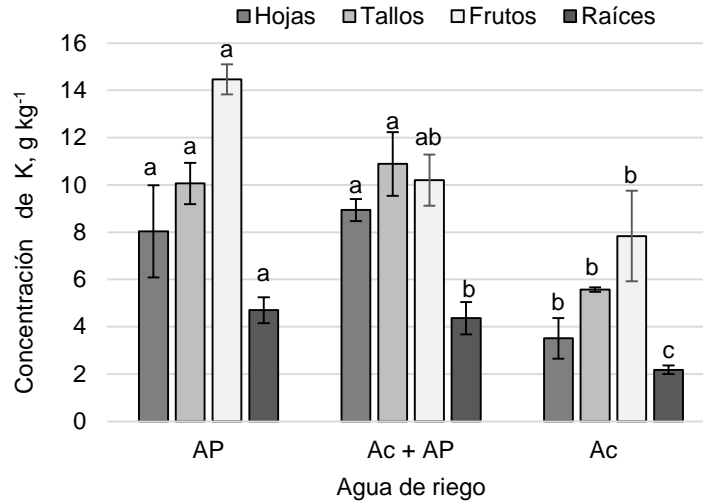
### Concentración de K

En la **Figura I.28** se presenta la concentración de K evaluada en los órganos de las plantas de tomate en función al sustrato. En hojas y frutos no existieron diferencias estadísticas entre tratamientos. En tallos y raíces las medias más altas se registraron cuando se usó composta como sustrato.



**Figura I. 28** Concentración de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

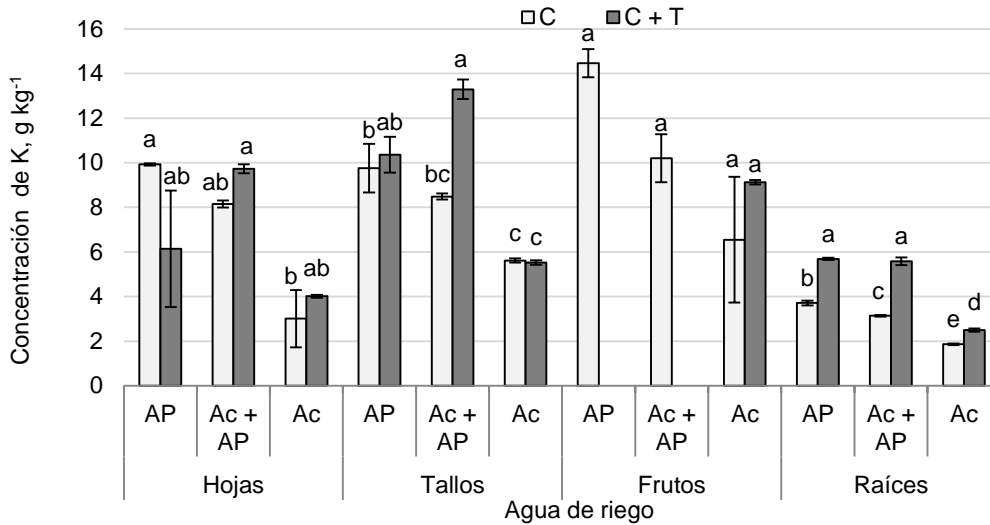
En la **Figura I.29** es posible observar que hubo diferencia estadística significativa en la concentración de K en todos los órganos en función al agua de riego. La mayor concentración de K en hojas se tuvo en plantas regadas con la mezcla de agua potable y agua acuícola y con agua potable. Estos mismos resultados se presentaron en tallos y frutos. En raíces, los tres tratamientos fueron diferentes desde el punto de vista estadístico, estando la media más alta y más baja cuando se regaron las plantas con agua potable y agua acuícola, respectivamente.



**Figura I. 29** Concentración de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

La **Figura I.30** muestra la concentración de K en los órganos de la planta de tomate en función de la interacción de los factores de estudio. La concentración foliar de K significativamente menor al resto se presentó en el tratamiento consistente en la combinación del sustrato composta y el riego con agua acuícola. En tallos y raíces, se observan también concentraciones bajas de este elemento cuando las plantas se regaron con agua acuícola; independientemente del sustrato. La concentración de K en frutos no fue estadísticamente diferente entre tratamientos.

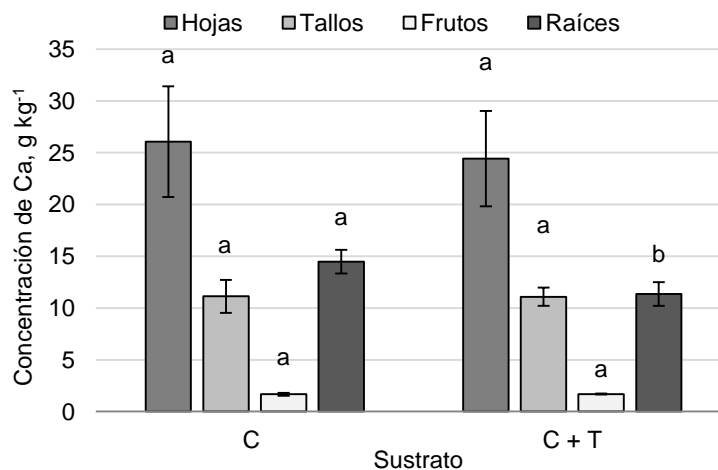




**Figura I. 30** Concentración de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y el agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.5$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

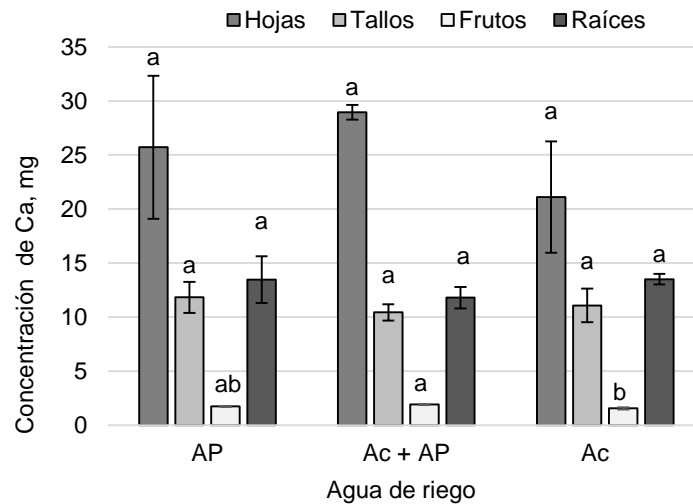
### Concentración de Ca

La concentración de Ca en función del sustrato empleado, fue solo estadísticamente diferente en las raíces, siendo mayor con el uso de composta (**Figura I.31**).



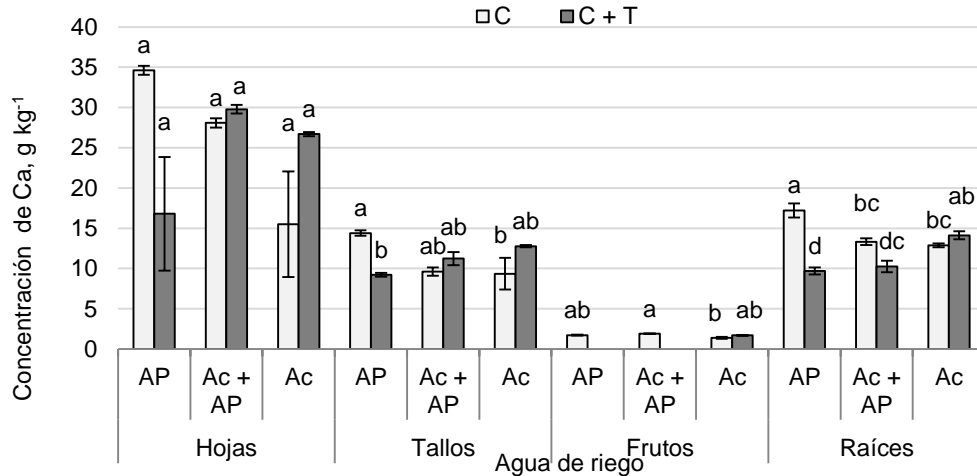
**Figura I. 31** Concentración de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La concentración de Ca en los órganos de plantas de tomate en función del agua empleada en el riego fue estadísticamente diferente solo en frutos, donde frutos de los tratamientos con agua acuícola, ya sea usada sola o en combinación con el agua potable presentaron las medias más altas (**Figura I.32**).



**Figura I. 32** Concentración de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

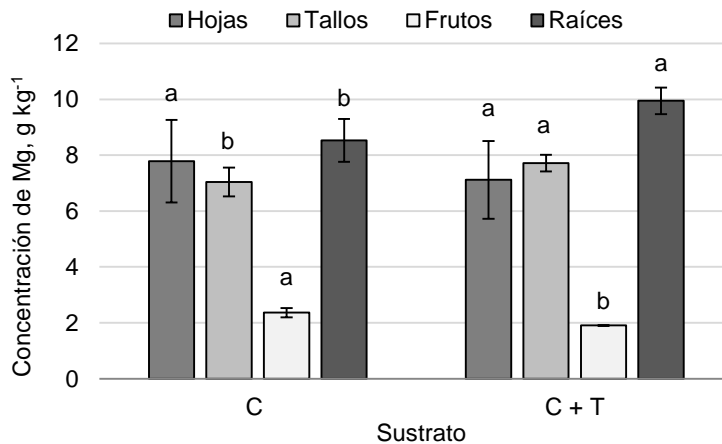
En la **Figura I.33** se observa que no hay diferencia significativa en la concentración foliar de Ca en función de la interacción de los factores de estudio (sustrato utilizado y agua de riego empleada). En tallos la mayor concentración de Cas se tuvo en el tratamiento composta con riego de agua potable, y la menor con el sustrato composta con tezontle en el mismo tipo de agua de riego. En los frutos, el sustrato composta ocasionó la mayor concentración de Ca cuando las plantas se regaron con la mezcla de agua acuícola y potable. La concentración de Ca en raíces tuvo una diferencia estadística significativa en los dos tipos de sustratos, teniendo la mayor concentración en el sustrato composta con el riego con agua potable.



**Figura I. 33** Concentración de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

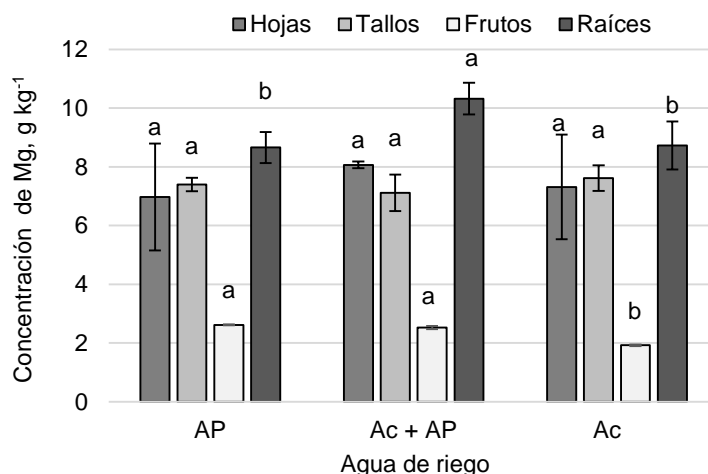
### Concentración de Mg

En hojas la concentración de Mg no fue diferente entre sustratos evaluados. En tallos y raíces las mayores concentraciones de Mg se registraron con el sustrato consistente en la mezcla de composta y tezontle. Por el contrario, en frutos el uso de composta incrementó la concentración de este elemento (**Figura I.34**).



**Figura I. 34** Concentración de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

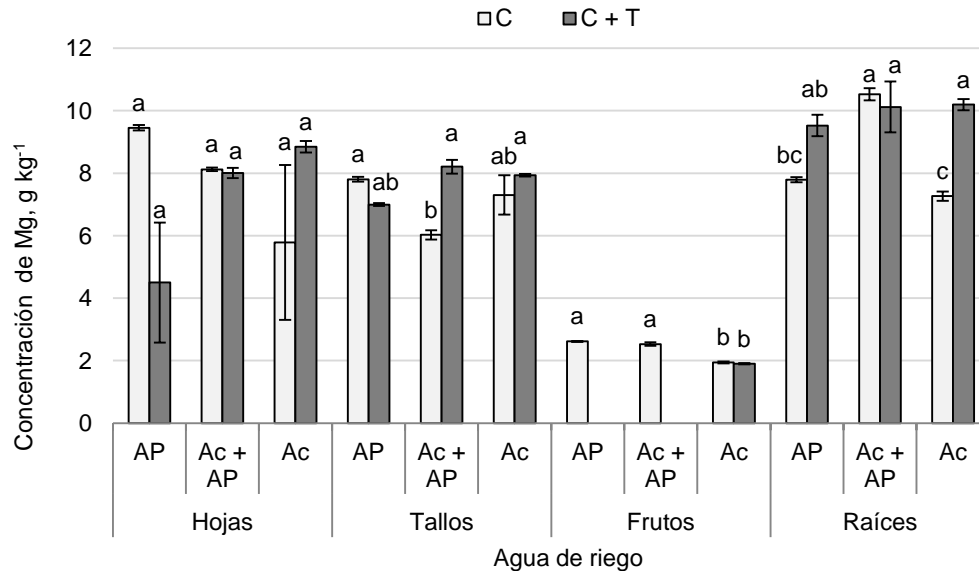
Solo en frutos y en raíces se presentaron diferencias estadísticas entre el tipo de riego en la concentración de Mg. En frutos, el agua acuícola redujo significativamente ésta; mientras que en raíces tanto el agua potable como el agua acuícola disminuyeron la concentración de Mg (**Figura I.35**).



**Figura I. 35** Concentración de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola

En la **Figura I.36** es posible observar que en hojas no hubo diferencias estadística significativa para la concentración de Mg en función a la interacción de sustratos y de agua de riego. Sin embargo se presentó diferencia estadística significativa en la concentración de Mg. Teniendo en tallos una diferencia significativa, presentando la mayor concentración en composta con el riego con agua potable; a diferencia de la mezcla de sustratos en donde la mayor concentración de Mg la presentó la mezcla de riego de agua potable y agua acuícola. En el caso de los frutos en la mezcla de sustrato con composta solo hubo crecimiento en el riego con agua acuícola. Y en composta hubo una diferencia significativa mostrando una menor concentración de Mg en el agua de riego acuícola en comparación con los otros dos tipos de agua de riego. Para el caso de las raíces; en los dos sustratos hubo una diferencia estadística significativa, en composta las raíces muestran una mayor concentración en la mezcla

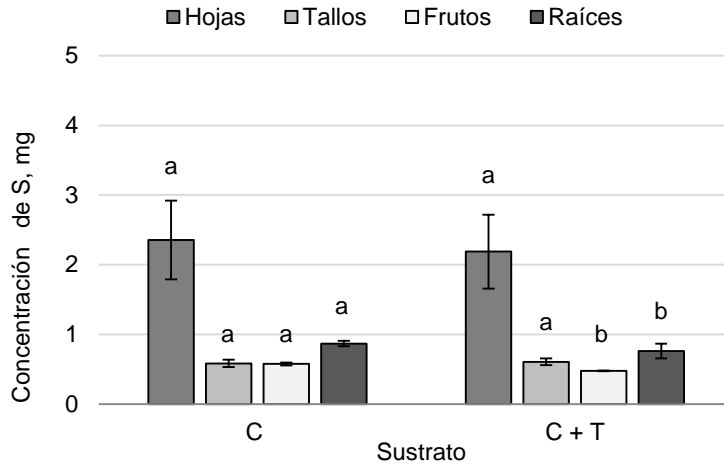
de agua acuícola con agua potable. Y en la mezcla de sustratos (composta con tezontle) existe diferencia significativa teniendo una menor concentración el riego de agua potable.



**Figura I. 36** Concentración de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y el agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

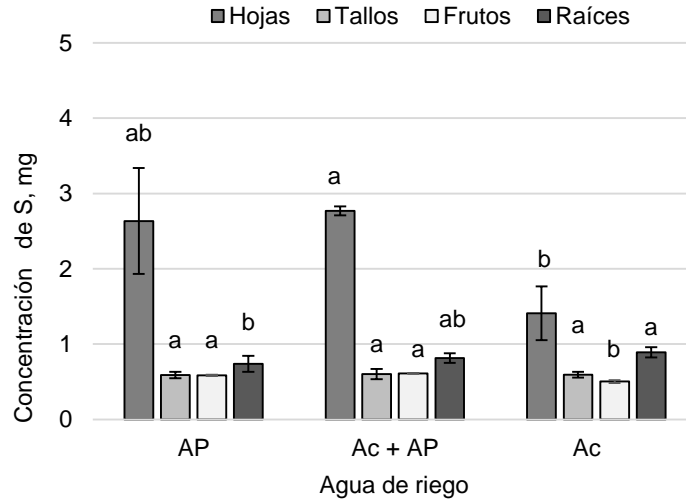
### Concentración de S

La **Figura I.37** muestra la relación que hay entre la concentración de S de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde las gráficas muestran una diferencia estadística significativa, en frutos y raíces teniendo una mayor concentración en composta en ambos órganos, y no existiendo ninguna diferencia significativa en los demás órganos evaluados.



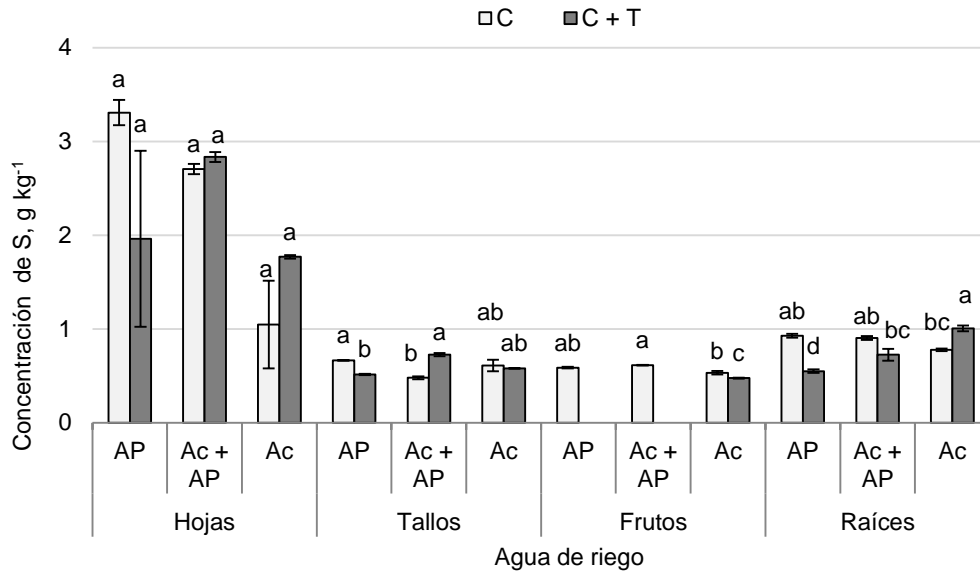
**Figura I. 37** Concentración de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La **Figura I.38** muestra la concentración de S de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en hojas, frutos y raíces. En las hojas teniendo una mayor concentración en la mezcla de agua acuícola con potable; los frutos presentan una menor concentración en al agua acuícola sin haber diferencia significativa en los otros dos riegos evaluados; las raíces muestran una mayor concentración de S con el riego de agua acuícola. No existen diferencias significativas en la concentración de S en tallos.



**Figura I. 38** Concentración de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.39** es posible observar que en hojas no hubo diferencia estadística significativa para la concentración de S en función a la interacción de agua de riego utilizada y sustrato. Sin embargo la figura muestra que los otros órganos presentaron diferencia estadística significativa en la concentración de S. En los tallos en composta se puede observar una mayor concentración en el riego de agua potable, y en la mezcla de sustratos la mayor concentración en este órgano fue presentada en la mezcla de aguas de riego. Para el órgano fruto en la mezcla de sustratos la mayor concentración de S fue presentada en la mezcla de aguas de riego y en composta la única que presento frutos fue la variable con riego de agua acuícola. Las raíces por su parte también tuvieron una diferencia estadística significativa presentando la mayor concentración las que estaban en composta con riego acuícola.

