



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

Comparación productiva entre sistemas acuapónicos e hidropónicos a partir de la combinación de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) y acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*)

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias

DANILO IGNACIO ARELLANO GONZÁLEZ

Director de Tesis
Víctor Escalona Contreras
Jurij Wacyk

Profesores consejeros
Héctor Uribe
Luis Luchsinger

SANTIAGO - CHILE
2020

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

Comparación productiva entre sistemas acuapónicos e hidropónicos a partir de la combinación de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) y acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*)

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias.

DANILO IGNACIO ARELLANO GONZÁLEZ

Calificaciones	Calificaciones
(Memoria de Título)	(Tesis de Grado)

DIRECTOR DE TESIS/AFE

Víctor H. Escalona
Ingeniero Agrónomo, Dr.

Jurij Wacyk
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

PROFESORES CONSEJEROS

Héctor Uribe
Médico Veterinario, Ph.D.

Luis Luchsinger
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Santiago, Chile
2020

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

En primer lugar, agradecer a mi familia, Alexandra González, Dagoberto Arellano y Rodrigo Arellano, por darme cariño, amor, atención y consejos durante toda mi vida. Ellos fueron quienes inspiraron mi gusto por la ciencia y los que me acompañaron durante los mejores y peores momentos de este trabajo.

A mis amigos, Carlos Araneda, Gabriel Zepeda, Jonathan Duarte, Sebastián Gallardo, Liza Sepúlveda, Francisca Narr, Bárbara Chepillo, Javier Altair, Camilo Toro, Renato Díaz y Carlos Ojeda quienes de una u otra forma me acompañaron durante todo mi periodo universitario, compartiendo interesantes conversaciones de política, ciencias y caluines junto a deliciosas inflorescencias y brebajes.

A mis compañeros y amigos del laboratorio, Mónica Flores, Alfonso González, Walter Valdebenito, Elizabeth González, María Luisa Tapia y Benjamín Battistoni de quienes aprendí más cosas prácticas de las que aprendí en todas las clases universitarias.

Por último, a mis queridos profesores guía, Víctor Escalona y Jurij Wacyk, quienes tuvieron la preocupación de formarme como profesional y persona, junto con motivarme a siempre sacar lo mejor de mí.

“Lo importante no es mantenerse vivo sino mantenerse humano”

(George Orwell)

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
Sistemas acuapónicos.....	2
Condiciones ambientales	2
Dinámica de nutrientes	3
Relación entre componentes del sistema productivo acuapónico	4
Descripción del sistema	5
Aplicabilidad en Chile	5
Calidad funcional en hortalizas.....	6
Calidad microbiológica en hortalizas	7
CAPÍTULO II: CULTIVO DE ACELGA BABY LEAF EN SISTEMA ACUAPÓNICO INTEGRADO CON EL CULTIVO DE TRUCHA ARCOÍRIS.....	8
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
HIPÓTESIS	12
OBJETIVOS.....	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
1.1 Materiales	13
1.1.1 Ubicación del ensayo	13
1.1.2 Material biológico	13
1.1.3 Tratamiento y diseño experimental	13
1.1.4 Manejo del experimento	17
1.1.4.1 Activación del biofiltro para tratamientos Ap y RAS.....	17
1.1.4.2 Sistema acuapónico.....	19
1.1.4.3 Sistema de recirculación acuícola (RAS).....	19
1.1.4.4 Sistema hidropónico.....	19
1.2 Métodos	20
1.2.1 Mediciones en el medio de cultivo	20
1.2.2 Cultivo de trucha arcoíris.....	20
1.2.3 Cultivo de acelga	21
1.4 Análisis estadístico	24
RESULTADOS	26
2.1 Mediciones en el medio de cultivo	26
2.2 Cultivo de trucha arcoíris.....	29
2.3 Cultivo de acelga.....	30

DISCUSIÓN.....	36
CONCLUSIONES PRIMER ENSAYO	43
CAPÍTULO III. CULTIVO DE ACELGAS CON COSECHAS ESCALONADAS EN SISTEMA ACUAPÓNICO INTEGRADO CON EL CULTIVO DE TRUCHA ARCOIRIS	44
RESUMEN.....	44
ABSTRACT	45
INTRODUCCIÓN	46
HIPÓTESIS	47
OBJETIVOS.....	47
MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1 Materiales	48
3.1.1 Ubicación del ensayo	48
3.1.2 Material biológico	48
3.1.4 Manejo del experimento	49
3.2 Métodos	51
3.2.1 Mediciones en el medio de cultivo	51
3.2.2 Cultivo de trucha arcoíris.....	51
3.2.3 Cultivo de acelga	51
3.3 Análisis estadístico	54
RESULTADOS	56
4.1 Mediciones en medio de cultivo.....	56
4.2 Cultivo de truchas arcoíris	59
4.3 Cultivo de acelga.....	60
DISCUSIÓN.....	68
CONCLUSIONES SEGUNDO ENSAYO	76
LITERATURA CITADA.....	77
APENDÍCE I.....	89
Memoria de cálculos	89
Cálculos relación entre componentes	89
Cálculo de biofiltro	91
APENDICE II.....	93
Información adicional del primer ensayo	93
Información adicional del segundo ensayo	95
ANEXOS.....	100
ANEXO I.....	100
ANEXO II	100

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Comparación de medias en mediciones de pH, conductividad eléctrica, saturación y concentración de oxígeno disuelto y temperatura, medidos en la solución de cada tratamiento durante los 30 días de ensayo.	26
Cuadro 2. Parámetros productivos en trucha arcoíris medidos y calculados en función a la variación registrada al término del periodo experimental (30 días).	30
Cuadro 3. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva de los tratamientos Hp y Ap, y su relación entre tratamientos al término de un periodo de 30 días.	31
Cuadro 4. Parámetros productivos en acelga al término del periodo experimental (30 días).	34
Cuadro 5. Concentración de fenoles totales y capacidad antioxidante según los métodos DPPH y FRAP al término del periodo experimental (30 días).	35
Cuadro 6. Comparación de medias en mediciones de pH, conductividad eléctrica, porcentaje de oxígeno disuelto, concentración de oxígeno y temperatura medidos en la solución de cada tratamiento durante el presente ensayo (60 días).	56
Cuadro 7. Parámetros productivos en trucha arcoíris medidos y calculados en función a la variación presente al término del segundo periodo del ensayo (60 días).	60
Cuadro 8. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva hidropónica y acuapónica al término del ensayo.	61
Cuadro 9. Parámetros productivos en acelga al término del segundo periodo experimental del ensayo.	65
Cuadro 10. Evolución en el incremento de biomasa posterior a cada cosecha en tratamientos Hp y Ap.	66
Cuadro 11. Concentración de fenoles totales y capacidad antioxidante según los métodos DPPH y FRAP al término del ensayo (60 días).	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución aleatorizada del ensayo incluyendo las 12 unidades experimentales utilizadas, correspondientes al tratamiento hidropónico (Hp), acuapónico (Ap) y acuícola (RAS).	14
Figura 2. Dimensiones, subdivisión y circulación de agua en el sistema del tratamiento acuapónico (Ap).	15
Figura 3. Dimensiones, subdivisión y circulación de agua en el sistema del tratamiento hidropónico (Hp).	16
Figura 4. Dimensiones, subdivisión y circulación de agua en el sistema del tratamiento recirculante acuícola (RAS).	17
Figura 5. Mediciones de parámetros en solución. (A) Medición de nitritos con espectrofotómetro portátil. (B) Medición de pH con potenciómetro portátil. (C) Medición de conductividad eléctrica con conductímetro portátil.	18
Figura 6. Presencia de <i>Saprolegnia spp.</i> en truchas durante los primeros días de ensayo.	19
Figura 7. Medición de parámetros productivos en trucha arcoíris. (A) Medición de peso y largo inicial en trucha arcoíris al inicio del ensayo. (B) Largo total trucha arcoíris al inicio del presente ensayo.	20
Figura 8. Fórmulas utilizadas para calcular parámetros productivos en el crecimiento de la trucha arcoíris al término de cada ensayo.	21
Figura 9. Proceso de anestesiado de peces. (A) Medición de la dosis de anestésico. (B) Anestesiado de peces para medición de parámetros productivos. (C) Recuperación de anestesiado en estanque de acondicionamiento.	21
Figura 10. Medición de nutrientes en tejido vegetal y solución nutritiva en tratamientos acuapónico (Ap) e hidropónico (Hp). (A) Espectrómetro de emisión atómica por plasma de microondas. (B) Inyección de estándares para establecer márgenes de medición de macronutrientes.	22
Figura 11. Variación en la conductividad eléctrica (dS m^{-1}) medida periódicamente en la solución de tratamientos acuapónico (Ap), hidropónico (Hp) y recirculante acuícola (RAS) durante un periodo de 30 días.	27
Figura 12. Concentración de nitritos (NO_2^-) y nitrógeno amoniacal total (TAN) (mg L^{-1}) en tratamientos recirculante acuícola (RAS) y acuapónico (Ap) durante un periodo de 30 días.	28
Figura 13. Concentración de nitratos (NO_3^-) (mg L^{-1}) medidos en tratamientos recirculante acuícola (RAS) y acuapónico (Ap) durante un periodo de 30 días.	29

Figura 14. Comparación de la concentración de macronutrientes (% MS) medidos en la sección aérea de plantas de acelgas entre los tratamientos Ap y Hp al término de este ensayo.	32
Figura 15. Concentración de micronutrientes en hojas de acelgas acuapónicas e hidropónicas al término del primer ensayo.	33
Figura 16. Evolución en el crecimiento de acelgas en tratamiento acuapónico (Ap) e hidropónico (Hp) durante el primer ensayo (30 días).	34
Figura 17. Distribución aleatorizada del ensayo incluyendo las 12 unidades experimentales utilizadas, correspondientes al tratamiento hidropónico (Hp), acuapónico (Ap) y acuícola (RAS).	49
Figura 18. Utilización del Software Image J para el aumento de contraste en muestras de acelga con el fin de determinar su área foliar.	52
Figura 19. Fórmula utilizada para la determinación de la tasa de crecimiento relativa (TCR) e incremento porcentual (IP) en el cultivo de acelga.	53
Figura 20. Análisis microbiológico en muestras de tejido vegetal en los tratamientos acuapónico (Ap) e hidropónico (Hp). (A) Preparación de medio agar para recuento en placa de aerobios mesófilos. (B) Cultivo en placa durante 48 h a 37 °C en tratamientos Ap y Hp.	54
Figura 21. Variación en la conductividad eléctrica (dS m^{-1}) medida periódicamente en la solución de los tratamientos Ap, Hp y RAS durante un periodo de 2 meses.	57
Figura 22. Concentración de NO_2^- y TAN en tratamientos RAS y Ap durante el segundo cultivo de acelga.	58
Figura 23. Concentración de NO_3^- en tratamientos RAS y Ap durante el segundo cultivo de acelga.	59
Figura 24. Comparación de la concentración de macronutrientes (% MS) medidos en la sección aérea de plantas de acelgas entre los tratamientos Ap y Hp al término de este ensayo.	62
Figura 25. Concentración de micronutrientes en tejido vegetal de acelgas acuapónicas e hidropónicas al término del segundo ensayo.	63
Figura 26. Sintomatología visual de clorosis intervenal asociado a déficit de Mn en tratamiento acuapónico (Ap) durante segundo ensayo.	63
Figura 27. Evolución en el crecimiento de acelgas en tratamiento acuapónico (Ap) e hidropónico (Hp) durante el segundo ensayo (8 semanas).	64
Figura 28. Evolución de la biomasa de acelgas posterior a las cosechas establecidas para determinar el incremento porcentual en el presente ensayo.	64

Figura 29. Comparación de cada uno de los factores de forma independiente para la variable $g \text{ planta}^{-1}$ durante los ciclos de crecimiento pertenecientes a segundo ensayo (8 semanas). 66

Figura 30. Recuento de aerobios mesófilos (RAM), enterobacterias y hongos y levaduras ($\log \text{ UFC g}^{-1}$) al momento de la cosecha en hojas de acelga cultivadas en los sistemas acuapónico e hidropónico. 67

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

En la actualidad existe una disminución constante en la superficie cultivable per cápita a nivel mundial debido, principalmente, a un incremento en la población, proyectado a 9.700 millones de habitantes al 2050, lo que, sumado a procesos de industrialización y urbanización, generará un aumento en la demanda de alimentos y recursos naturales (Liu *et al.*, 2016). Por tanto, es necesario generar una evolución de la agricultura tradicional, caracterizada por su alto impacto ambiental, con el fin de satisfacer las crecientes necesidades de la población de forma sustentable (Foley *et al.*, 2011).

Como respuesta a esta problemática surgen sistemas alternativos de producción de alimentos, los cuales buscan reducir el impacto ambiental y maximizar rendimientos por unidad de superficie, junto con disminuir el uso de recursos naturales (Saha *et al.*, 2016). Por un lado, la hidroponía recirculante surge como un método de producción agrícola sin el uso de suelo, el cual es reemplazado por un medio inerte de cultivo que provee a la planta de soporte y humedad siendo éste una alternativa en áreas donde no existe suelo disponible para la agricultura. En este sistema los nutrientes necesarios se suministran disueltos en agua formando una solución nutritiva compuesta de una mezcla de sales minerales (Diver, 2010). Dicha solución recircula constantemente en la zona radical, manteniendo una disponibilidad máxima de agua para las plantas y disminuyendo las pérdidas de este recurso en el sistema (Resh, 2012).

La acuicultura, por su parte, se entiende como un sistema de producción para la cría y engorde de organismos acuáticos tales como peces, moluscos, crustáceos y plantas (FAO, 2003). Esta cría implica el cultivo de diversas especies en condiciones controladas con el fin de disminuir la presión de las poblaciones en el medioambiente, generando productos seguros y saludables para el consumo humano. En sistemas acuícolas se considera que solo un 30 % del nitrógeno entregado en forma de alimento será cosechado posteriormente como biomasa animal, mientras que un 70 % será devuelto al medio como amoniaco (NH_3) y amonio (NH_4^+), compuestos que en su conjunto se consideran como nitrógeno amoniaco total (TAN) (Goddek *et al.*, 2019a). Lo anterior genera problemas en el manejo de los efluentes residuales aumentando, por ejemplo procesos de eutrofización (Zhang *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2015). Existen distintos métodos de producción acuícola, siendo el sistema de acuicultura recirculante (RAS) una de las tecnologías de cultivo que mayor interés ha adquirido últimamente (Badiola *et al.*, 2012). Este sistema es utilizado en áreas donde la disponibilidad de agua es limitada, ya que incorpora un biofiltro que permite la reutilización constante de este recurso (Somerville *et al.*, 2014).

Tanto los sistemas hidropónicos recirculantes como en los RAS, en comparación a los sistemas abiertos, permiten manejar de forma distinta el uso de los recursos, pudiendo establecer un balance más acabado entre las entradas al sistema y los desechos producidos por el mismo. En base a lo anterior, resulta interesante el poder establecer un vínculo entre los desechos y entradas de distintos sistemas productivos con el fin de establecer alternativas productivas más eficientes y con menor impacto medioambiental, en vías a una economía circular.

Sistemas acuapónicos

La acuaponía, se define como un sistema de producción integrada de alimentos que combina acuicultura de tecnología RAS con hidroponía en un único flujo recirculante de agua. En este sistema, los desechos metabólicos generados por los peces y los restos de su alimentación son utilizados por las plantas las cuales los absorben para transformarlos en materia orgánica vegetal (Timmons *et al.*, 2002; Diver, 2010; Somerville *et al.*, 2014).

La principal entrada de nutrientes en el sistema acuapónico corresponde al alimento entregado a los peces, el cual se dividirá en alimento asimilado, alimento no consumido, excreciones sólidas y líquidas, conteniendo TAN el cual, en forma de NH_3 , es altamente tóxico para los peces (Davidson *et al.*, 2014). Es por lo anterior, que la principal transformación química que ocurre en el sistema se conoce como nitrificación, proceso que transforma el TAN generado principalmente desde las excreciones solubles, a nitrato (NO_3^-). Este proceso es llevado a cabo por microorganismos presentes en el sistema, ubicados usualmente en el componente denominado biofiltro. El biofiltro está compuesto por un medio inerte que sirve como área disponible para la adhesión de las bacterias encargadas de la transformación del NH_4^+ a NO_3^- . El grupo de bacterias oxidantes de amonio (AOB) (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosovibrio* sp., entre otros) transforman el amonio a nitrito ($\text{NH}_4^+ + 1,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2 \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$), y el grupo de bacterias oxidantes de nitrito (NOB) (*Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*, *Nitrospina* sp., entre otros) convierten el nitrito a nitrato ($\text{NO}_2^- + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$) (Rakocy *et al.*, 2006; Wongkiew *et al.*, 2017). Adicionalmente, resulta relevante destacar que la alta absorción de NH_4^+ en plantas puede producir toxicidad por su acumulación en el tejido vegetal reduciendo el crecimiento, la tasa fotosintética y la elongación radical (Pan *et al.*, 2016; Arias-Baldrich *et al.*, 2017).

Otro proceso biológico relevante en sistemas acuapónicos corresponde a la mineralización. Este proceso consiste en la descomposición de desechos orgánicos sólidos, tales como proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas y minerales, para transformarlos a nutrientes en formas disponibles para la absorción de plantas. Este proceso es llevado a cabo por bacterias heterótrofas, caracterizadas por *Alphaproteobacterias* y *Gammaproteobacterias*, las que utilizan el carbono como fuente de alimentación. Dicha conversión ocurre en condiciones aeróbicas al igual que para las bacterias nitrificantes (Somerville *et al.*, 2014; Goddek *et al.*, 2019a). Además, cabe mencionar que los microorganismos que se encargan de la mineralización son antagonistas a los patógenos de las raíces, siendo esto beneficioso para las plantas (Rakocy *et al.*, 2006).

En función de lo anterior, la principal ventaja de la acuaponía es que al conectar dos formas de producción permite una utilización más eficiente de recursos tales como agua y nutrientes para producir alimentos de origen vegetal y animal, de una forma altamente sustentable, lo cual cobra aún más relevancia considerando los escenarios de cambio climático y escasez de recursos de la agricultura del futuro (Somerville *et al.*, 2014; Saha *et al.*, 2016).

Condiciones ambientales

Una de las primeras consideraciones para permitir el correcto funcionamiento de un sistema acuapónico es mantener control de las características fisicoquímicas del agua, manteniendo un equilibrio que permita el crecimiento eficiente del componente vegetal y animal, sin embargo, cada organismo presenta valores óptimos que le son propios en los cuales su crecimiento es

mayor, por lo tanto, resulta difícil entregar un único valor óptimo para todo el sistema (Tyson *et al.*, 2004; Rakocy *et al.*, 2006; Somerville *et al.*, 2014; Wortman, 2015). Los principales parámetros de interés con respecto a la calidad de agua corresponden a pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y temperatura (Goddek *et al.*, 2019a).

Debido a la problemática anterior es que existen ciertos acuerdos de rangos óptimos de funcionamiento para sistemas acuapónicos como la concentración de oxígeno disuelto (D.O.) debe variar entre 4 a 8 mg L⁻¹, pues valores inferiores generarán mortalidad en peces, nitrificación deficiente y problemas en la absorción de nutrientes (Timmons *et al.*, 2002; Rakocy *et al.*, 2006; Somerville *et al.*, 2014). El rango óptimo de temperatura fluctúa entre 15 a 30 °C, lo cual afectará de distinta forma al componente acuícola según la especie utilizada. Por ejemplo, para trucha arcoíris el rango óptimo de temperatura es entre 13 a 18°C (FAO, 2014), mientras que para el cultivo de tilapia el rango óptimo es de 28 a 32°C (Somerville *et al.*, 2014). Con respecto a las plantas, los valores de temperatura inferiores a 18 °C aumentarán el tiempo necesario para el desarrollo de las especies cultivadas y disminuirán su absorción de nutrientes afectando también la tasa de nitrificación (Somerville *et al.*, 2014). En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), normalmente en sistemas hidropónicos se trabaja con valores entre 2 a 3,5 dS m⁻¹ dependiendo de la especie cultivada. Sin embargo en sistemas acuapónicos se alcanzan valores entre 1,0 a 1,5 dS m⁻¹ debido a que, a diferencia de la hidroponía convencional, existen una entrega diaria y constante de nutrientes al sistema. Es por esto que la obtención de altos valores de CE en sistemas acuapónicos se atribuye principalmente a altas concentraciones propias del agua utilizada. Si bien este parámetro no es de gran importancia acuícola, valores superiores a este rango pueden producir toxicidad, estrés osmótico o puede ser indicador de desbalances nutricionales en las plantas (Lennard y Leonard, 2006; Rakocy *et al.*, 2006; Pantanella *et al.*, 2012). Por último, para el pH se define un rango óptimo entre 6,0 a 7,5, mientras que los valores de pH fuera de este rango producirán variaciones en la disponibilidad química de los nutrientes produciendo toxicidad en peces, déficit o excesos de nutrientes en las plantas y, específicamente a pH más ácidos, una disminución en la tasa de nitrificación (Tyson *et al.*, 2004; Somerville *et al.*, 2014; Cerozi y Fitzsimmons, 2016; Zou *et al.*, 2016).

Además del mencionado consenso en los parámetros de calidad de agua entre plantas, peces y bacterias, la conexión entre los distintos componentes genera un flujo continuo de nutrientes, cuyas transformaciones biológicas resultan claves para la posterior absorción vegetal.

Dinámica de nutrientes

Las plantas requieren macronutrientes (N, P, K, Ca, S y Mg) y micronutrientes (Fe, Mn, B, Zn, Cu y Mo), los cuales son esenciales para su crecimiento, estos son absorbidos mayoritariamente por las raíces, y en muchos casos, deben ser añadidos externamente para alcanzar altos rendimientos (Delaide, 2017). En hidroponía, diversos autores han planteado concentraciones establecidas de estos nutrientes para la formación de una solución nutritiva que contenga la concentración y proporciones de nutrientes adecuadas para el crecimiento vegetal, la cual debe ser monitoreada constantemente para evitar desbalances o déficits nutricionales (Resh, 2013).

Cuando se considera el uso de efluentes acuícolas como fuente de nutrientes para las plantas se ha reportado que las concentraciones de potasio (K) y calcio (Ca) son generalmente insuficientes para los valores requeridos por las plantas. En el caso de K, esto se debe a que este elemento se presenta en bajas concentraciones dentro de la composición del alimento de los

peces, lo que genera aún más bajos niveles de K disponible para las plantas (Seawright *et al.*, 1998; Suhl *et al.*, 2016). En el caso de Ca, los peces utilizan en promedio solo el 26,8% del contenido añadido en el alimento, sin embargo, el principal aporte de este nutriente al sistema viene de la concentración natural del agua utilizada (Delaide, 2017). Con respecto a los micronutrientes, se han reportado principalmente deficiencias asociadas al hierro (Fe) (Seawright *et al.*, 1998; Rakocy *et al.*, 2006; Sommerville *et al.*, 2014), lo cual también se produce debido a una baja concentración de este nutriente en el alimento de los peces lo que, sumado a una deficiente transformación química a una forma iónica absorbible por las plantas, genera una baja disponibilidad de este elemento en la solución para la absorción vegetal.

Además de la baja disponibilidad y concentración de algunos nutrientes provenientes del alimento para los peces, también puede existir pérdidas debido a procesos biológicos o prácticas de producción. Los procesos biológicos puede ser la desnitrificación entendida como la generación de NO, N₂O y N₂ mediante la transformación biológica de NO₃⁻, o el proceso ANAMMOX en el cual se oxida NH₄⁺ para generar N₂, ocurriendo ambos procesos en condiciones anaeróbicas (Goddek *et al.*, 2019a), mientras que el principal manejo productivo que genera pérdida de nutrientes es el retiro de los lodos acuícolas con el fin de prevenir enfermedades en peces, ya que estos pueden llegar a contener el 40% de los nutrientes entregados al sistema en forma de alimento, siendo los más afectados el Mg, Mn, Fe, P, Cu y Ca (Rafiee y Saad, 2005).

Para solucionar las deficiencias nutricionales observadas en plantas cultivadas en sistemas acuapónicos se han recomendado manejos tales como, adición de Ca en forma de nitrato de calcio (Ca(NO₃⁻)₂) (Seawright *et al.*, 1998), o de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) (Rakocy *et al.*, 2006). En el caso del K, se ha propuesto la adición directa a la solución de nitrato de potasio (KNO₃), fosfato de potasio (KH₂PO₄) o hidróxido de potasio (KOH). Por último, para el Fe Somerville *et al.* (2014) recomiendan añadir entre 1 a 2 mg L⁻¹ de Fe-EDTA en los primeros tres meses de iniciada la unidad acuapónica. Por otro lado, este problema podría disminuir mediante la adición de bacterias tales como *Bacillus* o *Pseudomonas*, liberadoras de sideróforos, compuestos que funcionan como quelantes orgánicos (Bartelme *et al.*, 2018).

Por otra parte, las deficiencias nutricionales observadas en plantas cultivadas en sistemas acuapónicos pueden ser atribuidas a un desequilibrio entre la biomasa animal y vegetal (Rakocy *et al.*, 2006).

Relación entre componentes del sistema productivo acuapónico

De esta manera, al ser el crecimiento de peces y plantas el fin productivo de este sistema, resulta relevante el poder asegurar que la cantidad de residuos orgánicos generados por el componente acuícola sea capaz de satisfacer los requerimientos nutricionales de las plantas.

A propósito de lo anterior, es necesario determinar un adecuado número de plantas por metro cuadrado, debido a que una de las variables más relevantes en este sistema es su relación con la tasa de alimentación diaria para los peces (TAD). Si la TAD es muy alta con respecto a la cantidad de plantas, los nutrientes se acumularán rápidamente causando fitotoxicidad, y si es muy baja las plantas se desarrollarán con deficiencias nutricionales (Rakocy *et al.*, 2006). La mayoría de los ensayos han estudiado hortalizas de hoja, a diferencia de las de fruto, por su menor requerimiento nutricional total y facilidad para adaptarse a un cultivo sin suelo.

Para establecer la adecuada relación entre los componentes se debe sincronizar la TAD con la tasa de absorción diaria de nutrientes por parte de las plantas. Para lo anterior, Somerville *et al.* (2014) establecen que el alimento de peces requerido para la producción de 1 m² de hortalizas de hoja son 40-50 g día⁻¹, mientras que 50-80 g día⁻¹ para hortalizas de fruto, considerando una tasa de alimentación de 1-2% de peso vivo por día. Rakocy *et al.* (2006) recomiendan, indistintamente de si sea una hortaliza de fruto u hoja, 60-100 g m⁻² día⁻¹ de alimento con un contenido proteico del 32%. Por otro lado, Endut *et al.* (2010) recomiendan una menor entrega de alimento que va de los 15 a 42 g m⁻² día⁻¹. Como se evidencia en lo reportado en la literatura, existe un amplio rango de recomendaciones, por lo que resulta importante evaluar cada combinación de especies de forma independiente, considerando la especie acuícola, la composición del alimento, tasa de alimentación, tipo de sistema hidropónico, especie y estado fisiológico de la planta, densidad de plantación y tasa de mineralización de nutrientes (Delaide, 2017).

Descripción del sistema

Los sistemas acuapónicos, al ser una combinación de hidroponía y RAS cuentan con los componentes de ambos sistemas. En general, el sistema posee un tanque para peces, un filtro mecánico, un biofiltro, bombas de agua y una cama de cultivo hidropónico. Dentro de las últimas, existen diversos diseños entre ellos el de raíz flotante (RF), película nutritiva (NFT) y el uso de sustrato sólido (SS) (Mauricieri *et al.*, 2018). El sistema de tipo RF se considera un sistema de fácil manejo y limpieza, que permite una alta absorción de nutrientes en sistemas acuapónicos, sin embargo, requiere de un gran volumen de agua y, por ende, la estructura del sistema es pesada (Lennard y Leonard, 2006). A diferencia del anterior, el sistema NFT se considera liviano, ya que requiere menores volúmenes de agua y también requiere una bomba de menor tamaño, no obstante, este sistema obtendría menores rendimientos, es costoso de montar y menos estable biológicamente (Lennard y Leonard, 2006). A diferencia de los sistemas recién descritos, el de tipo SS no requiere una unidad biofiltrante externa, ya que el medio de soporte para las plantas cumple la función del biofiltro, sin embargo, esto lo convierte en un sistema de difícil manejo y limpieza (Lennard y Leonard, 2006).

Adicionalmente, en la actualidad se definen dos arquetipos para desarrollar un sistema acuapónico, el sistema desacoplado (DS) y el acoplado (AS) (Goddek *et al.*, 2019a). En el sistema DS se separan los flujos continuos de agua y nutrientes entre los componentes productivos, permitiendo realizar ajustes químicos en pH, temperatura, conductividad eléctrica, entre otros, para permitir alcanzar el óptimo productivo de cada una de las unidades (Somerville *et al.*, 2014; Goddek *et al.*, 2019b). En el sistema AS, tanto agua y nutrientes circulan libremente entre las unidades hidropónicas y acuapónicas en un único ciclo recirculante de agua rica en nutrientes, formando una comunidad simbiótica entre peces, plantas y bacterias (Palm *et al.*, 2019).

Aplicabilidad en Chile

Especies acuícolas

En Chile existen un total de 128 pisciculturas, de estas solo 19 se encuentran en la zona central (Región RM y V) (Subpesca, 2019). Las especies más utilizadas para el cultivo de peces en Chile a nivel comercial con fines de exportación son el salmón del Atlántico (*Salmo salar*), el salmón del pacífico, específicamente el Coho o plateado (*Oncorhynchus kisutch*) y la trucha

arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) (ODEPA, 2014). Específicamente la trucha arcoíris corresponde al 7,3% de la producción total nacional y el 11,5% de la salmonicultura de hecho, el año 2019 aumentó en un 12,3% su producción en comparación al año 2018 (Subpesca, 2019). Por otro lado, esta especie es de rápido crecimiento (Gjedrem y Gunnes, 1978), alta producción de NH_4^+ (Wongkiew *et al.*, 2017) y una calidad nutricional excepcional, considerando su alto aporte de ácidos grasos omega-3 (Dewailly *et al.*, 2007). Es por lo anterior que, junto a su fácil adquisición en pisciculturas cercanas a la región metropolitana, la trucha arcoíris representa una opción interesante para realizar acuaponía en Chile.

A nivel internacional, las especies más utilizadas para el cultivo acuapónico son tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), tilapia azul (*Oreochromis aureus*), carpa común (*Cyprinus carpio*), bacalao Murray (*Maccullochella peelii*), pez koi (*Cyprinus carpio* var. *koi*), trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), entre otras. En Chile, debido a las condiciones climáticas y productos requeridos por el mercado, se han probado principalmente trucha arcoíris y camarón de río a escala semi-productiva, las cuales han sido técnicamente viables (Granja Agro-Acuícola, s.f.).

Especie vegetal

Las hortalizas más consumidas en Chile corresponden a tomate, choclo, lechuga, zapallo, zanahoria, sandía, alcachofa, ají, acelga, espinaca, pimiento, poroto verde, entre otras. (ODEPA, 2016). De las mencionadas anteriormente solo algunas se producen en sistemas hidropónicos, entre las cuales destacan principalmente las solanáceas y las hortalizas de hoja.

A nivel internacional, las hortalizas cultivadas exitosamente en sistemas acuapónicos son lechuga, albahaca, perejil, repollo, poroto, tomate, ají, kale, mizuna, berenjena, calabaza, brócoli, cebollín, berros, menta, hierba buena, apio y acelga (Sommerville *et al.*, 2014). En Chile se han probado con buenos resultados lechuga, albahaca, cebollín, berros, menta, hierba buena, apio y acelga (Granja Agro-Acuícola, s.f.; Revista Mundo Acuícola, 2013)

Calidad funcional en hortalizas

El concepto de alimento funcional nace en Japón en la década de los 80, y actualmente se define como un alimento que posee un ingrediente funcional, el que ejerce un efecto beneficioso sobre una o más funciones selectivas del organismo, de modo tal que resulte apropiado para mejorar el estado de salud y bienestar, reducir el riesgo de enfermedades o ambas cosas (Olagnero *et al.*, 2007).

Dentro de los ingredientes funcionales existen prebióticos, probióticos, vitaminas, minerales, antioxidantes, ácidos grasos y fitoquímicos (Cadaval *et al.*, 2005). De estos destacan los compuestos antioxidantes, los cuales corresponden a sustancias sintéticas o naturales que inhiben, previenen o retrasan el daño oxidativo de una molécula determinada (Halliwell y Gutteridge, 1995; Yadav *et al.*, 2016). Su importancia radica en que las reacciones de oxidación producen radicales libre que pueden generar una cadena de reacciones químicas que eventualmente pueden causar daño o muerte celular, por lo cual, los compuestos antioxidantes actúan removiendo estos intermediarios de radicales libres a través de su oxidación (Shebis *et al.*, 2013). Entre los compuestos antioxidantes están las vitaminas C y E, carotenos, los flavonoides y polifenoles (Cadaval *et al.*, 2005).

Los factores abióticos que causan estrés a las plantas producen en ellas distintas respuestas fisiológicas las cuales pueden alterar la concentración de ciertos compuestos dentro del tejido vegetal como los compuestos antioxidantes (Zlatevl *et al.*, 2012). Según Nguyen y Niemeyer (2010) la disponibilidad de nutrientes específicamente en la fertilización nitrogenada afecta la producción de compuestos antioxidantes, encontrando que a una fertilización con mayor concentración de nitrógeno hubo una menor capacidad antioxidante y concentración de fenoles totales en hojas de tres cultivares de albahaca. A su vez, Toor *et al.* (2006) determinaron que el origen de las fuentes fertilizantes puede tener un gran efecto en la concentración de macronutrientes, sabor y compuestos antioxidantes en tomate fertilizado con enmiendas de tipo mineral u orgánico.

Por otro lado, se ha visto que los diferentes colores en frutas y hortalizas también se relacionan con la capacidad antioxidante y concentración de compuestos fenólicos, como es el caso de las hortalizas de color magenta y rojo, las cuales presentan una mayor capacidad antioxidante en comparación a las de color verde o amarillo (Doğan *et al.*, 2020). En un estudio realizado por Pyo *et al.* (2004) se reportó que acelgas con tonalidades rojas obtienen una mayor capacidad antioxidante, según el método “2,2- diphenyl-1-picrylhydrazyl” (DPPH), que las verdes, al igual que una mayor concentración de compuestos fenólicos totales. Lo anterior se relacionaría a que en acelgas con tonalidades rojas aumentaría la concentración de compuestos bioactivos tales como la betalaina o betacianina (Pyo *et al.*, 2004; Ninfali y Angelino, 2013).

Calidad microbiológica en hortalizas

El Ministerio de Salud de Chile (MINSAL) establece una serie de criterios microbiológicos con el fin de aprobar o rechazar un alimento en función a estándares definidos para cada tipo de alimento, designando grados de calidad como “aceptable” y “rechazable”. En el caso de frutas y otros vegetales pre-elaborados listos para el consumo se establece, en el caso de bacterias, un máximo para aerobios mesófilos (RAM) y enterobacterias de 6,69 y 4,69 log UFC g⁻¹ respectivamente (MINSAL, 2014).

En un sistema acuapónico, al funcionar con los desechos provenientes de los peces, es fundamental evaluar la carga microbiológica por un eventual traspaso de bacterias patógenas perjudiciales para la salud del consumidor final (Somerville *et al.*, 2014). Pese a lo anterior, en un trabajo realizado por Sirsat y Neal (2013), se determinó que las lechugas acuapónicas mantendrían menores concentraciones de microorganismos que las cultivadas en suelo, tanto en coliformes como RAM. Asimismo, en estudios realizados por Alcarraz (2016) no se encontraron diferencias en la concentración de microorganismos entre lechugas hidropónicas y acuapónicas. No obstante, hasta el momento existen pocas investigaciones al respecto, lo que sugiere la necesidad de seguir investigando esta temática considerando su importancia en la seguridad alimentaria para, posteriormente, evaluar la inclusión de tecnologías que reduzcan la concentración de microorganismos, tales como tratamientos con luz UV, ozono o el uso de ácidos orgánicos (Elumalai *et al.*, 2017).

CAPÍTULO II: CULTIVO DE ACELGA BABY LEAF EN SISTEMA ACUAPÓNICO INTEGRADO CON EL CULTIVO DE TRUCHA ARCOÍRIS

RESUMEN

La acuaponía corresponde al cultivo multitrófico de alimentos que combina la producción hidropónica con sistemas de recirculación acuícola. En este sistema los desechos metabólicos generados por los peces y los restos de su alimentación se conectan con el componente vegetal mediante un flujo másico de nutrientes. El objetivo de este trabajo fue comparar los parámetros productivos y calidad funcional en acelgas (*Beta vulgaris* var. cicla) baby leaf cultivadas bajo un sistema acuapónico con la combinación de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) (Ap) versus un cultivo hidropónico (Hp). Para lo anterior se evaluó el rendimiento, concentración de nutrientes en hojas, concentración de fenoles totales y capacidad antioxidante en hojas de acelga. Por otro lado, el componente acuícola del sistema acuapónico fue comparado contra un sistema acuícola recirculante (RAS) con el fin de evaluar el efecto de la incorporación de un componente vegetal en los parámetros productivos acuícola. Para esto se evaluó el incremento de peso, el factor de conversión alimentaria (FCA), la tasa de crecimiento específica (TCE), el factor de condición K (factor K), la ganancia de peso (GP) y la supervivencia (S) de los peces en ambos sistemas. Al término del ensayo no se encontraron diferencias en el rendimiento vegetal entre los tratamientos Ap y Hp, obteniendo 0,6 kg m⁻² y 0,7 kg m⁻² M.F. respectivamente, no obstante, el largo radical fue mayor en las acelgas acuapónicas. Se encontró una menor concentración significativa ($p < 0,05$) de K y Mn en hojas de acelga acuapónica, correspondientes al 55,5 y 6,73 % de lo obtenido en las acelgas hidropónicas, respectivamente. No se encontraron diferencias en la concentración de fenoles totales ni en la capacidad antioxidante según el método DPPH. Sin embargo, según el método FRAP, las acelgas acuapónicas obtuvieron una mayor capacidad antioxidante de $286,7 \pm 55,8$ mg ET 100 g⁻¹ MF, un 19,3 % más que en Hp ($p < 0,05$). Por último, no se encontró ninguna diferencia entre los tratamientos en los parámetros productivos acuícolas evaluados, registrando un valor medio de FCA de 1,32 y en la TCE de $1,35 \pm 0,30$ % día⁻¹. Los datos del presente trabajo indican la viabilidad de sustituir el aporte de fertilizantes de síntesis químicas mediante la incorporación de un cultivo de trucha arcoíris, sin afectar el rendimiento y calidad funcional del componente vegetal.

Palabras clave: Acuaponía; *Beta vulgaris*; *Oncorhynchus mykiss*; capacidad antioxidante.

ABSTRACT

Aquaponics corresponds to multitrophic food culture that combines hydroponic production with aquaculture recirculation systems. In this system, the metabolic waste generated by fish and the remains of their diet are interrelated with the plant component through a mass flow of nutrients. The objective of this work was to compare the productive parameters and functional quality in chard (*Beta vulgaris* var. cicla) baby leaf grown under an aquaponic system with the combination of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) (Ap) versus a hydroponic culture (Hp). For this, nutrient concentration in leaves, concentration of total phenols and antioxidant capacity are evaluated. On the other hand, the aquaculture component of the aquaponic system was compared with a recirculating aquaculture system (RAS) to evaluate the effect of add a plant component on the aquaculture production parameters. For this, weight gain, dietary conversion factor (FCA), specific growth rate (TCE), condition factor (K factor), weight gain (GP) and survival (S) were evaluated. At the end of the experiment, no yield differences were found between the Ap and Hp treatments, obtaining 0.6 kg m⁻² and 0.7 kg m⁻² respectively, however, root length was longer in aquaponic chards. A lower concentration of K and Mn was found in aquaponic chard leaves, corresponding to 55.5 and 6.73% of that obtained in hydroponic chard. No differences were found in the concentration of total phenols or antioxidant capacity according to the DPPH method, however, according to the FRAP method, aquaponics chard obtained a higher antioxidant capacity. Lastly, no difference was found between the treatments in the aquaculture production parameters evaluated, registering an average FCA value of 1.32. The experiment establishes the feasibility of replacing the contribution of chemical synthesized fertilizers by adding a rainbow trout culture, without affecting yield and functional quality of the hydroponic component.

Keywords: Aquaponics; *Beta vulgaris*; *Oncorhynchus mykiss*; antioxidant capacity.

INTRODUCCIÓN

La acuaponía se define como un sistema de producción multitrófico de alimentos que combina la producción hidropónica con sistemas de recirculación acuícola (RAS) (Rakocy *et al.*, 2006; Somerville *et al.*, 2014), y surge como una solución promisorio al impacto ambiental asociado a la producción intensiva de peces y plantas (Mauricieri *et al.*, 2018). Este sistema cuenta con un componente acuícola conformado por biofiltro, decantador y estanques, junto a un componente hidropónico (Goddek *et al.*, 2019). Dentro de las principales ventajas de la acuaponía destaca la actividad fitorremediadora de efluentes acuícolas propios de un sistema RAS, los cuales, a gran escala, están asociados a problemas ambientales (Goddek *et al.*, 2019a). Es así como la incorporación de un componente vegetal en el mismo ciclo recirculante de agua permite la disminución en la concentración de nutrientes y materia orgánica en el sistema, mejora la calidad de agua para los peces y permite una producción hortícola adicional (Rakocy *et al.*, 2006; Graber y Junge, 2009; Somerville *et al.*, 2014).

Existen dos arquetipos para hacer acuaponía correspondientes a la forma desacoplada (DS) y acoplada (AS) (Goddek *et al.*, 2016; Monsees *et al.*, 2017; Goddek *et al.*, 2019a). En la primera se separan los flujos continuos de agua y nutrientes entre los componentes productivos, permitiendo realizar ajustes químicos en pH, temperatura, conductividad eléctrica, entre otros, posibilitando alcanzar el óptimo productivo de cada una de las unidades (Goddek *et al.*, 2019b). En la segunda, tanto agua y nutrientes circulan libremente entre las unidades hidropónicas y acuícolas en un único flujo recirculante rico en nutrientes, formando una comunidad simbiótica entre peces, plantas y bacterias (Palm *et al.*, 2019).

En los sistemas AS existen dos principales complicaciones productivas. La primera guarda relación con encontrar un punto medio entre las condiciones químicas óptimas que requiere cada uno de los componentes, y la segunda con permitir el adecuado balance másico para satisfacer el requerimiento nutricional del componente hidropónico (Rakocy *et al.*, 2006; Goddek *et al.*, 2019a). Se ha reportado en numerosos trabajos deficiencias nutricionales en plantas cultivadas en sistemas acuapónicos, tanto en macronutrientes (K y Ca) como en micronutrientes (Fe) (Rakocy *et al.*, 2006; Somerville *et al.*, 2014; Guzel *et al.*, 2018; Goddek *et al.*, 2019) asociadas, principalmente, a un bajo requerimiento de estos nutrientes por parte del componente acuícola, una baja disponibilidad química para la absorción de estos nutrientes y a una deficiente tasa de liberación de éstos desde los lodos acuícolas (Somerville *et al.*, 2014; Goddek *et al.*, 2019).

Dentro de las unidades hidropónicas se han estudiado distintos tipos de sub-sistemas hidropónicos, entre ellos el de raíz flotante, película nutritiva (NFT) y el uso de sustrato sólido (Mauricieri *et al.*, 2018). De los anteriores, se estableció al sistema de raíz flotante como un sistema simple y eficiente (Lennard y Leonard, 2006). Este sistema se vuelve interesante de estudiar por los mínimos costos de instalación y manejo que requiere para una producción eficiente (Lennard y Leonard, 2006; Mauricieri *et al.*, 2018).

Si bien durante los últimos años se han publicado numerosos trabajos referentes a sistemas acuapónicos, éstos se han centrado principalmente en un análisis del desempeño del componente acuícola, centrándose en parámetros como el factor de conversión alimentaria (FCA) y parámetros de calidad de agua. Dentro de estos parámetros están la concentración de nitritos y nitrógeno amoniacal total (TAN) (Mauricieri *et al.*, 2018) y dejan de lado importantes

consideraciones referentes al componente hidropónico, tales como el balance másico entre los distintos componentes y su repercusión en el rendimiento y calidad de las plantas (Buzby y Lin, 2014; Monsees *et al.*, 2017). Respecto a este último aspecto, Nguyen y Niermesal (2010), señalan que la disponibilidad de nutrientes, específicamente de nitrógeno, afecta la concentración de compuestos antioxidantes en albahaca hidropónica, encontrando que a mayores concentraciones de nitrógeno, cercanas 5,0 mM, tuvieron una menor capacidad antioxidante, mientras que a bajas concentraciones de 0,1 mM se vió un aumento en la concentración de compuestos fenólicos. A su vez, Toor *et al.* (2006) estudiaron los efectos que genera la adición de fuentes fertilizantes de origen químico y orgánico en tomates, encontrando que la concentración de fenoles totales, ácido ascórbico y capacidad antioxidante tienen relación directa con el origen de la fuente fertilizante, siendo mayor en las orgánicas.

Por otro lado, las especies acuícolas más utilizadas en investigaciones en acuaponía a nivel mundial son tilapia, carpa y pez gato, especies asociadas a climas tropicales y bajos requerimientos en calidad de agua (Sommerville *et al.*, 2014). Sin embargo, resulta relevante estudiar especies acuícolas aplicables a la realidad chilena, considerando sus requerimientos de calidad de agua junto a su concomitante rentabilidad en el país. En este contexto, las principales especies acuícolas cultivadas en Chile son el salmón del Atlántico (*Salmo salar*), trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y el salmón del Pacífico, específicamente el Coho o plateado (*Oncorhynchus kisutch*) (ODEPA, 2014).

Por último, la Fundación de Innovación Agropecuaria (FIA) (2016) establece que el mercado hortícola chileno se encuentra altamente limitado por una escasa diversificación y valor agregado en sus productos. Para lo anterior, resulta interesante considerar el aumento en el mercado de hortalizas gourmet tales como hortalizas ‘baby leaf’ las que se caracterizan por sus altos valores nutricionales y colores vivos (Red Agrícola, 2018). Considerando lo anterior, la acelga (*Beta vulgaris* var. cicla) surge como una opción de proveer un alimento altamente nutritivo e interesante para la fito-medicina, principalmente porque posee propiedades para combatir la hipertensión y una excelente capacidad antioxidante (Ninfali y Angelino, 2013).

HIPÓTESIS

Es posible reemplazar el aporte de fertilizantes de síntesis química en la producción de acelga hidropónica 'baby leaf' mediante la incorporación de un cultivo de trucha arco iris sin afectar el rendimiento y la calidad nutricional de las plantas.

OBJETIVOS

General

Comparar el efecto del aporte de distintas fuentes de fertilización entre un sistema hidropónico convencional versus un sistema acuapónico a partir de trucha arcoíris y acelga para establecer si esta combinación entre especies es productivamente viable.

Específicos

Evaluar el efecto de las diferentes fuentes de fertilización en los parámetros productivos de acelgas 'baby leaf' cultivadas en un sistema acuapónico e hidropónico

Evaluar el efecto de las diferentes fuentes de fertilización en los parámetros de calidad en acelga 'baby leaf' cultivada en un sistema acuapónico e hidropónico.

Evaluar el efecto de la implementación de un cultivo de acelga en los parámetros productivos de trucha arcoíris cultivadas en un sistema de recirculación acuícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Materiales

1.1.1 Ubicación del ensayo

El estudio se realizó en las dependencias del Centro de Estudios en Postcosecha (CEPOC), situado en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicada en la comuna de La Pintana (Provincia de Santiago, Región Metropolitana, Chile), específicamente a 33°40' latitud sur, 70°40' longitud y a 625 m.s.n.m. El ensayo se llevó a cabo en un invernadero macrotúnel de polietileno de 180 m² con ventilación forzada y sistema de climatización de tipo "pared húmeda", programado para mantener la temperatura a 20 °C. La temperatura media en el aire durante el desarrollo del ensayo fue de 27,8 °C, la cual se midió con un sensor de temperatura (S-TMB-M002, HOBO) ubicado dentro del invernadero. El ensayo tuvo un periodo experimental de 30 días realizado durante los meses de marzo y abril del 2019.

1.1.2 Material biológico

Se utilizaron acelgas (*Beta vulgaris* var. cicla) 'Rhubarb Chard' (Semencoop, Italia) para un cultivo de hojas 'baby leaf', cuyas semillas se sembraron en bandejas alveoladas a 1 cm de profundidad con una mezcla de sustrato de perlita expandida A6 y lana de roca en una relación de 1:1. Luego las bandejas se colocaron en una cámara de cultivo (LabTech Co, Ltda., Corea) a 25 °C durante un día hasta la emisión de la radícula, y posteriormente fueron llevadas al interior del invernadero a una temperatura media de 22 °C y colocadas sobre una mesa de almácigos (raíz flotante). Se realizó un riego hidratando el cepellón mediante capilaridad con agua potable durante 15 min cada 12 h. Después que los plantines alcanzaron el estado de cotiledones totalmente expandidos se regaron con solución nutritiva de Hoagland-II modificada, diluida al 50 % manteniendo un pH entre 5,5 y 6,2. Una vez que los plantines alcanzaron de 3 a 4 hojas verdaderas fueron trasplantados a las mesas de cultivo de cada sistema, siendo este el punto de partida para el ensayo.

Durante este estudio se utilizaron juveniles de trucha arco iris adquiridos en la Piscicultura del Río Bueno (Osorno, Chile). El traslado fue efectuado por el laboratorio de Nutrición Animal, perteneciente al Departamento de Producción Animal de la Universidad de Chile. El peso medio de cada individuo al inicio del ensayo fue de 89,3 ± 20,0 g, mientras que el largo total medio fue de 20,4 ± 0,9 cm.

1.1.3 Tratamiento y diseño experimental

Durante el ensayo se utilizó un diseño completamente aleatorizado (DCA), considerando un factor con 2 niveles, conformando 2 tratamientos con 3 repeticiones cada uno. El primer tratamiento correspondió al cultivo de acelga 'baby leaf' fertilizado con los efluentes de un cultivo de trucha arcoiris conformando un sistema acuapónico acoplado (Ap). El segundo tratamiento consistió en un cultivo de acelga fertilizado con solución nutritiva sintética

conformada por sales minerales en un sistema hidropónico recirculante de raíz flotante (Hp), el cual actuó como control para el tratamiento Ap.

Por otro lado, para determinar la variación en los parámetros productivos de las truchas arcoíris se estableció otra comparación independiente con un sistema recirculante acuícola (RAS). En este caso también se utilizó un DCA, considerando un factor con 2 niveles, conformando 2 tratamientos con 3 repeticiones cada uno. El primer tratamiento correspondió al cultivo de trucha arcoíris al que se le agregó un cultivo de acelga, conformando el mismo sistema acuapónico descrito en el párrafo anterior (Ap). El segundo tratamiento correspondió a un cultivo de trucha arcoíris en un sistema recirculante acuícola (RAS), el cual actuó como control para la evaluación de los parámetros productivos de las truchas arcoíris cultivadas en el tratamiento Ap.

Para ambas comparaciones se utilizaron un total de 12 unidades experimentales (UE) (Figura 1), considerando 6 UE en la comparación vegetal y 6 UE en la comparación acuícola. Para la comparación en el cultivo de acelga entre los tratamientos Ap y Hp, la UE consistió en una mesa de raíz flotante de $0,53 \text{ m}^2$ con una densidad de $27,9 \text{ plantas m}^{-2}$ dispuestas linealmente con un distanciamiento de 16 cm entre planta. Para la comparación en el cultivo de trucha arcoíris entre los tratamientos Ap y RAS, la UE consistió en un estanque de 100 L, y se trabajó con 4 individuos comenzando el ensayo con una densidad de $3,57 \text{ kg m}^{-3}$.

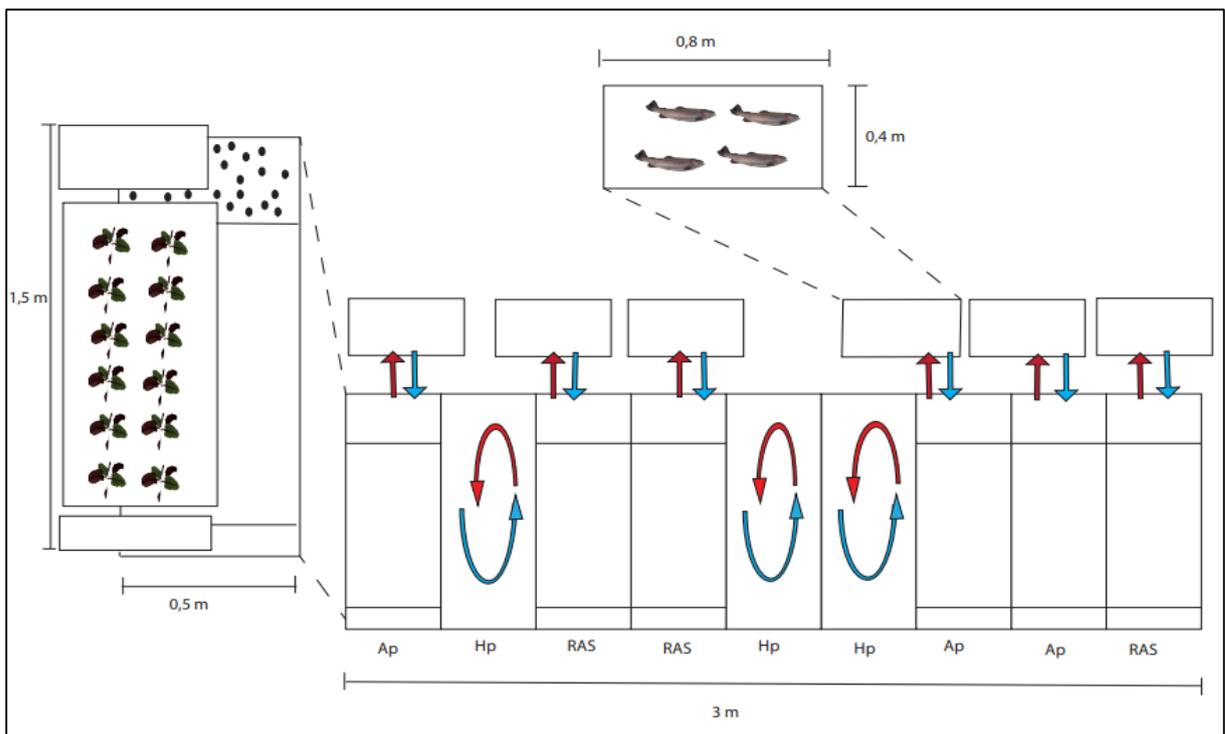


Figura 1. Distribución aleatorizada del ensayo incluyendo las 12 unidades experimentales utilizadas, correspondientes al tratamiento hidropónico (Hp), acuapónico (Ap) y acuícola (RAS). Las flechas azules corresponden al flujo de agua generado por la bomba mientras que las flechas rojas corresponden al retorno de esta.

1.1.3.1 Unidad experimental - tratamiento acuapónico (Ap)

El volumen total del sistema correspondió a 160 L, de los cuales 57,5 L correspondieron a la mesa de cultivo hidropónico, 13,5 L al biofiltro, 2,5 L al sumidero y 100 L al estanque de peces. El área total utilizada en la mesa del sistema acuapónico fue de 0,7 m², la cual se subdividió en tres secciones destinadas para el biofiltro, sumidero y mesa de cultivo hidropónico (Figura 2). La mesa de cultivo hidropónico de tipo raíz flotante tuvo un área de 0,52 m². Las plantas de acelga fueron situadas sobre planchas de poliestireno expandido de densidad media (20 kg m⁻³) y 3 cm de espesor.

El biofiltro tuvo un área de 0,15 m² en donde se le añadió un volumen de 3 L de biobolas (Bio-ball Sunsun, China) dispuestas en una malla plástica para evitar su dispersión. Los cálculos asociados al diseño biológico del sistema, entre ellos el volumen del biobolas necesarias se encuentra en Apéndice I (Rakocy *et al.*, 2006; Sommerville *et al.*, 2014; Wongkiew *et al.*, 2017). Por último, el sumidero tuvo un área total de 0,05 m² con un volumen de 2,5 L, donde se instaló una tubería de 20 mm por debajo de esta sección, hasta una altura de 5 cm sobre la base, con el fin de efectuar una decantación de partículas de mayor tamaño.

Para el cultivo de truchas, se utilizó un estanque rectangular con fondo plano (0,81 x 0,43 x 0,49 m) con una capacidad máxima de 120 L (Reyplast, Perú), el que correspondió a la UE para el cultivo acuícola (Figura 2). El estanque se mantuvo con volumen de 100 L de agua y se consideraron las proporciones establecidas por Somerville *et al.* (2014) para el cultivo de trucha, las que indican que la densidad en el estanque de cultivo debe ser de 10 a 20 kg de biomasa por 1 m³ de agua.

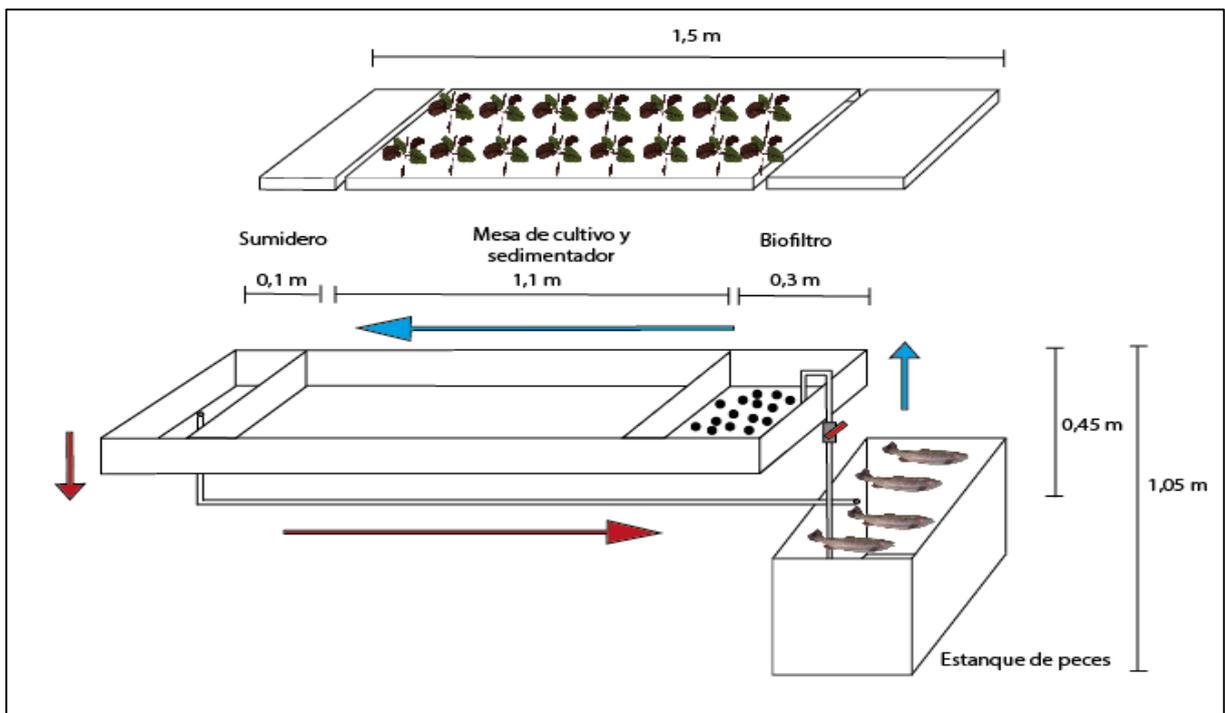


Figura 2. Dimensiones, subdivisión y circulación de agua en el sistema del tratamiento acuapónico (Ap). Las flechas azules corresponden al flujo de agua generado por la bomba mientras que las flechas rojas corresponden al retorno de esta.

El volumen total de agua en cada UE circuló desde la sección del estanque de peces hasta el sumidero, pasando por el biofiltro y mesa de cultivo. El agua fue verticalmente impulsada 0,45 m desde el estanque de peces hasta la sección del biofiltro mediante una bomba sumergible a un caudal de 342 L h^{-1} (Super pond, EE.UU.). El flujo entre el biofiltro, la mesa de cultivo y el sumidero fue por gravedad, debido a diferencias de un centímetro de altura de agua entre cada uno de los componentes. Finalmente, el agua retornó al estanque de peces mediante tuberías de PVC hidráulico de 20 mm de diámetro exterior, ubicadas en el área destinada al sumidero. El volumen total del sistema recirculó 2,13 veces por hora pasando por todos los componentes del sistema. Adicionalmente se instaló una malla plástica en el sector de retorno al estanque que actuó como filtro mecánico de partículas de mayor tamaño.

El sistema consideró dos aireadores (SB-9905A, Sebo) con sus dos salidas conectadas a piedras difusoras de 10 cm (Aquadine, EE.UU.), las cuales estuvieron dispuestas tanto en el estanque de peces, como en el sector del biofiltro para asegurar una oxigenación mínima de 6 mg L^{-1} .

1.1.3.2 Unidad experimental - tratamiento hidropónico (Hp)

El volumen total de este sistema fue de 70 L, considerando 9 cm de altura de agua. El área total destinada a esta UE fue de $0,72 \text{ m}^2$, de la cual se utilizó $0,52 \text{ m}^2$ para el cultivo de acelga, con el fin de igualar el área cultivada en el tratamiento Ap. Al igual que en el tratamiento Ap, se utilizaron planchas de poliestireno expandido para situar las plantas de acelga.

El agua se movió circularmente dentro de la mesa, gracias a una bomba de agua de 300 L h^{-1} (Super pond, EE.UU.) instalada en una de las esquinas de ésta (Figura 3). Adicionalmente se incorporó un aireador (SB-108, Sebo) con una salida conectada a una piedra difusora (Aquadine, EE.UU.) para asegurar una oxigenación mínima de 5 mg L^{-1} .

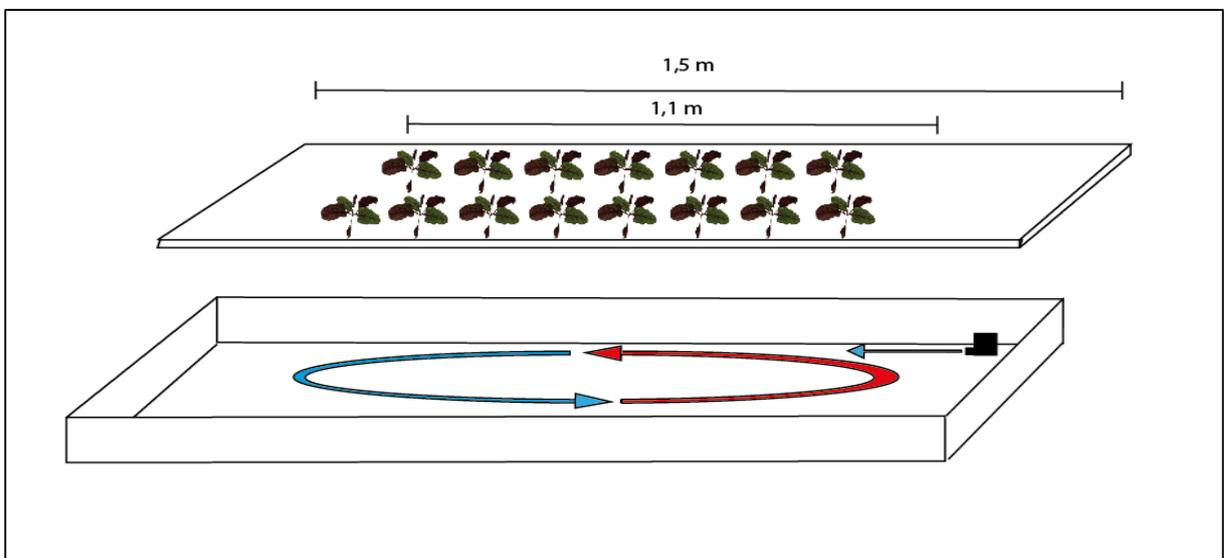


Figura 3. Dimensiones, subdivisión y circulación de agua en el sistema del tratamiento hidropónico (Hp). Las flechas azules corresponden al flujo de agua generado por la bomba mientras que las flechas rojas corresponden al retorno de esta.

La solución nutritiva utilizada fue Hoagland-II modificada en función de la concentración de iones presente en el agua utilizada durante el ensayo (Apéndice II). Para lo anterior, se utilizó un análisis del agua realizado durante el segundo semestre del año anterior (2018) (Agrolab, Chile) (Anexo I). Esta solución se constituyó de sales minerales de uso común en hidroponía

(Anexo II), y se añadió al 50 % durante los primeros 5 días de trasplante en la mesa de cultivo para posteriormente, aumentar al 100 % hasta alcanzar una conductividad eléctrica (CE) de 2,1-2,3 dS m⁻¹.