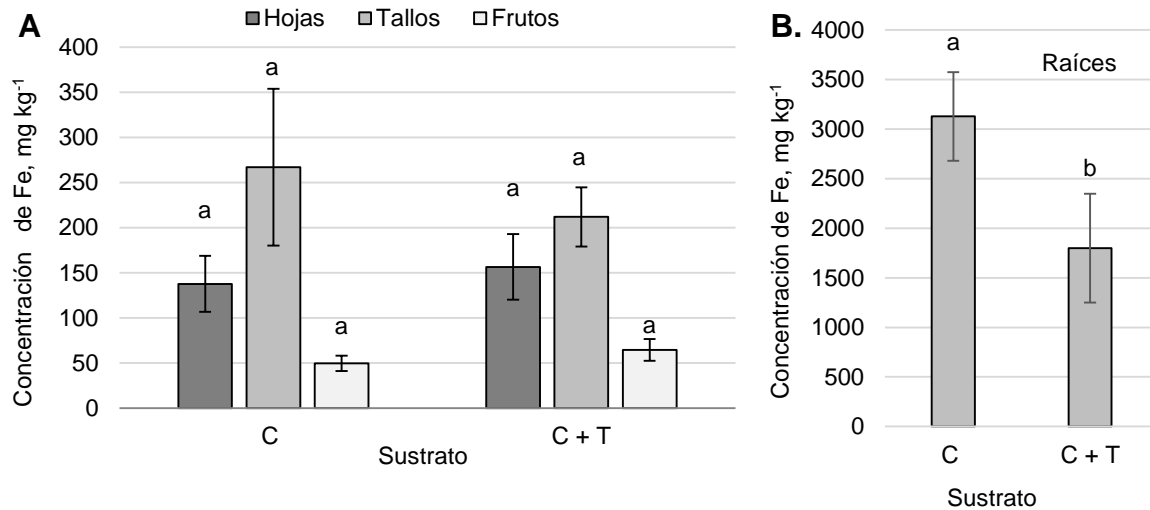


**Figura I. 39** Concentración de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

### Concentración de Fe

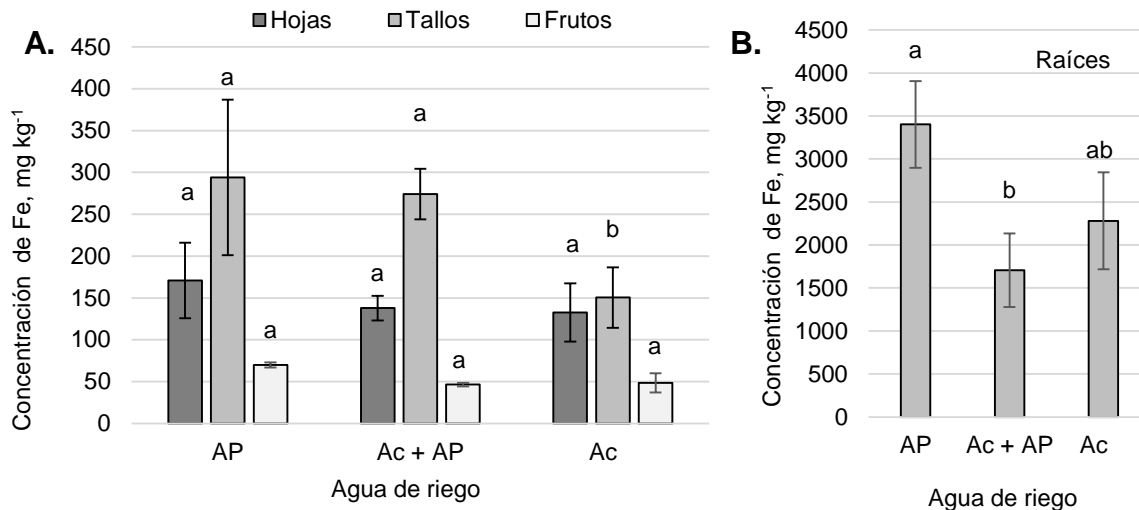
La **Figura I.40** muestra la relación que hay entre la concentración de Fe de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa, en raíces presentando una mayor concentración en composta. Los demás órganos no muestran una diferencia estadística significativa.





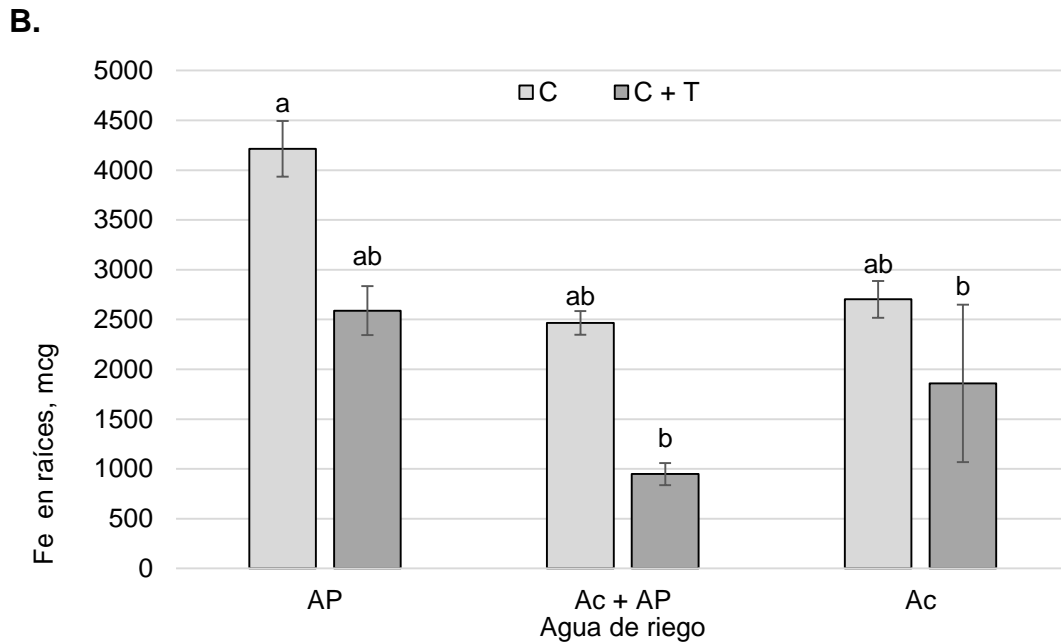
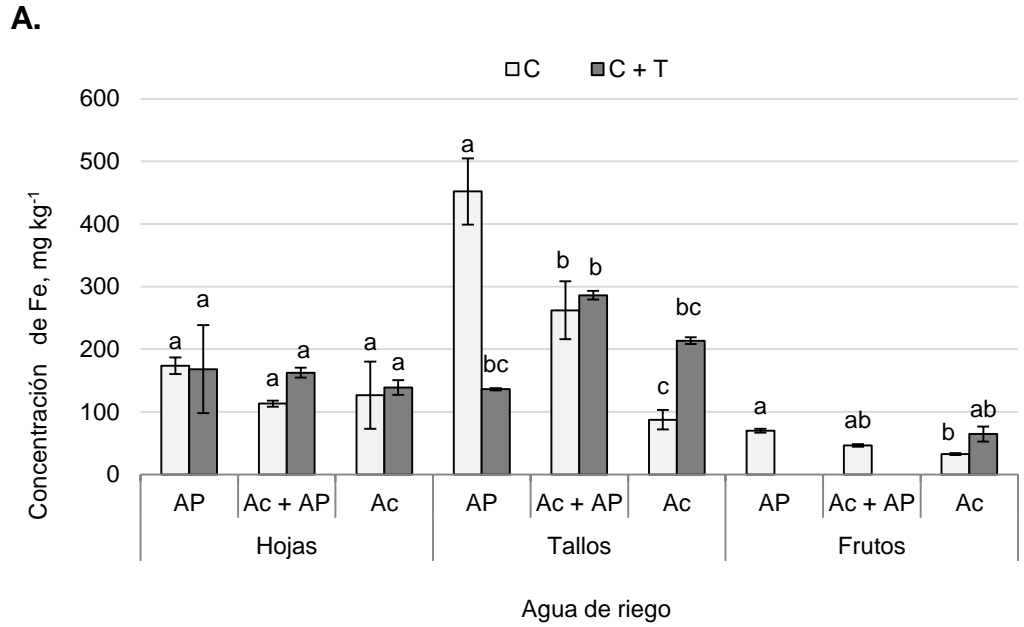
**Figura I. 40** Concentración de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La **Figura I.41 (A y B)** muestra la concentración de Fe de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en tallos y raíces, en donde los tallos muestran una menor concentración en riego de agua acuícola, y las raíces una menor concentración en la mezcla de agua acuícola con agua potable. No existen diferencias significativas en la concentración de Fe en hojas y frutos.



**Figura I. 41** Concentración de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

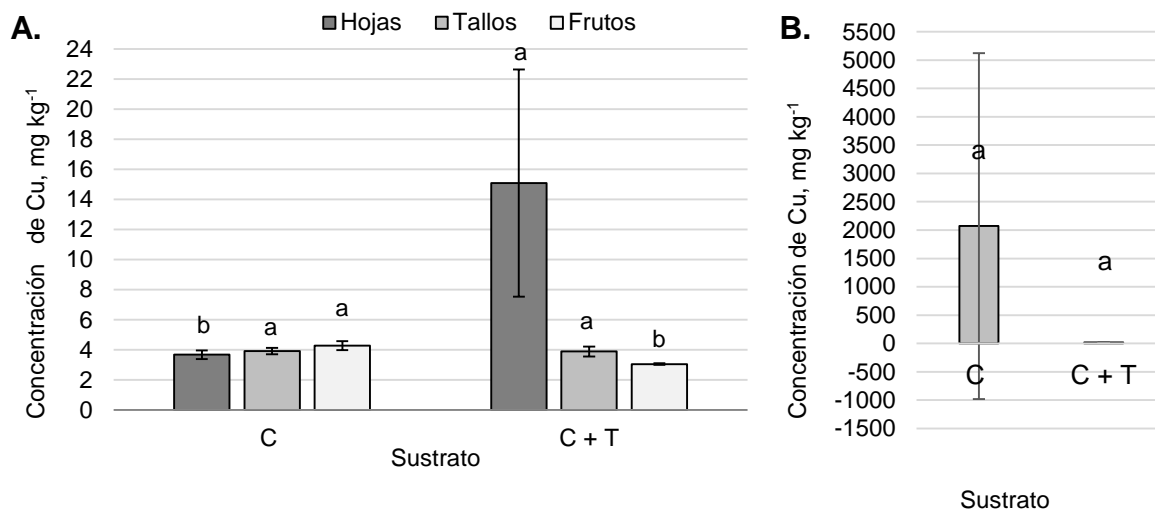
La **Figura I.42 (A y B)** muestran concentración de Fe en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto. Es posible observar que en hojas no hubo diferencia estadística significativa para la concentración de Fe en función al agua de riego utilizada. Sin embargo se presentó diferencia estadística significativa en la concentración de Fe en tallos observándose la mayor concentración en composta con riego agua potable. A diferencia de la mezcla de sustratos en donde la mayor concentración fue en la mezcla de agua de riego acuícola con agua potable. En el caso de los frutos en la mezcla de sustrato con composta solo hubo crecimiento en el riego con agua acuícola. Y en composta hubo una diferencia significativa mostrando una menor concentración de Mg en el agua de riego acuícola. Para las raíces; en los dos sustratos hubo una diferencia estadística significativa, sin embargo en composta, las raíces muestran una mayor concentración en el riego con agua potable. Y en la mezcla de sustratos composta con tezontle, existe diferencia significativa teniendo una mayor concentración el riego de agua potable.



**Figura I. 42** Concentración de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

## Concentración de Cu

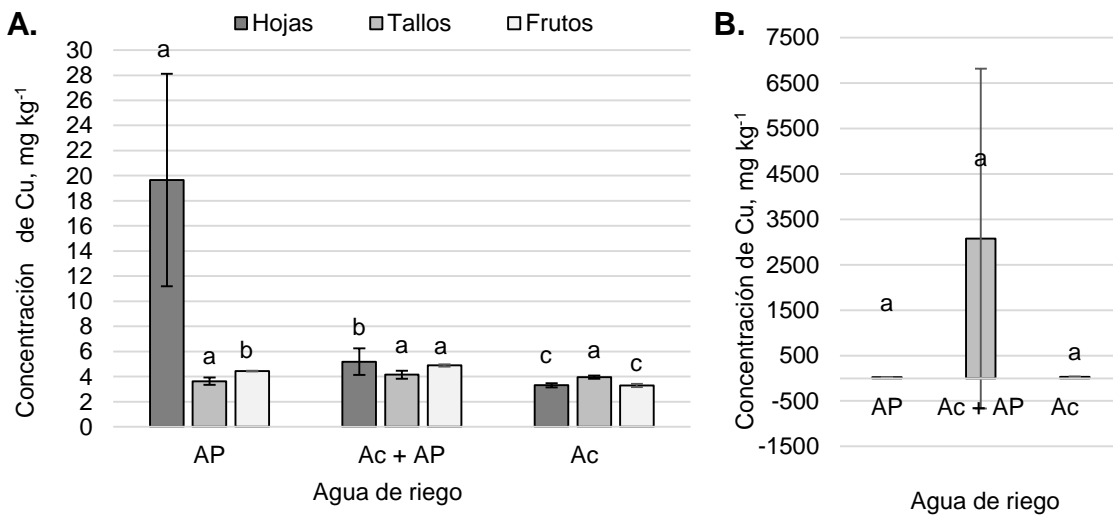
En la **Figura I.43 (A y B)** se puede observar que la desviación estándar es muy alta, en hojas y raíces principalmente y esto es debido a la fluctuación en los datos registrados. Las figuras muestran la relación que hay entre la concentración de Cu de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa, en hojas presentando una mayor concentración en la mezcla de sustrato composta con tezontle, así como en frutos en donde la mayor concentración se observa en composta. Las raíces muestran una diferencia estadística significativa muy pronunciada. Los tallos no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 43** Concentración de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

En la **Figura I.44 (A y B)** al igual que en la anterior se puede observar que la desviación estándar es muy alta, en hojas y raíces y esto es debido a la fluctuación en los datos registrados. Esta figura muestra la concentración de Cu de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en hojas, teniendo la mayor concentración en agua potable. Los frutos tienen una mayor concentración en la

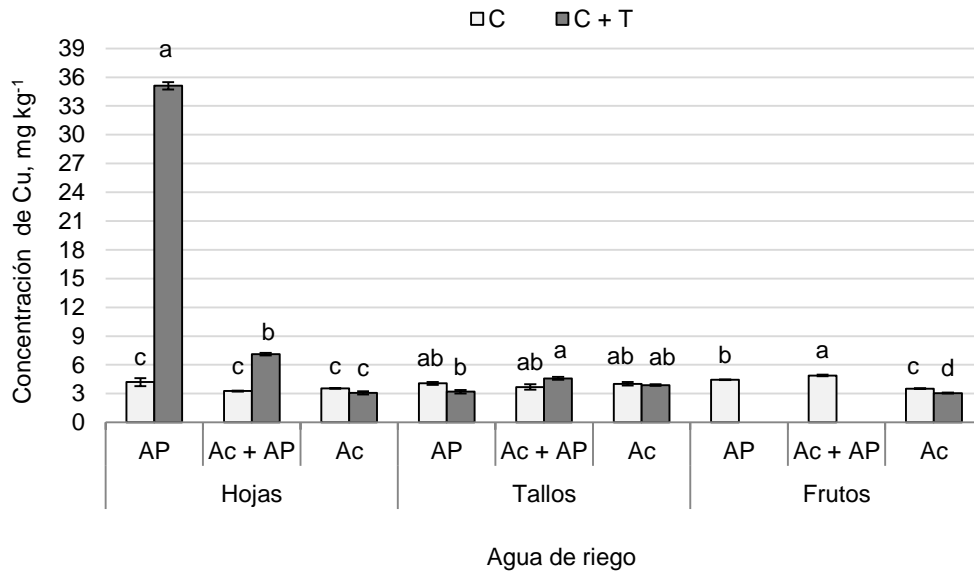
mezcla de agua acuícola con agua potable. Los tallos y las raíces no muestran diferencia estadística significativa.



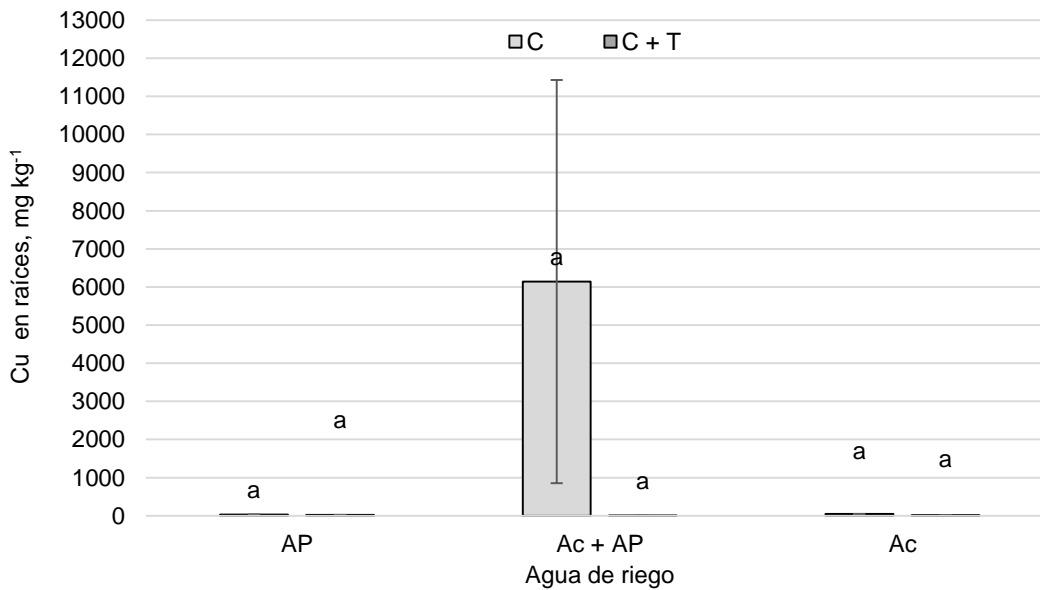
**Figura I. 44** Concentración de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.45 (A y B)** es posible observar la diferencia estadística significativa para la concentración de Cu en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En las hojas es posible observar la mayor concentración en la mezcla de sustrato de composta con tezontle en el riego agua potable. Los tallos, muestran una mayor concentración en la mezcla de agua acuícola con agua potable con el sustrato de la mezcla de composta con tezontle. Los frutos muestran una mayor concentración con la mezcla de agua acuícola con agua potable en el sustrato composta. Y en las raíces no se muestra diferencia estadística significativa.