1.1.3.3 Unidad experimental - tratamiento recirculante acuícola (RAS)

Para el establecimiento de la UE del tratamiento RAS se utilizó un estanque con las mismas dimensiones descritas en la sección 1.1.3.1. cuyo flujo de agua, al igual que en el tratamiento Ap, circuló sucesivamente desde el estanque hacia el biofiltro, sedimentador y sumidero, para posteriormente volver al estanque mediante tuberías de PVC de 20 mm (Figura 4). Los componentes de este sistema son los mismos descritos en la sección 1.1.3.1. salvo que el área destinada para la mesa de cultivo en el tratamiento Ap, solo se utilizó como sedimentador de partículas, sin incorporar plantas. Los aireadores y bomba de agua fueron similares a los utilizados en la sección 1.1.3.1.

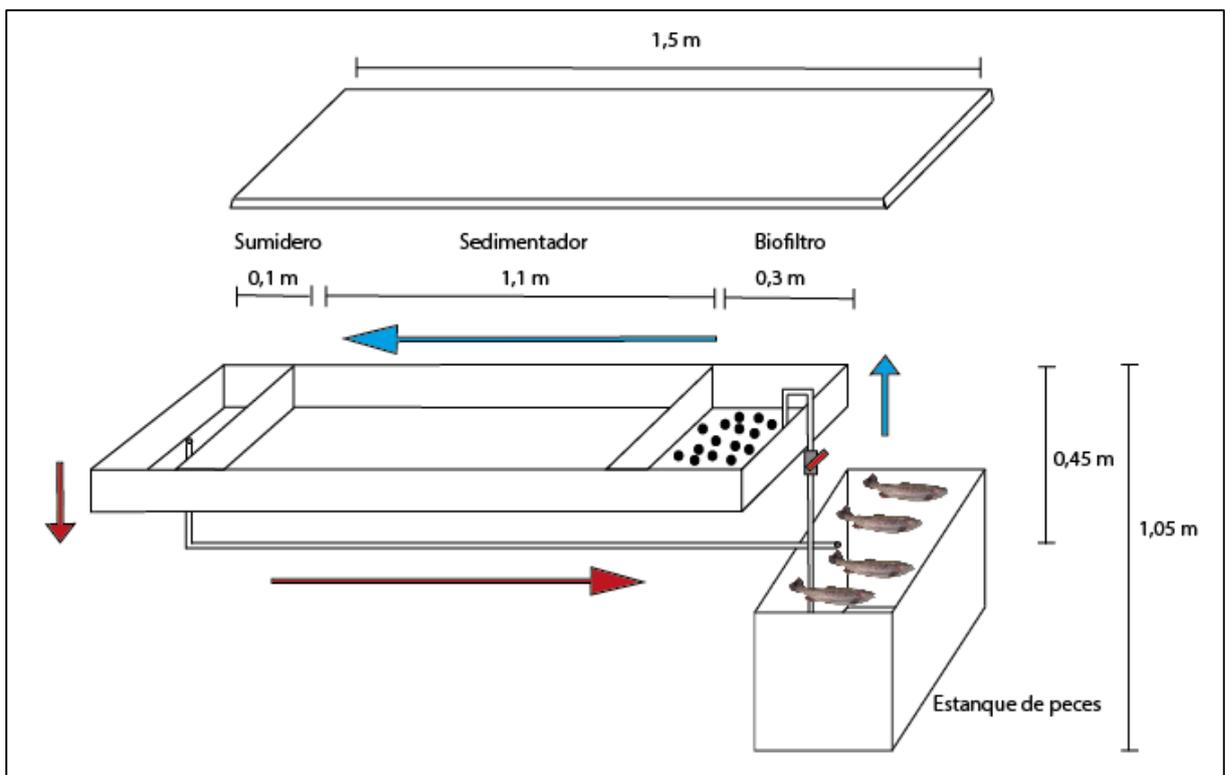


Figura 4. Dimensiones, subdivisión y circulación de agua en el sistema del tratamiento recirculante acuícola (RAS). Las flechas azules corresponden al flujo de agua generado por la bomba mientras que las flechas rojas corresponden al retorno de esta.

Tanto las dimensiones del biofiltro, decantador y sumidero, como el cálculo del material biofiltrante utilizado en el biofiltro, fueron similares a lo descrito en la sección 1.1.3.1, estableciendo un volumen total de agua en el sistema de 160 L.

1.1.4 Manejo del experimento

1.1.4.1 Activación del biofiltro para tratamientos Ap y RAS

La activación del biofiltro se realizó dos semanas antes de la iniciación del ensayo. Se comenzó rellenando las UE con 160 L de agua potable, a la cual se añadió una solución de tiosulfato de

sodio al 5 %, aplicada a una concentración de $0,1 \text{ mL L}^{-1}$, con el fin de disminuir cloro libre. Además, se aplicó un activador de biofiltro (FlorinBacter Brightwell, EE.UU.) a una concentración de $0,05 \text{ mL L}^{-1}$. Luego de 2 días, se incorporaron truchas a cada sistema a una densidad media de 8 kg m^{-3} y fueron alimentadas hasta saciedad una vez al día. También se incorporaron una mezcla de distintas hortalizas de hojas (kale, lechuga y mizuna) en cada sistema, con el fin de promover el desarrollo biológico del sistema. Desde la incorporación de las truchas al sistema se realizaron recambios de agua de un 25 % diario de volumen total del sistema.

La temperatura, pH, CE y oxígeno disuelto (DO) fueron medidos en el estanque de los peces una vez al día (15:00 h) en los tratamientos Ap y RAS, mientras que en el Hp fueron medidos directamente en la mesa de cultivo (Figura 5). El pH se midió con un medidor multiparámetro portátil de pH (PCE- IBERICA, España); la CE con un medidor de conductividad eléctrica (HI 99301, Hanna, Rumania) expresado en dS m^{-1} ; el DO con un oxímetro portátil (HI9146, Hanna, EE.UU.) expresando los resultados en concentración ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$) y porcentaje de saturación de oxígeno; mientras que la temperatura se registró con un termómetro de bolsillo (HI98509, Hanna, EE.UU.) expresado en $^{\circ}\text{C}$. Una vez por semana se midieron las concentraciones de NO_3^- , NO_2^- y nitrógeno amoniacal total (TAN) disueltas en la solución. Para estas mediciones se tomaron 25 mL de agua del estanque y se emplearon kits de medición para amonio (HACH 2668000, EE.UU.), kits de medición para NO_2^- (Nitraver 3, HACH 2107169, EE.UU.) y kits de medición para NO_3^- (Nitraver 5, HACH 1403499, EE.UU.). Una vez aplicados estos kits se compararon con el control y se determinó la concentración de estos compuestos en el agua con un espectrofotómetro UV/VIS (Optizen POP, Corea del Sur). Los resultados de estos parámetros fueron expresados en mg L^{-1} de TAN, NO_2^- y NO_3^- .

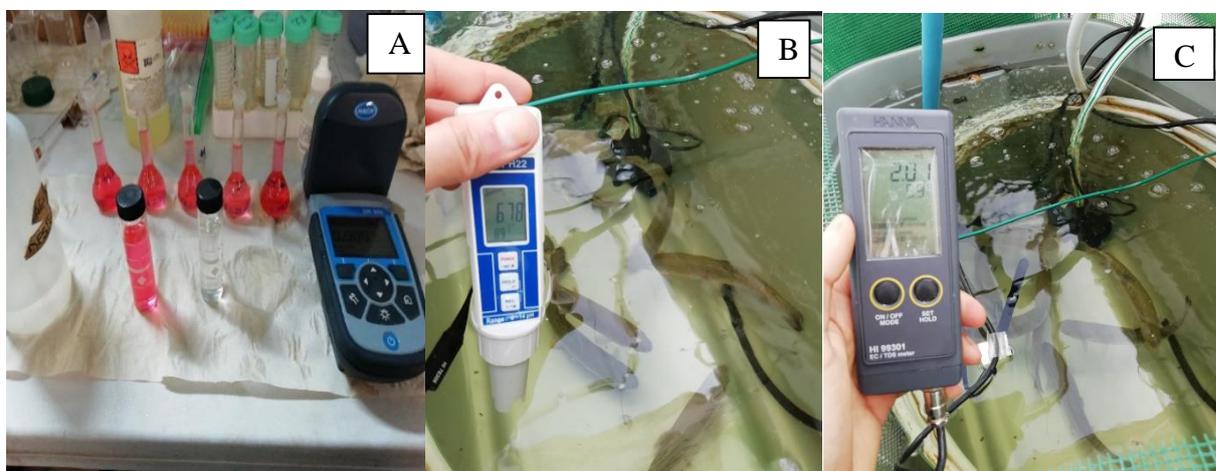


Figura 5. Mediciones de parámetros en solución. (A) Medición de nitritos con espectrofotómetro portátil. (B) Medición de pH con potenciómetro portátil. (C) Medición de conductividad eléctrica con conductímetro portátil.

El biofiltro se consideró activado cuando los niveles de TAN y NO_2^- fueron inferiores a $0,25 \text{ mg L}^{-1}$ (Somerville *et al.*, 2014) lo cual ocurrió 2 semanas posteriores a la adición de peces al sistema. Una vez finalizado el periodo de activación, las truchas y hortalizas, utilizadas para esto, fueron sacadas y transferidas a otro sistema, sin relación con este ensayo.

1.1.4.2 Sistema acuapónico

Se estableció una alimentación correspondiente al 2% del peso vivo de los peces de cada estanque dividida en tres porciones diarias, las cuales fueron suministradas a las 10:00, 14:00 y 17:00 h. Se utilizó un alimento comercial pelletizado (Ewos® transfer, Chile) con un 42% de proteína.

Se estableció un recambio diario de agua de un 15% del volumen total de cada UE. Cada recambio en este sistema se realizó con agua tratada con tiosulfato de sodio al 5 %. También se estableció una limpieza semanal de las bombas y tuberías del sistema para asegurar su funcionamiento.

Adicionalmente, producto de la aparición de *Saprolegnia spp* durante los primeros días de ensayo se sometió a los peces a un tratamiento en un baño de inmersión en NaCl al 2% durante 1 min como método curativo, y posteriormente se repitió una vez a la semana para prevenir su reaparición (Figura 6). Este manejo se diseñó con el fin de no modificar el balance iónico en la solución para la absorción vegetal.



Figura 6. Presencia de *Saprolegnia spp*. En truchas durante los primeros días de ensayo.

1.1.4.3 Sistema de recirculación acuícola (RAS)

La alimentación, los recambios de agua y limpieza de este sistema se efectuaron de la misma forma descrita en la sección 1.1.4.2.

Adicionalmente, debido a la presencia de *Saprolegnia spp*. durante los primeros días de ensayo, en este tratamiento, a diferencia del anterior, se adicionó NaCl directamente al estanque llegando a una concentración de 0,2 %. Posteriormente, los recambios diarios de agua se efectuaron con la misma concentración de NaCl.

1.1.4.4 Sistema hidropónico

La solución nutritiva fue repuesta en función de la CE cuando los valores fueron menores a 1,8 dS m⁻¹ (Bugbee, 2004). El pH de la solución se mantuvo entre valores de 5,5 a 6,2. Como parte del manejo normal de un sistema hidropónico, cuando la solución se alcalinizó escapando de

este rango, se adicionó una solución ácida al 5 % compuesta por 1,2 % ácido fosfórico y 3,8 % ácido nítrico. Adicionalmente se estableció una limpieza semanal de la bomba.

1.2 Métodos

1.2.1 Mediciones en el medio de cultivo

Durante el ensayo, la temperatura, pH, CE y DO fueron medidos en todos los tratamientos siguiendo la metodología, lugar de medición y programación descritos en la sección 1.1.4.1, mientras que las concentraciones en la solución de TAN, NO_2^- y NO_3^- fueron medidas una vez a la semana en los tratamientos RAS y Ap, siguiendo la metodología y lugar de medición descrita en 1.1.4.1.

1.2.2 Cultivo de trucha arcoíris

Al comienzo y término del ensayo, se registró el peso por individuo (P) largo total (LT) y largo específico (LE) de cada uno de los peces, junto al peso total en el estanque (PT). Para la medición de PT se utilizó una balanza portátil (Care CQT202, EE.UU.) y se registró la suma de los pesos de todos los individuos por estanque, expresándolos en g estanque^{-1} . Para la medición de P se registró la media entre las mediciones de todos los individuos de cada estanque, siendo expresada en g pez^{-1} (Figura 7). Se midió la totalidad del alimento consumido por los peces mediante el registro de g de alimento diario entregados por estanque, y una vez finalizado el ensayo se realizó la sumatoria de estos. Por último, para medir el LT (desde la boca a la aleta caudal) y LE (desde la boca al pedúnculo caudal) de los individuos se utilizó una regla estándar y fue expresado en cm.

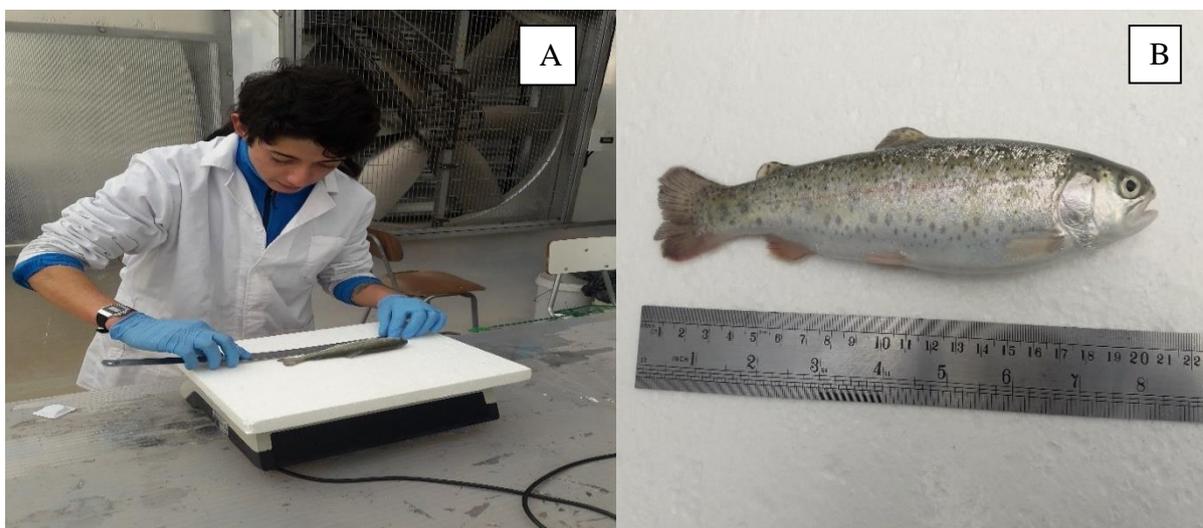


Figura 7. Medición de parámetros productivos en trucha arcoíris. (A) Medición de peso y largo inicial en trucha arcoíris al inicio del ensayo. (B) Largo total trucha arcoíris al inicio del presente ensayo.

Con estos datos se calculó el factor de conversión alimentaria (FCA), la tasa específica de crecimiento (TCE), el factor de condición corporal (K), la ganancia de peso (GP) y la supervivencia (S) según las fórmulas descritas en la Figura 8 (Torres, 2017; Morales, 2004).

$$\text{TCE (\%)}: ((\text{Ln (Peso final)} - \text{Ln (Peso inicial)}) / \text{días}) \times 100 \text{ (Morales, 2004)}$$

$$\text{GP (g)}: (\text{Peso final} - \text{Peso inicial}) \text{ (Alatorre-Jacome et al., 2012)}$$

$$\text{FCA: Alimento consumido/ GP (Aguilar et al., 2010)}$$

$$\text{S (\%)}: (\text{Número de Peces final} / \text{Número de peces al inicio}) \times 100 \text{ (Aguilar et al., 2010)}$$

$$\text{K: } \frac{10^N \times W}{L^3} \text{ (Barnham y Baxter, 1998)}$$

Donde
 W: Peso del pez en g.
 L: LE expresado en mm.
 N: Constante establecida para salmónidos con valor 5

Figura 8. Fórmulas utilizadas para calcular parámetros productivos en el crecimiento de la trucha arcoíris al término de cada ensayo.

Para realizar las mediciones anteriormente mencionadas, se realizó un anestesiado de los individuos mediante la utilización de metasulfato de tricaina (Dolical 80 %, Centrovét), disolviendo este producto a una concentración de 100 mg L^{-1} . Posterior a la medición, los peces pasaron a un estanque de acondicionamiento con agua de clorada y una bomba de aire (SB-348A, EE.UU.) durante 5 minutos, para luego ser devueltos a los estanques (Figura 9).

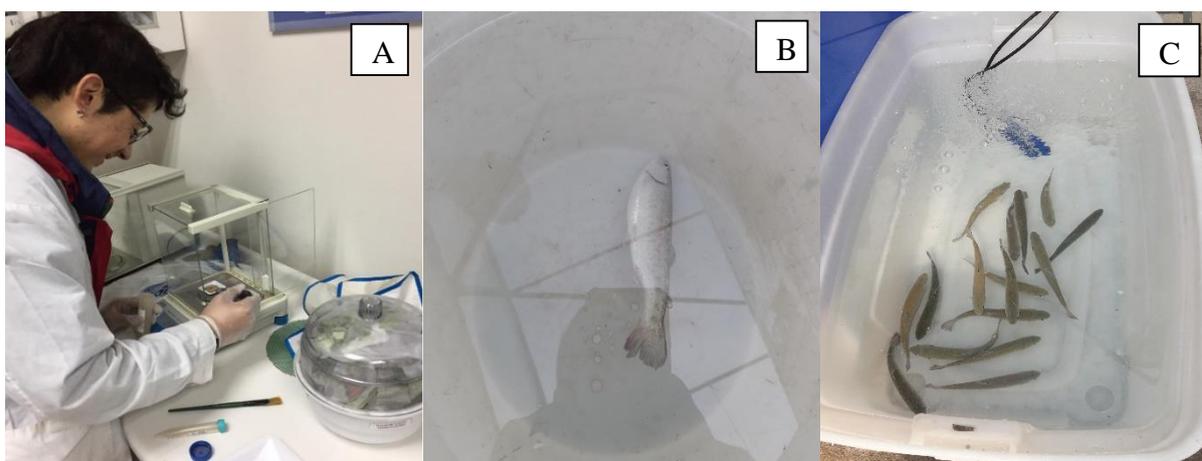


Figura 9. Proceso de anestesiado de peces. (A) Medición de la dosis de anestésico. (B) Anestesiado de peces para medición de parámetros productivos. (C) Recuperación de anestesiado en estanque de acondicionamiento.

1.2.3 Cultivo de acelga

1.2.3.1 Análisis mineral

Al término del ensayo se realizaron mediciones de macro (P, K, Ca y Mg) y micronutrientes (Mn, B, Fe, Cu y Zn) en el tejido vegetal y en la solución nutritiva de los tratamientos Ap y Hp.

Para la medición en tejido vegetal se cosecharon 3 plantas al azar por UE, de las cuales solo se utilizó la parte aérea (hojas). Posteriormente, fueron mezclados los tres grupos de hojas y se generó una muestra de 10 g por UE. Fueron lavadas con una solución compuesta por Tween 20

al 0,1 % y HCL al 1 % y posteriormente enjuagadas con agua destilada. Luego fueron secadas en una estufa a 70 °C durante 72 h hasta que su peso fuese constante. Una vez secas, fueron molidas en un mortero y se generaron submuestras de 150 mg, las cuales se sometieron a una digestión ácida en 8 mL de HNO₃ y 2 mL de H₂O₂ durante 24 h. Posteriormente fueron sometidas a 135 °C durante 30 min en una autoclave (LS-B50L, Jibimed) y filtradas con papel filtro 75 mm. El líquido resultante se aforó a 20 mL con agua desionizada y fue llevado a un espectrómetro por emisión atómica por plasma de microondas (MP-AES 4200, Agilent Technologies) en el que se realizaron las lecturas de iones. Las concentraciones de P, K, Ca y Mg fueron expresadas como porcentaje de materia seca (MS), mientras que las concentraciones de Mn, B, Fe, Cu y Zn se expresaron en mg kg⁻¹ MS.

Para la medición en la solución nutritiva se extrajeron, al término del ensayo, 25 mL de muestra desde la mesa de cultivo, con lo cual se generó una submuestra de 1 mL por UE, a la cual también se le sometió a una digestión ácida en 8 mL de HNO₃ y 2 mL de H₂O₂ durante 24 h. Posteriormente fueron sometidas a 135°C durante 30 min en autoclave (LS-B50L, Jibimed). Una vez filtradas, las muestras fueron llevadas a un espectrómetro por emisión atómica por plasma de microondas (MP-AES 4200, Agilent Technologies) en el que se realizaron las lecturas de iones (Figura 10). Las concentraciones de nutrientes en la solución nutritiva se expresaron como mg L⁻¹. Con estos datos se calculó la relación entre ambos sistemas (Hp/Ap).



Figura 10. Medición de nutrientes en tejido vegetal y solución nutritiva en tratamientos acuapónico (Ap) e hidropónico (Hp). (A) Espectrómetro de emisión atómica por plasma de microondas. (B) Inyección de estándares para establecer márgenes de medición de macronutrientes.

1.2.3.2 Materia fresca

Un día antes del trasplante al ensayo, se seleccionaron 15 plantines al azar, se les retiró los remanentes de sustrato, y se registró el peso de la planta completa con una balanza portátil (Care CQT202, EE.UU.) para determinar la materia fresca inicial en los ensayos. También se cuantificó el número de hojas por planta. En ambos parámetros se registró la media de estos valores, estableciendo el punto de partida para el ensayo.

Al término del ensayo, se seleccionaron 5 plantas al azar por UE y se dejó escurrir los restos de solución nutritiva hasta que dejara de gotear. Posteriormente se procedió a registrar el peso total de cada planta con una balanza portátil (Care CQT202, EE.UU.). Luego fue seccionada en dos partes (aérea y radicular) a las cuales también se les registró el peso fresco.

1.2.3.3 Materia seca

Luego de medir el peso fresco, las muestras fueron deshidratadas en una estufa (LabTech Co, Ltda., Corea) a 60 °C por 72 h con el fin de registrar el peso seco de la parte aérea y radical. Para todas las mediciones se utilizó una balanza portátil (Care CQT202, EE.UU.) y se registraron los valores medios de cada tratamiento, expresando finalmente los datos como $g\text{ planta}^{-1} \pm$ desviación estándar (DE). Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de peso seco en parte aérea y radical respecto al total de la planta, expresados como porcentaje (%).

1.2.3.4 Largo radical

Se realizó una medición el largo radical al término del ensayo. Se seleccionaron 5 plantas al azar por UE y se dejó gotear los restos de solución nutritiva en la raíz para posteriormente extenderla y medir con una regla estándar desde el hipocótilo a la raíz más larga. Los datos fueron expresados en cm.

1.2.3.5 Número de hojas

Al término del ensayo, se seleccionaron 5 plantas al azar por UE y se cuantificó el número de hojas en cada planta, expresando los resultados en “hojas planta^{-1} ”

1.2.3.6 Determinación de la concentración de compuestos bioactivos en plantas

Extracción vegetal

Al término del ensayo se seleccionaron 3 plantas al azar por UE de los tratamientos Ap y Hp. Estas plantas fueron retiradas de las planchas de poliestireno y seccionadas en dos partes (aérea y radicular). La parte aérea fue congelada a -80 °C (MDF- U33V, Sanyo electric Co., Japón) durante 24 h, posteriormente, fue secada en un liofilizador (FD5508, Il Shin BioBase, Corea) durante 24 h. Una vez seca, se pesaron 0,2 g de muestra liofilizada y se colocó en un tubo Falcon de 15 mL, se agregaron 10 mL de metanol al 70 % y se agitó en un vortex (MX-S, SCIOLOGEX, EE.UU.) durante 1 min y se sonicó (B-220, Branson, EE.UU.) durante 15 min para centrifugarse (Hermle Z 326K, Alemania) 15 min a 4 °C y 6000 rpm. Finalmente, se extrajo el sobrenadante con una jeringa de 10 mL y se filtró con filtros de pirinola de 0,22 μm . De este procedimiento se extrajeron 3 muestras por cada UE, las cuales fueron almacenadas en tubos eppendorf en un refrigerador a 0 °C. Las mediciones posteriores se realizaron 14 días después de la extracción

1.2.3.6.1 Capacidad antioxidante por FRAP

El reactivo FRAP estuvo compuesto de un buffer acetato 300mM (pH 3,6), solución de cloruro férrico 20 mM y solución TPTZ 10 mM. Para la preparación del reactivo se utilizaron 25 mL del buffer acetato, 2,5 mL de la solución TPTZ y 2,5 mL de la solución de cloruro férrico. Todo lo anterior según la metodología de Benzie y Strain (1996).

Se incubaron 20 μL de extracto vegetal (descrito en 1.2.1.4) junto a 600 μL del reactivo FRAP durante 30 min a 37 $^{\circ}\text{C}$. Luego de este tiempo, se tomó 200 μL de la mezcla (extracto y reactivo FRAP) y se traspasó a una placa multicelda para espectrofotómetro (ASYS UVM340, Reino Unido) realizándose mediciones de absorbancia a 593 nm cada 30 min hasta una medición estable. La capacidad antioxidante se determinó mediante una curva de calibración realizada sobre la base de una solución madre de Trolox. Esta solución se preparó disolviendo 0,015 g de Trolox en 25 mL de metanol al 70 % y posteriormente se generaron diferentes diluciones para establecer la curva de calibración. Los resultados de estas mediciones se expresaron en mg equivalente de Trolox por 100 g de masa fresca ($\text{mg ET } 100 \text{ g}^{-1} \text{ M.F.}$)

1.2.3.6.2 Capacidad antioxidante por DPPH

El protocolo utilizado fue el propuesto por Brand-Williams *et al.* (1995). A 250 μL de extracto vegetal (descrito en 1.2.1.4) se le añadió 1 mL solución DPPH al 0,1 mM y se incubó durante 20 min. Posteriormente se tomó 200 μL de la mezcla (extracto y reactivo DPPH) y se traspasó a una placa multicelda para espectrofotómetro (ASYS UVM340, Reino Unido) y se realizaron lecturas a 517 nm. Luego, pasadas 2 h de incubación, se volvió a medir la absorbancia de la reacción. La capacidad antioxidante se calculó mediante una curva de calibración realizada sobre la base de una solución madre de Trolox (descrita en 1.2.4.1.1). Los resultados fueron expresados como mg equivalente de Trolox por 100g de masa fresca ($\text{mg ET } 100\text{g}^{-1} \text{ M.F.}$).

1.2.3.6.3 Concentración de fenoles totales

Esta medición se llevó a cabo según el método descrito por Singleton y Rossi (1965), ajustado al protocolo del laboratorio. Para esto, se utilizaron 100 μL del extracto vegetal (descrito en 1.2.3.6), al cual se le agregaron 200 μL de reactivo Folin-Ciocalteu al 10 %, se homogenizó y dejó incubar durante 5 min a 20 $^{\circ}\text{C}$. Posteriormente se agregaron 800 μL de Na_2CO_3 (700mM), la solución resultante fue homogenizada y se dejó reposar durante 60 min. Debido a que posterior a este tiempo se observó turbiedad en la solución, se centrifugó (Hermle Z 326K, Alemania) 2 min a 4 $^{\circ}\text{C}$ y 6000 rpm. Luego, se extrajeron 200 μL del sobrenadante y se traspasó a una placa multicelda para medir su absorbancia en espectrofotómetro (ASYS UVM340, Reino Unido) a 765 nm.

La concentración de compuestos fenólicos se calculó por medio de una curva de calibración realizada sobre la base de una solución madre de ácido gálico $2,4 \times 10^{-3} \text{ M}$. Los resultados fueron expresados como mg equivalente de ácido gálico por 100 g de masa fresca ($\text{mg EAG } 100\text{g}^{-1} \text{ M.F.}$).

1.4 Análisis estadístico

Para determinar las posibles diferencias entre tratamientos al término de ensayo en base a los datos obtenidos en este estudio, se utilizó el siguiente modelo matemático:

Diseño estadístico completamente aleatorizado

$$\gamma_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

γ_{ij} = Variable respuesta en la j-ésima repetición, con el i-ésimo tratamiento

μ = Media general

τ_i = Efecto del i-ésimo nivel del factor tratamiento, donde i= solución nutritiva en base a sales minerales, solución nutritiva en base a efluentes acuícolas.

ε_{ij} = Error experimental

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de modelos lineales mixtos (MLM) con un nivel de significancia del 5 %. Para el análisis de los datos se usó una prueba de ANDEVA y en caso de existir diferencias significativas entre los tratamientos se utilizó la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p \leq 0,05$), utilizando el programa estadístico InfoStat.

RESULTADOS

2.1 Mediciones en el medio de cultivo

Al comparar las medias de los tres tratamientos en los parámetros fisicoquímicos de la solución medidos durante el ensayo, el tratamiento Hp, en comparación al tratamiento Ap, obtuvo valores menores en pH, saturación y concentración de oxígeno disuelto, mientras que entre los tratamientos Ap y RAS los valores fueron similares ($p > 0,05$). Con respecto a la temperatura, se puede observar diferencias entre los tratamientos Ap y Hp, siendo mayor el valor en Hp. En cambio, entre los tratamientos Ap y RAS no se encontraron diferencias significativas. Los tratamientos mantuvieron un rango máximo y mínimo de 11,5 y 17,5 °C en el caso de Ap, de 12,7 y 16,6 °C para RAS, y de 12,5 y 20 °C para Hp. Por otro lado, se encontraron diferencias significativas en la CE siendo mayor en Hp y menor en Ap (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de medias en mediciones de pH, conductividad eléctrica, saturación y concentración de oxígeno disuelto y temperatura, medidos en la solución de cada tratamiento durante los 30 días de ensayo.

1er ensayo	RAS	Ap	Hp
pH	8,2 ± 0,0 a	8,2 ± 0,1 a	6,0 ± 0,3 b
CE (dS m ⁻¹)	2,0 ± 0,1 b	1,5 ± 0,0 c	2,4 ± 0,1 a
Saturación de oxígeno disuelto (%)	87,2 ± 5,2 a	81,7 ± 1,4 a	72,8 ± 3,1 b
Concentración de oxígeno (mg L ⁻¹)	8,6 ± 0,1 a	8,5 ± 0,5 a	7,5 ± 0,4 b
Temperatura (°C)	14,3 ± 0,1 b	14,5 ± 0,4 b	16,8 ± 0,0 a

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media ($n=3$) ± DE.

En la Figura 11, se puede apreciar que la CE del tratamiento Hp presentó un incremento a partir del día 7 del ensayo que fue de 1,5 ± 0,0 a 2,3 ± 0,1 dS m⁻¹ lo cual se explica debido a que en ese momento se aplicó el 50 % restante de la solución nutritiva. Con respecto al tratamiento Ap la CE se mantuvo con un constante aumento, llegando a valores máximos de 1,84 ± 0,0 dS m⁻¹, a diferencia del sistema RAS el cual partió similar a Ap, pero posteriormente, debido a la adición sostenida de NaCl aumentó llegando a valores similares a Hp al término del ensayo. Esta adición correspondió a un tratamiento de control frente a *Saprolegnia* spp.

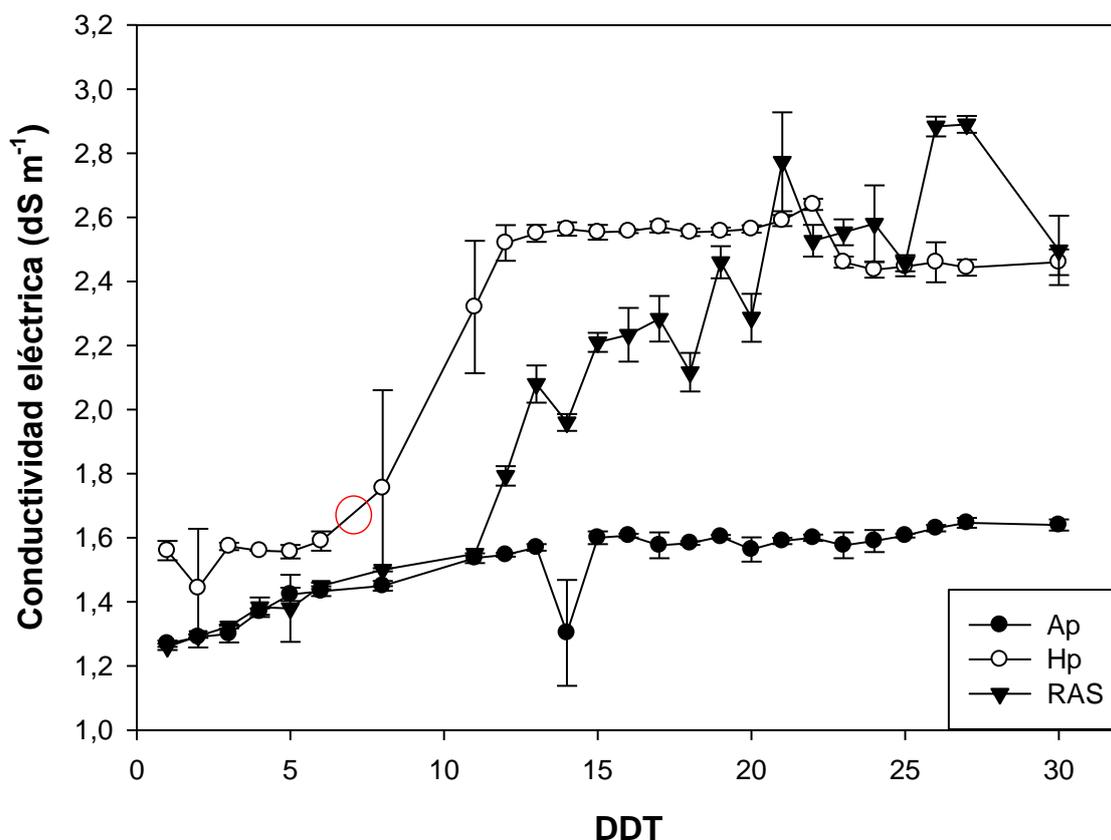


Figura 11. Variación en la conductividad eléctrica (dS m^{-1}) medida periódicamente en la solución de tratamientos acuapónico (Ap), hidropónico (Hp) y recirculante acuícola (RAS) durante un periodo de 30 días. El círculo rojo corresponde a la aplicación del 50 % restante de la solución nutritiva del tratamiento Hp. Días después de trasplante (DDT). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Compuestos nitrogenados en medio de cultivo para peces

Al comienzo del periodo experimental la concentración de NO_2^- y TAN fue más alta, con valores de $0,6$ y $0,7 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente, en el tratamiento Ap, en comparación a RAS. En cambio, el tratamiento RAS tuvo una concentración de NO_2^- de $0,5$ y un TAN de $0,8 \text{ mg L}^{-1}$ y a partir del día 18 del ensayo dichos valores se estabilizaron en $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ en los tratamientos Ap y RAS debido a la estabilización del funcionamiento del biofiltro (Figura 12) (DeLong y Losordo, 2012; Somerville *et al.*, 2014).

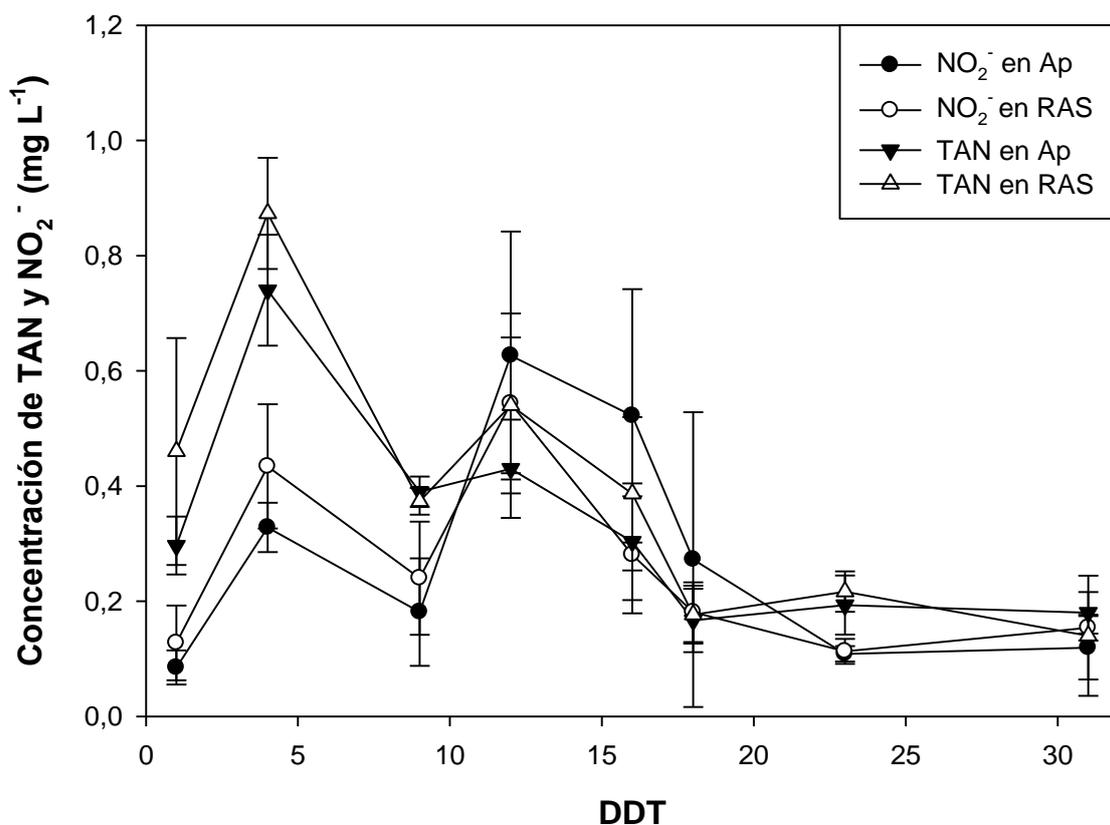


Figura 12. Concentración de nitritos (NO_2^-) y nitrógeno amoniacal total (TAN) (mg L^{-1}) en tratamientos recirculante acuícola (RAS) y acuapónico (Ap) durante un periodo de 30 días. Días después de trasplante (DDT). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Durante los primeros 10 días del ensayo los nitratos presentaron valores similares de $4,1 \pm 1,1 \text{ mg L}^{-1}$ en los tratamientos RAS y Ap (Figura 13). Posteriormente se observó una acumulación progresiva hasta alcanzar un equilibrio en $7,9 \pm 1,4 \text{ mg L}^{-1}$ a partir de los 12 días de iniciado el ensayo. Finalmente, se observa en la última medición que el tratamiento Ap registró una menor concentración de nitratos en comparación al tratamiento RAS, el cual registró $11,8 \pm 0,2 \text{ mg L}^{-1}$.

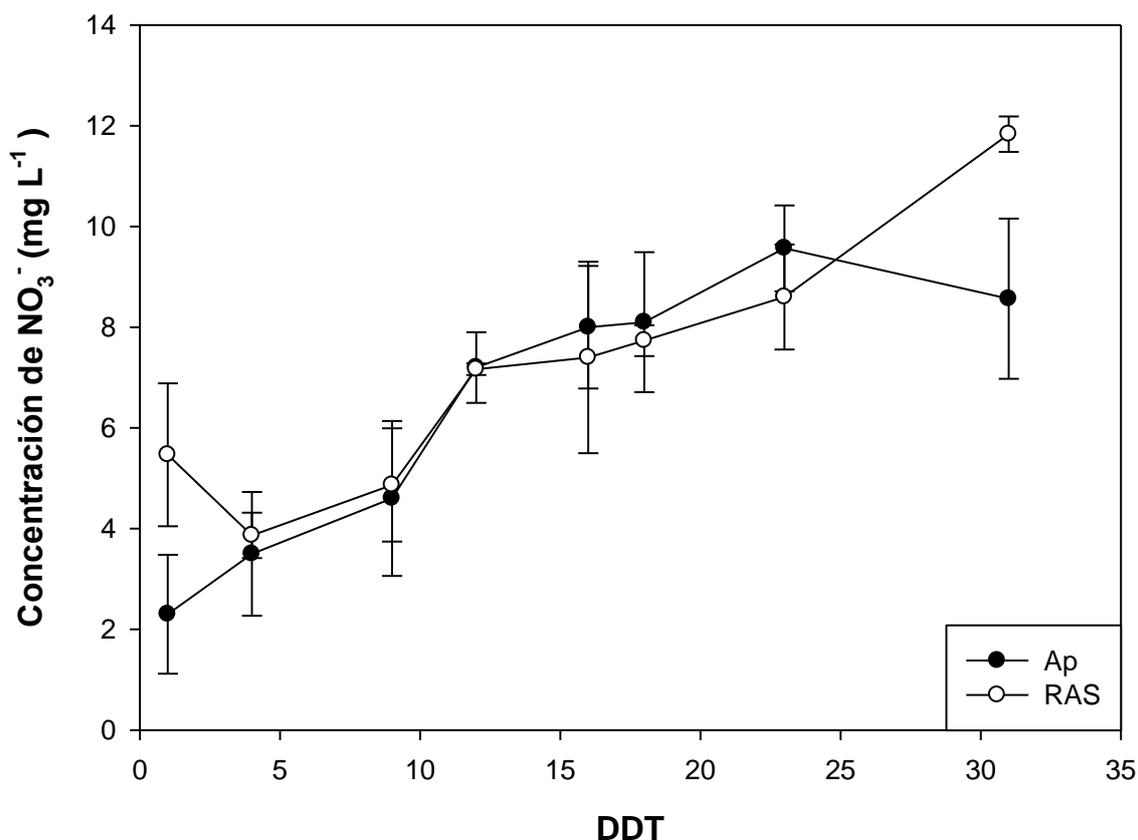


Figura 13. Concentración de nitratos (NO_3^-) (mg L^{-1}) medidos en tratamientos recirculante acuícola (RAS) y acuapónico (Ap) durante un periodo de 30 días. Días después de trasplante (DDT). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

2.2 Cultivo de trucha arcoíris

Ganancia de peso (GP)

Al término del ensayo no se registraron diferencias significativas ($p>0,05$) en la ganancia de peso entre los tratamientos Ap y RAS (Cuadro 2). En el tratamiento Ap se registró una variación de la biomasa total presente en el estanque de $370,1 \pm 18,6 \text{ g estanque}^{-1}$ a $539 \pm 14,1 \text{ g estanque}^{-1}$, lo que correspondió a una variación en la densidad del estanque de $3,7$ a $5,4 \text{ kg m}^3$. A su vez, en el tratamiento RAS se registró una variación en la biomasa total del estanque de $348,3 \pm 34,5 \text{ g}$ a $510,6 \pm 30,8 \text{ g}$, lo que correspondió a un aumento en la densidad de $3,5$ a $5,1 \text{ kg m}^3$.

Factor de conversión alimentaria (FCA)

Respecto al FCA no se obtuvieron diferencias significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos al término del ensayo (Cuadro 2) registrando $1,28 \pm 0,16$ en Ap y $1,37 \pm 0,25$ en Hp.

Largo total (LT)

No se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos Ap y RAS en el LT obtenido al término del ensayo (Cuadro 2). Se registró durante el ensayo una variación media por individuo de $20,4 \pm 0,9 \text{ cm}$ a $22,3 \pm 0,2 \text{ cm}$ por individuo.

Tasa de crecimiento específica (TCE)

En lo relativo a la TCE no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos Ap y RAS (Cuadro 2). Al término del ensayo se determinó un crecimiento medio de $1,34 \pm 0,2 \%$ día⁻¹ y $1,37 \pm 0,2 \%$ día⁻¹ para Ap y RAS respectivamente.

Factor de condición K

Respecto al factor de condición K no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos (Cuadro 2). En el tratamiento Ap se registró una variación de $1,45 \pm 0,07$ a $1,60 \pm 0,08$. A su vez, en el tratamiento RAS se registró una variación de $1,42 \pm 0,10$ a $1,64 \pm 0,07$.

Mortalidad

Durante el periodo experimental no se registraron muertes de peces en ninguno de los estanques siendo la mortalidad de 0 % y la supervivencia de 100 % en ambos tratamientos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros productivos en trucha arcoíris medidos y calculados en función a la variación registrada al término del periodo experimental (30 días).

Parámetro	Ap	RAS
GP (g pez ⁻¹)	$42,2 \pm 4,6$ a	$40,5 \pm 6,4$ a
FCA	$1,28 \pm 0,1$ a	$1,37 \pm 0,2$ a
LT (cm)	$22,0 \pm 0,6$ a	$22,5 \pm 0,3$ a
TCE (% día ⁻¹)	$1,34 \pm 0,2$ a	$1,37 \pm 0,3$ a
K	$1,60 \pm 0,6$ a	$1,64 \pm 0,0$ a
S (%)	$100 \pm 0,0$ a	$100 \pm 0,0$ a

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

2.3 Cultivo de acelga

Concentración de nutrientes en el medio de cultivo de plantas

Al término del ensayo se encontraron diferencias significativas entre las soluciones de los tratamientos Hp y Ap en la concentración de K y Mg (Cuadro 3). Con respecto a la concentración de micronutrientes no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre ambos tratamientos.

Cuadro 3. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva de los tratamientos Hp y Ap, y su relación entre tratamientos al término de un periodo de 30 días.

Elemento	Ap (mg L ⁻¹)	Hp (mg L ⁻¹)	Relación Hp/Ap
P	<0,01mg/L	<0,01mg/L	-
Ca	136,9 ± 6,36 a	136,1 ± 7,47 a	0,99
K	6,3 ± 3,35 b	208,6 ± 14,50 a	33,06
Mg	15,2 ± 1,60 b	31,8 ± 1,91 a	2,08
Zn	1,61 ± 1,46 a	1,99 ± 0,17 a	1,23
Fe	5,23 ± 9,05 a	13,68 ± 11,86 a	2,61
Cu	1,59 ± 1,46 a	2,56 ± 3,10 a	1,61
B	0,19 ± 0,32 a	0,04 ± 0,07 a	0,21
Mn	<0,01mg/L	<0,01mg/L	-

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) ± ES.

Concentración de nutrientes en tejido vegetal

Al comparar la concentración de elementos entre las plantas de los sistemas Ap y Hp solo se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en la concentración de K (Figura 14) siendo significativamente mayor en Hp con $5,3 \pm 0,0\%$ MS respecto a Ap con $2,7 \pm 0,1\%$ MS. Con respecto al Mg se obtuvieron valores de $0,6 \pm 0,0\%$ MS en ambos tratamientos, mientras que el de P fue de $0,3 \pm 0,0\%$ MS para ambos tratamientos. Con respecto al Ca, los valores fueron $1,2 \pm 0,0$ y $1,1 \pm 0,1\%$ MS para los tratamientos Ap y Hp respectivamente.

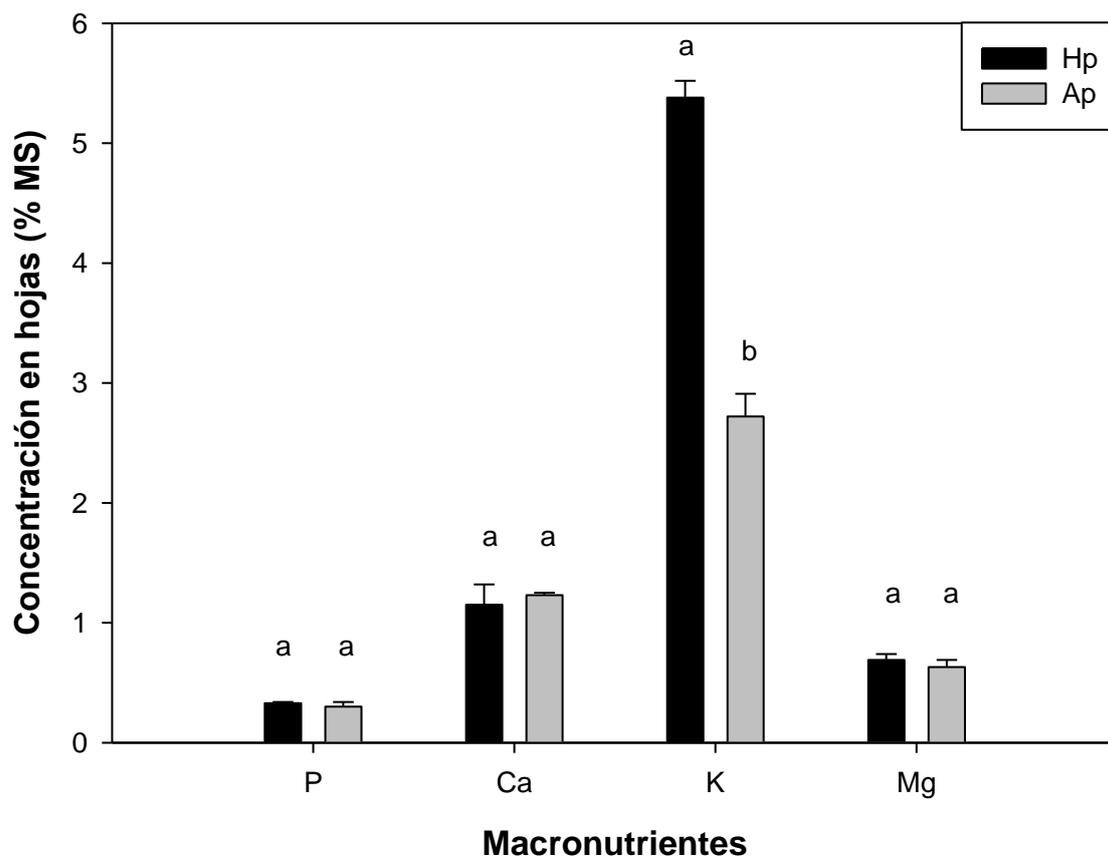


Figura 14. Comparación de la concentración de macronutrientes (% MS) medidos en la sección aérea de plantas de acelgas entre los tratamientos Ap y Hp al término de este ensayo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Respecto a la concentración de micronutrientes al momento de la cosecha solo se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de Mn, obteniendo valores de $147,1 \pm 4,7$ mg kg^{-1} en las acelgas hidropónicas, respecto a las acuapónicas con $9,9 \pm 2,4$ mg kg^{-1} . Como se puede observar en la Figura 15, la concentración de los demás micronutrientes no mostró diferencias significativas entre ambos tratamientos ($p > 0,05$) siendo de $38,2 \pm 15,2$ y $52,8 \pm 15,9$ mg kg^{-1} para Zn, $70,5 \pm 35,7$ y $57,07 \pm 32,7$ mg kg^{-1} para Fe, $19,39 \pm 17,9$ y $7,7 \pm 2,4$ mg kg^{-1} para Cu y $36,3 \pm 10,9$ y $55,4 \pm 8,66$ mg kg^{-1} para B en Hp y Ap respectivamente.

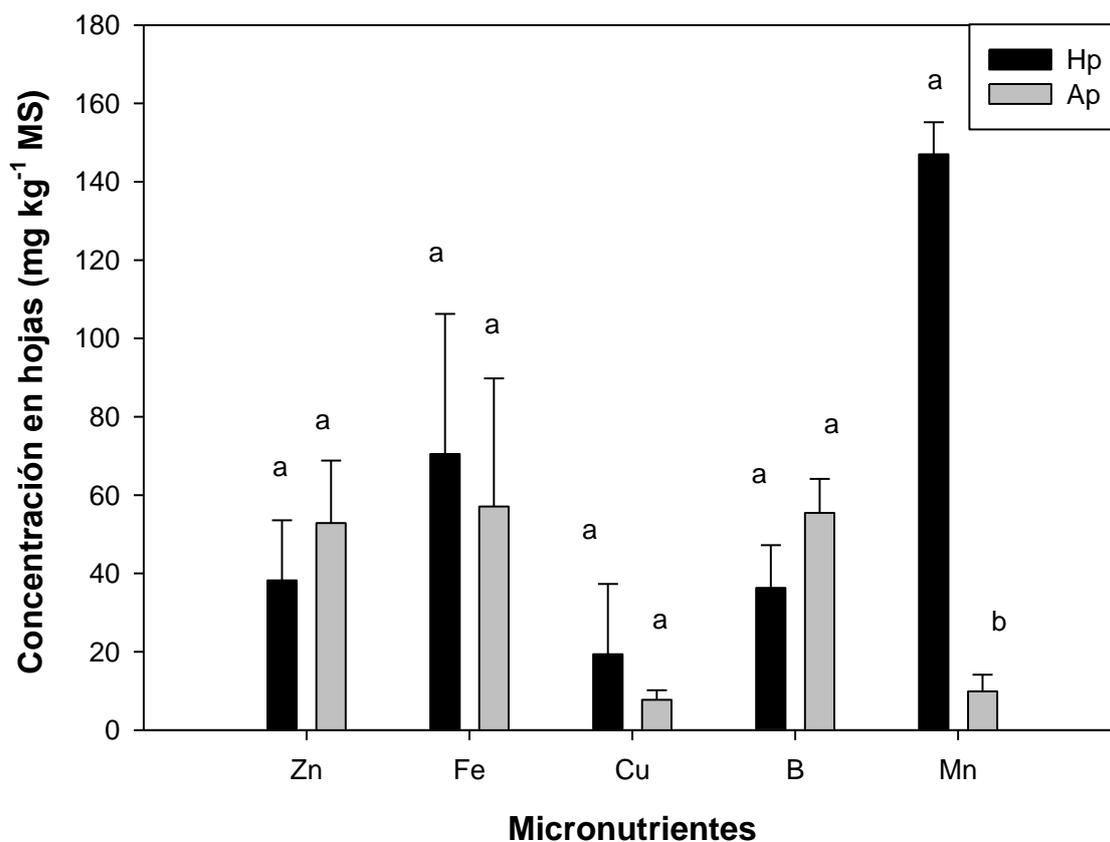


Figura 15. Concentración de micronutrientes en hojas de acelgas acuapónicas e hidropónicas al término del primer ensayo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los elementos ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Materia fresca

En lo referente a la materia fresca no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos (Cuadro 4), obteniendo rendimientos de $0,63$ y $0,79$ kg m⁻² para Ap y Hp respectivamente (Figura 16).

Materia seca

En lo relativo a la materia seca aérea y radical no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos (Cuadro 4). Lo mismo ocurrió con la determinación del porcentaje de peso seco, obteniendo una media entre los tratamientos de $1,7 \pm 0,6$ g planta⁻¹ en materia seca aérea, $0,5 \pm 0,1$ g planta⁻¹ en materia seca radical y $7,2 \pm 1,4$ % en porcentaje de materia seca.

Largo radicular

El tratamiento Ap obtuvo raíces significativamente ($p \leq 0,05$) más largas con un valor de $28 \pm 5,3$ cm respecto a Hp con $23 \pm 4,2$ cm.

Número de hojas

Con relación al número de hojas no se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos, obteniendo $66,6 \pm 0,7$ y $6,6 \pm 0,8$ hojas planta⁻¹ en Ap y Hp respectivamente (Cuadro 4).

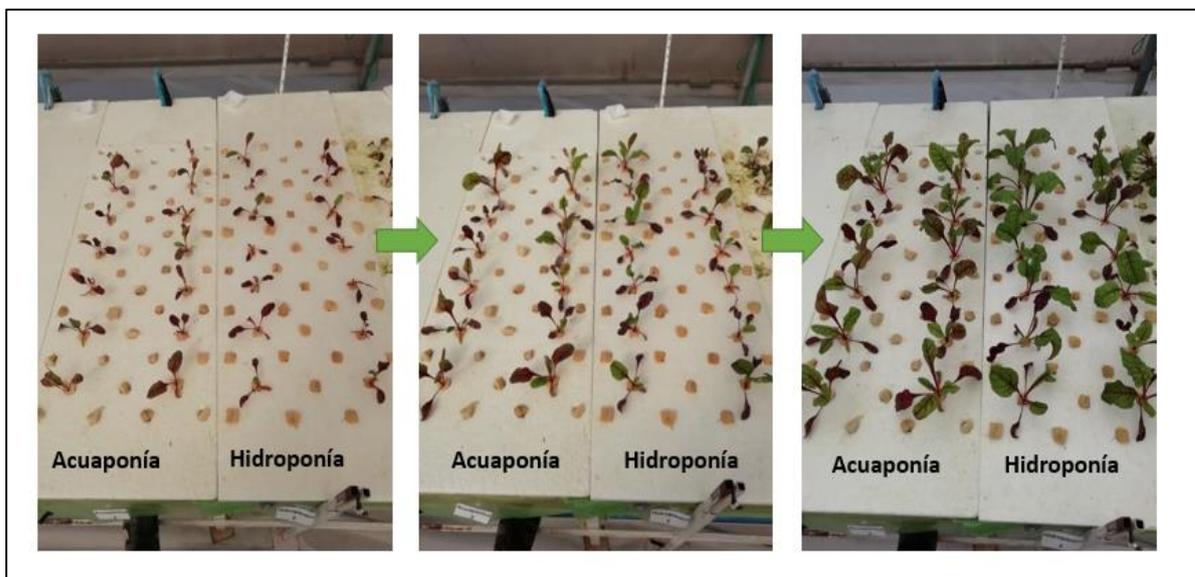


Figura 16. Evolución en el crecimiento de acelgas en tratamiento acuapónico (Ap) e hidropónico (Hp) durante el primer ensayo (30 días).

Cuadro 4. Parámetros productivos en acelga medidos y calculados al término del periodo experimental (30 días).

Parámetro		Ap	Hp
Materia fresca (g planta ⁻¹)	Aéreo	21,3 ± 5,6 a	26,6 ± 9,9 a
	Radical	10,3 ± 3,2 a	8,1 ± 2,6 a
	Total	30,6 ± 7,8 a	34,3 ± 11,5 a
Materia seca (g planta ⁻¹)	Aéreo	1,4 ± 0,3 a	2,0 ± 0,7 a
	Radical	0,5 ± 0,1 a	0,5 ± 0,2 a
% Materia seca	Aéreo	6,8 ± 0,4 a	7,7 ± 0,5 a
	Radical	5,2 ± 0,3 a	6,7 ± 0,7 a
Largo raíz (cm)		28,3 ± 5,3 a	23,0 ± 4,2 b
Número de hojas		6,6 ± 0,7 a	6,6 ± 0,8 a

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos durante cada ensayo ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE

Concentración de fenoles totales

Como se puede observar en el Cuadro 5, no se registraron diferencias significativas ($p>0,05$) en la concentración de fenoles totales entre Ap y Hp, obteniendo $388,6 \pm 45,9$ y $353,6 \pm 20,8$ mg EAG 100g⁻¹ M.F respectivamente.

Capacidad antioxidante

Según el método DPPH para determinar la capacidad antioxidante no se encontraron diferencias significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos (Cuadro 5). Sin embargo, según el método FRAP,

la capacidad antioxidante sería un 19,7% mayor en Ap con $286,7 \pm 55,8$ mg ET 100 g^{-1} M.F respecto a Hp con $233,5 \pm 10,5$ mg ET 100 g^{-1} M.F.

Cuadro 5. Concentración de fenoles totales y capacidad antioxidante según los métodos DPPH y FRAP al término del periodo experimental (30 días).

Tratamiento	Fenoles totales	DPPH	FRAP
	mg EAG 100g^{-1} M.F.	mg ET 100 g^{-1} M.F.	mg ET 100 g^{-1} M.F.
Ap	$388,6 \pm 45,9$ a	$158,8 \pm 41,8$ a	$286,7 \pm 55,8$ a
Hp	$353,6 \pm 20,8$ a	$135,5 \pm 17,5$ a	$233,5 \pm 10,5$ b

Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

DISCUSIÓN

Mediciones en el medio de cultivo

Temperatura

La temperatura media durante este ensayo fue de 14,5 y 16,8 °C para los tratamientos Ap y Hp respectivamente, encontrándose ambos dentro de los rangos óptimos descritos para los sistemas utilizados. Pese a lo anterior, en el caso del tratamiento Ap, la temperatura se acercó más al valor óptimo establecido para el crecimiento de peces y menos a la temperatura óptima para el crecimiento de hortalizas de hoja (18 °C) y el proceso de nitrificación (25 °C) (Resh, 2013; Somerville *et al.*, 2014; Yavuzcan *et al.*, 2017). A pesar de que la mayoría de los estudios han evaluado el efecto de la temperatura del aire en las plantas, la temperatura en la raíz tendría implicancias más críticas en controlar el crecimiento vegetal (Xu y Huang, 2000). Al presentar temperaturas infra óptimas se inhibió el crecimiento y número de raíces y se disminuyó el peso seco radical y la absorción de agua, debido a un aumento en la viscosidad de ésta, reduciendo también la absorción de nutrientes (Affan *et al.*, 2005; Xu y Huang, 2006; Gorbe y Calatayud, 2010). Por otro lado, al evaluar la temperatura en los tratamientos Ap y RAS se registraron valores similares, obteniendo en ambos tratamientos, valores óptimos para el crecimiento y desarrollo de las truchas. En un estudio anterior, Alcarraz (2016) realizó un ensayo de similares características y ubicación, encontrando rendimientos vegetales similares entre acuaponía e hidropónía, sin embargo, debido a que el invernadero contó con climatización pasiva, registró una temperatura media mayor en el invernadero, lo cual influyó en la temperatura de la solución obteniendo una media de 17,8 °C. Por último, Petrea *et al.* (2013) realizaron un ensayo utilizando la combinación de trucha arcoíris y espinaca, registrando una temperatura media de 16,8 °C.

Oxígeno disuelto (DO)

En lo relativo al oxígeno disuelto en el medio de cultivo se registraron rangos de 6,9 a 9,0 mg O₂ L⁻¹ en el tratamiento Ap y de 4,8 a 8,1 mg O₂ L⁻¹ en el tratamiento Hp, obteniendo una media mayor en Ap. Estos valores se encuentran dentro de los rangos óptimos para el crecimiento de plantas, bacterias y peces (Chun y Takakura, 1994; Rakocy *et al.*, 2006; Somerville *et al.*, 2014; Yavuzcan *et al.*, 2017; Al-Rawahy *et al.*, 2019). Lo anterior se explica por la entrada extra de oxígeno al tratamiento Ap, producto de las cascadas que se generan debido a la circulación de agua en el sistema (Spellman y Whiting, 2006), junto a la incorporación de un aireador adicional. Otro factor que influye en este valor es la temperatura, siendo mayor en Hp (16,8 °C), la cual afectó directamente los niveles de DO en la solución, ya que se generó una disminución en la solubilidad del oxígeno (Hutchinson, 2005). Pese a las diferencias observadas entre Ap y Hp, se debe tener en cuenta que, en sistemas acuapónicos, en comparación al hidropónico, se requería una mayor concentración de oxígeno producto del alto requerimiento en peces y bacterias. Por el contrario, los tratamientos Ap y RAS obtuvieron medias similares registrando, en el caso de RAS, un rango de 6,8 a 8,3 mg O₂ L⁻¹. En un ensayo realizado por Petrea *et al.* (2013), el cual también consideró una caída gravitacional del agua, pero con un volumen total mayor del sistema (2,5 m³), reportaron una menor concentración de DO de 7,3 O₂ mg L⁻¹.

Conductividad eléctrica (CE)

En este ensayo se observaron diferencias significativas entre los sistemas siendo mayor en Hp y menor en Ap. El tratamiento Hp registró una media de $2,4 \text{ dS m}^{-1}$ durante el ensayo, valor que se explicaría por la adición de las sales en la solución nutritiva para alcanzar un valor considerado óptimo para hidroponía (Resh, 2013). A su vez, el tratamiento Ap mantuvo valores de CE constantes durante todo el ensayo, manteniéndose en un rango de $1,2$ a $1,8 \text{ dS m}^{-1}$, lo cual, dentro de un punto de vista hidropónico, se encuentra en el mínimo del rango óptimo de la CE, lo que estaría asociado a una menor concentración de iones disponibles para las plantas comprado con Hp (Sharma *et al.*, 2019). Pese a lo anterior, se ha visto que la entrega de nutrientes en la acuaponía funciona de una forma distinta a la hidroponía, generando y liberando nutrientes a una tasa constante diaria (Goddek *et al.*, 2019a). Por otro lado, las diferencias entre los tratamientos Ap y RAS, se deben a que en el tratamiento RAS se registró un aumento mayor de CE asociado a la adición de NaCl al estanque de cultivo (Koeypudsa *et al.*, 2005; Sommerville *et al.*, 2014).

pH

Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos Ap y Hp mientras que el pH fue similar en Ap y RAS. El tratamiento Hp registró valores medios que se encuentran en rangos óptimos para el cultivo hidropónico de hortalizas de hoja (Brechner y Both, 2001; Resh, 2013; Sharma *et al.*, 2019). En cambio, el tratamiento Ap, registró un rango de pH entre $7,9$ a $8,4$ durante el ensayo. Lo anterior, se puede deber al pH alcalino natural del agua, con una alta carga de carbonatos, utilizada para los recambios, encontrándose dentro del rango reportado para el río Maipo fuente de abastecimiento de agua potable (Lorca, 2018). Si bien, el proceso de nitrificación genera una constante acidificación del medio (Delaide, 2017) en este caso, la alta tasa de recambio de agua con un pH alcalino habría suplido dicha acidificación. A estos valores de pH, tanto en Ap como RAS, se observó un aumento en la tasa de nitrificación, junto con una mayor actividad de bacterias benéficas presentes en el sistema, las cuales podrían liberar sideróforos al medio, actuando como quelantes orgánicos de Fe, Mn y Zn (Blanchenton *et al.*, 2012; Somerville *et al.*, 2014; Wongkiew *et al.*, 2017). Sin embargo, de acuerdo con Resh (2013), a un pH mayor a 7 en la solución, también se ve disminuida la disponibilidad de dichos nutrientes, los cuales precipitan y pierden su disponibilidad para la absorción vegetal. En un ensayo realizado por Velichkova *et al.* (2019), con una combinación de trucha arcoíris y lechuga, obtuvieron un pH de $7,9$ con una adición de agua del 10 % del volumen total diario. A su vez, Alcarraz (2016) y Petrea *et al.* (2013), obtuvieron valores de pH menores a $6,9$, sin embargo, no informan la tasa de recambio de agua diaria en sus ensayos.