**A.**



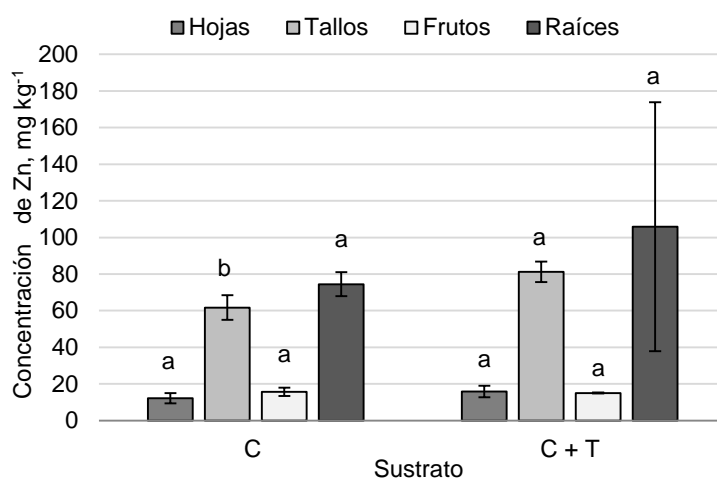
**B.**



**Figura I. 45** Concentración de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

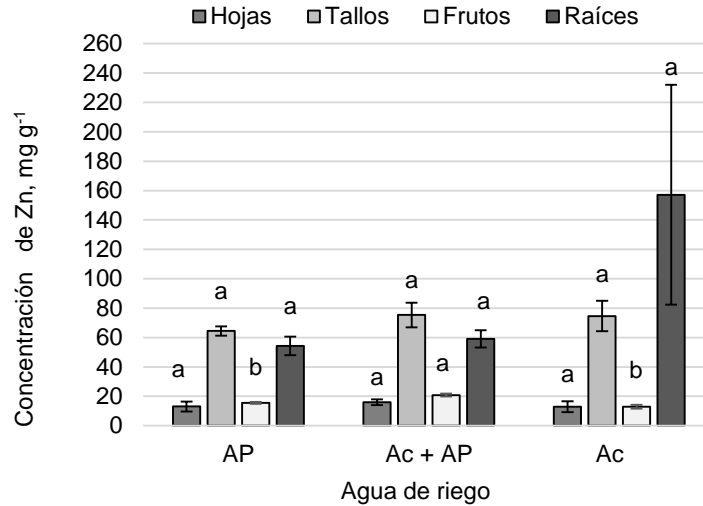
## Concentración de Zn

En la **Figura I.46** se puede observar que la desviación estándar en la variable de las raíces es muy alta, en hojas y raíces principalmente y esto es debido a la fluctuación en los datos registrados. La figura muestra la relación que hay entre la concentración de Zn de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En tallos se presenta una mayor concentración en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Las hojas, frutos y raíces no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 46** Concentración de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) C= composta; T= tezontle.

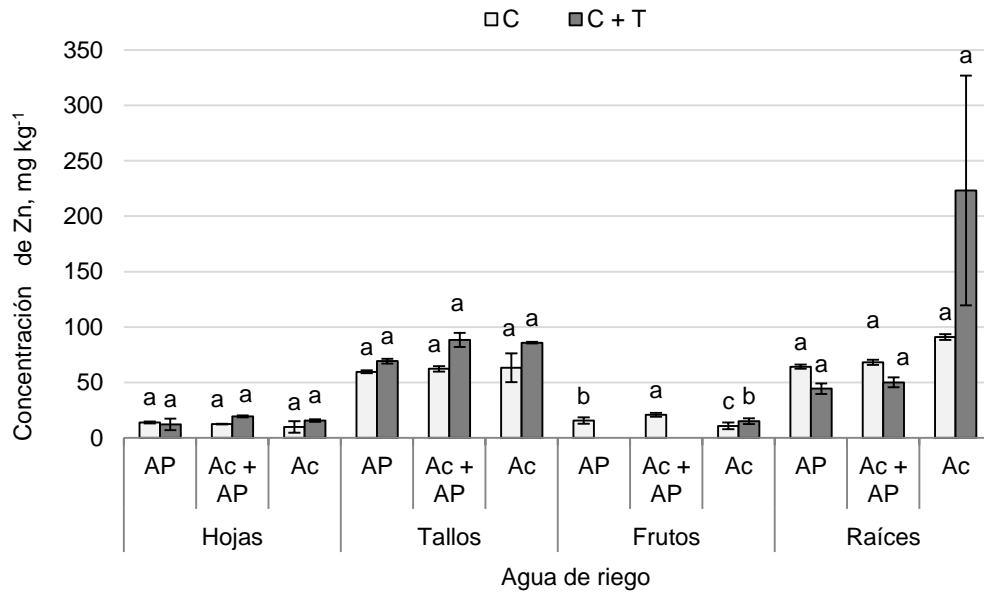
En la **Figura I.47** al igual que en la anterior se puede observar que la desviación estándar es muy alta, en raíces debido a la fluctuación en los datos registrados. Esta figura muestra la concentración de Zn de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en frutos, teniendo la mayor concentración en la mezcla de agua acuícola con agua potable. Las hojas, tallos y raíces no muestran diferencia estadística significativa.



**Figura I. 47** Concentración de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.48** es posible observar en los frutos una diferencia estadística significativa para la concentración de Zn en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego teniendo una mayor concentración en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Las hojas, tallos y raíces no muestran diferencia estadística significativa.

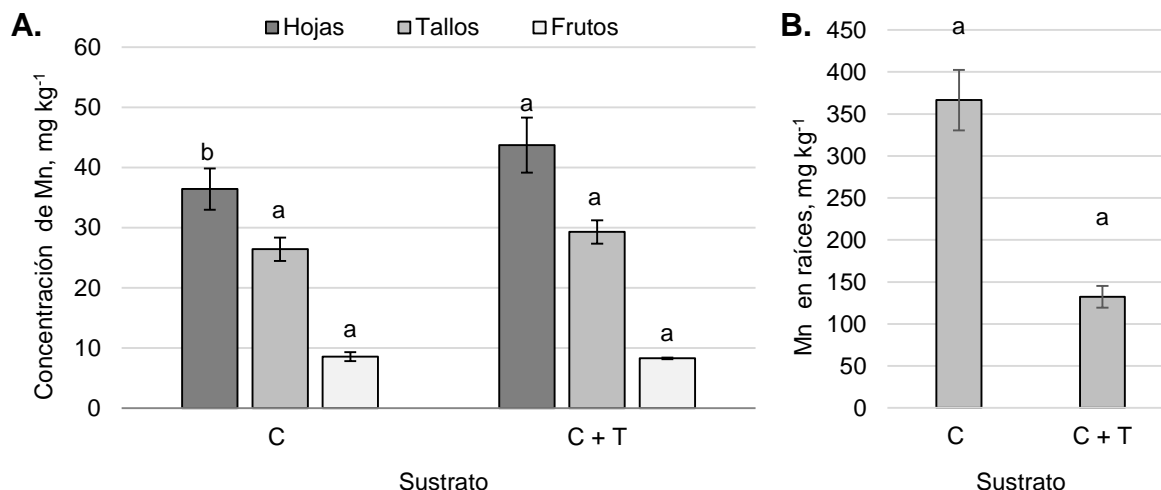




**Figura I. 48** Concentración de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

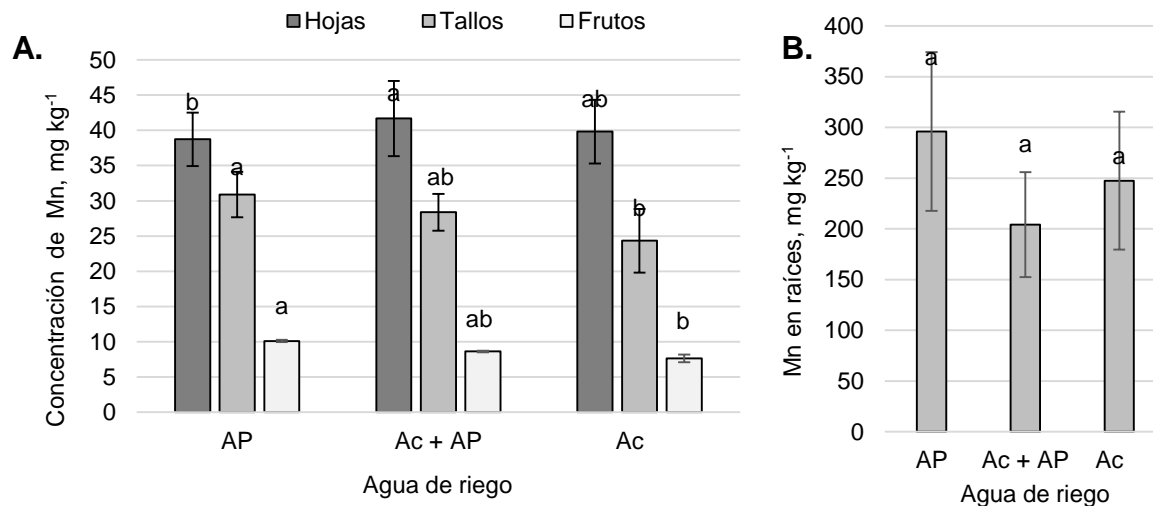
### Concentración de Mn

En la **Figura I.49 (A y B)** se muestra la relación que hay entre la concentración de Mn de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En hojas se presenta una mayor concentración en composta. Los tallos, frutos y raíces no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 49** Concentración de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

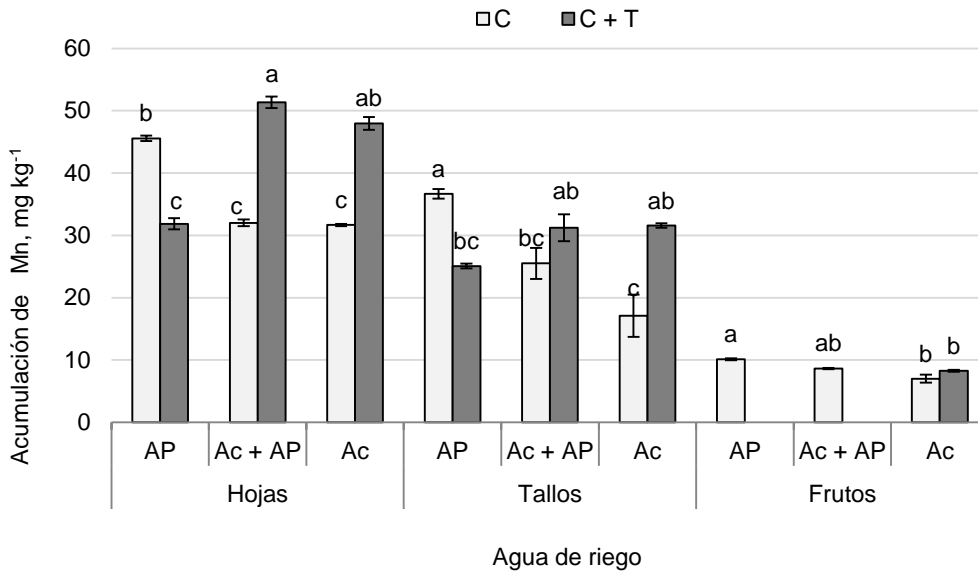
La **Figura I.50 (A y B)** muestra la concentración de Mn de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en hojas teniendo la mayor concentración en la mezcla de agua acuícola con agua potable. Los tallos y frutos presentan una mayor concentración en el riego con agua potable. Las raíces no muestran diferencia estadística significativa.



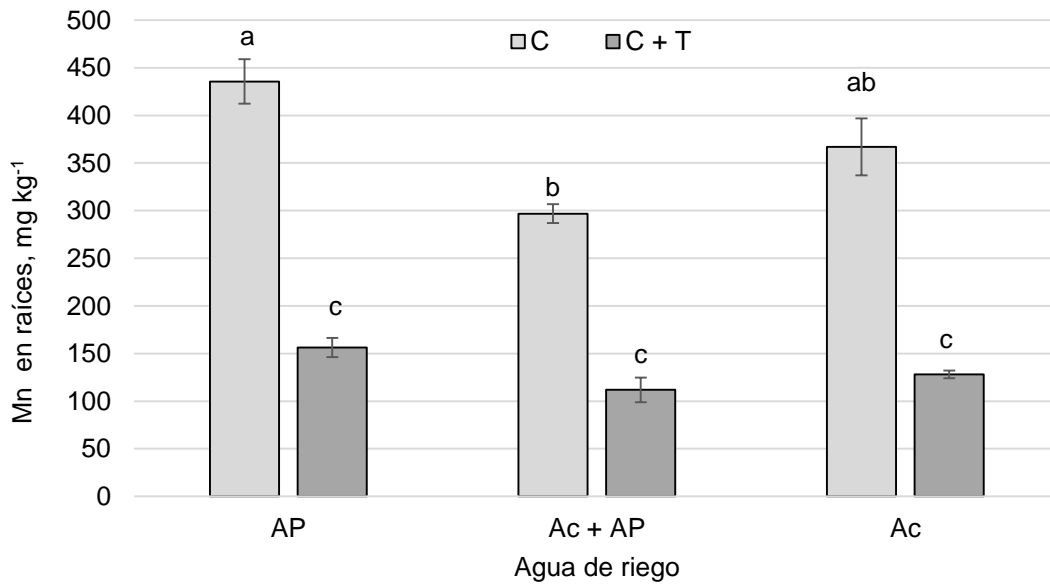
**Figura I. 50** Concentración de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.51 (A y B)** es posible observar en las raíces una diferencia estadística significativa para la concentración de Mn en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego teniendo una mayor concentración en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Mostrando una mayor concentración en el riego con agua potable y con sustrato composta. En sustrato de la mezcla de composta con tezontle no muestra una diferencia estadística significativa. Las hojas muestran una mayor concentración de manganeso en la mezcla de agua acuícola y agua potable, los tallos y frutos con mayor concentración se presentaron en sustrato composta y con riego en agua potable.

**A.**



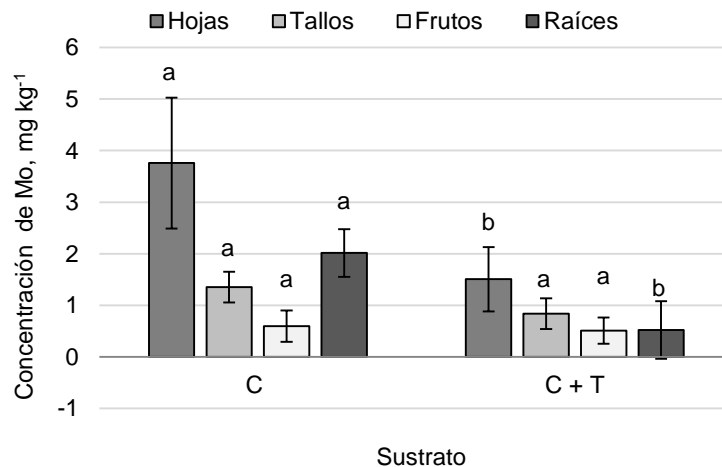
**B.**



**Figura I. 51** Concentración de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y por órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= Composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

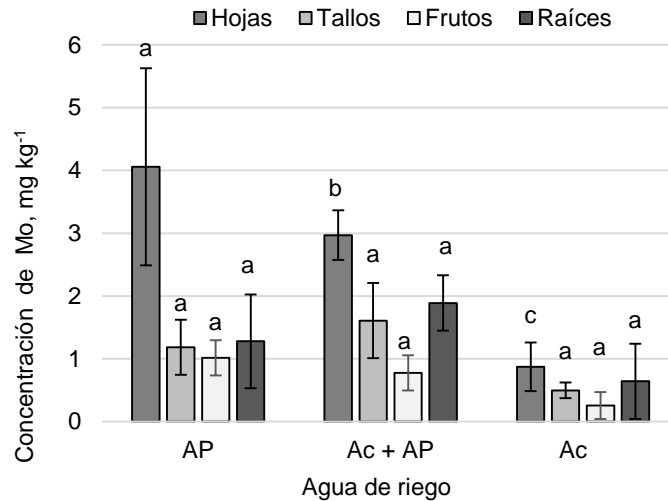
## Concentración de Mo

La **Figura I.52** muestra la relación que hay entre la concentración de Mo de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En hojas y raíces se presenta una mayor concentración en composta. Los tallos y frutos no muestran una diferencia estadística significativa.



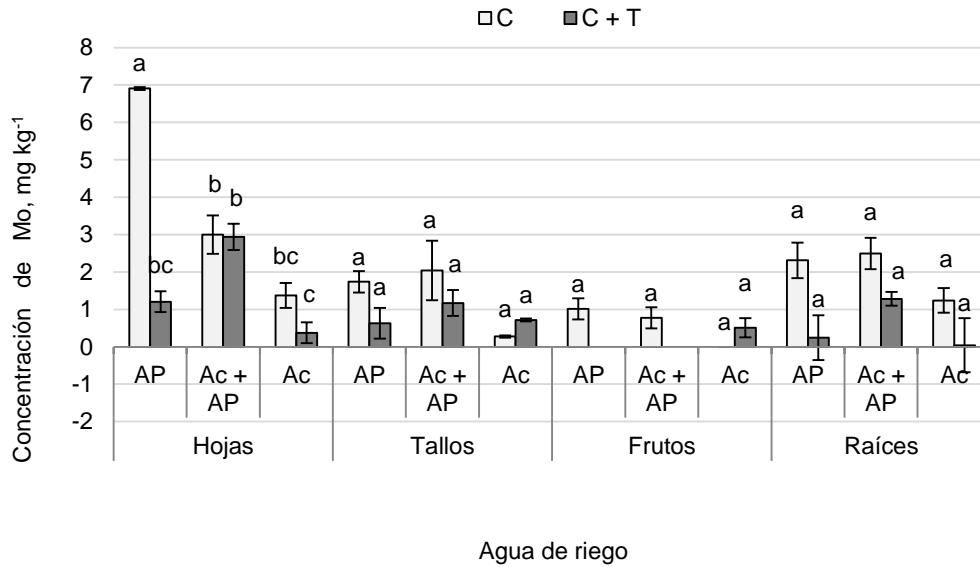
**Figura I. 52** Concentración de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La **Figura I.53** muestra la concentración de Mo de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en hojas teniendo una mayor concentración en agua potable. Los tallos, frutos y raíces no muestran diferencia estadística significativa.



**Figura I. 53** Concentración de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= Agua acuícola.

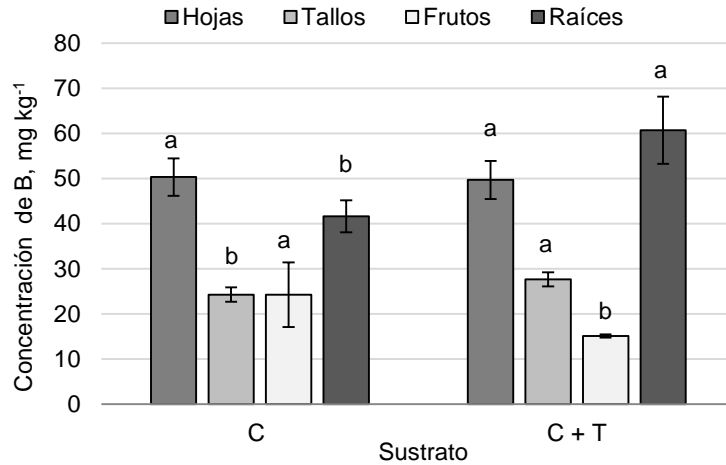
En la **Figura I.54** es posible observar en las hojas una diferencia estadística significativa para la concentración de Mo en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego teniendo una mayor concentración agua potable en sustrato composta. Los tallos frutos y raíces no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 54** Concentración de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

### Concentración de B

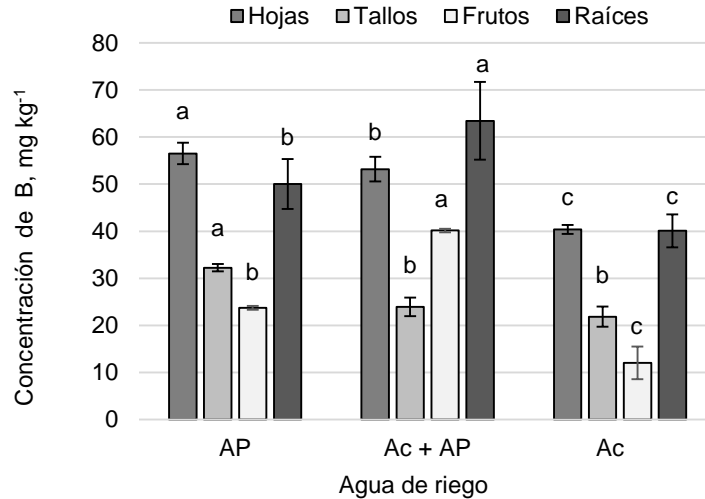
En la **Figura I.55** se muestra la relación que hay entre la concentración de B de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En raíces y tallos se presenta una mayor concentración en la mezcla de composta con tezontle. Los frutos presentan una mayor concentración en el sustrato composta. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 55** Concentración de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) C= composta; T= tezontle.