Compuestos nitrogenados

El pH también tiene influencias en la forma química que predominará el TAN, presentándose en mayor proporción el amoníaco (NH_3) a pH más ácido, y como amonio (NH_4^+) a pH más alcalino (Yavuzcan *et al.*, 2017; Goddek *et al.*, 2019a). En este ensayo los tratamientos Ap y RAS tuvieron un desempeño similar en las concentraciones de TAN y NO_2^- durante los primeros días de ensayo, caracterizados con valores cercanos al máximo del rango óptimo para sistemas de recirculación acuícola. Luego de 18 días de ensayo los compuestos nitrogenados se estabilizaron en valores menores a $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ permitiendo un adecuado cultivo de trucha arcoíris (Somerville *et al.*, 2014; Yavuzcan *et al.*, 2017) siendo este valor correspondiente al comportamiento habitual de estabilización y maduración de un biofiltro (Delong y Losordo,

2012). Esta disminución en los valores de TAN y NO_2^- , es característica del proceso de nitrificación, ya que estos compuestos sirven como base para la posterior transformación aeróbica a nitratos (NO_3^-) (Wongkiew *et al.*, 2017). Lo anterior también se observa en la concentración de NO_3^- en los sistemas, ya que se observó un aumento constante de NO_3^- en ambos tratamientos, llegando a 11,3 y 8,5 mg L^{-1} en los tratamientos RAS y Ap respectivamente. La diferencia entre tratamientos se debió a la absorción de este nutriente por parte de las plantas en Ap (Rakocy *et al.*, 2006). En un ensayo de similares características realizado por Alcarraz (2016), se registraron valores mayores de NO_2^- en los primeros días del ensayo, sin embargo, también alcanzó una concentración final mayor de NO_3^- , llegando a 21 mg L^{-1} . Lo anterior se debe a que, si bien se utilizó una menor tasa de alimentación diaria (1,44 %) que la utilizada en este ensayo (2 %), se trabajó con una mayor densidad de peces en el estanque, de 9,6 kg m^{-3} , lo que se tradujo en un mayor aporte total de nutrientes al sistema, cercano a un 193 % de lo entregado en este ensayo.

Cultivo de trucha arcoíris

Ganancia de peso

Respecto a la ganancia de peso en las truchas evaluadas al término del ensayo, se puede afirmar que no hubo diferencias significativas entre Ap y RAS. En el estudio de Alcarraz (2016) se registró un aumento de peso por trucha de 13,6 g pez^{-1} en 3 semanas, lo que fue menor a lo registrado en este ensayo 41,3 g pez^{-1} . Sin embargo, en el presente ensayo, el periodo experimental correspondió a 4 semanas y se utilizaron peces de mayor tamaño inicial, encontrando incluso una menor TCE en comparación a la obtenida en dicho ensayo (1,93 % día^{-1})

Factor de conversión alimentaria (FCA)

En este ensayo no se observaron diferencias significativas en el FCA entre Ap y RAS, asociado principalmente a que los parámetros ambientales y de calidad de agua los que se mantuvieron en rangos óptimos para el cultivo de trucha arcoíris (Welker *et al.*, 2019), obteniendo una media de 1,33 entre ambos. Con respecto a la realidad en Chile, la Revista Aqua (2015) estableció una FCA de 1,66 como media para el cultivo de trucha arcoíris en sistemas acuícolas. En el ensayo realizado por Alcarraz (2016), evaluando parámetros productivos de truchas arcoíris con un peso inicial de 24,4 g pez^{-1} , encontró un FCA de 0,74 en un sistema acuapónico de condiciones similares nuestro estudio. Lo anterior, se debe a que los peces más pequeños convierten su alimento de una forma más eficiente obteniendo una FCA menor, mientras que al aumentar el peso de los peces disminuye la eficiencia, aumentando así los valores de FCA (Storebakken y Austreng, 1987; Bregnballe, 2015). Así mismo, en un ensayo realizado por Akbulut *et al.* (2002), en donde evaluaron el efecto del peso inicial de truchas arcoíris en la tasa de crecimiento, encontraron que las truchas de un peso inicial de 118,6 g obtuvieron una FCA de 1,65, a diferencia de las truchas cuyo peso inicial fue de 52,2 g, que obtuvieron un FCA de 1,37.

Por otro lado, al evaluar otras especies acuícolas cultivadas en sistemas acuapónicos, Estim *et al.* (2019) obtuvieron valores similares en el FCA, obteniendo 1,47 trabajando con tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico con combinación de poroto (*Phaseolus vulgaris*) y repollo (*Brasica rapa chinensis*). En el caso de Mauricieri *et al.* (2019a), encontraron un FCA de 1,71 utilizando la combinación de carpa europea (*Cyprinus carpio* L.) y hortalizas de hoja (lechuga, acelga y achicoria) en un sistema acuapónico de baja tecnología.

Lennard y Leonard (2006) encontraron valores de FCA entre 0,85 a 1,1 al evaluar distintos subsistemas hidropónicos dentro de un sistema acuapónico, obteniendo 0,85 en un sistema de raíz flotante.

Tasa de crecimiento específica (TCE)

En la TCE no hubo una diferencia significativa entre los tratamientos, registrando valores similares entre ambos de 1,34 % día⁻¹ en Ap y 1,37 % día⁻¹ en RAS, lo cual se relaciona a parámetros similares en los medios de cultivos entre tratamientos. En un ensayo realizado por Sánchez *et al.* (2014), quienes reportaron un incremento de peso 1,06 g día⁻¹ utilizando individuos cuyo peso inicial fue de 32,45 g. En dicho ensayo, se utilizó una densidad similar en el estanque (3,49 kg m⁻³) y se obtuvo largo total final, a un peso de 100 g pez⁻¹, similar al presente ensayo. Otros autores reportaron valores mayores de TCE en trucha arcoíris, obteniendo entre 1,99 a 2,03 % día⁻¹, en un ensayo de 22 semanas, pero en este caso, a diferencia del presente ensayo, con un peso inicial menor (16,5 g) (Okumus y Mazlum, 2002; Dikel *et al.*, 2010).

Factor de condición K

En este ensayo no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos con una media de 1,62 en el factor K en Ap y RAS. Este factor puede ser utilizado para determinar la adecuada densidad en el estanque, y está influenciada por la edad del pez, sexo, estado de maduración, tipo de alimento consumido, entre otros (Morales, 2004). A su vez se estableció que los valores del factor K en el cultivo de trucha arcoíris generalmente están en el rango de 0,8 a 1,8, siendo 1,8 peces bien nutridos, mientras que 0,8 una condición extremadamente pobre, con peces largos y delgados (Barnham y Baxter, 1998). Por tanto, en nuestro ensayo en ambos tratamientos con peces éstos presentaron una excelente condición al término del ensayo.

Mortalidad

Se alcanzó una supervivencia del 100 % en los tratamientos y, con respecto a la mortalidad de los individuos, Woynarovich *et al.* (2011) establecieron un valor normal de un 5 % en un periodo de 4 a 6,5 meses de cultivo para truchas arcoíris con un peso fresco superior a 25 g dentro de un sistema acuícola tradicional de baja escala. Según esta referencia se podría afirmar que el cultivo de truchas en ambos tratamientos se mantuvo dentro del margen normal de la industria. En los ensayos de Alcarraz (2014) y Petrea *et al.* (2013), obtuvieron valores similares con un 100 % de supervivencia. A diferencia de lo anterior, Sánchez *et al.* (2014), reportó una tasa de mortalidad de un 4,9 % en un sistema exclusivamente acuícola.

Gracias a estos antecedentes, se puede afirmar que la incorporación de un cultivo hortícola de acelga a un sistema RAS de producción acuícola no generaría un impacto en los parámetros de cultivo de trucha arcoíris.

Cultivo de acelga

Concentración de nutrientes

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos Ap y Hp en las concentraciones de K y Mg en la solución, siendo mayores ambas en el tratamiento Hp. Sin embargo, en el tratamiento Ap, se obtuvo una relación entre los cationes de Ca, K y Mg de 1,3:2,0:0,3

respectivamente, lo que se ajusta a lo recomendado por varios autores, para permitir una absorción balanceada de estos nutrientes (Schwarz, 1968; Resh, 2013). La menor concentración de K en la solución del tratamiento Ap, generó también una consecuente disminución en la absorción de este nutriente, provocando un menor contenido de K en las hojas de acelga, llegando a un 55,5 % de lo obtenido en el tratamiento Hp. Las bajas concentraciones de K en la solución obtenida en sistemas acuapónicos, son debido a que este elemento no es requerido en grandes concentraciones por los peces, por lo que su concentración en el alimento no satisface los requerimientos en plantas (Seawright *et al.*, 1998; Graber y Junge, 2009; Suhl *et al.*, 2016). De hecho, en un ensayo realizado por Pineda *et al.* (2017) con la combinación de tilapia y lechuga, se determinó que los efluentes acuícolas solo aportarían un 5% del requerimiento total de K en un sistema acuapónico. Por otro lado, también resulta interesante considerar que el consumo de hortalizas con bajas de concentraciones de K puede ser benéficos para pacientes con trastornos crónicos al riñón (D'imperio *et al.*, 2019). Con respecto a las diferentes concentraciones de Mg en la solución obtenidas entre los tratamientos, esto también se ha reportado en otros sistemas acuapónicos, sin embargo, esta diferencia no se vio reflejada en diferentes contenidos de Mg en las hojas. Por último, el tratamiento Ap obtuvo valores significativamente menores que el tratamiento Hp en las concentraciones de Mn en las hojas de acelga, lo que se puede relacionar a una baja disponibilidad de este nutriente debido al pH alcalino reportado durante el ensayo en Ap.

Materia fresca

Los tratamientos Ap y Hp no presentaron diferencias significativas en el rendimiento vegetal al término del ensayo, obteniendo 0,6 kg m⁻² y 0,7 kg m⁻² para los tratamientos Ap y Hp respectivamente. Diversos autores han encontrado rendimientos similares al comparar un sistema hidropónico con un sistema acuapónico utilizando diversas combinaciones entre especies (Licamele, 2009; Graber y Junge, 2009; Pantenella *et al.*, 2012; Suhl *et al.*, 2016), mientras que otros, han reportado que incluso habría un mayor rendimiento en el caso del sistema acuapónico (Alcarraz, 2016; Saha *et al.*, 2016). En un ensayo realizado por Soberg (2016), en el cual comparó rendimientos de acelga variedad 'Bulls Blood' entre un sistema hidropónico y acuapónico obtenidos al término de 5,5 semanas de cultivo, tampoco se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo, este autor obtuvo rendimientos mayores a los registrados en este estudio, lo cual se explica por un mayor periodo experimental y la utilización de una mayor densidad de cultivo, en comparación a este ensayo (27,9 plantas m⁻²), correspondiente a 36 y 33,6 plantas m⁻² para hidroponía y acuaponía respectivamente.

En un trabajo realizado por Nicoletto *et al.* (2018) se comparó el rendimiento de mizuna babyleaf cultivada durante un mes bajo tres aportes nutricionales distintos, correspondientes a un aporte exclusivo de efluentes acuícolas (FW), un aporte de efluentes acuícolas suplementados con P y K (CFW), y un control hidropónico (HC). En dicho trabajo se encontraron diferencias entre los tres tratamientos, siendo mayor el CFW con un rendimiento de 1,07 kg m⁻², seguidos por el tratamiento HC (-7,5 %) y el tratamiento FW (-74,7 %). Las grandes diferencias obtenidas entre el tratamiento HC y FW en dicho ensayo, se deberían a que a solo se trabajó con el efluente acuícola y no con un sistema acuapónico acoplado, por lo que la concentración inicial de iones en el sistema no alcanzó a suplir la demanda total en el cultivo. Los rendimientos obtenidos en los tratamientos CFW y HC fueron mayores a los obtenidos en este ensayo, sin embargo, en dicho ensayo se trabajó con una alta densidad de 3000 plantas m⁻² en un sistema con canales de tipo NFT.

Materia seca

Con respecto a la materia seca, tanto en la parte aérea como radical, no se obtuvieron diferencias significativas ($p \geq 0,05$) entre los tratamientos. Si bien las deficiencias de K se relacionan a variaciones en la partición de materia seca, debido a su relevancia en la regulación osmótica, éstas no se habrían evidenciado en este ensayo debido a su corta duración. En un estudio realizado por Janpen *et al.* (2019) se determinó que la deficiencia de K en menta hidropónica se evidenció recién a partir de los 30 días de crecimiento, disminuyendo el peso seco total y reduciendo a su vez la relación aérea/radical. Por lo anterior, resulta interesante determinar si esta variación en la concentración de K presente en el tejido vegetal generaría modificaciones en estos valores al aumentar el periodo experimental.

Largo radical

La única diferencia respecto a los parámetros productivos vegetales entre tratamientos fue el largo final de raíz, el cual fue mayor en el tratamiento Ap en un 23 %. Lo anterior, puede estar relacionado a la modificación en la estructura radical generada por la diferente disponibilidad y concentración de nutrientes entre los tratamientos discutida anteriormente (Giehl y Wirén, 2014). En un ensayo realizado por Jia *et al.* (2008) al cultivar distintos genotipos de arroz en un sistema hidropónico, establecieron que el crecimiento de raíces se ve reducido a bajas concentraciones de K, sin embargo, una deficiencia moderada de K incrementa el largo de raíz.

Número de hojas

Respecto al número de hojas no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, gracias a condiciones similares de crecimiento aéreo, permitiendo un crecimiento y desarrollo igualable estadísticamente entre Ap y Hp. En el ensayo realizado por Soberg (2016), en el cual comparó rendimientos de acelga variedad 'Bulls Blood' entre un sistema hidropónico y acuapónico obtenidos al término de 5,5 semanas de cultivo se obtuvo un número de hojas similar al final del estudio (7,11 hojas planta⁻¹). Sin embargo, en este estudio se empleó un mayor periodo experimental y una mayor densidad de cultivo en comparación a nuestro ensayo.

Fenoles totales

Al término del ensayo, no se observaron diferencias significativas en la concentración de fenoles totales entre ambos tratamientos. La concentración media de compuestos fenólicos totales en acelgas fue de 371 mg EAG 100 g⁻¹ M.F. Estos valores fueron mayores a lo reportado por Zein *et al.* (2015), quienes determinaron valores medios de 192 mg EAG 100 g⁻¹ M.F, utilizando una variedad de acelga de penca blanca. Esta diferencia se relaciona al color de la variedad utilizada (Vinson y Hontz, 1995; Lurrari *et al.*, 1998), lo que adicionalmente implica una mayor concentración de betalaína (Ninfali y Angelino, 2013).

Capacidad antioxidante

Con respecto a la capacidad antioxidante no se observaron diferencias al medirla según el método DPPH, registrando un valor de 147,1 mg ET 100 g⁻¹ M.F en ambos tratamientos. Sin embargo, al evaluar esta misma variable según el método FRAP, se encontró que el tratamiento Ap tuvo un valor significativamente mayor, registrando un 19 % más que el tratamiento Hp. La variación entre ambos métodos puede deberse a una afinidad diferencial de ciertos compuestos

bioactivos a cada método de medición, ya que por una parte el método FRAP establece la capacidad antioxidante mediante el poder reductor de Fe^{+3} a Fe^{+2} , mientras que en el método DPPH se determina mediante la reducción de radicales libres, pudiendo interferir distintos compuestos adicionales en ambos métodos (Mitic *et al.*, 2013). Además, la diferencia entre los tratamientos según el método FRAP puede deberse a que una reducida disponibilidad de nitrógeno generaría un estrés de tipo abiótico que desencadenaría un aumento en la capacidad antioxidante (Stefanelli *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES PRIMER ENSAYO

Sobre la base de las condiciones experimentales utilizadas en el presente ensayo. Se puede afirmar lo siguiente:

- ✓ Las acelgas “baby leaf” fertilizadas con el aporte de efluentes de un cultivo acuícola de trucha arcoíris obtienen un rendimiento estadísticamente igual a las acelgas cultivadas en hidroponía.
- ✓ Las acelgas “baby leaf” fertilizadas con el aporte de efluentes de un cultivo acuícola de trucha arcoíris obtienen al menos una calidad funcional estadísticamente igual a las acelgas cultivadas en el tratamiento hidropónico.
- ✓ Las truchas arcoíris cultivadas bajo un sistema acuapónico obtuvieron parámetros productivos estadísticamente iguales a los obtenidos en un sistema recirculante de agua convencional.
- ✓ Las hojas de acelgas cultivadas bajo un tratamiento acuapónico obtienen concentraciones de K y Mn significativamente menores que las cultivadas bajo un sistema hidropónico convencional.

Es por lo anterior que se puede afirmar que el sistema acuapónico es una propuesta viable para producir truchas arcoíris y acelga manteniendo los estándares productivos de sistemas convencionales. Sin embargo, resulta importante el establecer si las diferencias en la concentración de nutrientes observadas en el tejido vegetal durante este ensayo pueden generar una disminución en los parámetros productivos al extender el periodo de cultivo.

CAPÍTULO III. CULTIVO DE ACELGAS CON COSECHAS ESCALONADAS EN SISTEMA ACUAPÓNICO INTEGRADO CON EL CULTIVO DE TRUCHA ARCOÍRIS

RESUMEN

La acuaponía combina la acuicultura e hidroponía para producir plantas y peces en un único sistema integrado. El objetivo de este trabajo fue comparar los parámetros productivos, calidad funcional y calidad microbiológica en un cultivo de acelgas (*Beta vulgaris* var. cicla) con cosechas escalonadas cultivadas bajo un sistema acuapónico con la combinación de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) (Ap) versus un cultivo hidropónico (Hp). Para lo anterior se evaluó el rendimiento, concentración de nutrientes en hojas, concentración de fenoles totales, capacidad antioxidante y calidad microbiológica. Por otro lado, el componente acuícola del sistema acuapónico fue comparado contra un sistema acuícola recirculante (RAS) con el fin de evaluar el efecto de la incorporación de un componente vegetal en los parámetros productivos acuícolas. Para esto se evaluó el incremento de peso, el factor de conversión alimentaria (FCA), la tasa de crecimiento específica (TCE), el factor de condición (factor K), la ganancia de peso (GP) y la supervivencia (S). En el presente estudio se encontraron diferencias significativas en los parámetros productivos evaluados al término del cuarto ciclo de crecimiento, obteniendo un largo radical mayor en el tratamiento Hp, mientras que un mayor porcentaje de peso seco, tanto aéreo como radical, en el tratamiento Ap. Adicionalmente, se encontraron diferencias significativas en la concentración foliar de Ca, K, Mg, Zn y Mn entre los tratamientos, obteniendo una mayor concentración en Ca y Zn en el tratamiento Ap. Pese a lo anterior, al evaluar cada ciclo de crecimiento de acelga posterior a una cosecha, se encontró que el efecto del tratamiento no fue significativo, puesto que las diferencias entre tratamientos se explicarían por las diferencias en el peso inicial de la planta y el efecto propio de cada ciclo de crecimiento. Junto a lo anterior, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en la concentración de fenoles totales, capacidad antioxidante según los métodos DPPH y FRAP y análisis microbiológico. Por último, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos Ap y RAS al evaluar los parámetros productivos acuícolas, registrando un valor medio de FCA de 1,29. Lo anterior, establecería la viabilidad de sustituir el aporte de fertilizantes de síntesis química mediante la incorporación de un cultivo de trucha arcoíris, sin afectar el crecimiento, calidad funcional y microbiológica de ambos componentes.

Palabras clave: Acuaponía; *Beta vulgaris*; *Oncorhynchus mykiss*; capacidad antioxidante; calidad microbiológica.

ABSTRACT

Aquaponics combines aquaculture and hydroponics to produce plants and fish in a single integrated system. The objective of this work was to compare productive parameters, functional quality and microbiological quality in a culture of chard (*Beta vulgaris* var. *cicla*) with staggered crops grown under an aquaponic system with the combination of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) (Ap) versus an hydroponic (Hp) culture. Yield, leaf nutrient concentration, total phenol concentration, antioxidant capacity and microbiological quality were evaluated. On the other hand, the aquaculture component of the aquaponic system was compared against a recirculating aquaculture system (RAS) to evaluate the effect of the incorporation of a plant component on the aquaculture production parameters. For this, weight gain (GP), dietary conversion factor (FCA), specific growth rate (TCE), condition factor (K factor) and survival (S) were evaluated. In the present study, significant differences were found in the productive parameters evaluated at the end of the fourth growth cycle, obtaining a longer length in the Hp treatment, whereas a higher dry weight percentage, both aerial and radical, in the Ap treatment. Additionally, significant differences were found in the foliar concentration of Ca, K, Mg, Zn and Mn between the treatments, obtaining a higher concentration in Ca and Zn in the Ap treatment. Despite the above, when evaluating each growth cycle of chard after harvest, it was found that the effect of the treatment was not significant, and the differences between treatments would be explained by the differences in the initial weight of the plant and the effect of each growth cycle. Along with the above, no significant differences were found between the treatments in the concentration of total phenols, antioxidant capacity according to the DPPH and FRAP methods, and microbiological analysis. Lastly, no significant difference was found between the Ap and RAS treatments when evaluating the aquaculture production parameters, registering an average FCA value of 1.29. The foregoing establishes the feasibility of replacing the contribution of chemical synthesized fertilizers by incorporating a rainbow trout culture, without affecting growth, functional and microbiological quality of both aquaponic components.

Keywords: Aquaponics; *Beta vulgaris*; *Oncorhynchus mykiss*; antioxidant capacity; microbiological quality.

INTRODUCCIÓN

La acuaponía se define como un sistema de producción multitrófico de alimentos que combina la producción hidropónica con sistemas de recirculación acuícola (RAS). En este sistema los desechos metabólicos generados por los peces y los restos de su alimentación se interrelacionan con el componente vegetal mediante un flujo másico de nutrientes (Rakocy *et al.*, 2006; Somerville *et al.*, 2014; Goddek *et al.*, 2019a). En la última década se han realizado diversos estudios en sistemas acuapónicos, encontrando diferencias a nivel de solución, en comparación a un sistema hidropónico convencional, en la concentración de nutrientes disueltos, en los parámetros fisicoquímicos, y en la comunidad microbiológica presente (Somerville *et al.*, 2014; Mauricieri *et al.*, 2018; Goddek *et al.*, 2019a). Con respecto a lo anterior, se ha observado que las concentraciones de K disuelto en solución son bajas en sistemas acuapónicos y que, si bien, se han observado rendimientos similares entre sistemas, también se ha visto que deficiencias leves de K pueden generar un aumento en el largo radical. Sin embargo, hasta ahora se desconoce qué sucedería al incrementar el grado y duración de dicha deficiencia, pudiendo producirse una disminución del largo radical (Jia *et al.*, 2008). Asimismo, gran parte de estos ensayos se ha realizado con el propósito de evaluar los efectos de la incorporación de un componente acuícola en un único ciclo de cultivo, encontrando las diferencias anteriormente mencionadas. No obstante, sería interesante evaluar si estas diferencias obtenidas en un único ciclo de cultivo, que no generaron diferencias productivas, ocasionan diferencias en el rendimiento si el periodo de cultivo se alarga.

Según varios autores los sistemas recirculantes acuícolas se pueden trabajar con altas densidades de cultivo, las cuales varían entre 10 a 20 kg m⁻³ (Somerville *et al.*, 2014; Bregnballe, 2015). Sin embargo, en sistemas acuapónicos con baja implementación tecnológica, esta densidad debiera disminuir, ya que la posibilidad de efectuar un adecuado manejo de la calidad del agua disminuye (Mauricieri *et al.*, 2019). Lo anterior entra en conflicto con permitir una máxima acumulación de nutrientes para el componente vegetal, teniendo que generar un ajuste en la cantidad de biomasa cultivada (Rakocy *et al.*, 2006).

Por último, uno de los cuidados más importantes que se debe tener en relación con la producción de alimentos, independiente del sistema con que se produzca, es la contaminación microbiológica. Lo anterior cobra mayor relevancia en sistemas acuapónicos, considerando que la principal entrada de nutrientes en el sistema viene de los desechos acuícolas, por lo tanto, resulta importante esclarecer si la utilización de este sistema tiene implicancias en la calidad microbiológica del alimento (Mauricieri *et al.*, 2018).

HIPÓTESIS

Es posible reemplazar el aporte de fertilizantes de síntesis química en la producción de acelga hidropónica, con cosechas escalonadas mediante la incorporación de un cultivo de trucha arcoíris al circuito hidropónico sin afectar su rendimiento, calidad nutricional e inocuidad.

OBJETIVOS

General

Evaluar si las diferencias en la concentración de nutrientes en el medio de cultivo de un sistema acuapónico, a partir de trucha arcoíris genera diferencias productivas en el cultivo de acelga con cosechas escalonadas, en comparación a un sistema hidropónico convencional.

Específicos

Evaluar si el efecto del aporte de fertilizantes en base a los efluentes acuícolas de un cultivo de trucha arcoíris, generan modificaciones en los parámetros productivos y de crecimiento de un cultivo de acelga con cosechas escalonadas, y realizar una comparación con el sistema hidropónico de tipo raíz flotante.

Evaluar los parámetros de calidad e inocuidad en acelga cultivada bajo un sistema acuapónico, y realizar una comparación con el sistema hidropónico.

Evaluar el efecto de la implementación de un cultivo de acelga con cosechas escalonadas, en los parámetros productivos de trucha arcoíris cultivadas en un sistema de recirculación acuícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

3.1.1 Ubicación del ensayo

El ensayo se realizó en las dependencias descritas en 1.1.1. En el presente estudio se registró una temperatura media entre 6,7 y 31,7 °C durante el día y entre 1,2 y 10,2 °C durante la noche, registrándose una radiación media de 96,1 W m⁻². Tanto para la medición de temperatura como para la medición de radiación, se utilizó una estación registradora de condiciones ambientales (H21-USB, HOBO) con sensores de radiación (S-LIB-M003, HOBO) y temperatura (S-TMB-M002, HOBO). El periodo experimental fue de 60 días realizado entre los meses de mayo, junio y julio del 2019.

3.1.2 Material biológico

Se utilizaron acelgas (*Beta vulgaris* var. cicla) 'Rhubarb Chard' (Semencoop, Italia), las cuales fueron sembradas y cultivadas bajo el mismo protocolo descrito en 1.1.2 hasta el inicio del ensayo.

Se utilizaron juveniles de trucha arcoíris adquiridas de la misma forma descrita en 1.1.2, sin embargo estas truchas tuvieron, al inicio del ensayo, un peso medio de 100,0 ± 8,9 g con un largo total de 20,3 ± 0,7 cm. Posteriormente, a la mitad del ensayo (35 días), se generó un ajuste de masa en los estanques, comenzando este periodo con las mismas truchas, pero con un peso medio por individuo de 133,9 ± 17,5 g y con un largo total de 22,8 ± 1,0 cm.

3.1.3 Tratamiento y diseño experimental

El primer tratamiento correspondió a un sistema acuapónico (Ap), mientras que el segundo tratamiento correspondió a un sistema hidropónico (Hp), ambos descritos en 1.1.3. El periodo experimental fue de dos meses durante los cuales se realizaron cosechas parciales cada dos semanas conformando 4 ciclos de crecimiento, correspondientes al crecimiento de la planta entre cada cosecha, y un total de 3 cosechas escalonadas. Para esto se realizaron cosechas periódicas cada dos semanas de hojas con un largo superior a 10 cm, dejando al menos 3 hojas en expansión. Se utilizó un diseño estadístico con parcelas divididas completamente aleatorizado (DPD) con estructura factorial 2 x 4. En este diseño el primer factor, de dos niveles, correspondió a los tratamientos Ap y Hp, mientras que el segundo factor correspondió al ciclo de crecimiento, con 4 niveles asociados a los 4 ciclos de crecimiento posterior a cada cosecha durante los dos meses de ensayo. Adicionalmente, se consideró como covariable el peso inicial de cada planta al comienzo de cada ciclo de crecimiento. Mientras que, para la comparación de los parámetros medidos al término del ensayo, se utilizó un diseño estadístico completamente aleatorizado (DCA).

En este ensayo se estableció un tratamiento adicional para evaluar el desempeño acuícola en el tratamiento Ap. Dicho tratamiento, consistió en el cultivo de trucha arcoíris en un sistema recirculante acuícola (RAS) descrito en el punto 1.1.3. Sin embargo, debido al mayor periodo experimental, se estableció un reajuste de masa a la mitad del ensayo (cuarta semana). En este

caso se utilizó un DCA para el análisis de todos los parámetros, no obstante, cada periodo de crecimiento del componente acuícola fue analizado y comparado independientemente.

Se trabajó con un total de 12 unidades experimentales (UE), considerando cada comparación independiente entre los tratamientos Hp y Ap (6 UE) y entre los tratamientos Ap y RAS (6 UE) (Figura 17). Con el fin de acercarse a este sistema a la máxima producción de ambos componentes, se aumentó la densidad de cultivo. Para los tratamientos Ap y Hp se utilizó un cultivo de acelgas con una densidad de $60,4 \text{ plantas m}^{-2}$. Mientras que para la comparación entre los tratamientos Ap y RAS, se inició con una media de $10,7 \pm 1,0$ truchas dando una densidad en el estanque de $9,6 \text{ kg m}^{-3}$, y posteriormente, al momento del reajuste de masa, se trabajó con una media de $5,5 \pm 1,0$ truchas por estanque a una densidad de $7,3 \text{ kg m}^{-3}$.

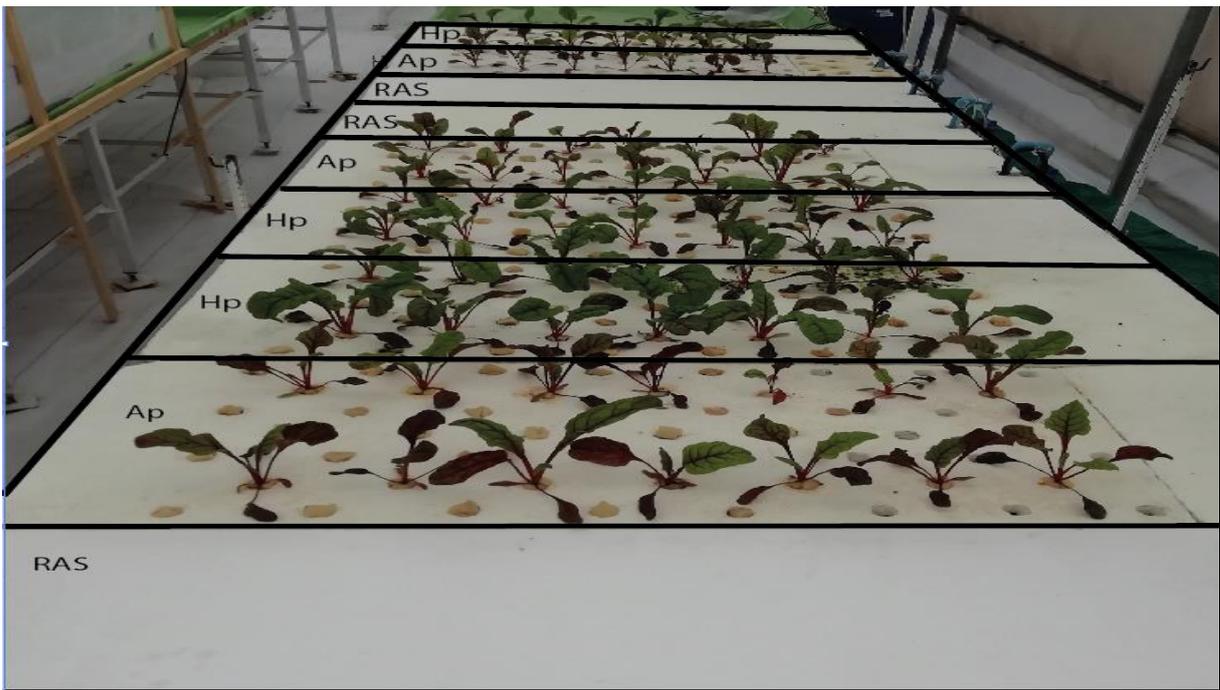


Figura 17. Distribución aleatorizada del ensayo incluyendo las 12 unidades experimentales utilizadas, correspondientes al tratamiento hidropónico (Hp), acuapónico (Ap) y acuícola (RAS).

3.1.3.1 Diseño de unidades experimentales

Tanto la estructura del sistema, flujo de agua, y el diseño de la UE fueron los mismos descritos en el punto 1.1.3.1 y 1.1.3.3 para los tratamientos Ap y RAS respectivamente, siendo la principal diferencia con el ensayo anterior la densidad de cultivo y el periodo experimental.

Con respecto al tratamiento Hp, se utilizó el mismo sistema descrito en 1.1.3.2, sin embargo, se añadió un calefactor de acuario (HG-100, Sebo) programado a $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con el fin de acercarse la solución hidropónica a un valor óptimo (Resh, 2013).

3.1.4 Manejo del experimento

3.1.4.1 Cosecha escalonada y ciclos de crecimiento

Se realizó una cosecha de hojas en los tratamientos Ap y Hp cada 2 semanas, cuyo criterio fue la colecta de hojas completamente extendidas de un largo mayor a 10 cm desde el peciolo al extremo distal de la hoja, dejando en la planta al menos 2 hojas en expansión. La cosecha se realizó cortando el peciolo en la zona más cercana al tallo con una tijera, sin remover a la planta del sistema de cultivo. Se contabilizaron un total de 3 cosechas parciales junto a una cosecha final, en la cual se retiró la planta en su totalidad. Se consideró un ciclo de crecimiento a las 2 semanas entre cada una de las cosechas.

3.1.4.2 Sistema acuapónico

La alimentación del estanque se efectuó de la misma forma descrita en la sección 1.1.4.2. Se estableció un recambio diario de agua a un 5 % del volumen total en cada UE. Cada adición o recambio de agua se realizó con agua potable tratada con tiosulfato de sodio al 5 %. Adicionalmente, se realizó una limpieza y remoción de lodos cada 2 días, dejando un 20 % aproximadamente del contenido total de lodos, con el fin de aumentar la cantidad de nutrientes mineralizados en la solución. También se estableció una limpieza semanal de las bombas y tuberías del sistema para evitar su mal funcionamiento.

3.1.4.3 Sistema recirculante acuícola

El manejo de este sistema se efectuó similar a lo descrito en 1.1.4.3.

3.1.4.4 Sistema hidropónico

El manejo de esta UE se efectuó igual a lo descrito en 1.1.4.4.

3.1.4.5 Manejos adicionales en este ensayo

En los días previos al ensayo, se presentó una alta presencia de oídio (*Podosphaera pannosa*) en el invernadero donde se realizó el experimento. Debido a lo anterior, 5 días antes de comenzar el periodo experimental, la zona del ensayo fue cubierta completamente con polietileno, mientras que al resto del invernadero se le aplicó Miclobutanil (Agrospec, Chile) a una concentración de 0,4 mL L⁻¹. A los plantines que posteriormente se utilizaron en el ensayo, se les aplicó Timorex Gold (BIOMOR, Israel) a una concentración de 2,5 ml L⁻¹ y se les dejó en una zona aislada al exterior al invernadero durante 2 días.

Adicionalmente, cuando los tratamientos Ap y Hp presentaron valores de TAN y NO₂⁻ mayores a 1 mg L⁻¹, se aumentó la tasa de recambio diaria de agua a un 30 % del volumen total del estanque y, posteriormente, cuando los niveles de estos compuestos se acercaron al rango óptimo para los peces, la tasa se redujo progresivamente hasta el 5 % diario. Lo anterior se realizó en tres ocasiones durante la primera y segunda semana del ensayo.

Los dos factores mencionados anteriormente pudieron tener efectos en la mortalidad en peces registrados durante la primera mitad del ensayo (Apéndice II).

3.2 Métodos

3.2.1 Mediciones en el medio de cultivo

Durante este ensayo, la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de la solución se realizó utilizando la misma metodología y programación descrita en el punto 1.1.4.1, considerando las mediciones de temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto (DO) en los tratamientos Ap, Hp y RAS y en el caso de los tratamientos Ap y RAS la concentración de TAN, NO₂⁻ y NO₃⁻ en la solución.

3.2.2 Cultivo de trucha arcoíris

En este ensayo se registró el peso (P) y largo total (LT) de cada uno de los individuos del estanque, expresando los datos en g pez⁻¹ y cm respectivamente. Esta medición se realizó al comienzo, a la mitad (35 días) y al término del ensayo (60 días), siguiendo la metodología expuesta en 1.2.2.

Posteriormente se calculó el factor de conversión alimentaria (FCA), la tasa de crecimiento específica (TCE), el factor de condición (K), la ganancia de peso (GP) y la supervivencia (S) para el primer y segundo periodo de crecimiento, según las mismas fórmulas utilizadas en 1.2.2.

3.2.3 Cultivo de acelga

3.2.3.1 Análisis mineral

Al término del ensayo se realizó un análisis de la concentración de nutrientes (P, K, Ca, Mg, Mn, B, Fe, Cu y Zn) en las hojas de acelga y la solución de los tratamientos Hp y Ap. Para lo anterior se utilizó la metodología descrita en 1.2.3.1.

3.2.3.2 Concentración de clorofila en hojas

Al término del ensayo se determinó la concentración de clorofila en cada UE. Para esto, se seleccionaron 5 plantas al azar por UE y se realizó una medición por planta en la última hoja completamente expandida, en una hoja en expansión y en una hoja basal, y posteriormente se calculó la media entre dichas mediciones (Saha *et al.*, 2016). Las mediciones se realizaron con un medidor de concentración de clorofila (MC-100, EE.UU.), cuya área de medición es de 2 x 3 mm. Los datos se expresaron según el índice CCI.

3.2.3.3 Materia fresca

Se generó una medición semanal de la biomasa en plantas. Se seleccionaron 5 plantas al azar por UE al inicio del ensayo, a las cuales se les midió el peso de forma semanal, incluyendo los pesos antes y después de cada cosecha, hasta el término del ensayo. Para efectuar dicha medición, se retiró la planta de la bandeja de cultivo y se dejó escurrir los restos de la solución nutritiva hasta que esta terminara de gotear, en ese momento se midió utilizando una balanza portátil (Care CQT202, EE.UU.) y posteriormente fue devuelta a la UE. Posterior a cada cosecha, se registró el peso fresco de la totalidad de lo cosechado por UE con una balanza portátil (Care CQT202, EE.UU.).

Por último, al momento de finalizar el ensayo, se determinó el peso fresco total, peso fresco aéreo y radical, utilizando la misma metodología descrita en 1.2.3.2.

3.2.3.4 Materia seca

Se midió el peso seco aéreo y radical al término del cuarto ciclo de crecimiento, para posteriormente calcular el porcentaje de peso seco aéreo y radical de estas 5 plantas por UE utilizando la misma metodología descrita en 1.2.3.3. Los datos fueron expresados como g planta⁻¹.

3.2.3.5 Largo radical

Se realizó la medición del largo radical al término del ensayo siguiendo la misma metodología expuesta en 1.2.3.4.

3.2.3.6 Medición de área foliar

Al término del cuarto ciclo de crecimiento se realizó una estimación del área foliar en cada planta mediante una fotografía. Para lo anterior, dos plantas fueron escogidas al azar en cada UE y se separaron todas las hojas por planta. Estas hojas fueron puestas en una superficie blanca y se tomaron fotografías en formato JPEG con una cámara digital (EOS Rebel t3, Canon Inc, Japón) (Figura 18). Posteriormente de cada imagen se generó un aumento de contraste para determinar el área foliar efectiva con un programa editor de recursos gráficos (Image J, National Institute of Health, EE.UU.) según la metodología descrita por Chaudhary *et al.* (2012).

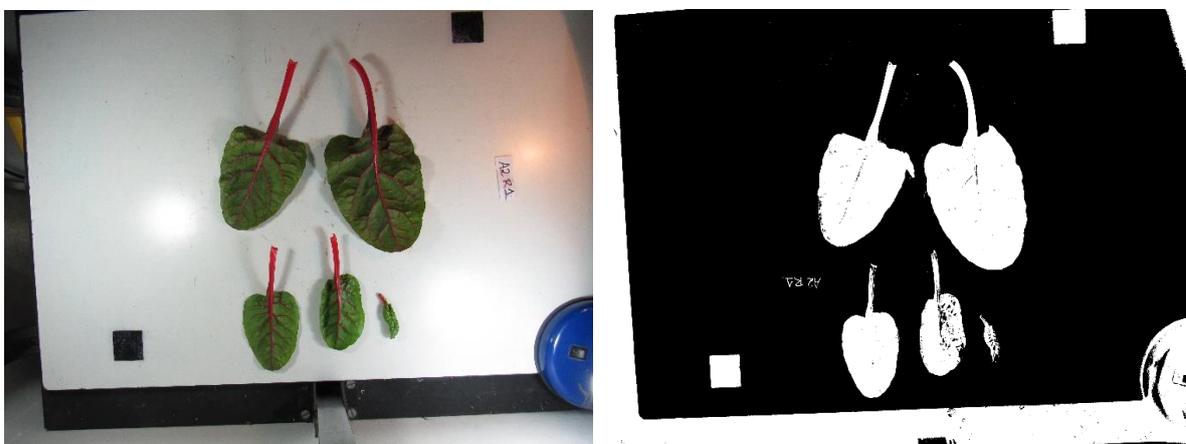


Figura 18. Utilización del Software Image J para el aumento de contraste en muestras de acelga con el fin de determinar su área foliar.

3.2.3.7 Incremento porcentual y tasa de crecimiento relativa

Con los datos de materia fresca se calculó la tasa de crecimiento relativa (TCR) en cada ciclo de cultivo y fue expresada en % día⁻¹. Adicionalmente se calculó el incremento porcentual (IP) en la materia fresca posterior a cada ciclo de cultivo y fue expresada en %. Ambos cálculos se realizaron según la fórmula descrita en la Figura 19.

<p><u>Tasa de crecimiento relativa</u></p> $TCR: \frac{\ln * (M_2 / M_1)}{T_{1-2}} \quad (\text{Turnbull } et \text{ al.}, 2012)$ <p><u>Incremento porcentual</u></p> $IP: \frac{M_2 * 100}{M_1}$ <p>Donde: M_1: Materia fresca al inicio del ciclo de cultivo M_2: Materia fresca al término del ciclo de cultivo T_{1-2}: Duración del ciclo de cultivo (días)</p>
--

Figura 19. Fórmula utilizada para la determinación de la tasa de crecimiento relativa (TCR) e incremento porcentual (IC) en el cultivo de acelga.

3.2.3.8 Determinación de la concentración de compuestos bioactivos en plantas

Al finalizar el ensayo se consideraron 3 plantas cosechadas por UE en los tratamientos Ap y Hp para la extracción de los compuestos. Las labores de cosecha y la extracción se efectuaron mediante la metodología descrita en 1.2.3.6.

Una vez obtenida la extracción se determinó la concentración de fenoles totales y la capacidad antioxidante según los métodos DPPH y FRAP. La determinación de concentración de fenoles totales se efectuó mediante la metodología descrita en 1.2.3.6.3, mientras que la determinación de los métodos DPPH y FRAP se realizó mediante los protocolos descritos en 1.2.3.6.2 y 1.2.3.6.1 respectivamente.

3.2.3.9 Análisis microbiológicos

Al término del ensayo, fueron seleccionadas 3 plantas al azar por cada UE en los tratamientos Hp y Ap. Dichas plantas fueron cosechadas retirándolas de la bandeja y desechando la parte radical cuidando de no ponerla en contacto con las hojas. Cada grupo de hojas cosechadas por planta fue introducido independientemente en bolsas estériles (Model 400 Bags 6141, Inglaterra) y se les añadió 90 mL de agua peptonada estéril (APT, Merk Darmstadt, Alemania). Posteriormente, la bolsa se sometió a un homogeneizador (IUL, Masticator Classic, España) durante 1 min, para efectuar la mezcla de su contenido. Una vez realizado el procedimiento descrito, se extrajo 1 mL de la solución por bolsa y se generaron diluciones seriadas. Cada una de estas diluciones tuvo tres repeticiones de cultivo en placas Petri independientes (Figura 20). Posteriormente, se efectuó un conteo en placa de colonias y se generó una media entre las tres placas para cada muestra, las cuales, finalmente, fueron expresadas como el logaritmo de las unidades formadoras de colonias por gramo ($\log \text{ UFC g}^{-1}$).

Se utilizaron distintos medios, técnicas y condiciones de cultivo según la metodología de Venegas *et al.* (1990) realizándose un recuento expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de colonias (UFC) de aerobios mesófilos, hongos y levaduras y enterobacterias, las cuales se describen a continuación:

- Recuentos de aerobios mesófilos (RAM)

Se realizó una incubación mediante una siembra en profundidad en el medio agar de conteo de placas (PC) (Merck, Alemania) a 37 °C durante 48 h. Posteriormente se realizó un recuento de las colonias que se desarrollaron en placa.

- Enterobacterias

Se realizó una incubación mediante una siembra en profundidad en el medio agar rojo violeta (ARV) (Merck, Alemania) a 37 °C durante 48 h. Posteriormente se realizó un recuento de las colonias que se desarrollaron en la placa.

- Hongos y levaduras

Se realizó una siembra en superficie en el medio PC (Merck, Alemania) con un pH ajustado a 4, durante 7 días a 25 °C. Posteriormente se realizó un recuento de las colonias que se desarrollaron en placa.

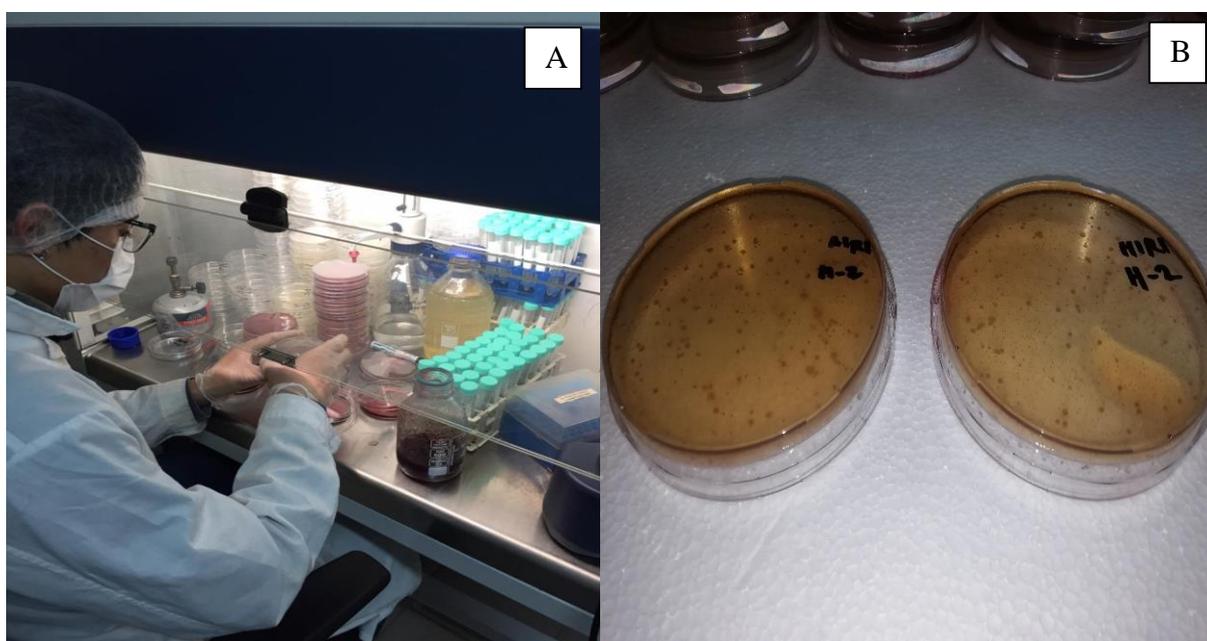


Figura 20. Análisis microbiológico en muestras de tejido vegetal en los tratamientos acuapónico (Ap) e hidropónico (Hp). (A) Preparación de medio agar para recuento en placa de aerobios mesófilos. (B) Cultivo en placa durante 48 h a 37 °C en tratamientos Ap y Hp.

3.3 Análisis estadístico

Para determinar las posibles diferencias entre tratamientos al término de ensayo en base a los datos obtenidos en este estudio, se utilizó el siguiente modelo matemático:

a. Diseño estadístico completamente aleatorizado

$$\gamma_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

γ_{ij} = Variable respuesta en la j-ésima repetición, con el i-ésimo tratamiento

μ = Media general

τ_i = Efecto del i-ésimo nivel del factor tratamiento, donde i= solución nutritiva en base a sales minerales, solución nutritiva en base a efluentes acuícolas.

ε_{ij} = Error experimental

Por otro lado, para determinar las posibles diferencias en el crecimiento entre tratamientos al término de cada ciclo de crecimiento en base a los datos obtenidos en este estudio, se utilizó el siguiente modelo matemático:

b. Diseño bifactorial completamente aleatorizado con parcelas divididas

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + c_j + (\tau * c)_{ij} + b_k + pi + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Variable respuesta en la κ -ésima repetición, con el i-ésimo tratamiento y el j-ésimo ciclo

μ = Media general

τ_i = Efecto del i-ésimo nivel del factor tratamiento, donde i= solución nutritiva en base a sales minerales, solución nutritiva en base a efluentes acuícolas.

c_j = Efecto del j-ésimo nivel del factor ciclo, donde j= 1,2,3,4

$(\tau * c)_{ij}$ = efecto de la interacción del i-ésimo nivel del factor tratamiento con el j-ésimo nivel del factor ciclo

b_k = Efecto asociado a la parcela principal

pi = Peso inicial de planta en cada ciclo de crecimiento

ε_{ijk} = Error experimental

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de modelos lineales mixtos (MLM) con un nivel de significancia del 5 %. Para el análisis de los datos se usó una prueba de ANDEVA y en caso de existir diferencias significativas entre los tratamientos se utilizó la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p \leq 0,05$), utilizando el programa estadístico InfoStat.

RESULTADOS

4.1 Mediciones en medio de cultivo

En el caso del pH y concentración de oxígeno, el tratamiento Hp registró una media menor en comparación al tratamiento Ap y RAS, entre los cuales no se presentó una diferencia significativa ($p > 0,05$). Con respecto a la temperatura, los tratamientos Ap y RAS se mantuvieron similares, mientras que el sistema Hp registró valores medios mayores. El tratamiento Ap mantuvo una temperatura entre 10,8 y 16,2 °C, el tratamiento RAS entre 10,5 y 16,1 °C mientras que el tratamiento Hp de 18,8 y 20,0 °C. En la CE, al igual que en el ensayo anterior, se encontraron diferencias significativas entre los tres tratamientos (Cuadro 6), siendo mayor en el tratamiento Hp y menor en el tratamiento Ap. La única diferencia significativa con respecto del ensayo anterior se registró en el porcentaje de saturación de oxígeno las cuales, en este ensayo, fueron similares entre los tres tratamientos.

Cuadro 6. Comparación de medias en mediciones de pH, conductividad eléctrica, porcentaje de oxígeno disuelto, concentración de oxígeno y temperatura medidos en la solución de cada tratamiento.

	RAS	Ap	Hp
pH	7,2 ± 0,3 a	7,3 ± 0,4 a	5,8 ± 0,7 b
CE (dS m ⁻¹)	2,1 ± 0,1 b	1,9 ± 0,2 c	2,4 ± 0,3 a
Oxígeno disuelto (%)	70,8 ± 3,3 a	70,6 ± 4,1 a	70,7 ± 2,2 a
Concentración de oxígeno (mg L ⁻¹)	7,0 ± 0,6 a	7,0 ± 0,9 a	6,2 ± 0,6b
Temperatura (°C)	13,2 ± 1,7 b	14,0 ± 1,6 b	19,4 ± 2,1 a

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE (n=3) ± DE.

En la Figura 21, se puede apreciar que a partir del día 9 del ensayo hubo un alza en la CE del tratamiento Hp llegando a $2,52 \pm 0,04$ dS m⁻¹ el día 13 del ensayo, lo cual, al igual que en el ensayo anterior, coincide con el relleno del 50 % restante de la solución nutritiva. Adicionalmente, durante el primer ciclo del ensayo existe una desviación estándar en las medias de los tratamientos Ap y RAS, ya que en ese periodo se aumentó la tasa de recambio de agua en el sistema. Por último, se puede observar que en el periodo final comenzaron a aumentar los valores en los tratamientos Ap y RAS debido, principalmente, a una mayor acumulación de iones en la solución llegando en la última semana a valores de 2,2 dS m⁻¹ en Ap y 2,3 dS m⁻¹ en RAS.

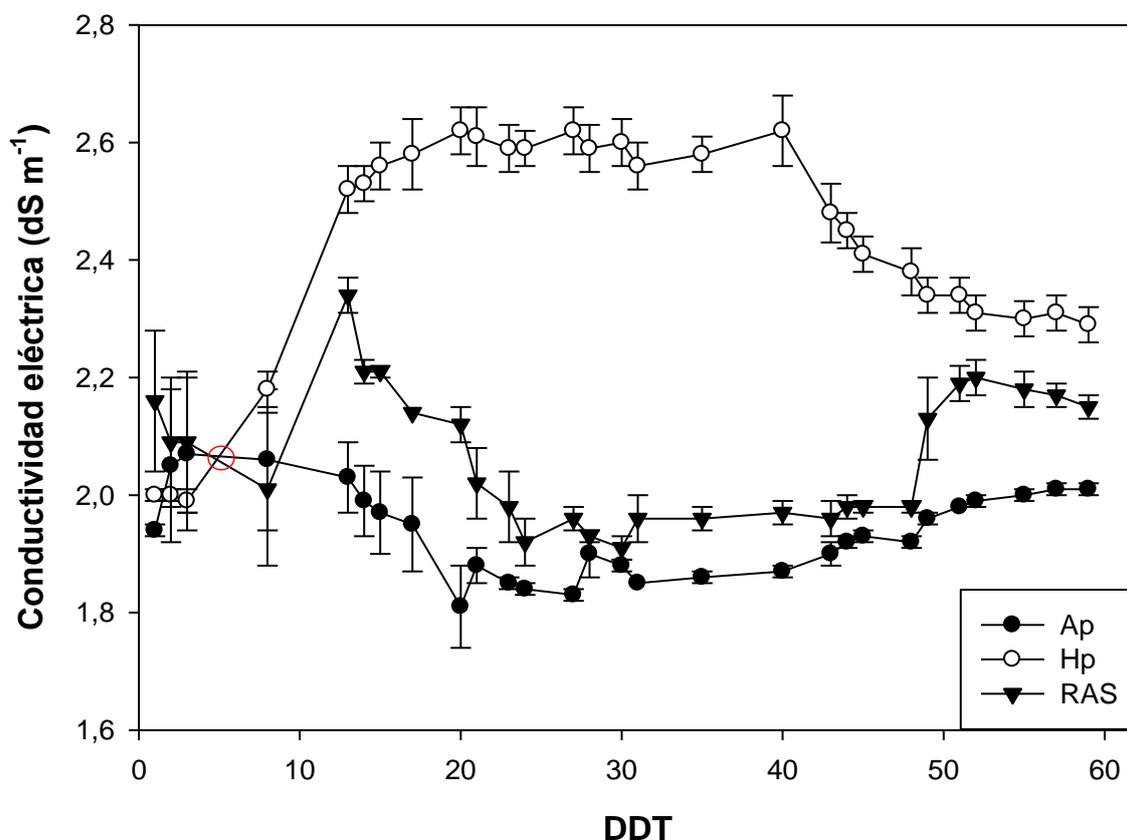


Figura 21. Variación en la conductividad eléctrica (dS m^{-1}) medida periódicamente en la solución de los tratamientos Ap, Hp y RAS durante un periodo de 2 meses. El círculo rojo corresponde a la aplicación del 50 % restante de la solución nutritiva del tratamiento Hp. Días después de trasplante (DDT). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Compuestos nitrogenados en medio de cultivo para peces

Como se puede apreciar en la Figura 22, existió una alta variabilidad en los niveles de TAN durante las dos primeras semanas del presente ensayo en Ap y RAS, lo cual se relaciona a la alta densidad por estanque. Lo anterior se resolvió aumentando los recambios de agua, logrando así, el día 26 del ensayo, una nueva estabilización del biofiltro, lo cual se puede evidenciar debido a las bajas concentraciones de TAN y NO_2^- que se observan a partir de dicha medición.

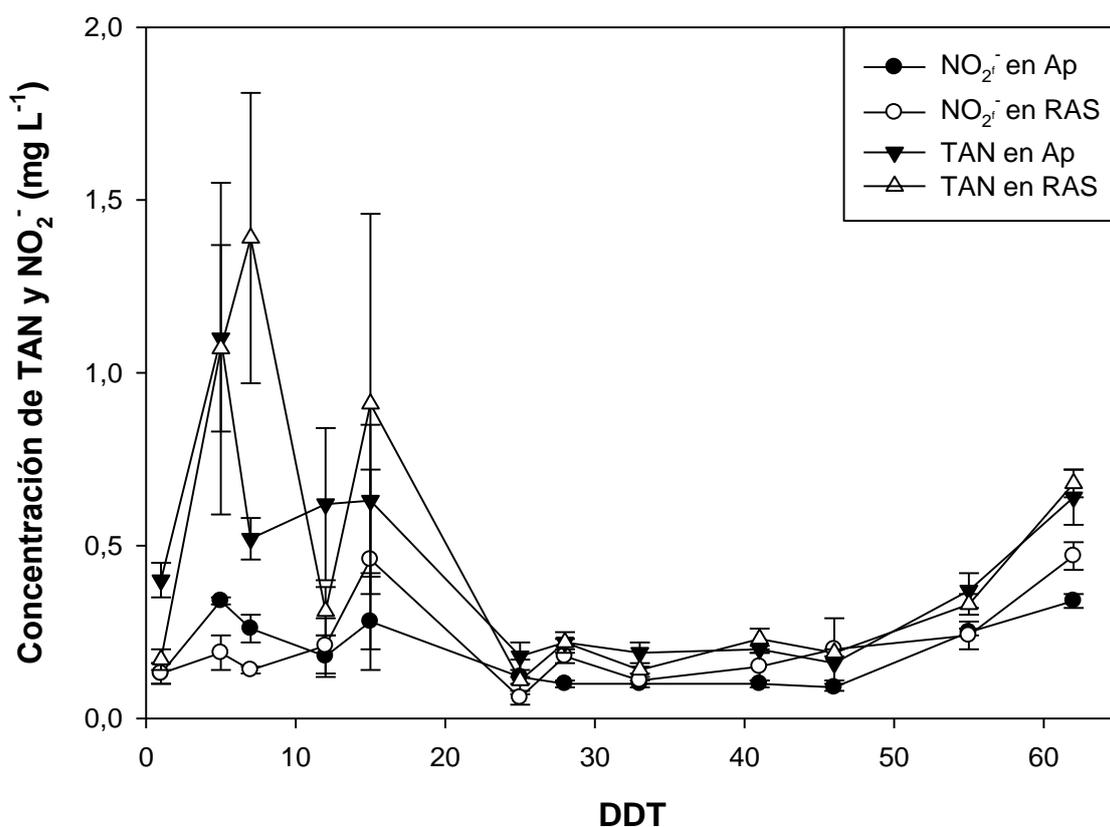


Figura 22. Concentración de NO_2^- y TAN en tratamientos RAS y Ap durante el segundo cultivo de acelga. Días después de trasplante (DDT). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Como se puede observar en la Figura 23, durante el comienzo de este ensayo las concentraciones de nitratos presentaron una alta variabilidad asociada a un aumento en la tasa de recambio de agua. Posteriormente, una vez logrado el equilibrio del sistema y generado un reajuste de biomasa animal, se observa que paulatinamente comienzan a aumentar las concentraciones, llegando a valores de $10,3 \pm 2,0$ y $18,2 \pm 1,4$ mg L^{-1} en los tratamientos Ap y RAS respectivamente.

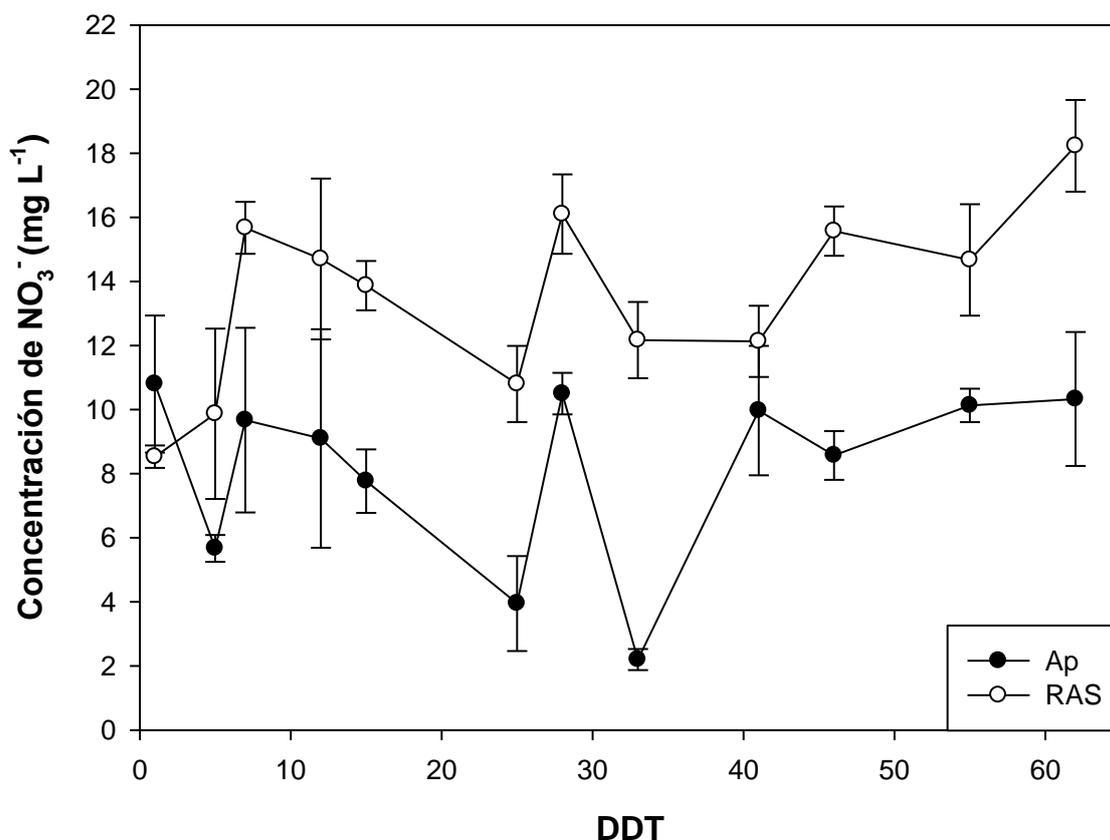


Figura 23. Concentración de NO_3^- en tratamientos RAS y Ap durante el segundo cultivo de acelga. Días después de trasplante (DDT). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

4.2 Cultivo de truchas arcoíris

Producto del ajuste realizado el día 33 del ensayo en las UE acuícolas, la comparación se realizó a partir de este punto, sin embargo, los datos asociados a la primera mitad del ensayo se pueden observar en el Apéndice II.

Ganancia de peso (GP)

No se observaron diferencias significativas ($p>0,05$) en la ganancia de peso en truchas entre los tratamientos acuícolas (Cuadro 7). En el periodo comprendido desde 35 al 62 del ensayo, la biomasa total por estanque tuvo una variación desde los 731 ± 21 hasta 940 ± 29 g estanque⁻¹ en Ap, lo que corresponde a una variación en la densidad de 7,3 a 9,4 kg m⁻³. En el tratamiento RAS se observó una variación de 742 ± 24 g estanque⁻¹ a 966 ± 116 g estanque⁻¹ lo que representa una variación en la densidad que va de 7,4 a 9,6 kg m⁻³.

Factor de conversión alimentaria (FCA)

Respecto al FCA, no se obtuvieron diferencias significativas ($p>0,05$) entre Ap y RAS, registrando una media de $1,29 \pm 0,36$ entre los tratamientos.

Largo total (LT)

Los tratamientos no demostraron diferencias significativas en el LT (Cuadro 7) obteniendo una variación de 22,3 a 25,1 cm en el tratamiento Ap y de 22,9 a 24,4 cm en el tratamiento Hp.

Tasa de crecimiento específica (TCE)

No se presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos obteniendo una media de $1,04 \pm 0,19$ % día⁻¹. Lo anterior representa un crecimiento diario de 1,63 y 1,72 g día⁻¹ en Ap y RAS respectivamente.