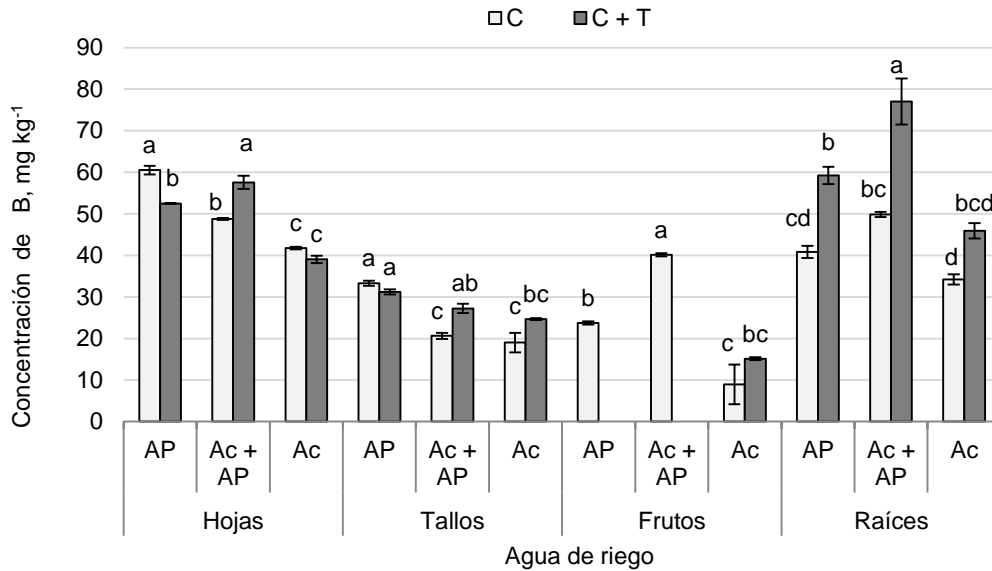
La **Figura I.56** muestra la concentración de B de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en todas las variables estudiadas, las hojas y tallos muestran una mayor concentración con agua potable. Los frutos y raíces presentan una mayor concentración en la mezcla agua de riego con agua acuícola y agua potable.





**Figura I. 56** Concentración de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

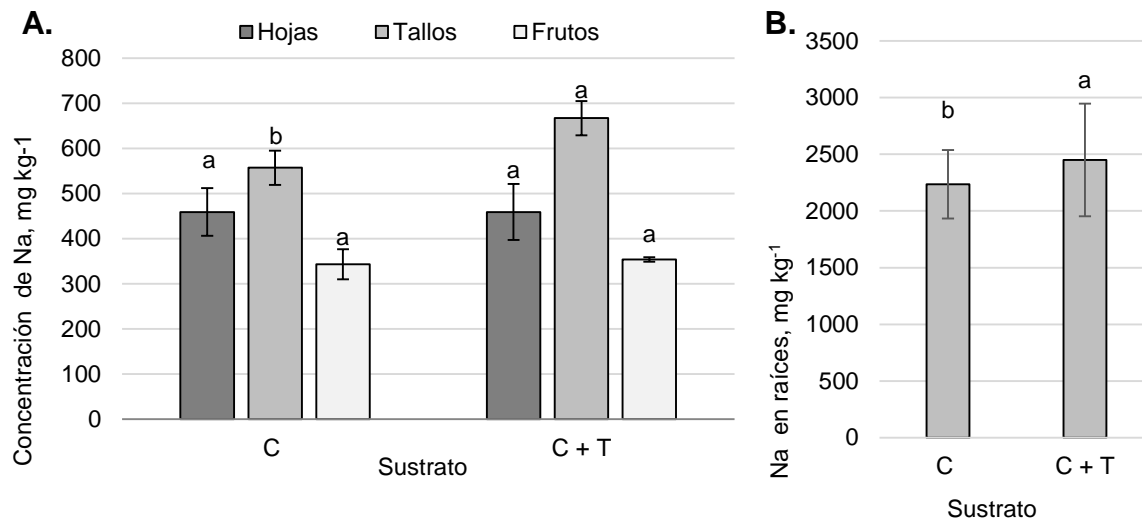
En la **Figura I.57** es posible observar la concentración de B en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En hojas se observa una mayor concentración de B en la composta con el riego agua potable; y para la mezcla de sustrato composta con tezontle se muestra una mayor concentración en la mezcla de agua acuícola con agua potable. Para tallos, la mayor concentración se puede observar en el riego con agua potable para ambos sustratos evaluados. Para los frutos se muestra una mayor concentración en la mezcla de agua acuícola con agua potable en el sustrato composta. Y finalmente para las raíces se muestra una mayor concentración en el riego con la mezcla de agua acuícola con agua potable y con la mezcla de sustrato composta y tezontle.



**Figura I. 57** Concentración de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

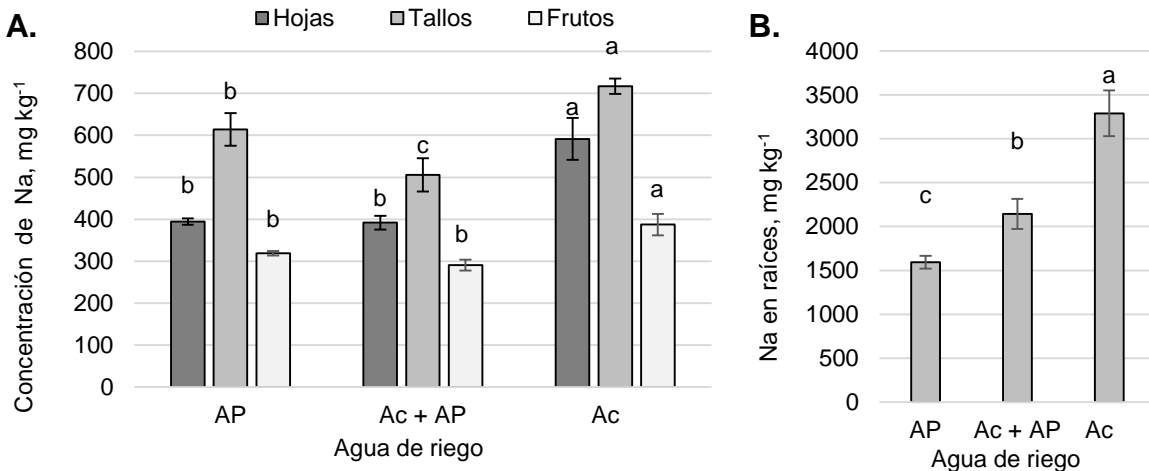
### Concentración de Na

La **Figura I.58** muestra la relación que hay entre la concentración de Na de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran diferencia estadística significativa en tallos y raíces, mostrando una mayor concentración en la mezcla de composta con tezontle para ambos órganos. Las hojas y frutos no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 58** Concentración de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

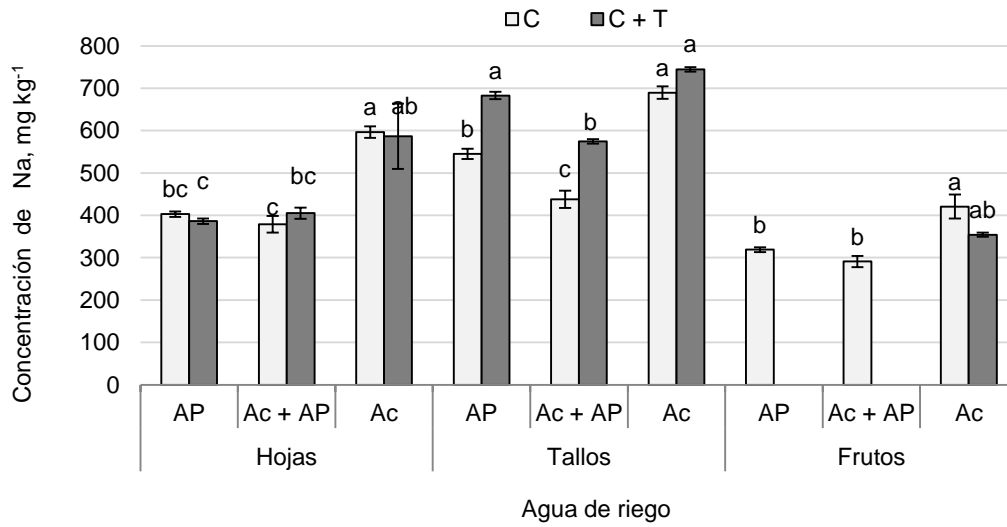
La **Figura I.59 (A y B)** muestra la concentración de Na de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en hojas, tallos, frutos y raíces teniendo la mayor concentración de Na en el riego de agua acuícola.



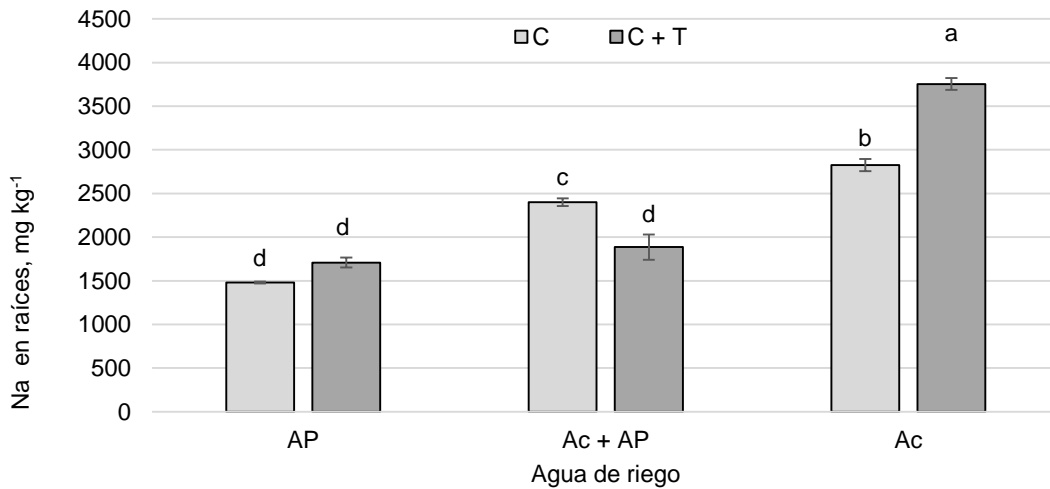
**Figura I. 59** Concentración de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.60 (A y B)** es posible observar la concentración de Na en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Las hojas y tallos muestran una mayor concentración en agua acuícola con ambos sustratos evaluados. Los frutos muestran una mayor concentración en el riego acuícola con sustrato composta. A diferencia de las raíces en donde la mayor concentración se observa en el riego de agua acuícola pero con la mezcla de sustrato composta con agua acuícola.

**A.**



**B.**



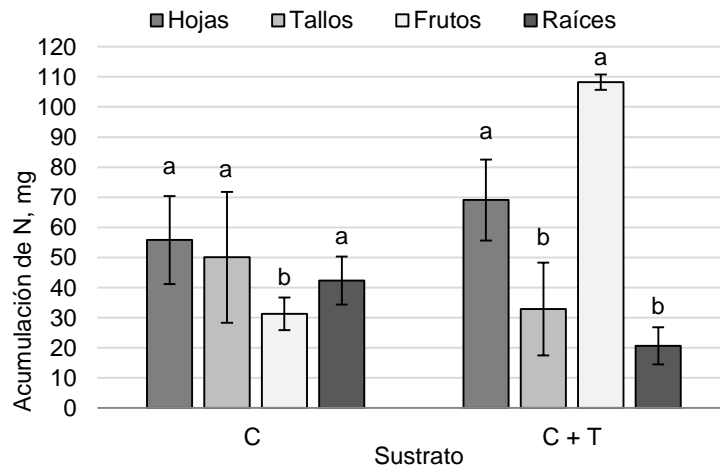
**Figura I. 60** Concentración de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

#### 1.5.4.6 Comparación de acumulación nutrimental de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette divididos por órganos.

Es relevante mencionar que en los gráficos de acumulación siguientes no se tomó en cuenta el sustrato tezontle debido a la senescencia que presentó.

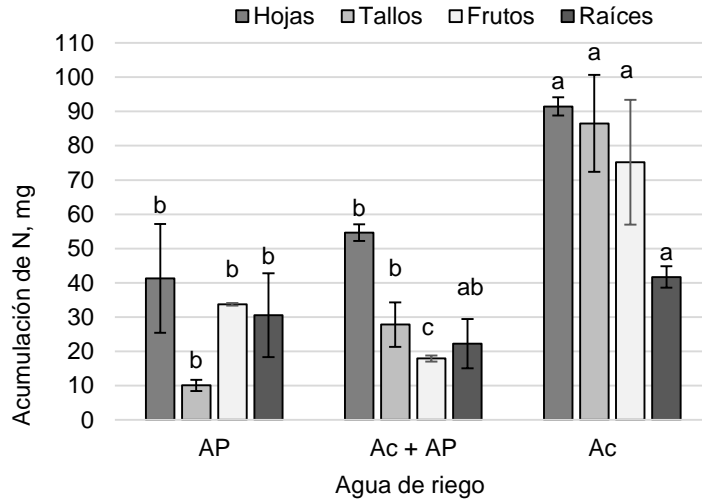
##### Acumulación de N

En la **Figura I.61** se muestra la relación que hay entre la acumulación de N de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa en tallos y raíces presentando una mayor acumulación en composta. Los frutos presentan una mayor acumulación la mezcla de sustrato composta con tezontle. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 61** Acumulación de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) C=: Composta; T= tezontle.

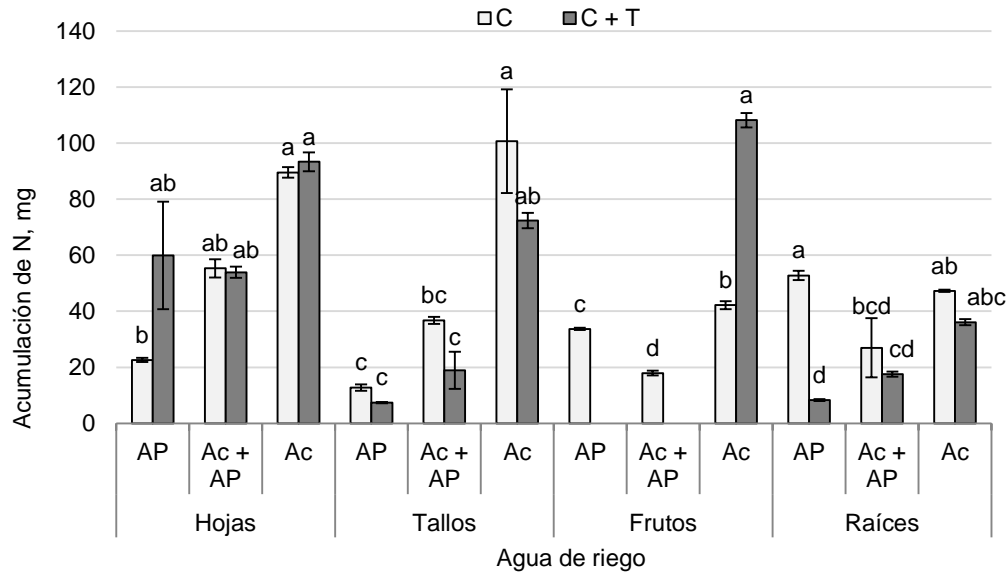
La **Figura I.62** muestra la acumulación de N de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en todas las variables estudiadas, presentando una mayor acumulación en todos los órganos en el agua acuícola.



**Figura I. 62.** Acumulación de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.63** es posible observar la acumulación de N en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En sustrato composta; las hojas, tallos y frutos muestran una diferencia estadística significativa mostrando la mayor acumulación en el riego acuícola. Para el caso de las raíces en composta, la mayor acumulación se observa en agua potable.

En el caso de la mezcla de sustratos composta con tezontle, también se observa una diferencia estadística significativa, en donde mayor acumulación de N se muestra en las hojas, tallos, frutos y raíces también en agua acuícola.

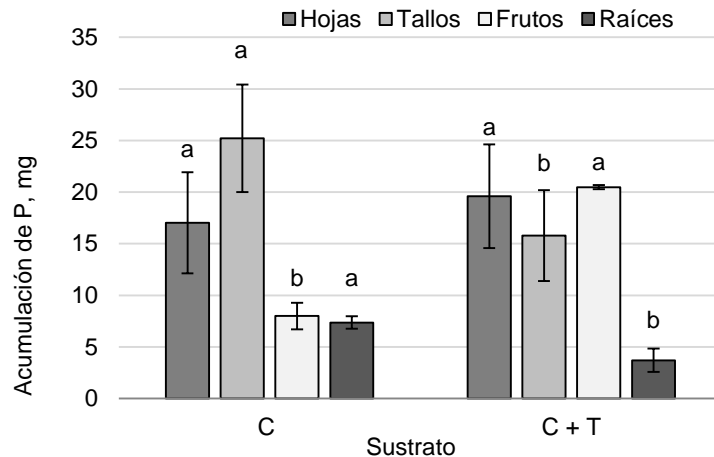


**Figura I. 63** Acumulación de N en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

### Acumulación de P

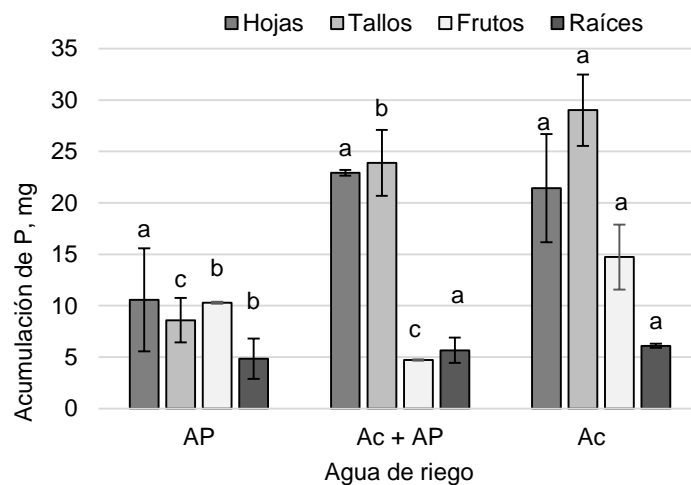
En la **Figura I.64** se muestra la relación que hay entre la acumulación de P de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En tallos y raíces se presenta una mayor acumulación en composta. A diferencia de los frutos que presentan una mayor acumulación en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Por otra parte las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.





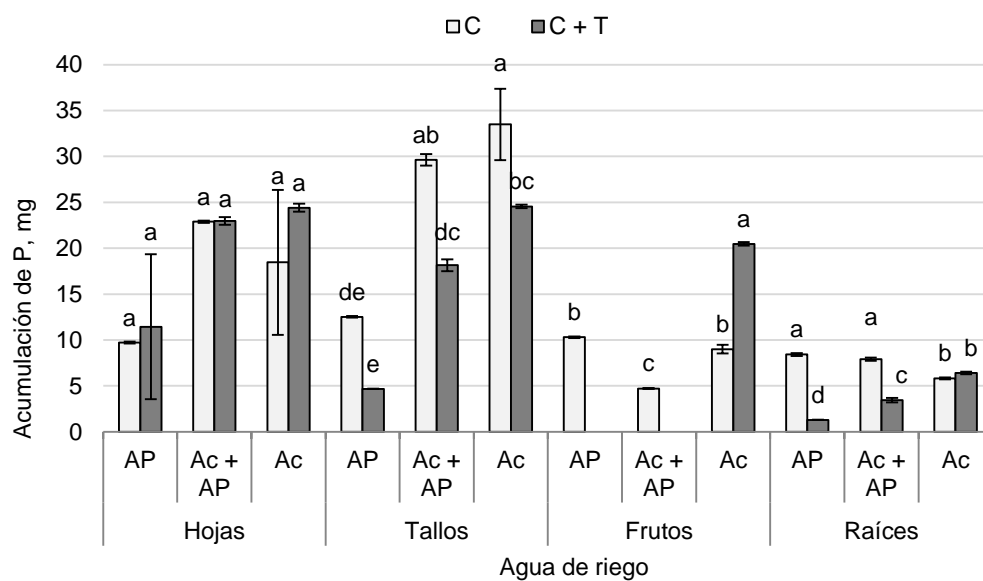
**Figura I. 64** Acumulación de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

En la **Figura I.65** es posible observar la acumulación presentada de P en función al tipo de agua de riego, las hojas no presentan una diferencia estadística significativa. Sin embargo sí es posible observar una diferencia significativa en tallos, frutos y raíces. Observando la mayor acumulación en las tres variables las regadas con agua acuícola.



**Figura I. 65** Acumulación de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

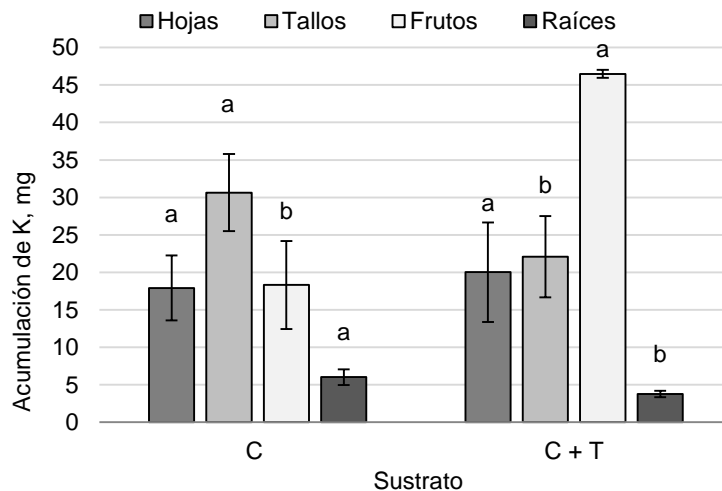
En la **Figura I.66** podemos observar la acumulación de P en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En hojas es posible observar que no hay ninguna diferencia estadística significativa en ninguna interacción evaluada. Para tallos, la mayor acumulación se puede observar en la interacción con el riego con agua acuícola en sustrato composta. Para los frutos se muestra una diferencia significativa observando la mayor acumulación en la mezcla de sustratos composta con tezontle con el riego potable, resultando entre la acumulación de P en tallos este último el valor más alto. Finalmente las raíces también tiene una diferencia estadística significativa mostrando una mayor acumulación en sustrato composta y como riego con la mezcla de agua acuícola con agua potable; al igual que con el riego con agua potable. Siendo que para la mezcla de sustratos composta con tezontle los frutos presentaron una mayor acumulación con el riego acuícola.



**Figura I. 66** Acumulación de P en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

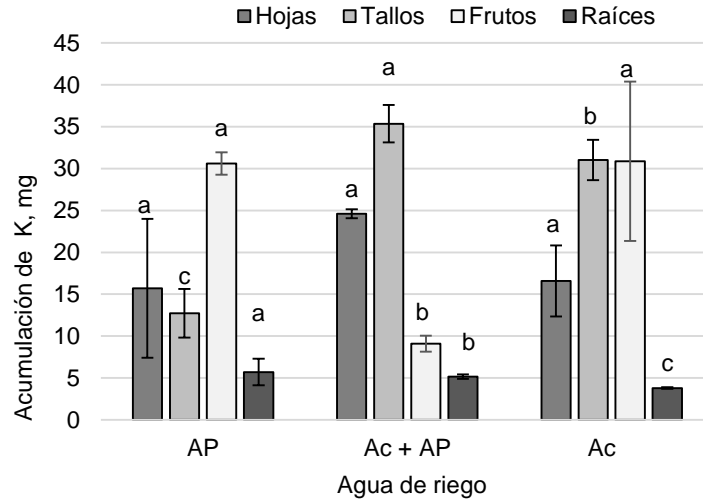
## Acumulación de K

En la **Figura I.67** se muestra la relación que hay entre la acumulación de K de acuerdo al sustrato utilizado mostrando una diferencia estadística significativa en tallos y raíces en composta. Los frutos presentan una mayor acumulación en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Por otra parte las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



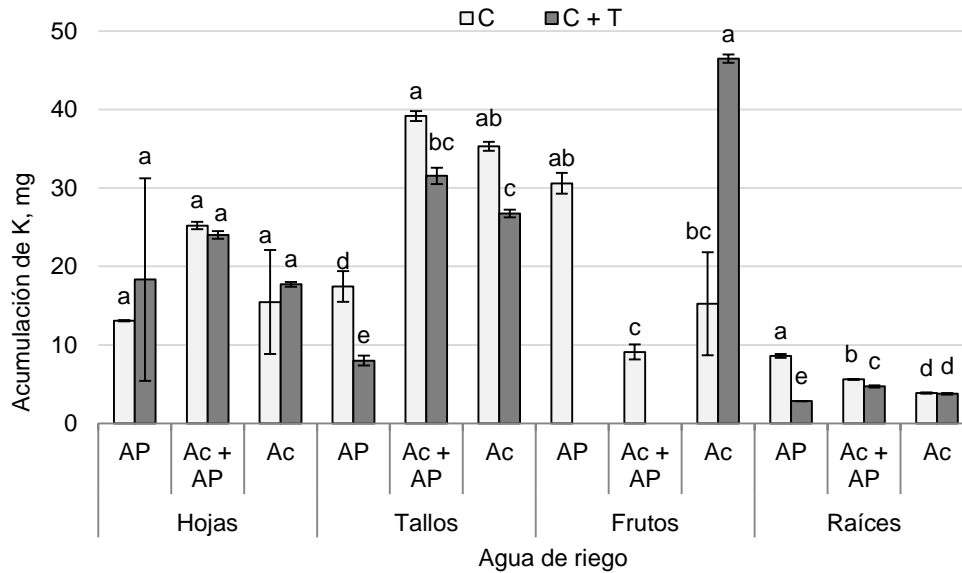
**Figura I. 67** Acumulación de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

En la **Figura I.68** es posible observar la acumulación de K de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse que en hojas no hay diferencia significativa en las variables estudiadas, sin embargo para tallos la variable mostrada con mayor acumulación es la mezcla de agua de riego potable con acuícola. En el caso de los frutos se observa una mayor acumulación en agua potable y en agua acuícola existiendo una diferencia estadística significativa siendo su valor menor el de la mezcla de agua acuícola con agua potable. Para el caso de raíces se presenta una mayor acumulación en el riego con agua potable.



**Figura I. 68** Acumulación de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

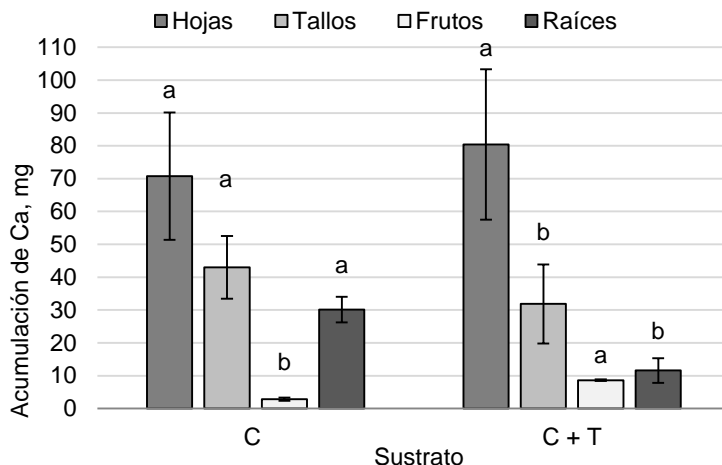
La **Figura I.69** nos muestra la acumulación de K en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. La acumulación en hojas no muestra una diferencia estadística significativa. Para tallos, la mayor acumulación puede observarse en el sustrato composta, con el riego de agua potable con acuícola. Para los frutos se muestra una mayor acumulación en la interacción de agua acuícola con la mezcla de sustrato composta con tezontle. Y finalmente para las raíces se muestra una mayor acumulación en la interacción de riego con agua potable y como sustrato composta.



**Figura I. 69** Acumulación de K en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

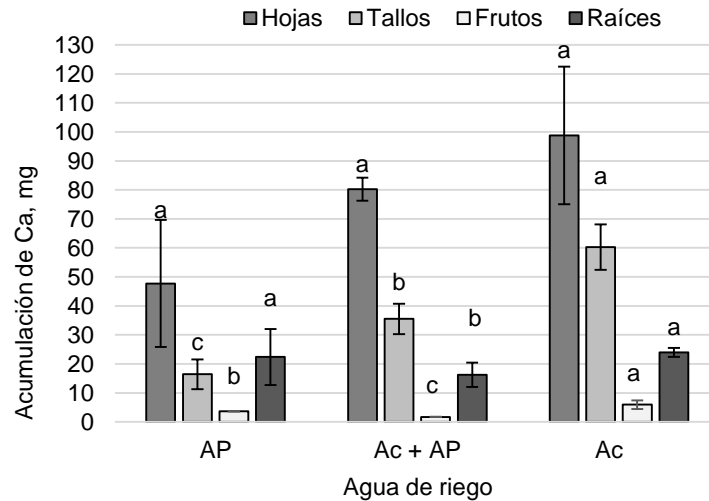
### Acumulación de Ca

En la **Figura I.70** es posible observar la relación que hay en la acumulación de Ca de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa para tallos, frutos y raíces. A diferencia de las hojas en donde no se muestra diferencia estadística significativa. Los tallos y raíces presentan una mayor acumulación en composta. Los frutos presentan una mayor acumulación la mezcla de sustrato composta con tezontle.



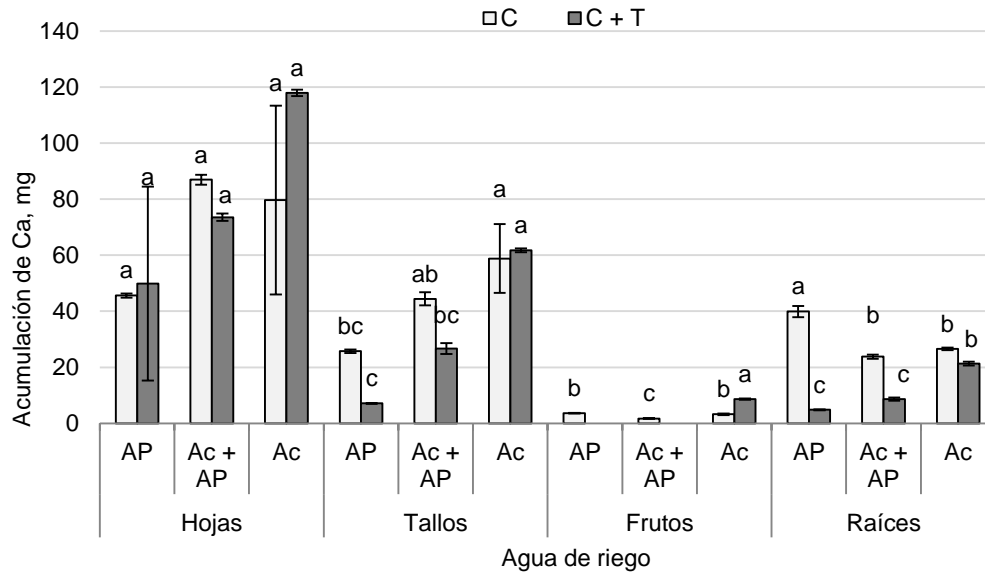
**Figura I. 70** Acumulación de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

En la **Figura I.71** es posible observar la acumulación de Ca de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa tallos y frutos teniendo la mayor acumulación de Ca en el agua acuícola. Las raíces muestran una acumulación mayor en agua acuícola y en el agua potable, siendo que a diferencia de esos dos tipos de agua, la mezcla de agua potable con agua acuícola muestra la menor acumulación. Las hojas no muestran diferencia estadística significativa.



**Figura I. 71** Acumulación de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.72** es posible observar la acumulación de Ca en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En hojas se observa no se observa una diferencia estadística significativa en cuanto a la acumulación de Ca. Para tallos y frutos, la mayor acumulación se puede observar en la interacción de riego con agua acuícola y en la mezcla de sustratos composta con tezontle. Y finalmente para las raíces se muestra una mayor acumulación en el riego con la interacción de agua potable y composta.

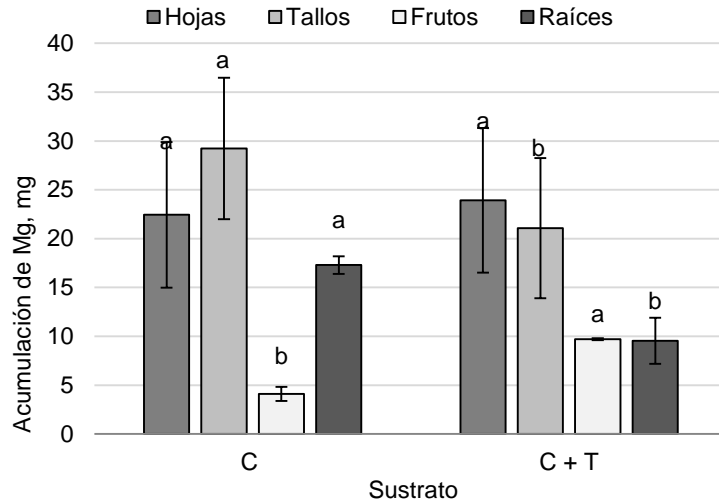


**Figura I. 72** Acumulación de Ca en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

### Acumulación de Mg

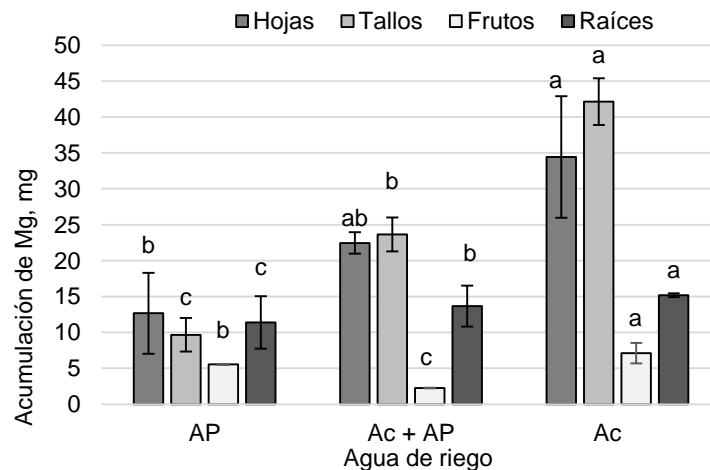
La **Figura I.73** muestra la relación que hay entre la acumulación de Mg de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En raíces y tallos se presenta una mayor acumulación en composta. Los frutos presentan una mayor acumulación en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.





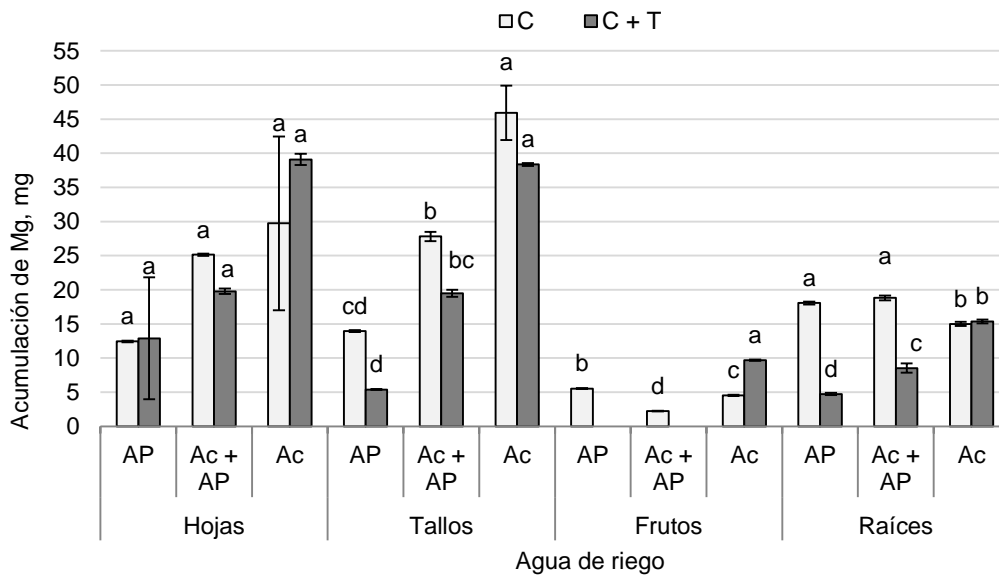
**Figura I. 73** Acumulación de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La **Figura I.74** muestra la acumulación de Mg de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en todas las variables estudiadas, presentando una mayor acumulación en el agua de riego acuícola para todos los órganos (hojas, tallos, frutos y raíces).