Factor de condición K

En este parámetro no se encontraron diferencias significativas al término del estudio (Cuadro 7). Al término de la segunda mitad del ensayo, el factor de condición K aumentó su valor respecto a la primera mitad, comenzando desde $1,4 \pm 0,3$ g cm⁻¹ hasta $1,6 \pm 0,1$ g cm⁻¹ al término del ensayo.

Supervivencia

Se pudo observar que en ambos tratamientos se registró una supervivencia del 94,4 % y, por lo tanto, una mortalidad del 6,5 % sin encontrar diferencias significativas entre Ap y RAS.

Cuadro 7. Parámetros productivos en trucha arcoíris medidos y calculados en función a la variación presente al término del segundo periodo experimental (60 días).

Parámetro*	Ap	RAS
GP (g pez ⁻¹)	48,9 ± 13,8 a	51,9 ± 14,0 a
FCA	1,33 ± 0,4 a	1,24 ± 0,4 a
LT (cm)	25,1 ± 1,0 a	24,4 ± 0,4 a
LE (cm)	22,5 ± 1,1 a	22,0 ± 0,3 a
TCE (% día ⁻¹)	0,98 ± 0,19 a	1,11 ± 0,21 a
K (g cm ⁻¹)	1,6 ± 0,0 a	1,6 ± 0,4 a
S (%)	94,4 ± 9,6 a	94,4 ± 9,6 a

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE (n=3) ± DE.

*Valores calculados a partir del reajuste de masa realizado el 25 de junio

4.3 Cultivo de acelga

Concentración de nutrientes en el medio de cultivo de plantas

Al término del ensayo, a diferencia del anterior, no se registraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos en la concentración de K disuelto en la solución (Cuadro 8). Por otro lado, se obtuvieron diferencias ($p \leq 0,05$) en la concentración de Ca, siendo mayor en el tratamiento Hp obteniendo un 39% más que en Ap.

Cuadro 8. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva hidropónica y acuapónica al término del ensayo.

Elemento	Ap (mg L ⁻¹)	Hp (mg L ⁻¹)	Relación Hp/Ap
P	<0,01	<0,01	-
Ca	135,0 ± 4,2 b	188,6 ± 15,3 a	1,39
K	4,1 ± 4,0 a	4,4 ± 2, 1a	1,07
Mg	12,9 ± 1,0 b	20,4 ± 0,9 a	1,57
Zn	1,23 ± 0,1 a	1,25 ± 0,2 a	1,01
Fe	0,60 ± 0,4 a	1,29 ± 0,9 a	2,15
Cu	0,05 ± 0,0 a	0,06 ± 0,0 a	1,2
B	0,03 ± 0,1 a	0,12 ± 0,2 a	4
Mn	<0,01	<0,01	-

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas corresponden al análisis estadístico del ensayo. Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) ± ES.

Concentración de nutrientes en tejido vegetal

Al igual que en el ensayo anterior, se observaron diferencias significativas en las concentraciones foliares de K entre los tratamientos, obteniendo en el tratamiento Ap un 67,43 % de lo obtenido en Hp (Figura 24). Adicionalmente, a diferencia del ensayo anterior, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en las concentraciones de Mg y Ca. En el caso de las concentraciones de Mg, el tratamiento Hp obtuvo valores mayores, con un $0,9 \pm 0,0$ % MS, mientras que el tratamiento Ap obtuvo $0,78 \pm 0,1$ % MS. Respecto al ensayo anterior, las concentraciones de Ca en Ap fueron mayores alcanzando $1,47 \pm 0,5$ % MS, mientras que Hp tuvo $0,81 \pm 0,1$ % MS.

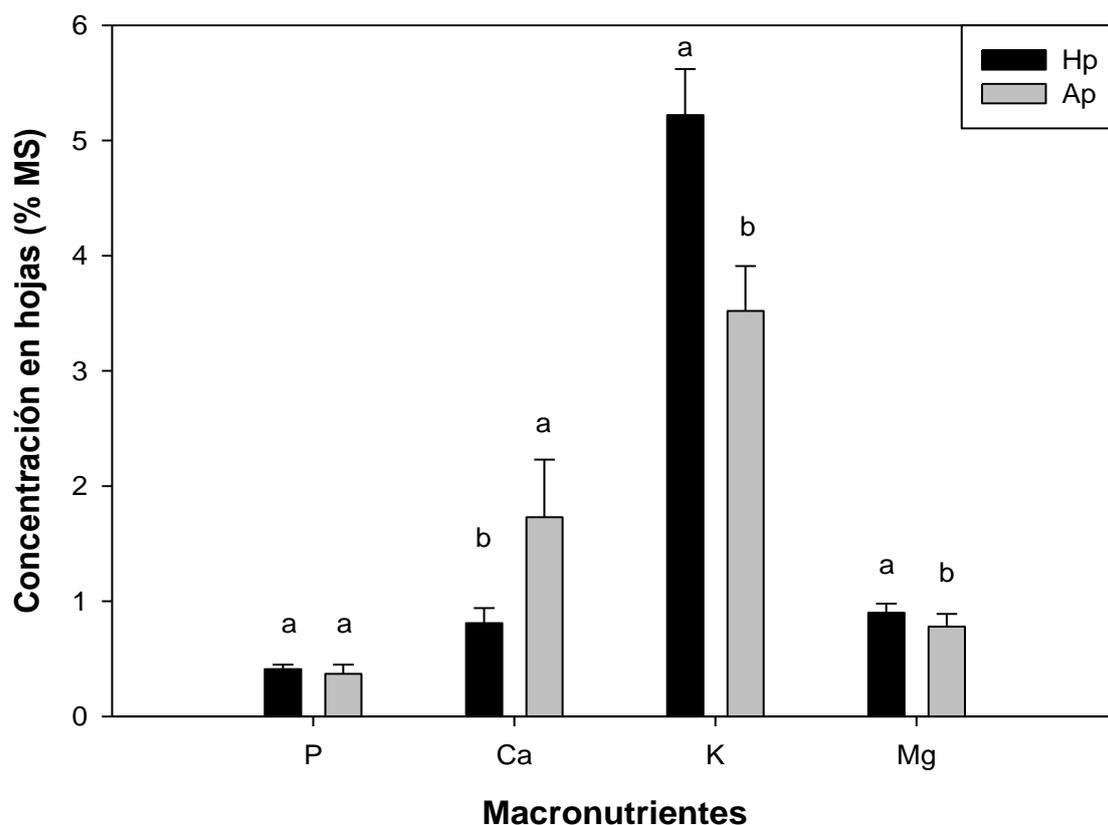


Figura 24. Comparación de la concentración de macronutrientes (% MS) medidos en la sección aérea de plantas de acelgas entre los tratamientos Ap y Hp al término de este ensayo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Con respecto a los micronutrientes, se pudieron observar diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el contenido de Zn en las hojas de acelga. El tratamiento Ap obtuvo $127,4 \text{ mg kg}^{-1}$ mientras que Hp tuvo $37,3 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 25). Adicionalmente, al igual que en el ensayo anterior, se observó una menor concentración de Mn en Ap, presentando $74,2$ y $37,1 \text{ mg kg}^{-1}$ en Hp y Ap respectivamente. Adicionalmente se observó en las acelgas acuapónicas una clara clorosis intervenal asociada a la diferencia de Mn recién descrita (Figura 26).

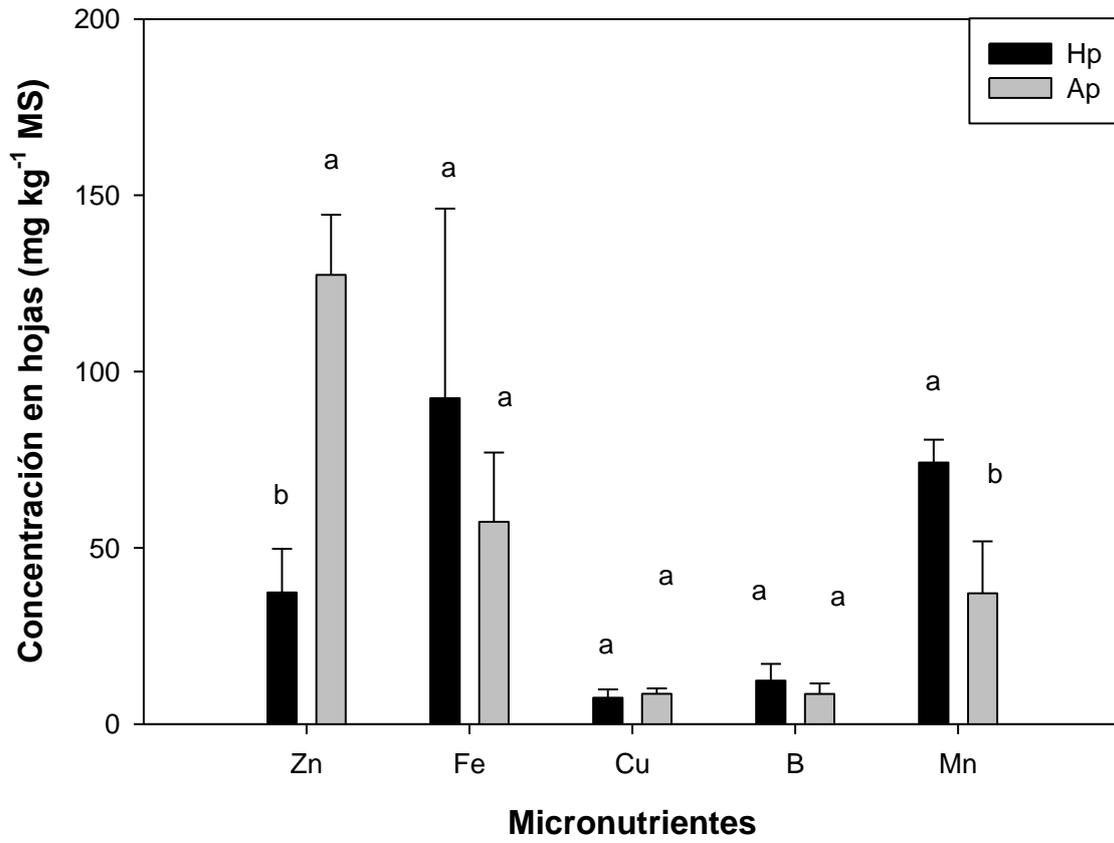


Figura 25. Concentración de micronutrientes en tejido vegetal de acelgas acuapónicas e hidropónicas al término del segundo ensayo. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.



Figura 26. Sintomatología visual de clorosis intervenal asociado a déficit de Mn en tratamiento acuapónico (Ap) al término del segundo ensayo.

Materia fresca final

Al comparar la materia fresca obtenida al término del último ciclo de crecimiento, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo Ap menor, obteniendo cerca de un 56 % del peso fresco aéreo obtenido en el tratamiento Hp (Cuadro 9). Con respecto a la acumulación total de biomasa, incluyendo lo cosechado, el tratamiento Hp obtuvo $4,03 \pm 0,6 \text{ kg m}^{-2}$ y Ap $2,38 \pm 0,9 \text{ kg m}^{-2}$ (Figura 27). En el segundo periodo de crecimiento se alcanzó el mayor peso fresco de planta en cada tratamiento, reportando valores de 24,06 y 34,34 g planta^{-1} en los tratamientos Ap y Hp respectivamente (Figura 28).



Figura 27. Evolución en el crecimiento de acelgas en tratamiento acuapónico (Ap) e hidropónico (Hp) durante el segundo ensayo (8 semanas).

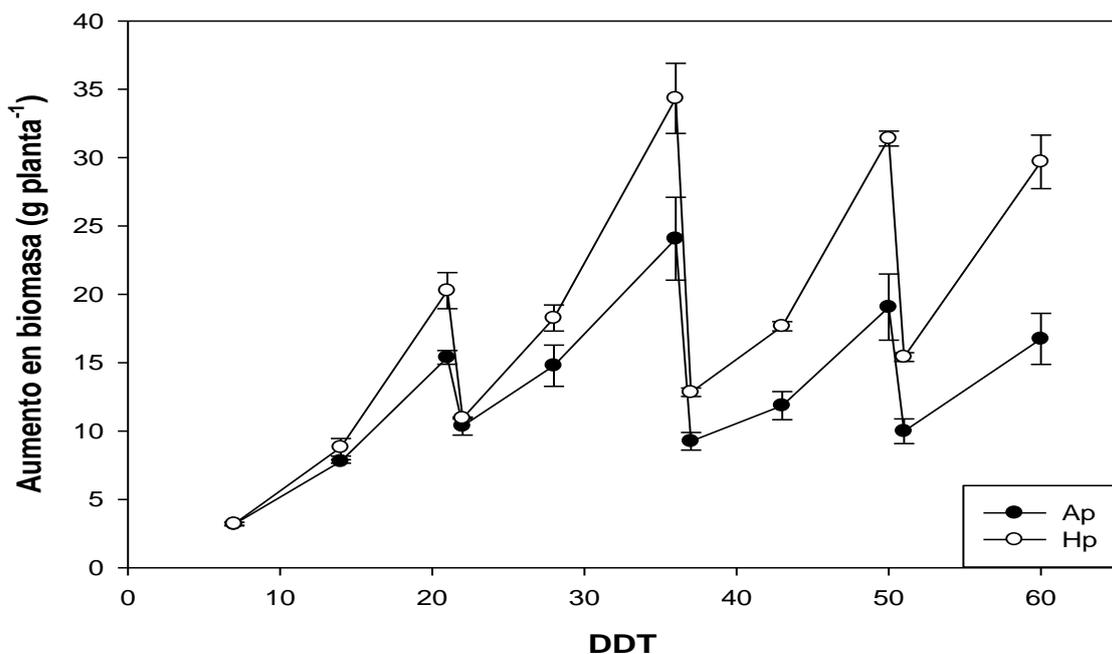


Figura 28. Evolución de la biomasa de acelgas posterior a las cosechas establecidas para determinar el incremento porcentual en el presente ensayo. Días después de trasplante (DDT). Los valores corresponden a la media entre UE (n=3) \pm DE.

Materia seca

Pese a las diferencias observadas entre los tratamientos en la materia fresca, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) al comparar el peso seco aéreo y radical al término del cuarto ciclo de crecimiento, sin embargo, sí se observaron diferencias en el porcentaje de peso aéreo y seco, siendo mayor en ambos casos en Ap con $8,7 \pm 1,6$ y $8,2 \pm 2,1$ % respectivamente (Cuadro 12).

Largo radical

Con respecto al largo radical se observó que Hp registró valores significativamente ($p \leq 0,05$) mayores que Ap, obteniendo en el tratamiento Ap cerca de un 43 % del largo obtenido en el tratamiento Hp (Cuadro 9).

Concentración de clorofila

En lo relativo la concentración de clorofila en hojas al término del último ciclo de cultivo si se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo mayor Hp con $38,1 \pm 4,5$ CCI, mientras que en Ap se obtuvo $23,8 \pm 11,3$ CCI.

Área foliar

No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el área foliar al término del cuarto ciclo de crecimiento entre los tratamientos. El tratamiento Ap obtuvo $465,1 \pm 47$ cm² planta⁻¹ mientras que Hp obtuvo $466,5 \pm 134$ cm² planta⁻¹.

Cosecha

Al evaluar las cosechas realizadas al término de cada ciclo de cultivo (Cuadro 9), se puede observar que en cada cosecha el tratamiento Ap registró un 53 %, 31 % y 36 % de kg m⁻² menos que Hp lo cual, en sumatoria junto a la biomasa aérea final, representa un rendimiento de 2,3 kg m⁻² y 4,0 kg m⁻² en Ap y Hp respectivamente.

Cuadro 9. Parámetros productivos en acelga medidos y calculados al término del cuarto ciclo de crecimiento.

Parámetro		Ap	Hp
Materia fresca (gr planta ⁻¹)	Aéreo*	10,50 ± 4,8 b	18,68 ± 1,5 a
	Radicular	6,08 ± 6,2 b	8,95 ± 6,2 a
	Total*	16,74 ± 7,1b	29,69 ± 7,6 a
Materia seca (gr planta ⁻¹)	Aéreo*	0,84 ± 0,3 a	1,29 ± 0,4 a
	Radicular	0,47 ± 0,1 a	0,41 ± 0,0 a
Porcentaje de materia seca (%)	Aéreo	8,74 ± 1,6 a	6,88 ± 0,3 b
	Radicular	8,26 ± 2,1 a	4,59 ± 0,4 b
Largo raíz (cm)		23,80 ± 11,3 b	54,8 ± 26,9 a
Nivel de clorofila (CCI)		29,32 ± 8,6 b	38,18 ± 4,5 a
Área foliar (cm ² planta ⁻¹)		465,1 ± 47 a	466,5 ± 134 a
Cosecha (kg m ⁻²)	1	0,22 ± 0,02	0,46 ± 0,12
	2	0,73 ± 0,98	1,05 ± 0,91
	3	0,54 ± 0,13	0,84 ± 0,18

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos durante cada ensayo ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE (n=3) ± DE.

* Valores obtenidos al término del último ciclo de crecimiento del ensayo.

Incremento porcentual, tasa de crecimiento relativa e interacción ciclo-tratamiento

Al momento de evaluar la interacción entre el ciclo de crecimiento y el tratamiento se observó que no fue significativa, con un p-valor de 0,1109, mientras que, al evaluar los factores independientemente, solo se encontró una significancia ($p \leq 0,05$) en el factor ciclo de crecimiento (Figura 29) y en la covariable de “peso inicial”. Por otro lado, al comparar cada ciclo de crecimiento en función de su tasa de crecimiento relativa (TCR) y el incremento porcentual posterior a cada cosecha (IP), solo se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los tratamientos durante la primera mitad del ensayo. Se encontró una mayor TCR en el tratamiento Hp en el primer y segundo ciclo de crecimiento (Cuadro 10), mientras que solo se encontró una diferencia en el segundo ciclo de crecimiento en el IP, siendo mayor en Hp.

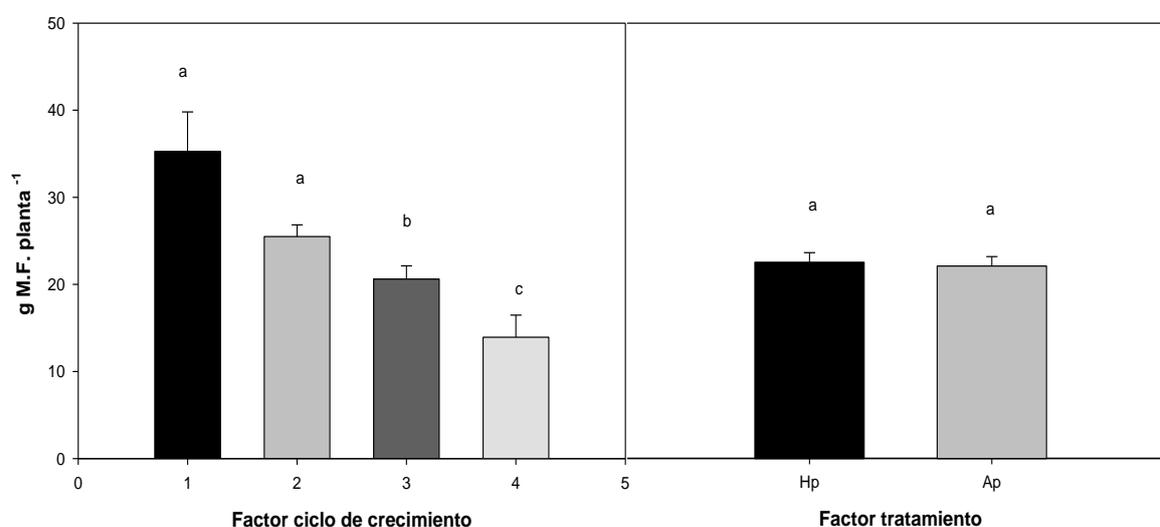


Figura 29. Comparación de cada uno de los factores de forma independiente para la variable $g \text{ planta}^{-1}$ durante los ciclos de crecimiento pertenecientes a segundo ensayo (8 semanas). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Cuadro 10. Evolución en el incremento de biomasa posterior a cada cosecha en tratamientos Hp y Ap.

Ciclo de crecimiento	Incremento porcentual posterior a cada cosecha (IP) (%)		Tasa de crecimiento relativa (TCR) (% día ⁻¹)	
	Hp	Ap	Hp	Ap
1	633,2 \pm 53,9 a	482,9 \pm 19,3 a	13,1 \pm 1,0 a	11,2 \pm 0,4 b
2	314,0 \pm 22,9 a	230,3 \pm 14,3 b	8,1 \pm 0,9 a	5,9 \pm 0,7 b
3	244,9 \pm 07,6 a	204,9 \pm 17,7 a	6,3 \pm 0,3 a	5,0 \pm 1,0 a
4	192,2 \pm 08,8 a	166,9 \pm 05,4 a	4,6 \pm 0,6 a	3,6 \pm 0,4 a

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas en cada periodo de crecimiento posterior a cada cosecha ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE.

Calidad vegetal

Fenoles totales

Como se puede observar en el Cuadro 11, al término del presente ensayo no se encontró una diferencia significativa ($p > 0,05$) en la concentración de fenoles totales entre Ap y RAS.

Capacidad antioxidante

Lo mismo ocurrió con la capacidad antioxidante, la cual, medida por dos métodos (FRAP y DPPH), no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos.

Cuadro 11. Concentración de fenoles totales y capacidad antioxidante según los métodos DPPH y FRAP al término del ensayo.

Tratamiento	Fenoles totales	DPPH	FRAP
	mg EAG 100g ⁻¹ M.F.	mg ET 100g ⁻¹ M.F.	mg ET 100g ⁻¹ M.F.
Ap	329,3 ± 78,3 a	98,2 ± 8,2 a	222,0 ± 9,6 a
Hp	381,7 ± 20,2 a	89,3 ± 3,7 a	220,5 ± 5,0 a

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas ($p \leq 0,05$).

Análisis microbiológicos

No se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos en ninguno de los grupos de microorganismos estudiados (Figura 30). En el caso de aerobios mesófilos se reportaron valores de $4,0 \pm 0,1$ y $4,2 \pm 0,1$ log UFC g⁻¹ para Ap y Hp respectivamente, mientras que en enterobacterias, el tratamiento Ap tuvo $3,7 \pm 0,1$ log UFC g⁻¹ y Hp $3,8 \pm 0,3$ log UFC g⁻¹. Respecto a hongos y levaduras se obtuvieron $2,3 \pm 0,2$ log UFC g⁻¹ y $2,3 \pm 0,4$ log UFC g⁻¹ para Ap y Hp respectivamente.

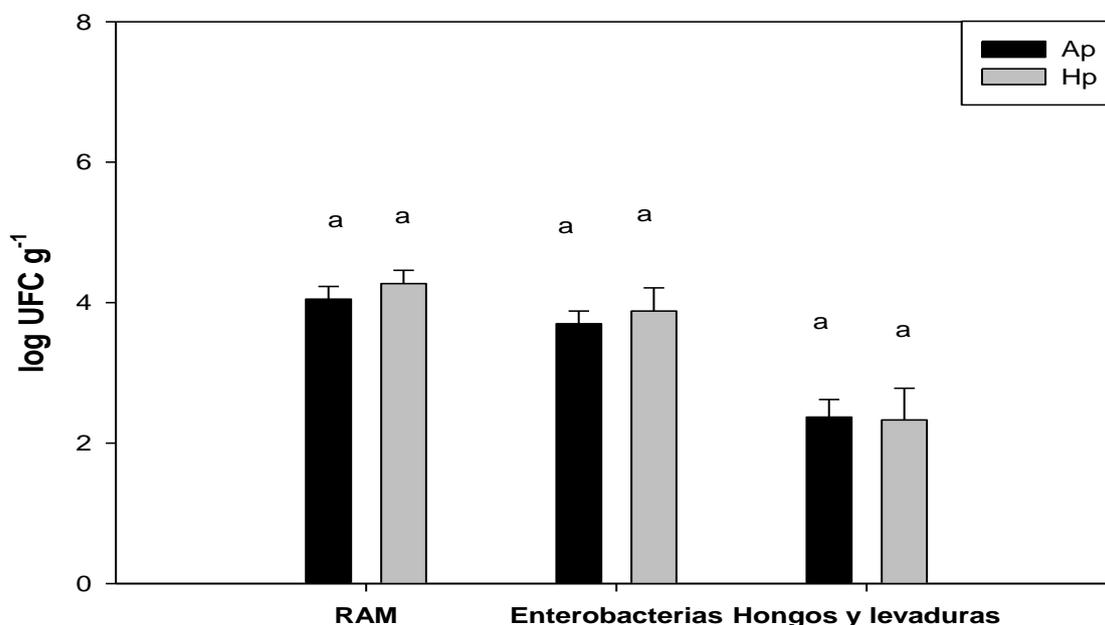


Figura 30. Recuento de aerobios mesófilos (RAM), enterobacterias y hongos y levaduras (log UFC g⁻¹) al momento de la cosecha en hojas de acelga cultivadas en los sistemas acuapónico e hidropónico. Las barras representan la media ($n=3$) ± DE. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$).

DISCUSIÓN

Mediciones en el medio de cultivo

Temperatura

Durante el ensayo se registró una temperatura media de 13,2, 14,0 y 19,0 °C para los tratamientos RAS, Ap y Hp respectivamente. Al igual que en el ensayo anterior, los valores se mantuvieron dentro del rango tolerable para el cultivo de las especies, privilegiando en el caso del tratamiento Ap, la temperatura óptima para el componente acuícola (FAO, 2014; Somerville *et al.*, 2014; Yavuzcan *et al.*, 2017), pero manteniéndose dentro del rango tolerable para el cultivo de acelga (Drost, 2010; Whiting *et al.*, 2014; Somerville *et al.*, 2014). En el tratamiento Hp, en comparación al ensayo anterior, se observó un aumento en el valor medio de temperatura asociado a la incorporación de un calefactor, cuyo fin fue acercar dicho valor al óptimo reportado para el cultivo de hortalizas de hoja (18 °C) (Somerville *et al.*, 2014; Al-Rawahy *et al.*, 2019).

Oxígeno disuelto (DO)

En el medio de cultivo se registraron rangos entre 8,8 y 5,4 mg O₂ L⁻¹ en Ap, entre 6,9 y 5,3 mg O₂ L⁻¹ en Hp y entre 8,6 y 5,2 mg O₂ L⁻¹ en RAS. Al comparar la concentración y saturación de oxígeno de los tratamientos entre ensayos, se pueden observar medias menores durante el presente ensayo. Sin embargo, estos valores se encontraron dentro del rango óptimo para todos los sistemas evaluados. La disminución en la disponibilidad de oxígeno se produjo por el incremento en la demanda por parte del sistema, ya que, al trabajar a una mayor carga de peces y plantas, también aumentaría el requerimiento de este gas (Somerville *et al.*, 2014; Wongkiew *et al.*, 2017; Yavuzcan *et al.*, 2017).

Conductividad eléctrica (CE)

Se registraron rangos de 2,2 a 1,8 dS m⁻¹, 2,6 a 2,2 8 dS m⁻¹ y 2,3 a 1,9 8 dS m⁻¹ en Ap, Hp y RAS respectivamente. En comparación al ensayo anterior, se pudo observar que se mantuvieron las mismas diferencias estadísticas entre los tres tratamientos, sin embargo, el porcentaje de diferencia entre ellos disminuyó considerablemente. En el caso del tratamiento Ap, se obtuvo un valor de CE considerado dentro del rango más productivo para hortalizas hidropónicas asociado, principalmente, a una mayor concentración de nutrientes (Resh, 2013). Lo anterior, también se pudo observar en la mayor acumulación de NO₃⁻ disuelto en la solución de este tratamiento (Ap) al final ensayo. Por otro lado, se observó, en comparación al primer ensayo, un aumento en el valor medio de CE en tratamientos Ap y RAS relacionado a una menor tasa de recambio de agua, y por ende una mayor acumulación de iones en la solución (Good *et al.*, 2009; Monsees *et al.*, 2017; Torres, 2017; Goddek *et al.*, 2019). Por último, el tratamiento RAS obtuvo una CE significativamente mayor que el tratamiento Ap, lo cual, a diferencia del ensayo anterior, no se debió a la incorporación de NaCl, si no que a una mayor acumulación de iones en la solución del sistema RAS, debido a que este tratamiento no contó con plantas que absorbieran nutrientes.

pH

Tanto Ap como Hp se encontraron dentro de los rangos de pH que permitirían una mayor disponibilidad de nutrientes para la absorción vegetal, registrando un rango de valores de 6,9 a

7,6 en Ap y entre 5,0 a 6,2 en Hp, sin embargo, Hp estuvo dentro del rango óptimo para la máxima disponibilidad (Resh, 2013). En el caso de Ap y RAS se registraron valores que permitirían un adecuado funcionamiento del biofiltro y calidad de agua para peces (Yavuzcan *et al.*, 2017). En este estudio se registraron las mismas diferencias significativas entre los tratamientos que en el ensayo anterior, obteniendo un valor igual estadísticamente entre Ap y RAS, mientras que uno menor en Hp. Independiente de la similitud anterior, en los tratamientos Ap y RAS se registró una menor media que en el ensayo anterior, producto de una menor tasa de recambio de agua y mayor producción de TAN (4.2), el cual al transformarse a nitrato por acción del biofiltro genera acidificación (Good *et al.*, 2009; Davidson *et al.*, 2014).

Compuestos nitrogenados

Debido al reajuste en la tasa de nitrificación que debió ejercer el biofiltro durante los primeros días de ensayo, producto del aumento en la biomasa en los estanques, se observó un aumento en las concentraciones de TAN disuelto en la solución, llegando a valores de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ en los tratamientos Ap y RAS. Lo anterior, obligó a aumentar la tasa de recambio de agua durante las primeras semanas del ensayo causando la variación en las concentraciones de estos compuestos en el medio de cultivo. Si bien las concentraciones de NO_2^- durante la primera mitad del ensayo fueron mayores a las registradas en el ensayo anterior, se mantuvieron dentro de rangos adecuados en ambos tratamientos (Rakocy *et al.*, 2006). A partir del día 26 se consideró que los tratamientos entraron nuevamente en equilibrio registrando valores óptimos de TAN y NO_2^- inferiores a $0,2 \text{ mg L}^{-1}$. Estos resultados se asemejan a lo reportado por Petrea *et al.* (2013) con valores de NO_2^- de $0,15 \text{ mg L}^{-1}$, y son menores a lo reportado por Alcarraz (2016), con valores de $0,79 \text{ mg L}^{-1}$, quién en su caso, trabajó con una carga mayor en el sistema.

Con respecto a las concentraciones de NO_3^- se registraron valores medios de $8,1 \pm 3,0$ y $13,5 \pm 2,8 \text{ mg L}^{-1}$ para Ap y RAS respectivamente. El tratamiento RAS registró un rango entre $8,5$ a $18,2 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que Ap registró un rango entre $2,2$ a $10,8 \text{ mg L}^{-1}$. El día 33 del ensayo se registró la menor concentración en Ap asociado a la disminución en la densidad del estanque, y a la tasa de recambio de agua realizada en ese periodo. En este ensayo, se obtuvieron concentraciones mayores de NO_3^- a las registradas en el ensayo anterior, lo cual estaría relacionado a la mayor densidad de peces, junto a una menor tasa de recambio de agua. Sin embargo, se registraron valores inferiores a los reportados por Petrea *et al.* (2013), y Alcarraz (2016). En el caso de Alcarraz (2016), esto se explicaría por una mayor biomasa animal en un estanque de similares características durante del ensayo, llegando a una biomasa final de 16 kg m^{-3} .

Cultivo de trucha arcoíris

Ganancia de peso

En cuanto a la ganancia de peso en los individuos, se puede afirmar que no hubo una diferencia significativa entre los tratamientos al término del segundo mes de cultivo. Lo anterior se asemeja a lo ocurrido en el ensayo anterior, no obstante, en este ensayo se registró un mayor aumento de biomasa relacionado a un mayor tamaño inicial de las truchas, obteniendo incluso una TCE menor en comparación al estudio anterior. Con respecto a la variación en la densidad del estanque durante la segunda mitad del estudio (de $7,3$ a $9,5 \text{ kg m}^{-3}$), se puede afirmar que esta no superó la capacidad nitrificante del biofiltro, y por ende, se mantuvo una adecuada calidad de agua, no obstante, la variación en la densidad dentro de la primera mitad de ensayo (de $9,6$ a $10,9 \text{ kg m}^{-3}$) pudo ser la causante del aumento en la exigencia del biofiltro y por ende

un desmedro en la calidad de agua, generando estrés y mortalidades (Yavuzcan *et al.*, 2017). Lo anterior, es contrario a lo observado en el estudio de Alcarraz (2016) en el cual se trabajó a una densidad final mayor de $16,1 \text{ kg m}^{-3}$ en un sistema de similares características, pero con una supervivencia del 100 %. La diferencia en la mortalidad entre los estudios recién discutidos pudo deberse a un menor peso por individuo, junto al aumento en la exigencia del biofiltro durante este ensayo.