**Figura I. 74** Acumulación de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

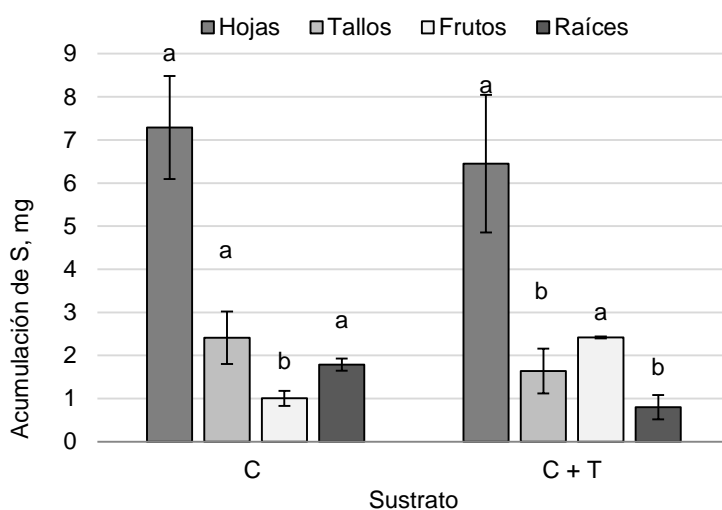
La **Figura I.75** nos muestra la acumulación de Mg en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Para tallos, la mayor acumulación se puede observar en el riego con agua acuícola para ambos sustratos evaluados por separado (composta y mezcla de composta con tezontle). Para los frutos se muestra una mayor acumulación con agua acuícola y como sustrato la mezcla de agua acuícola con tezontle y potable en el sustrato composta. Y finalmente para las raíces se muestra una mayor acumulación en el riego con la mezcla de agua acuícola con agua potable, con composta como sustrato y así mismo pero con agua potable. En hojas no se observa una diferencia estadística significativa



**Figura I. 75** Acumulación de Mg en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

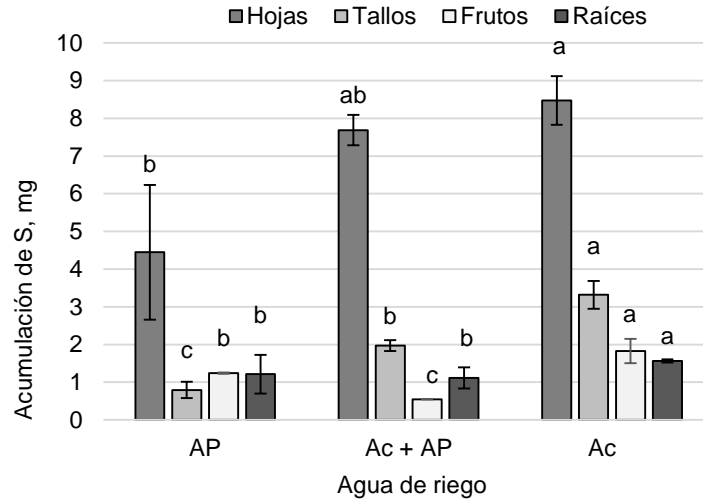
## Acumulación de S

En la **Figura I.76** se muestra la relación que hay entre la acumulación de S de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En raíces y tallos se presenta una mayor acumulación en composta. Los frutos presentan una mayor acumulación en la mezcla de composta con tezontle. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



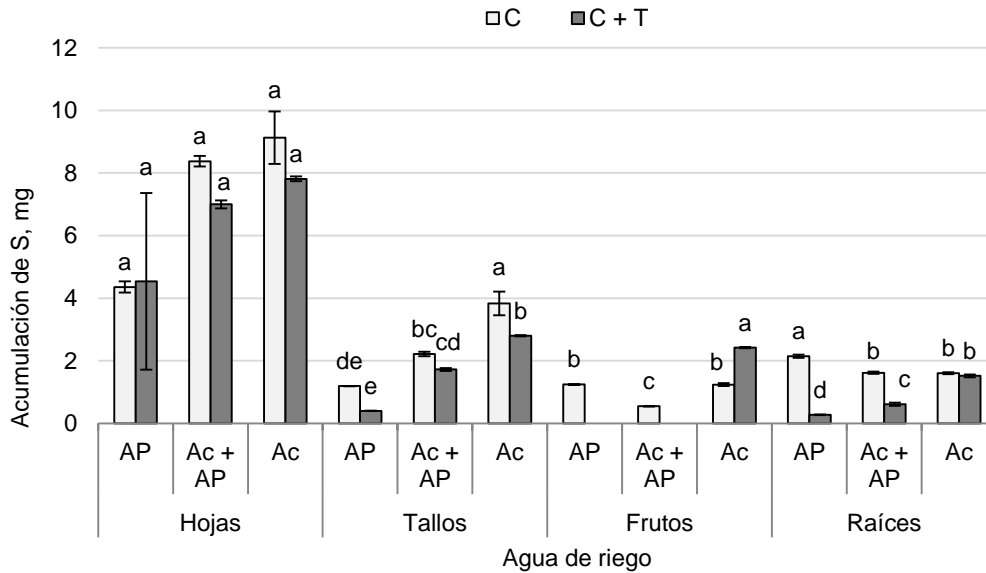
**Figura I. 76** Acumulación de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La **Figura I.77** muestra la acumulación de S en función al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en todas las variables estudiadas, mostrando la mayor acumulación con agua acuícola para todos los órganos evaluados.



**Figura I. 77** Acumulación de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

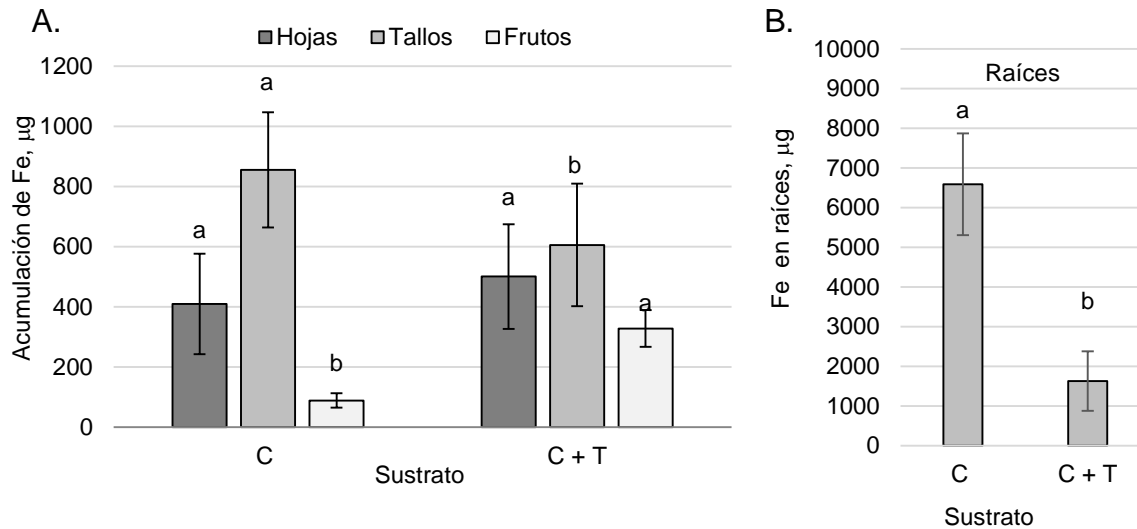
En la **Figura I.78** es posible observar la acumulación de S en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En hojas no se observa diferencia estadística significativa en la acumulación de S. Para tallos, la mayor acumulación se puede observar en el riego con agua acuícola en composta. Para los frutos se muestra una mayor acumulación en la mezcla de composta con tezontle con el riego de agua acuícola. Y finalmente para raíces se muestra una mayor acumulación en el riego con agua potable y sustrato composta.



**Figura I. 78** Acumulación de S en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

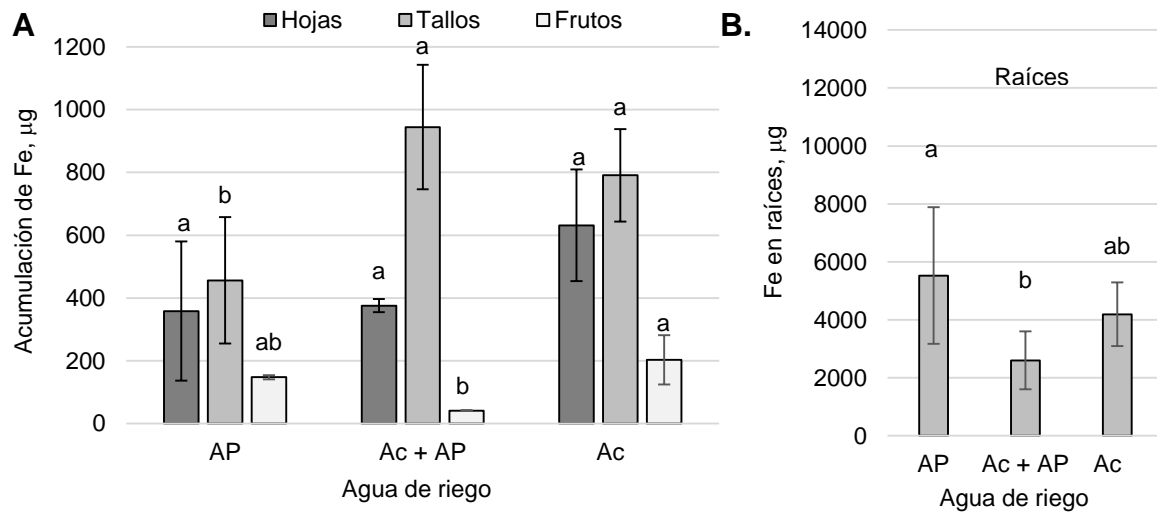
### Acumulación de Fe

En la **Figura I.79 (A y B)** se muestra la relación que hay entre la acumulación de Fe de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En raíces y tallos se presenta una mayor acumulación en composta. Los frutos presentan una mayor acumulación en la mezcla de composta con tezontle. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 79** Acumulación de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

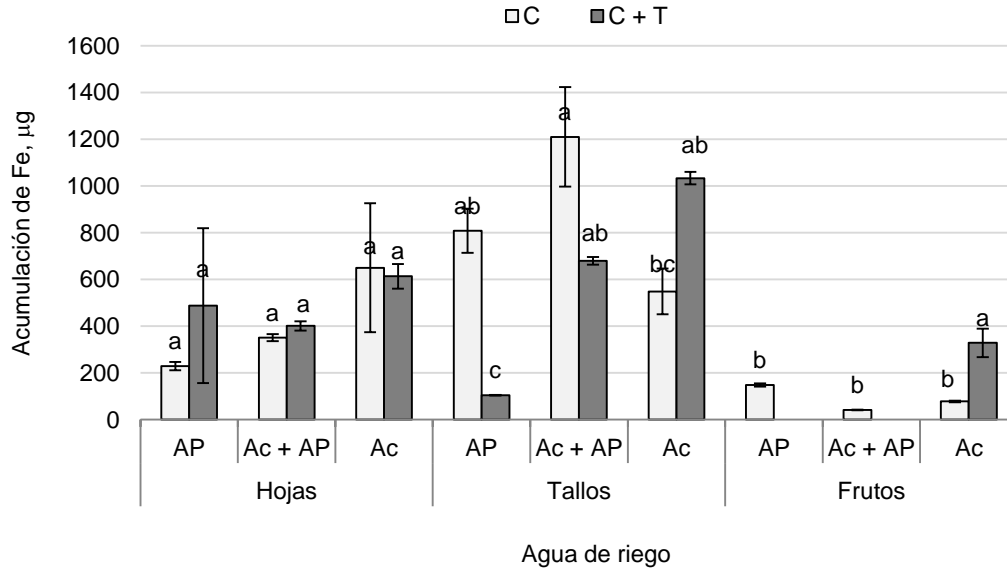
La **Figura I.80 (A y B)** muestra la acumulación de Fe de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en todas las variables estudiadas, para el caso de tallos muestran una menor acumulación con agua potable. Los frutos presentan una mayor acumulación con agua de acuícola. Las raíces tienen una mayor acumulación con agua potable. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



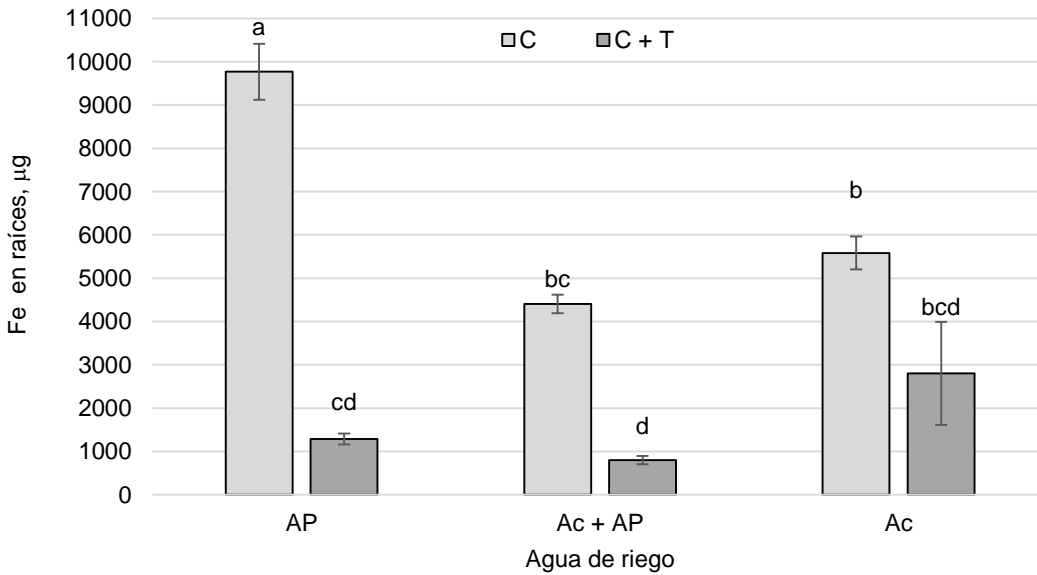
**Figura I. 80** Acumulación de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.81** es posible observar la acumulación de Fe en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa. En los tallos se observa una mayor acumulación de Fe en composta con la mezcla de agua acuícola con agua potable. Para los frutos se muestra una mayor acumulación en agua acuícola con mezcla de sustrato composta con tezontle. Y finalmente para las raíces se muestra una mayor acumulación en composta con riego de agua potable.

**A.**



**B.**

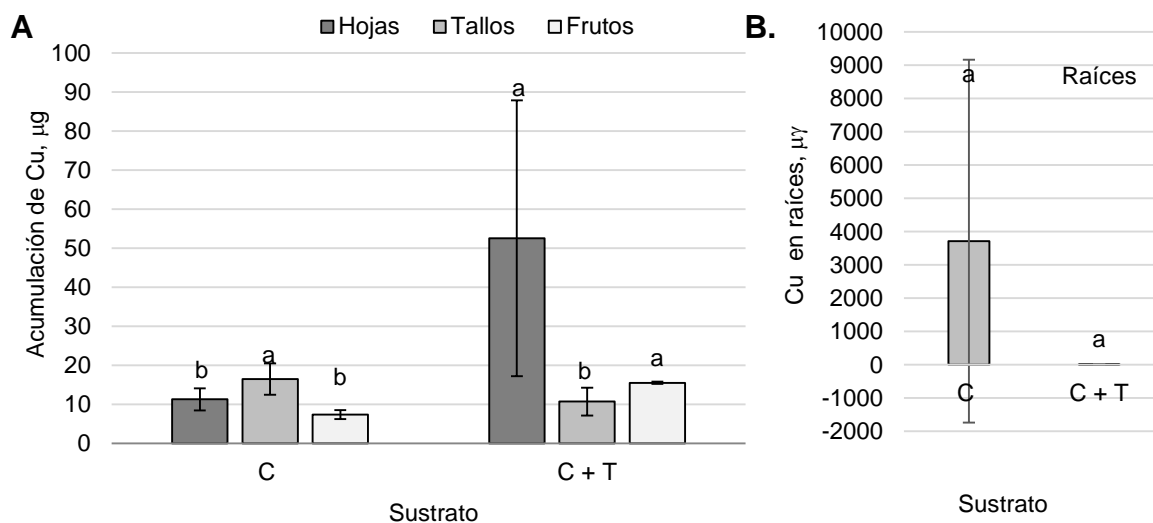


**Figura I. 81** Acumulación de Fe en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.



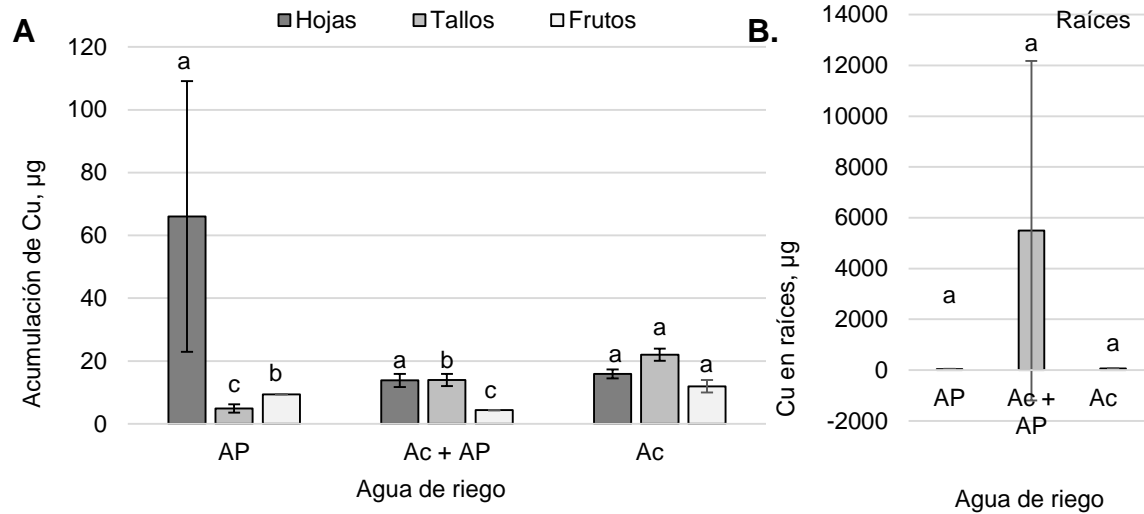
## Acumulación de Cu

En la **Figura I.82** se muestra la relación que hay entre la acumulación de Cu de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se observa diferencia estadística significativa. En hojas y frutos se presenta una mayor acumulación en la mezcla de composta con tezontle. Los tallos por otra parte presentan una mayor acumulación en sustrato composta. Las raíces no muestran una diferencia estadística significativa. (Las desviaciones estándar que se muestran son debido a la fluctuación en los datos obtenidos en las mediciones de campo).



**Figura I. 82** Acumulación de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

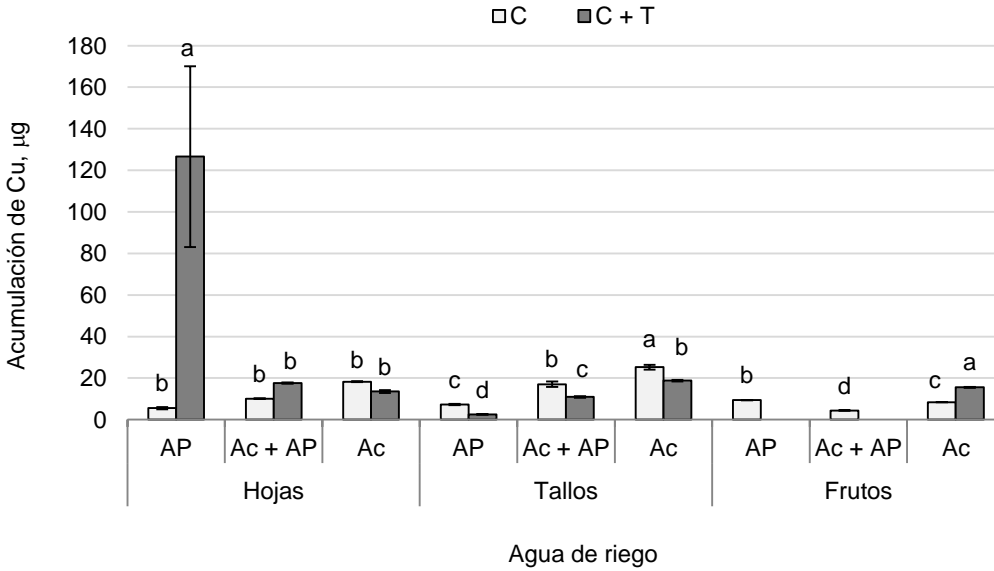
La **Figura I.83 (A y B)** muestra la acumulación de Cu de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en las variables estudiadas, los tallos y frutos muestran una mayor acumulación con agua acuícola. Las hojas y raíces no muestran una diferencia estadística significativa.



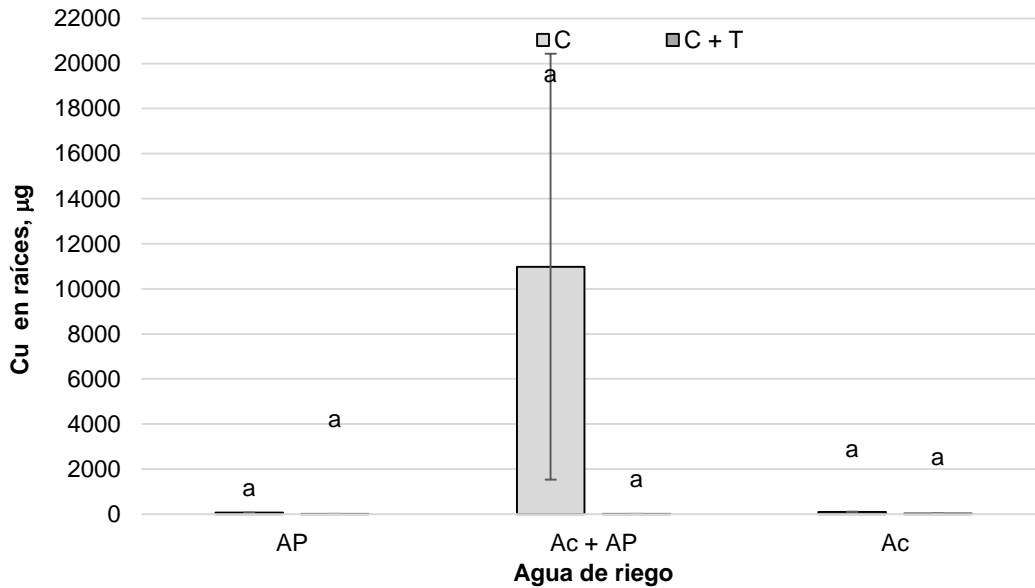
**Figura I. 83** Acumulación de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.84 (Ay B)** es posible observar la acumulación de Cu en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En donde se muestran diferencias estadísticas significativas. En hojas se observa una mayor acumulación de Cu en la mezcla de composta con tezontle con el riego de agua potable. Para tallos, la mayor acumulación se puede observar en el riego con agua acuícola con composta. Para los frutos se muestra una mayor acumulación en la mezcla sustrato composta con tezontle y con el riego con agua acuícola. Y finalmente para las raíces no muestran diferencia estadística significativa.

**A.**



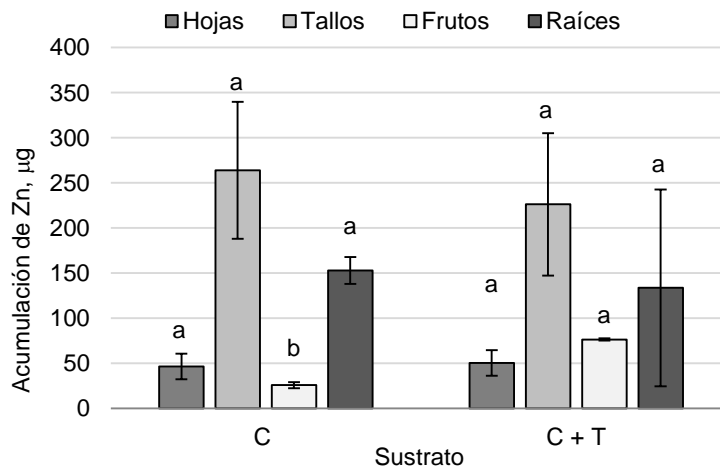
**B.**



**Figura I. 84** Acumulación de Cu en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. (A) hojas, tallos y frutos (B) raíces. Medias  $\pm$  DE en cada sub figura y órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

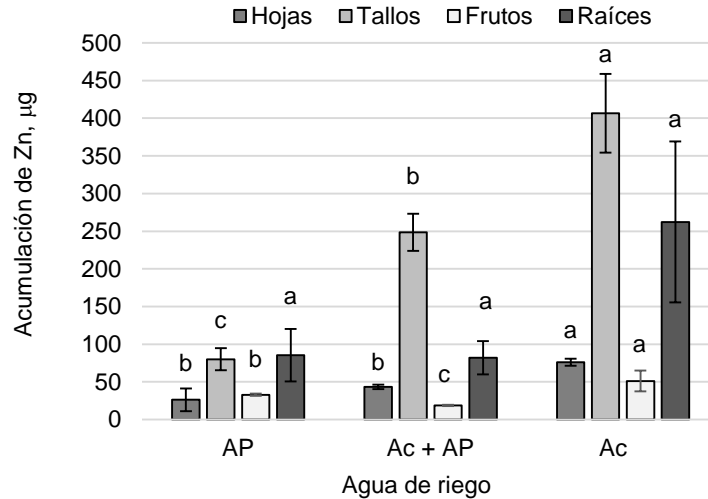
## Acumulación de Zn

En la **Figura I.85** es posible observar la relación que hay entre la acumulación de Zn de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa solo en frutos habiendo una mayor acumulación de Zn en la mezcla de composta con tezontle. En hojas, tallos y raíces no se muestra una diferencia estadística significativa.



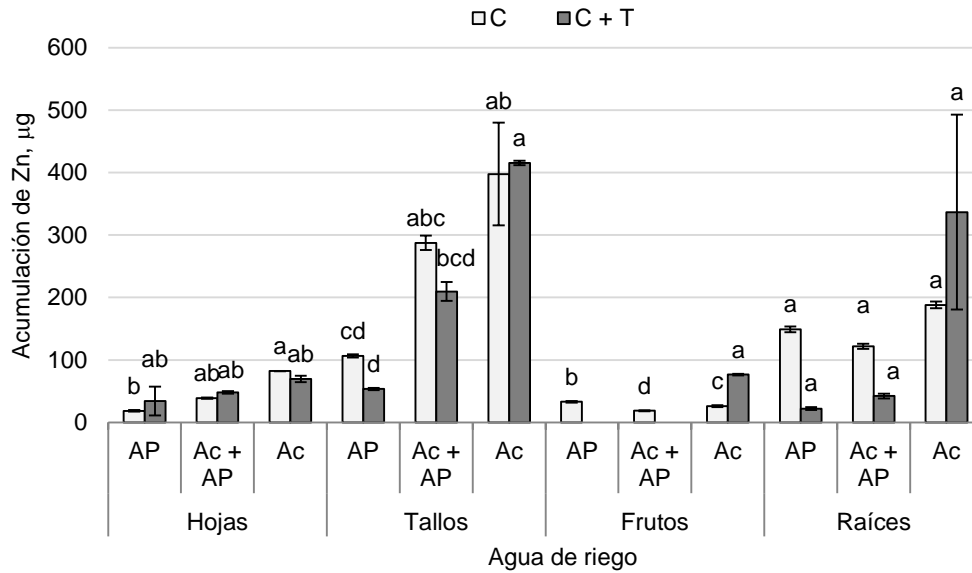
**Figura I. 85** Acumulación de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

En la **Figura I.86** se muestra la acumulación de Zn de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en las variables estudiadas. En hojas, tallos y frutos se muestra una mayor acumulación con el riego en agua acuícola. En raíces no se observa diferencia estadística significativa.



**Figura I. 86** Acumulación de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

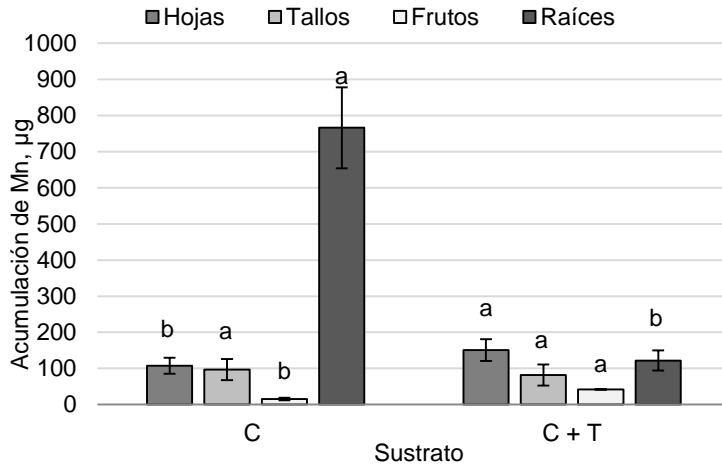
En la **Figura I.87** es posible observar la acumulación de Zn en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En la cual se puede observar una diferencia estadística significativa. En hojas se observa una mayor acumulación de Zn en composta con el riego agua acuícola. Para tallos, la mayor acumulación se puede observar en el riego con agua acuícola en la mezcla de composta con tezontle. Para los frutos se muestra una mayor acumulación en la mezcla de agua acuícola con agua acuícola en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Y finalmente para las raíces no se muestra diferencia estadística significativa.



**Figura I. 87** Acumulación de Zn en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

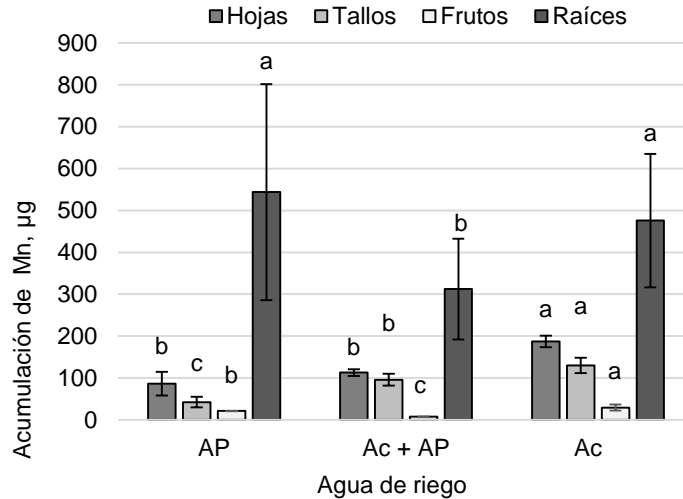
### Acumulación de Mn

La **Figura I.88** muestra la relación que hay entre la acumulación de Mn de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En hojas y frutos se presenta una mayor acumulación en la mezcla de composta con tezontle. Las raíces presentan una mayor acumulación en el sustrato composta. Los tallos no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 88** Acumulación de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

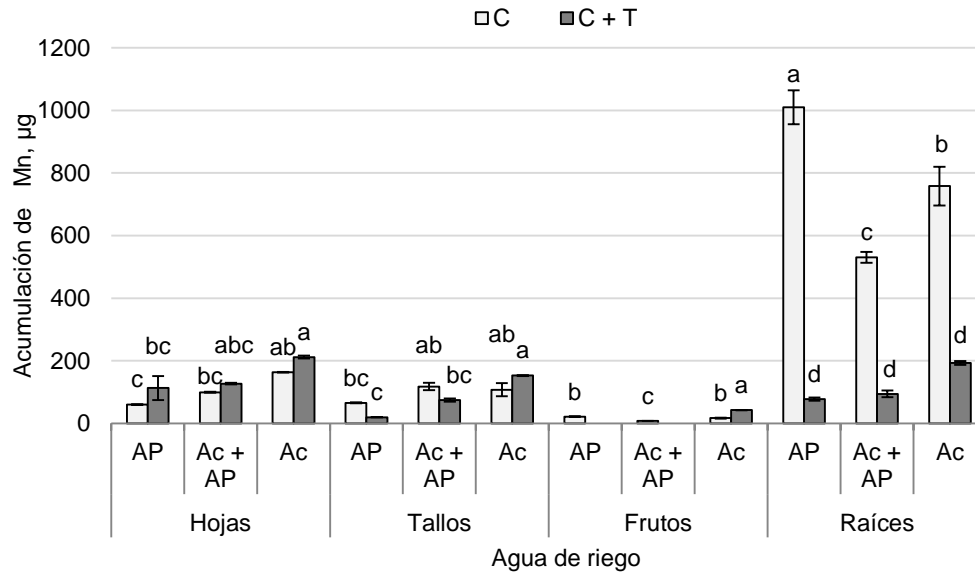
La **Figura I.89** muestra la acumulación de Mn de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en todas las variables estudiadas, las hojas y tallos y frutos muestran una mayor acumulación con agua potable. Las raíces presentan una mayor acumulación en el riego con agua acuícola; así como también en el riego con agua potable.



**Figura I. 89** Acumulación de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP: agua potable; Ac: agua acuícola.

En la **Figura I.90** es posible observar la acumulación de Mn en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En la cual se observa la diferencia estadística significativa. En hojas se observa una mayor acumulación de Mn en la mezcla de composta con tezontle y con el riego agua acuícola. Para tallos, la mayor acumulación se puede observar en el riego con agua acuícola y como sustrato la mezcla de composta con tezontle. Para los frutos se muestra una mayor acumulación en el riego de agua acuícola y como sustrato la mezcla de composta con tezontle. Y finalmente para las raíces se muestra una mayor acumulación en el riego con agua potable y con sustrato composta.

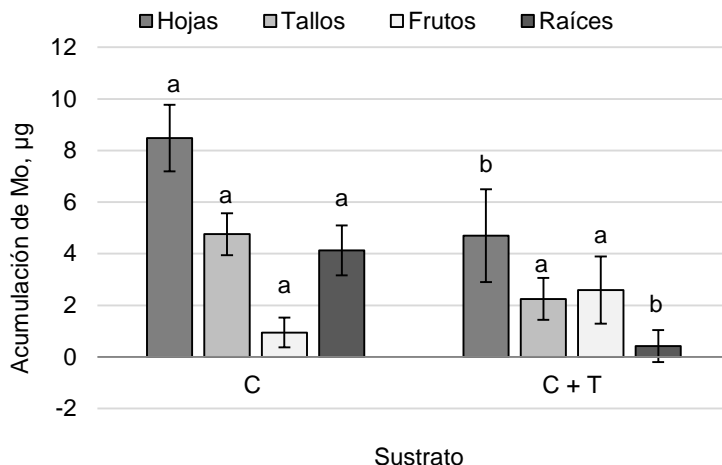




**Figura I. 90** Acumulación de Mn en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

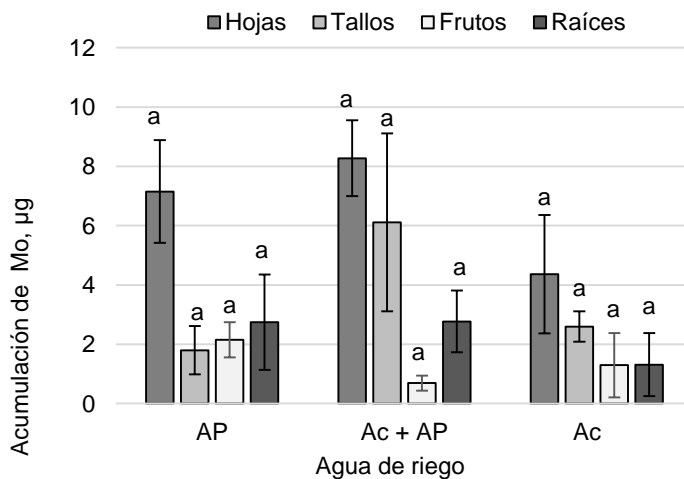
### Acumulación de Mo

En la **Figura I.91** se muestra la relación que hay entre la acumulación de Mo de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En hojas y raíces se presenta una mayor acumulación en composta. Los frutos y tallos no muestran una diferencia estadística significativa.



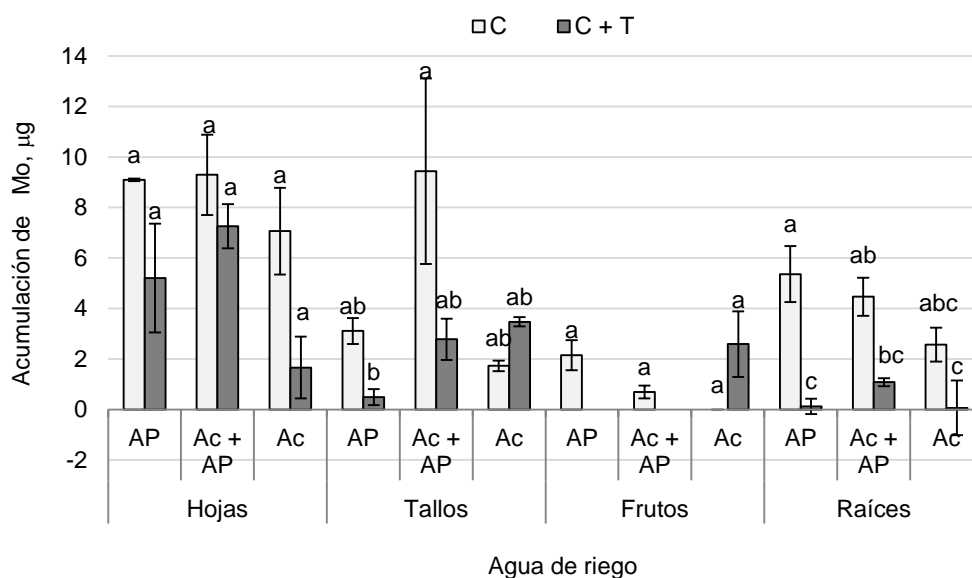
**Figura I. 91** Acumulación de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La **Figura I.92** muestra la acumulación de Mo de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse que no hay diferencias significativas en ninguna de las variables evaluadas.



**Figura I. 92** Acumulación de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

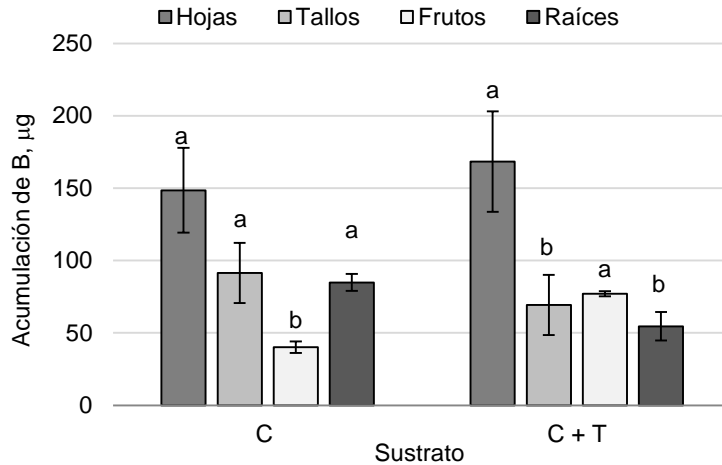
En la **Figura I.93** es posible observar la acumulación de Mo en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego en donde se muestran diferencias estadísticas significativas. Para tallos, la mayor acumulación se puede observar en la mezcla de riego de agua acuícola con agua potable en sustrato composta. Para las raíces se muestra una mayor acumulación en el riego agua potable y sustrato composta. Las hojas y frutos no muestran ninguna diferencia estadística significativa.



**Figura I. 93** Acumulación de Mo en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias ± DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

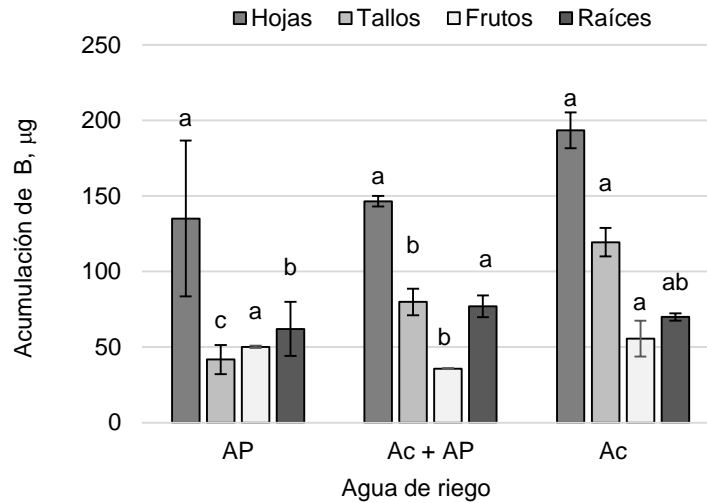
### Acumulación de B

La **Figura I.94** muestra la relación que hay entre la acumulación de B de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En tallos y raíces se presenta una mayor acumulación en composta. Los frutos presentan una mayor acumulación en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



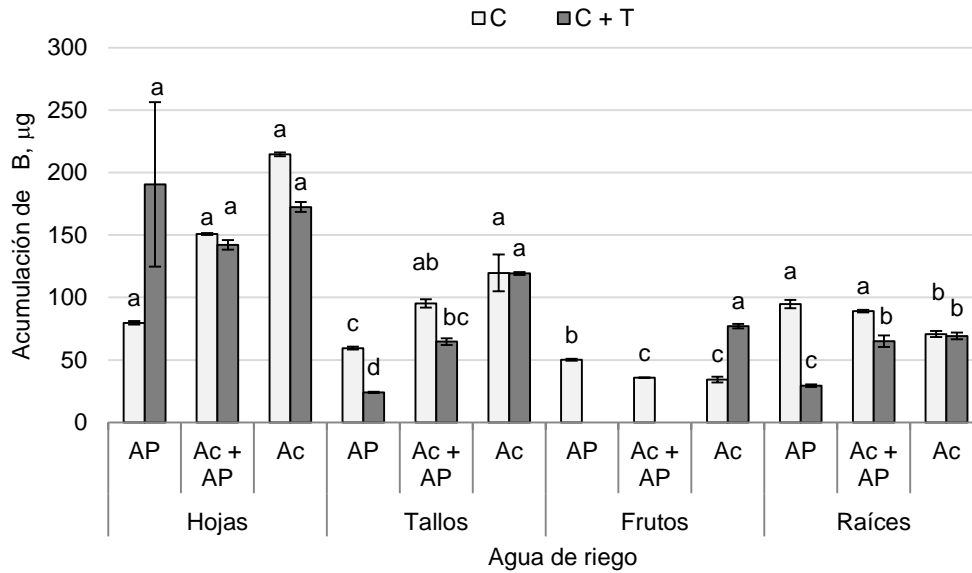
**Figura I. 94** Acumulación de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La **Figura I.95** muestra la acumulación de B de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en las variables evaluadas. Los tallos muestran una mayor acumulación con agua acuícola. Los frutos presentan una mayor acumulación en agua de riego acuícola y así mismo en agua potable. Las raíces muestran la mayor acumulación en la mezcla de agua acuícola con agua potable. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 95** Acumulación de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP: agua potable; Ac: agua acuícola.

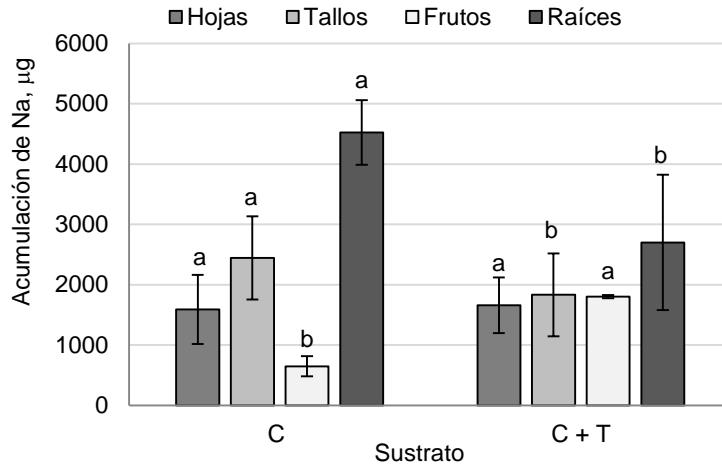
En la **Figura I.96** es posible observar la acumulación de B en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego en donde se muestra la diferencia estadística significativa. Para tallos, para ambos sustratos evaluados, la mayor acumulación se puede observar en el riego con agua acuícola. Para los frutos se muestra una mayor acumulación en la mezcla de composta con tezontle en el riego acuícola. Y finalmente para las raíces se muestra una mayor acumulación en el riego con la mezcla de agua acuícola con agua potable y así mismo en el riego con agua potable, ambos tipos de riego con composta como sustrato. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



**Figura I. 96** Acumulación de B en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

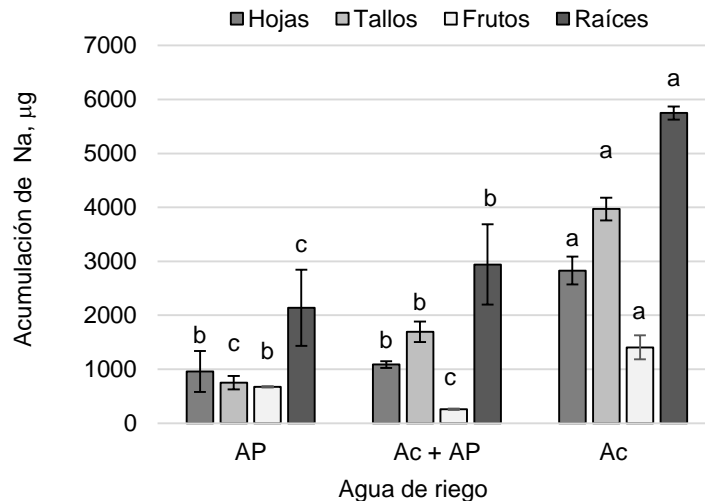
### Acumulación de Na

En la **Figura I.97** se muestra la relación que hay entre la acumulación de Na de acuerdo al sustrato utilizado en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde se muestran una diferencia estadística significativa. En raíces y tallos se presenta una mayor acumulación en composta. Los frutos presentan una mayor acumulación en la mezcla de sustrato composta con tezontle. Las hojas no muestran una diferencia estadística significativa.



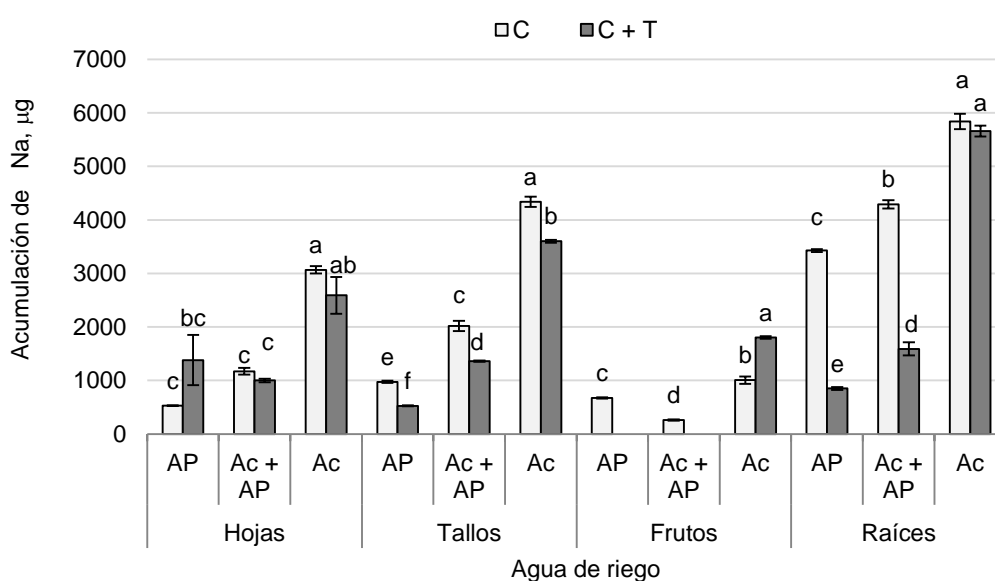
**Figura I. 97** Acumulación de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al sustrato utilizado. Medias ± DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle.

La **Figura I.98** muestra la acumulación de Na de acuerdo al tipo de agua de riego utilizada en las plantas de tomate en un sistema acuapónico abierto, en donde puede observarse una diferencia significativa en las variables estudiadas, todos los órganos muestran una mayor acumulación en el riego con agua acuícola.



**Figura I. 98** Acumulación de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico en función al agua de riego. Medias ± DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). AP= agua potable; Ac= agua acuícola.

En la **Figura I.99** es posible observar la acumulación de Na en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. En hojas y tallos se observa una mayor acumulación de Na en la composta con el riego agua acuícola. Para los frutos se muestra una mayor acumulación en la mezcla de sustratos composta y tezontle con el riego agua acuícola. Y finalmente para las raíces se muestra una mayor acumulación en el riego con agua acuícola con composta sustrato seguida del mismo tipo de riego pero con el otro sustrato evaluado (mezcla de composta con tezontle).



**Figura I. 99** Acumulación de Na en plantas de tomate en un sistema acuapónico; en función a la interacción entre el sustrato utilizado y agua de riego. Medias  $\pm$  DE en cada órgano con letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). C= composta; T= tezontle; AP= agua potable; Ac= agua acuícola.



### I.5.5. Caracterización química de los alimentos para la tilapia

En esta investigación se emplearon tres alimentos para las tilapias en función de la etapa de crecimiento. En la etapa 1 se utilizó el alimento recomendado para peces de entre 5 y 30 g de peso. En la etapa 2, el alimento es para peces con 31 a 60 g. En la etapa tres el alimento usado es recomendado para peces entre 61 y 150 g (**Cuadro I.2**).

En el **Cuadro I.24** se presentan los resultados de las concentraciones de nutrimentos. Es particularmente importante observar la disminución de la concentración de N, Ca, S, Cu, Mn, Zn y Na en el alimento para la etapa 3; por el contrario, se incrementa de manera importante la concentración de K.

**Cuadro I. 24** Caracterización química de alimentos suministrados a las tilapias a lo largo de la experimentación.

| Etapa | N                   | P        | K       | Ca                  | Mg      | S       |
|-------|---------------------|----------|---------|---------------------|---------|---------|
|       | %                   |          |         | mg kg <sup>-1</sup> |         |         |
| 1     | 7.36                | 17195.83 | 2674.28 | 94492.15            | 4265.36 | 6062.22 |
| 2     | 7.67                | 10744.62 | 2469.28 | 17046.26            | 2054.16 | 7478.57 |
| 3     | 5.08                | 1638.38  | 7344.09 | 1351.44             | 2666.59 | 1533.13 |
|       | B                   | Fe       | Cu      | Mn                  | Zn      | Na      |
|       | mg kg <sup>-1</sup> |          |         |                     |         |         |
| 1     | 4.68                | 460.29   | 17.68   | 52.56               | 258.88  | 3356.63 |
| 2     | 10.13               | 455.86   | 19.47   | 46.51               | 221.07  | 2723.11 |
| 3     | 5.75                | 515.26   | 13.53   | 25.77               | 3.19    | 188.13  |

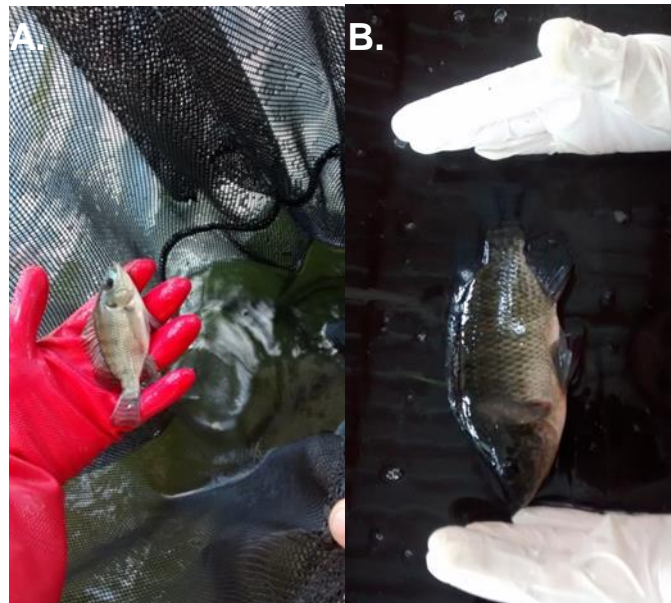
### I.5.6 Análisis de biometría de tilapias

Al término del experimento fue posible producir 146 tilapias mismas que estaban ubicadas en el estanque de cemento (**Figura I.100**). Las cuales alcanzaron un promedio de peso de 141.27 g.



**Figura I. 100** Cultivo de tilapia en estanque de cemento.

Se pudo observar que el crecimiento de las tilapias fue bueno, dado que éstas tenían una buena apariencia al final del ciclo de producción (**Figura 101 B**). Las medidas promedio de las tilapias al final del estudio fueron de largo 18.97 cm, de alto 7.03 cm y 3.30 cm de ancho.



**Figura I. 101** Aspecto de las tilapias de 30 (A) y 85 (B) días de edad.

## **I.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Uno de los principios en la acuaponía es la reutilización del agua. Al mismo tiempo las raíces son utilizadas como biofiltros para poder usar el agua nuevamente en los animales acuáticos y de esta forma la integración del sistema está completa. Estos sistemas de producción surgen de la necesidad de solucionar problemas de suministro de alimentos de una forma más acorde con los sistemas naturales. Dentro del sistema acuapónico los desechos sirven como fertilizante líquido para el crecimiento de las plantas. De esta manera el agua puede ser recirculada y los nutrimentos aprovechados al máximo. Si no son removidos esos residuos pueden alcanzar niveles tóxicos para los animales acuáticos, causando una mortalidad en estos y en los cultivos. Las ventajas que presenta un sistema cerrado respecto al abierto: es principalmente ahorro de agua y fertilizantes, impacto ambiental menor.

Los resultados de este trabajo permiten concluir que el mayor crecimiento de las plantas de tomate se tuvo en composta, regadas con el agua proveniente del cultivo de peces; por lo que esta agua funciona como un complemento a la nutrición de las plantas. Así también este trabajo permite confirmar la viabilidad de establecer sistemas acuapónicos en pequeña escala y a bajo costo que hacen posible un uso más eficiente de los insumos y una reducción de los impactos negativos de la acuicultura en el ambiente. Se recomienda evaluar este tipo de sistema con especies vegetales menos demandantes en nutrimentos que el tomate, considerando aspectos de inocuidad en los productos a obtener.

La materia orgánica aparte de ser el medio de sostén de la planta, se utiliza para aumentar la retención de agua del suelo, para mejorar la estructura y actividad microbiológica. En sustratos, los valores oscilan de 5.2 a 6.3 .y varía según el cultivar; para el cultivo de tomate los valores de pH ideal (del suelo) oscilan de 6.0 a 6.5, un sustrato con pH mayor a 6.5 tiene menos disponible para su absorción los siguientes elementos: hierro, zinc manganeso y cobre Y a pH menor a 5.5 el fosforo y molibdeno son menos disponibles En los tres sustratos usados, el pH inicial es clasificado como

alcalino , lo que se traduce en baja disponibilidad para las plantas, en específico de micronutrientes.

El pH del agua del cultivo de tilapia, del agua potable y de la combinación de la acuícola y potable tuvieron rangos mayores a 7 llegando a 8.95, fue posible observar que al mismo tiempo que las tilapias iban creciendo, los rangos de pH iban en aumento; siendo las de mayor rango el agua acuícola. Los rangos óptimos para su disponibilidad nutrimental oscilan entre 5.5 y 6; los resultados obtenidos fueron todos por arriba del pH ideal, por lo cual precisan una acidificación para la producción de cultivos vegetales.

La conductividad eléctrica óptima para cultivos hidropónicos va de 1.5 a 2.5 dS m<sup>-1</sup>; siendo que las mostradas en las muestras de agua todas oscilaron entre un rango de 0.135 a 0.470 dS m<sup>-1</sup> por lo cual no significaría problema para su producción. Sin embargo es viable realizar adición de nutrientes necesarios según la especie vegetal a utilizar en la conformación del sistema acuapónico.

Por otra parte se pudo observar que al estar al aire abierto, tuvo una mayor incidencia de plagas. El control biológico es una herramienta esencial para el éxito de las operaciones de acuaponía. En este experimento no se tuvo ningún control biológico, sin embargo para procedimientos posteriores es recomendable utilizar control biológico y para mantener las condiciones controladas se recomienda el uso de invernadero.

## I.7 LITERATURA CITADA

- Abad M, Martínez-Herrero MD, Martínez-García PF, Martínez-Corts J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 11: 141-154.
- Alcántar, G. G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. 156 p. Publicación Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C., Chapingo, México.
- Argo WR. 1998. Root medium chemical properties. *HortTechnology* 8: 486-494.
- Brito L. M., Mourão I. 2012. Characterizing different horticultural substrates and growth containers. *Agrotec* 2-3: 32-38, 64-69.
- Bugbee, B. 2003. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. En línea: [http://cpl.usu.edu/files/publications/publication/pub\\_9984184.pdf](http://cpl.usu.edu/files/publications/publication/pub_9984184.pdf).
- Buzby KM, Lian-Shin L. 2014. Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacultural Engineering* 63: 39–44
- Galindo-Reyes MA, González-Hernández VA, López-Jiménez A, Sánchez-García P, Soto-Hernández RM, Muratalla-Lúa A. 2011. Concentración y acumulación de N, P y K en frambuesa roja (*Rubus idaeus* L.) manejada a dos cosechas anuales. *Terra Latinoamericana* 29(2): 143-151
- Ghorbani R, Koocheki A, Jahan M, Asadi GA. 2008. Impact of organic amendments and compost extracts on tomato production and storability in agroecological systems. *Agron. Sustain. Dev.* 28: 307-311.
- Gómez-Merino FC, Ortega-López NE, Trejo-Téllez LI, Sánchez-Páez R, Salazar-Marcial E, Salazar-Ortiz J. 2015. La acuaponía: Alternativa sustentable y potencial para producción de alimentos en México. *Agroproductividad* 8(8): 60-65.
- INAFED, 2010. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM30veracruz/index.html>
- Jones B Jr J 2014 Complete guide for growing plants hydroponically. CRC Press. 223 p.

- Noguera P, Abad M, Puchades R, Maquieira A, Noguera V. 2003. Influence of Particle Size on Physical and Chemical Properties of Coconut Coir Dust as Container Medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34: 593-605.
- NUTRIPEC PURINA. 2015. Disponible en :<http://www.nutrimentospurina.com/linea-acuacultura>
- PIC TILAPIA 2012. (Proyecto Integral de Capacitación). Criterios Técnicos y económicos para la producción sustentable de Tilapia en México. Comité sistema producto Tilapia de México A.C. Disponible en <http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/work/sites/cona/dgof/publicaciones/CriteriosTecnicosEconomicosTilapiaEnMexico.pdf>
- Rodríguez-González, H. Rubio-Cabrera, SG. García-Ulloa, M. Montoya-Mejía M. Magallón-Barajas FJ. 2015. ANÁLISIS TÉCNICO DE LA PRODUCCIÓN DE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) Y LECHUGA (*Lactuca sativa*) EN DOS SISTEMAS DE ACUAPONÍA. *Agroproductividad*. 8(3):15-19.
- Ronzón-Ortega M, Hernández-Vergara MP, Pérez-Rostro CI. 2012. Hydroponic and aquaponic production of sweet basil (*Ocimum basilicum*) and giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15: S63-S71.
- Sánchez-del-Castillo F, González-Molina L, Moreno-Pérez EC, Pineda-Pineda J, Reyes-González CE. 2014. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 37 (3): 261 - 269
- Soil First Consulting. 2016. Irrigation Water Guidelines. Disponible en línea en: [file:///C:/Users/HP/Downloads/Irrigation %20Water Guidelines.pdf](file:///C:/Users/HP/Downloads/Irrigation%20Water%20Guidelines.pdf). Consultado: febrero 6, 2016.
- Sonneveld, C., Voogt, W. 2009. *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, Springer, ISBN 9048125316, New York, U. S. A
- Steiner,A.A. (1984) The universal nutrient solution. In: *Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture*. ISOSC. Wageningen. The Netherlands. 633-650 pp
- Toledo-Pérez, S.J. y M. C. García-Capote. 2000. Nutrición y alimentación de tilapia cultivada en América Latina y el Caribe. pp 83-137 En: Civera-Cerecedo, R., Pérez-Estrada, C.J., Ricque-Marie, D. y Cruz-Suárez, L.E. (Eds.) *Avances en*

- Nutrición Acuícola IV. Memorias del IV Simposium Internacional de Nutrición Acuícola. Noviembre 15-18, 1998. La Paz, B.C.S., México.
- Tjalling Holwerda Harmen. 2006. CropKit Guía de Manejo Nutrición Vegetal de Especialidad Tomate. Disponible en línea en [http://www.sqm.com/Portals/0/pdf/cropKits/SQM-Crop\\_Kit\\_Tomato\\_L-ES.pdf](http://www.sqm.com/Portals/0/pdf/cropKits/SQM-Crop_Kit_Tomato_L-ES.pdf) consultado el 29 de enero 2015.
- Trejo-Téllez, L.I., Gómez-Merino, F. C. 2012. Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. *In: Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. Asao, T. (ed.). InTech. pp. 1-22.
- Trejo-Téllez LI, Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC, García-Albarado JC, Baca-Castillo GA, Tejeda-Sartorius O. 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5:863-876.