Factor de conversión alimentaria (FCA)

No se encontraron diferencias significativas entre Ap y RAS, con una media de 1,29 en el FCA entre los tratamientos durante la segunda mitad del presente ensayo, obteniendo valores semejantes al primer ensayo (1,33). Lo anterior se relacionaría a manejos similares en el control del ambiente, calidad del alimento, manejo de los desechos y calidad del agua (Davidson *et al.*, 2014; Hasan *et al.*, 2017). Los datos encontrados en este estudio se asemejan a los reportados por Wacyk *et al.* (2012), quienes trabajaron con trucha arcoíris con un peso medio de 12 g, encontrando valores de FCA entre 1,2 a 1,3 utilizando alimento con un contenido proteico similar al utilizado en este ensayo, sin embargo en dicho ensayo se utilizó una densidad menor en el estanque ($2,4 \text{ kg m}^{-3}$).

Tasa de crecimiento específica (TCE)

Se obtuvieron valores iguales estadísticamente en la TCE entre los tratamientos. Adicionalmente, los valores fueron similares a los reportados por Akbulut *et al.* (2002), quienes obtuvieron valores de $1,02 \text{ \% día}^{-1}$ utilizando un peso inicial similar, pero a una mayor densidad en el estanque ($12,1 \text{ kg m}^{-3}$). Por otro lado, Velichkova *et al.* (2019), reportó un aumento en la biomasa de 206,1 %, y con un aumento de 2,91 veces comparado con el valor inicial en un periodo de 60 días, pero utilizando truchas con un peso inicial de 13,4 g.

Si bien durante este ensayo se registró una TCE similar entre los tratamientos, se observó una disminución con respecto al ensayo anterior, obteniendo $1,35 \text{ \% día}^{-1}$ ($1,48 \text{ g día}^{-1}$) en el primero mientras que $1,04 \text{ \% día}^{-1}$ ($1,68 \text{ g día}^{-1}$) en el segundo. Esta disminución está directamente relacionada a la diferencia en la densidad del estanque y disponibilidad de alimento, generando de esta forma una mayor competitividad y dominancia entre los individuos (Holm *et al.*, 1990)

Factor de condición K

El factor K no mostró diferencias significativas entre los tratamientos al igual que en el ensayo anterior. Sin embargo, los tratamientos no presentaron valores constantes durante todo el ensayo, comenzando con $1,4 \pm 0,3 \text{ g cm}^{-1}$ la segunda mitad del ensayo, considerada como una condición menos apropiada en comparación al factor K con el que terminó ($1,6 \pm 0,1 \text{ g cm}^{-1}$). Lo anterior se debería a las altas concentraciones de TAN que se presentaron en los estanques de cultivo durante la primera mitad del ensayo, las cuales generaron estrés en los peces reduciendo su factor de condición y causando mortalidades durante la primera y segunda mitad del ensayo (Morales, 2004).

Mortalidad

La mortalidad observada posterior al reajuste de masa fue similar entre los tratamientos, pero aumentó en comparación al ensayo anterior. Lo anterior se debería probablemente a mortalidades tardías relacionadas a los altos valores de NO_2^- y TAN obtenidos durante el primer

mes (Wagner *et al.*, 2011), razón por la cual se efectuó el reajuste de densidad en los estanques. Sin embargo, los valores obtenidos en este ensayo se encuentran dentro del límite máximo de mortalidad, considerado como normal, establecido por Woynarovich *et al.* (2011), quienes establecen un máximo de un 5 % en sistemas tradicionales de acuicultura de baja escala. En el estudio realizado por Velichkova *et al.* (2019) se registraron valores inferiores de mortalidad, con una supervivencia del 97,5 % en combinación de trucha arcoíris y lechuga.

Al término de este ensayo, al igual que en el anterior, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en ninguno de los parámetros evaluados, a excepción de la disminución en la supervivencia, la cual se mantuvo muy cercana al máximo permitido en este tipo de sistemas. Lo anterior establece a la acuaponía como un sistema productivo, que no genera un desmedro en la eficiencia de la transformación de alimento a biomasa en los peces, junto con mantener un adecuado hábitat para su crecimiento.

Cultivo de acelga

Concentración de nutrientes

En este ensayo, al igual que en el anterior, se observó una diferencia significativa en la concentración K en las hojas de acelga, siendo mayor en el tratamiento Hp. Pese a lo anterior, en comparación al primer ensayo, la diferencia porcentual entre ambos aumentó, obteniendo en las acelgas acuapónicas un 67,4 % de lo obtenido en las hidropónicas. Esta diferencia no se relaciona directamente a lo observado en las concentraciones de K en la solución, ya que en ambos tratamientos fue mínima al término del ensayo ($> 4,5 \text{ mg L}^{-1}$), sin encontrar diferencias significativas entre ellos ($p > 0,05$). El hecho de que no se encontraran diferencias significativas en la concentración de K en las hojas, se relaciona con la mayor duración del ensayo lo que generaría un mayor agotamiento de la solución nutritiva, la que fue rellenada en función de la CE, sin embargo, esta variable no permite diferenciar los desbalances y/o requerimientos específicos de un nutriente, ya que refleja la concentración total de iones disueltos en la solución (Pardossi *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2017), pudiendo tener gran cantidad de nutrientes totales, pero una baja concentración de K. En este ensayo se observó que esta baja concentración de la solución se evidenciara en la concentración final del tejido debido a acumulada en el tiempo

En relación con el Mg, el tratamiento Hp presentó una mayor concentración en el tejido y solución respecto a Ap, lo cual no ocurrió al término del primer ensayo. De todas formas, la deficiencia de este nutriente ya ha sido reportada por algunos autores en sistemas acuapónicos (Bittsanszky *et al.*, 2016; Goddek *et al.*, 2019). La disminución en la concentración de Mg en ambos tratamientos, respecto al primer ensayo, se explicaría por la mayor duración del periodo experimental, lo cual a su vez justificaría que la leve tendencia observada en la concentración foliar de este nutriente al término del primer ensayo se evidenciara estadísticamente al término de segundo. En este caso la concentración de Mg en la solución hidropónica no se habría visto tan agotada como el caso del K debido a que la acelga absorbe, en base a la concentración foliar, una mayor proporción de K que de Mg durante su crecimiento lo cual, sumado al aparente desbalance nutricional en la solución de Hp, habría mantenido concentraciones mayores a Ap. En un estudio realizado por Pantenella *et al.* (2012) encontraron una concentración de 44 mg L^{-1} , mientras que en el realizado por Delaide (2017) encontró una concentración de $23,5 \text{ mg L}^{-1}$, no obstante, al igual que en el caso del Ca, solo el 25 % de la concentración de Mg entra por el alimento, el resto es propio de la concentración del agua utilizada. En un ensayo realizado por Guzel *et al.* (2018), donde compararon la concentración de macronutrientes en hojas de calabaza cultivadas en sistemas acuapónicos e hidropónicos, encontraron diferencias similares

a las de este ensayo, obteniendo en el sistema acuapónico un 68 % del K obtenido en el hidropónico, sin embargo, en este caso las hojas hidropónicas obtuvieron un 78 % del Mg obtenido en las acuapónicas.

La concentración de Ca en el tejido vegetal presentó diferencias significativas entre los tratamientos, siendo mayor en Ap. A su vez, al comparar la concentración en la solución al término del ensayo, fue mayor en Hp. En este caso, la diferencia en la concentración de Ca en las hojas, no se debió a un problema de baja disponibilidad y concentración del nutriente en el sistema Hp, ya que éste registró una concentración similar al ensayo anterior. La razón por la cual el tratamiento Ap pudo acumular más Ca en el tejido, sería que durante este ensayo el desbalance generado entre los cationes de la solución, asociado a una baja concentración de K, pudo generar un aumento en la absorción de calcio (Ruamrungsri *et al.*, 1996). Si bien, el encontrar altas concentraciones de Ca en sistemas acuapónicos es contrario a lo descrito en diversos estudios realizados en este tipo de sistemas (Somerville *et al.*, 2014; Bittsanszky *et al.*, 2016; Delaide, 2017; Goddek *et al.*, 2019a), el agua utilizada en este ensayo para los recambios diarios presentaba altos contenidos de Ca (Anexos I), explicando la mayor acumulación en comparación a otros estudios. De hecho, en un ensayo realizado por Delaide (2017), se determinó que el principal aporte de este nutriente vendría del agua utilizada, cercano a un 90 % de la concentración total de Ca en el agua. Sumado a lo anterior, también se registró un valor de pH en la solución nutritiva acuapónica que permitía una alta disponibilidad de este nutriente (Resh, 2013). Adicionalmente, como está establecido que un sistema acuapónico, a diferencia de uno hidropónico, es un medio con alta carga e interacciones microbianas (Michaud, 2017), es posible que esta diferencia en la concentración foliar de Ca pueda estar relacionada a la presencia de microorganismos, que generan una relación simbiótica con la planta, permitiendo una mayor absorción, mayor crecimiento e inmunidad (Vimal *et al.*, 2017).

En un ensayo realizado en lechugas cultivadas en un sistema acuapónico, con una densidad en el cultivo de tilapia similar a la utilizada en este ensayo (10 kg m^{-3}), se obtuvieron menores concentraciones Ca y K en las hojas, de 1,5 y 2,4 % respectivamente, junto con una similar concentración de K (4 mg L^{-1}) y menor concentración de Ca (22 mg L^{-1}) en la solución (Pineda *et al.*, 2017). En el caso anterior, la diferencia observada, en comparación al presente ensayo, en cuanto a la concentración K en las hojas se explica principalmente por la diferencia propia de la especie, ya que la acelga tiene un mayor requerimiento interno de K en comparación a la lechuga (Bouzo *et al.*, 2003).

Con respecto a la concentración de micronutrientes en las hojas de acelga del presente estudio, se encontraron diferencias entre los tratamientos en la concentración de Zn y Mn, siendo el tratamiento Ap mayor en Zn, y el tratamiento Hp en Mn. La menor concentración de Mn en acelgas acuapónicas concuerda con lo reportado en el ensayo anterior, y lo reportado en otros trabajos (Bittsanszky *et al.*, 2016; Goddek *et al.*, 2019). La diferencia en la concentración de Mn también se pudo observar visualmente como una clorosis intervenal en las hojas nuevas del tratamiento Ap. A diferencia de lo ocurrido en el ensayo anterior, se observó un incremento en la concentración de Zn en las hojas de acelga cultivadas bajo el tratamiento Ap, llegando a concentraciones superiores a 100 mg kg^{-1} . En sistemas acuapónicos generalmente no se encuentran deficiencias asociadas a este nutriente, ya que el alimento de los peces contiene la cantidad necesaria para suplir la demanda vegetal, permitiendo también, debido al bajo requerimiento vegetal, su rápida acumulación en el sistema (Delaide *et al.*, 2017). Lo anterior, puede explicar que se genere una acumulación de este nutriente y por ende aumente la absorción total durante el ciclo, sin embargo, es necesario monitorear la concentración de este nutriente ya que en concentraciones superiores a 2 mg L^{-1} es altamente tóxico para la trucha arcoíris

(Lovegrove y Eddy, 1982; Delaide, 2017). En un trabajo realizado por Guzel *et al.* (2016) ocurrió algo similar, encontrando mayores concentraciones de Zn y menores de Mn en hojas de calabaza acuapónicas en comparación a las hidropónicas.

Materia fresca

Respecto al análisis en la acumulación de biomasa en acelga a través de los ciclos de cultivo, se puede afirmar que no hubo una interacción significativa entre los tratamientos y los ciclos de crecimiento, siendo estos últimos los únicos que presentaron significancia al analizarlos de forma independiente. Adicionalmente, se pudo observar una significancia en la covariable peso inicial de las plantas al inicio de cada una de las fases de cultivo, teniendo una influencia en el peso final de ellas. Lo anterior también se observa en la TCR de cada periodo, siendo menor en el tratamiento Ap durante el primer y segundo ciclo de crecimiento, lo cual, en este caso, se debió a una menor concentración y disponibilidad de nutrientes durante ese periodo, lo que se generó debido al aumento en la tasa de recambio de agua producto de los altos niveles de TAN (Morgan y Cononlly, 2013; Albornoz y Lieth, 2015). Posterior a que el sistema alcanzó el equilibrio nuevamente, tanto la TCR como el IP asociado a cada ciclo de crecimiento no fue diferente estadísticamente entre los tratamientos. Sin embargo, se continuó observando diferencias en la materia fresca por planta al término de cada ciclo y, por ende, en las cosechas, en este caso, debido exclusivamente a la diferencia en el peso inicial posterior a cada cosecha. Es por lo anterior, que las diferencias en el rendimiento final, sumando todas las cosechas, también serían afectadas por este factor explicando los mayores rendimientos en Hp, razón por la cual una comparación estadística en los resultados no sería relevante y resulta más relevante evaluar las variaciones porcentuales entre los tratamientos. De hecho, al momento de evaluar la diferencia en el área foliar de cada planta al término del cuarto ciclo de crecimiento, no se observó una diferencia significativa entre los tratamientos. En un estudio de 70 días realizado por Mauricieri *et al.* (2019a), se evaluó el rendimiento de acelga sometida a dos densidades de cultivo de *Cyprinus carpio* L., de 2,5 kg m⁻³ (APL) y 4,65 kg m⁻³ (APH) cultivadas bajo un sistema acuapónico de baja tecnología, y adicionalmente se comparó con un control hidropónico (HP). En dicho estudio se trabajó a una densidad de 10 plantas m⁻² y se encontró un rendimiento de 3,8, 4,1 y 5,3 kg m⁻² en los tratamientos HP, APH y APL. En el presente ensayo, el tratamiento Hp obtuvo un rendimiento similar de 4,0 kg m⁻² a lo reportado para un sistema hidropónico en el ensayo de Mauricieri *et al.* (2019), sin embargo, el tratamiento Ap obtuvo un rendimiento menor de 2,3 kg m⁻². La diferencia obtenida en los sistemas acuapónicos se debe a una mayor acumulación de nutrientes en la solución llegando, por ejemplo, a valores medios de 72,8 mg L⁻¹ de NO₃⁻ y 104,2 mg L⁻¹ de K, lo que a su vez, se explica por la menor densidad vegetal utilizada, y por condiciones ambientales consideradas mejores para el desarrollo y acción de bacterias (Somerville *et al.*, 2014). Lo anterior se debe a una mayor temperatura en la solución, cercana a los 20 °C, junto a el diseño del componente hidropónico, en este caso, utilizando sustrato sólido, el cual se ha visto que entrega una mayor superficie disponible para la adherencia de bacterias (Lennard y Leonard, 2006; Mauricieri *et al.*, 2019b).

Materia seca

Lo anterior también se relaciona a las diferencias en el porcentaje de peso seco obtenido en este ensayo, ya que variaciones en el peso seco de raíz/brote, se asocian directamente a la concentración de K, debido a la importancia osmótica que tiene la misma, sin embargo, el efecto en esta relación aún no está bien establecido y variará en gran medida según la especie cultivada (Hafsi *et al.*, 2014).

Largo radical

La diferencia observada en la concentración de nutrientes discutida anteriormente, específicamente en el caso del K, podría explicar la diferencia en el largo radical observada entre los tratamientos, ya que, si bien no se presentaron diferencias entre tratamientos en la concentración de este nutriente al término del ensayo, el aumento en el periodo experimental de este ensayo, respecto al anterior, habría generado una deficiencia acumulada en el tiempo incrementando su efecto y expresándose en una disminución en el largo radical del tratamiento Ap (Jia *et al.*, 2008).

Concentración de clorofila

El contenido de clorofila se utiliza como indicador del contenido de N en hojas, sin embargo, esta estimación se ve afectada por factores medioambientales y características foliares (Xiong *et al.*, 2015). Al evaluar las diferencias de dicho valor, se observa una disminución clara en el tratamiento Ap, lo cual estaría relacionado a la deficiencia de Mn y Mg en hojas debido a que son nutrientes que, al estar relacionados con la conformación de clorofila, producen una clorosis intervenal en hojas (Resh, 2013). Lo mismo ocurrió en el ensayo realizado por Guzel *et al.* (2018) quienes, al encontrar deficiencias de Mn en hojas de calabaza acuapónicas, también encontraron una menor concentración de clorofilas que en las hidropónicas. Si bien, se ha visto que la deficiencia de K genera una disminución en el contenido de clorofilas (Zhao *et al.*, 2015), no está claro el efecto en la tonalidad de la hoja, ya que, bajo deficiencias leves de K, la hoja tomaría tonalidades verdes oscuro, mientras que bajo severas deficiencias tomaría tonalidades amarillas a pardo (Peng *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2014).

Fenoles totales

La concentración de fenoles totales al término del ensayo fue de 349,4 mg EAG 100g⁻¹ M.F., sin encontrar diferencias estadísticas entre los tratamientos y reportando valores similares al ensayo anterior. Los resultados de ambos ensayos establecen que el cambio en el origen de los nutrientes aportados a un sistema hidropónico no genera cambios en la concentración de fenoles totales, sin embargo, se desconoce cuál sería el comportamiento de otros compuestos bioactivos, tales como carotenoides, terpenoides, entre otros.

Capacidad antioxidante

En la capacidad antioxidante no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en ninguno de los métodos utilizados. A diferencia del primer ensayo, no se reportaron diferencias significativas entre los tratamientos en la capacidad antioxidante según el método FRAP, lo cual puede estar relacionado a la disminución en la tasa de recambio de agua, ya que esto permitió trabajar a mayores concentraciones de NO₃⁻ disuelto en la solución, y por ende, una disminución en el estrés abiótico presente en el ensayo anterior. Adicionalmente, el generar cosechas periódicas en las acelgas disminuyendo su peso fresco, permitió que el requerimiento diario de los nutrientes fuera menor (Albornoz y Lieth, 2015). Algo similar ocurrió en el estudio realizado por Guzel *et al.* (2018), quienes tampoco encontraron diferencias en la actividad de enzimas antioxidantes, al comparar calabazas cultivadas en acuaponía e hidroponía, sin embargo, al igual que en este estudio, el tratamiento hidropónico tuvo mayor concentración de clorofila y Mn en el tejido vegetal.

Microbiología

Al término del último ciclo de cultivo no se presentaron diferencias significativas en los recuentos microbiológicos entre los tratamientos Ap y Hp. Con respecto al RAM, se obtuvieron valores mayores a los registrados en otros ensayos acuapónicos, con valores de 3,2 log UFC g⁻¹ en hojas de lechuga (Sirsat y Neal, 2013; Alcarraz, 2016). A su vez Selma *et al.* (2012), determinaron la diferencia en RAM entre un cultivo en suelo y uno hidropónico, obteniendo valores de 4,0 log UFC g⁻¹, lo cual es similar a los registrado en este estudio (4,16 log UFC g⁻¹). Con respecto al recuento de enterobacterias, se obtuvo un valor de 3,79 log UFC g⁻¹, también mayor al reportado por Alcarraz (2016) de 1,0 (log UFC g⁻¹). Pese a esto, se puede afirmar que en el presente estudio las acelgas cultivadas en ambos sistemas presentaron recuentos microbiológicos inferiores a lo establecido por el Reglamento Sanitario de Alimentos para frutas y otros vegetales pre-elaborados listos para el consumo (MINSAL, 2014). Este reglamento establece un límite máximo para RAM 6,6 log UFC g⁻¹ y enterobacterias de 4,6 log UFC g⁻¹. Con respecto al recuento de hongos y levaduras, si bien el MINSAL no entrega un rango aceptable, se obtuvieron valores menores a los reportados por Selma *et al.* (2012) en un cultivo de lechuga, quienes encontraron valores entre 4,0 a 4,6 log UFC g⁻¹. Las diferencias entre estudios se relacionan en gran medida a la fuente de agua utilizada en los sistemas acuapónicos, ya que tienen una gran incidencia en la inocuidad de los productos finales, ya sean peces o plantas.

CONCLUSIONES DEL SEGUNDO ENSAYO

Sobre la base de las condiciones experimentales utilizadas en el segundo ensayo se puede afirmar lo siguiente:

- ✓ Las diferencias en el rendimiento total en el ensayo están determinadas por el factor ciclo de crecimiento y el peso inicial de las plantas, y no por el efecto del factor tratamiento.
- ✓ El cultivo de acelga con cosechas escalonadas cultivadas en un sistema acuapónico obtiene una calidad funcional y microbiológica estadísticamente igual a las acelgas cultivadas en un sistema hidropónico convencional con una solución nutritiva completa y suficiente para todo el periodo del cultivo.
- ✓ No se evidencia un efecto negativo en la implementación de un cultivo de acelga con cosechas escalonadas, en los parámetros productivos de la trucha arcoíris conformando un sistema acuapónico.
- ✓ Un cultivo de acelga con cosechas escalonadas bajo un tratamiento acuapónico, obtiene concentraciones de K, Mg y Mn, menores que las cultivadas bajo un tratamiento hidropónico.

Los resultados muestran que el sistema acuapónico es una propuesta viable para producir truchas arcoíris y acelga de calidad, tanto nutricional como microbiológica, manteniendo los estándares productivos de sistemas convencionales. Sin embargo, resulta importante el establecer un manejo para satisfacer en su totalidad la demanda nutricional vegetal.

Bajo un punto de vista acuapónico, resultaría interesante el determinar el efecto del aumento o reducción en los valores de FCA en los demás componentes del sistema ya que, aparte de entregar ser un indicador de eficiencia en la alimentación y producción acuícola, este factor se relaciona al desempeño medioambiental, ya que se relaciona con la pérdida de nutrientes al medio de cultivo y a su vez con la disponibilidad de estos para la absorción vegetal. Adicionalmente, resultaría interesante evaluar el aumento en la concentración de nutrientes, tales como K, Mn y Fe, en el alimento acuícola, aumentando el FCA pero disminuyendo posibles deficiencias nutricionales en plantas, diseñando un alimento con fines acuapónicos que intente suplir los requerimientos de ambos componentes sin perjudicar la producción de los mismos.

LITERATURA CITADA

- Affan, F., M. Kitano, D. Yasutake, T. Wajima, and T. Yasunaga. 2005. Study on root absorption responding to environmental stress by using hydroponic systems. *Phyton* 45:223-228.
- Aguilar, F., G. Afanador-Téllez, y A. Muñoz-Ramírez. 2010. Efecto del procesamiento de la dieta sobre el desempeño productivo de tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus* var. *Chitralada*) en un ciclo comercial de producción. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia* 57(2):104-118.
- Akbulut, B., T. Sahin, N. Aksungur, and M. Aksungur. 2002. Effect of Initial Size on Growth Rate of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Reared in Cages on the Turkish Black Sea Coast. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Science* 2:133-136.
- Alatorre-Jacome, O., F. Garcia, G. Soto-Zarazua, and E. Rico-Garcia. 2012. Techniques to assess fish productivity in aquaculture farmers and small fisheries: an overview of algebraic methods. *Journal of Applied Sciences* 12(9):888-892.
- Albornoz, F., and J. Lieth. 2015. Daily Macronutrient Uptake Patterns in Relation to Plant Age in Hydroponic Lettuce. *Journal of Plant Nutrition* 39 (10):1357-1364.
- Alcarraz, E. 2016. Evaluación de la concentración de nitratos, calidad microbiológica y funcional en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en los sistemas acuapónico e hidropónico. 31 p. Tesis Magister. Universidad de Chile, Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos, Santiago, Chile.
- Al-Rawahy, M., S. Al-Rawahy, Y. Al-Mulla, and S. Nadaf. 2019. Influence of nutrient solution temperature on its oxygen level and growth, yield and quality of hydroponic cucumber. *Journal of Agricultural Science* 11(3):75-82.
- Arias-Baldrich, C., C. De la Osa, N. Bosch, I. Ruiz-Ballesta, J. Monreal, and S. Garcia-Mauriño. 2017. Enzymatic activity, gene expression and posttranslational modifications of photosynthetic and non-photosynthetic phosphoenolpyruvate carboxylase in ammonium stressed sorghum plants. *Journal of Plant Physiology* 214:39-47.
- Austreng, E., T. Storebakken, and T. Asgard. 1987. Growth Rates Estimates for Cultured Atlantic Salmon and Rainbow Trout. *Aquaculture* 60:157-160.
- Badiola, M., D. Mendiola, and J. Bostock. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering* 51:26-35.
- Barnham, C., and A. Baxter. Condition Factor, K, for Salmond Fish. 1998. *Fisheries Notes* FN0005. ISSN 1440-2252.
- Bartelme, R., B. Oyserman, J. Blom, O. Sepulveda, and R. Newton. 2018. Stripping Away the Soil: Plant Growth Promoting Microbiology Opportunities in Aquaponics. *Frontiers in Microbiology* 9(8). Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.00008/full#B65> (Consultado en noviembre de 2019).

- Benzie, I., and J. Strain. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry* 239(1):70-76.
- Bittsanzky, A., N. Uzinger, G. Gyulai, A. Mathis, R. Junge, M. Villaroel, B. Kotzen, and T. Komives. 2016. Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles* 2(2):17-20.
- Blanchenton J., K. Attramadal, L. Michaud, E. Roque d’Orbcastel, and O. Vadstein. 2013. Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. *Aquacultural Engineering* 53:30-39.
- Bouzo, C., E. Astegiano, y L. Favaro. 2003. Procedimientos para predecir la necesidad de abonos en cultivos hortícolas. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias* 2:7-19.
- Brand-Williams, W., M. Cuvelier, and C. Berset. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Science and Technology* 28(1):25-30.
- Brechner, M., and A. Both. 2001. *Hydroponic lettuce handbook*. Cornell controlled environment agriculture (CEA). Cornell University. 48p.
- Bregnballe, J. 2015. *A Guide to Recirculation Aquaculture: An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and EUROFISH International Organization, Rome, Italy. 95 p.
- Bugbee, B. 2004. Nutrient Managment in Recirculating Hydroponic Culture. *Acta horticultrae* 648:99-112.
- Buzby, K., and L. Lin. 2014. Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacultural Engineering* 63:39-44.
- Cadaval, A., B. Artiach, U. Garín, C. Pérez, y J. Aranceta. 2005. *Alimentos funcionales: Para una alimentación más saludable*. Sociedad Española de Nutrición Comunitaria, España. Disponible en <http://www.piaschile.cl/wp-content/uploads/2015/04/Alimentos-funcionalespara-una-alimentaci%C3%B3nmas-saludable.pdf> (Consultado en mayo de 2018).
- Cerozi, B., and K. Fitzsimmons. 2016. The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponic nutrient solution. *Bioresource Technology* 219:778-781.
- Chaudhary, P., S. Godara, A. Cheeran, and A. Chaudhari. 2012. Fast and Accurate Method for Leaf Area Measurement. *International Journal of Computer Applications* 49:22-25.
- Chen, L., L. Lin, G. Cai, Y. Sun, T. Huang, K. Wang, and J. Deng. 2014. Identification of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Deficiencies in Rice based on static Scanning Technology and Hierarchical Identification Method. *PLoS One* 9(11). Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4245116/> (Consultado en diciembre de 2019).
- Chun, C., and T. Takakura. 1994. Rate of root respiration of lettuce under various dissolved oxygen concentrations in hydroponics. *Enviroment Control in Biology*. 32(2):125-135.

D'Imperio, M., F. Montesano, M. Renna, A. Parente, A. Logrieco, and F. Serio. 2019. Hydroponic Production of Reduced-Potassium Swiss Chard and Spinach: A Feasible Agronomic Approach to Tailoring Vegetables for Chronic Kidney Disease Patients. *Agronomy* 9(10):627.

Danjela, V., D. Jasna, S. Spiric. 2011. Rainbow trout (*Onchorhynchus Mykiss*) from aquaculture- meat quality and importance in diet.

Plenary paper on International 56th Meat Industry Conference held from June 12-15th 2011. on Tara mountain;

Dannehl, D., and M. Josuttis. 2014. Cultivar and production effects on bioactive polyphenols. p. 3–13. In: Watson, R. (ed) *Polyphenols in Plants: Isolation, purification and extract preparation*. Academic Press, New York, USA.

Davidson, J., C. Good, C. Welsh, and S., Summerfelt. 2014. Comparing the effects of high vs. low nitrate on health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* within water recirculating aquaculture system. *Aquaculture Engineering* 59:30-40.

Delaide, B. 2017. A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability. 101 p. PhD Thesis. University of Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Liège, Belgium.

DeLong, D., and T. Losordo. 2012. How to start a biofilter. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication 4502. 4p.

Dewailly, É., P. Ayotte, M. Lucas and C. Blanchet. 2007. Risk and benefits from consuming salmon and trout: A Canadian Perspective. *Food and Chemical Toxicology* 45(8): 1343-1348.

Dikel, S., B. Ünal, T. Eroldogan, and A. Ozluer. 2010. Effects of Dietary L-carnitine Supplementation on Growth, Muscle Fatty acid Composition and Economic Profit of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 10:173-180.

Diver, S. 2006. *Aquaponics- Integration of hydroponic with aquaculture*. ATTRA Publication. National sustainable agriculture information service. 25p.

Drost, D. 2010. *Swiss Chard in the Garden*. Cooperative extension, UtahState University, Logan, Utah, USA. Disponible en https://extension.usu.edu/files/publications/publication/HG_Garden_2005-14.pdf (Consultado en octubre de 2019).

Doğan, E., B. Ataç and V. Gökmen. 2020. Relationship between color and antioxidant capacity of fruits and vegetables. *Current Research in Food Science* 2: 1-10.

Eck, M., A. Razack, M. Sebastien, A. Schmautz, R. Junge, T. Smits, and M. Haissam. 2019. Exploring Bacterial Communities in Aquaponics Systems. *Water* 11(2): 260.

Elumalai, S., A. Shaw, D. Allen, C. Currey, K. Rosentrater and K. Xie. 2017. Influence of UV Treatment on the Food Safety Status of a Model Aquaponic System. *Water* 9(1): 27.

Endut, A., A. Jusoh, N. Ali, W. Wan Nik, and A. Hassan. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresour Technol* 101:1511-1517.

Estim, A., S. Saufie, and S. Mustafa. 2018. Water quality remediation using aquaponics subsystems as biological and mechanical filters in aquaculture. *Journal of Water Process Engineering*. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714416305335?via%3Dihub> (Consultado en mayo de 2018).

FAO. 2003. Acuicultura: Principales conceptos y definiciones. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Disponible en <http://www.fao.org/spanish/newsroom/focus/2003/aquaculture-defs.htm> (Consultado en abril del 2017).

FAO. 2014. Manual Práctico para el Cultivo de la Trucha Arcoíris. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-bc354s.pdf> (Consultado en diciembre del 2018).

Foley, J., N. Ramankutty, and K. Brauman. 2011. Solutions for a cultivated plant. *Nature* 478: 337-420.

Fundación de Innovación Agropecuaria. 2016. Agenda de Innovación Agraria Producción Hortícola. FIA, Santiago, Chile. 40p. Disponible en <http://bibliotecadigital.fia.cl/handle/20.500.11944/145447> (Consultado en abril del 2017).

Giehl, R., and N. Wirén. 2014. Root Nutrient Foraging. *Plant Physiology* 166(2):509-517.

Gjedrem, T. and K. Gunnes. 1978. Comparison of growth rate in Atlantic salmon, pink salmon, Arctic char, sea trout and rainbow trout under Norwegian farming conditions. *Aquaculture* 13(2): 135-141.

Goddek, S., A. Joyce, B. Kotzen, and G., Burnell. 2019a. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer, Cham, Switzerland.

Goddek, S., A. Joyce, S. Wuertz, O. Körner, E. Bläser, M. Reuter, and K. Keesman. 2019b. Decoupled Aquaponics Systems. 201- 230. *In: Goddek, S., A. Joyce, B. Kotzen, and G., Burnell (eds.) Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer, Cham, Switzerland.

Goddek, S., Z. Schmutz, B. Scott, B. Delaide, K. Keesman, S. Wuertz, and R. Junge. 2016. The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. *Agronomy* 6(2):37.

Good, C., J. Davidson, C. Welsh, B. Brazil, K. Snekvik, and S. Summerfelt. 2009. The impact of water exchange rate on the health and performance of rainbow trout in water recirculation systems. *Aquaculture* 294:80-85.

Gorbe, E., and A. Calatayud. 2010. Optimization of Nutrition in Soilless Systems: A Review. *Advances in Botanical Research* 53(1):193-245.

Graber A., and R. Junge. 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246:147-156.

Granja Agro-Acuicola. Tienda-Productos. s.f.. Disponible en <http://www.acuiponia.cl/?page=tienda> (Consultado en mayo de 2018).

Guzel, S., U. Cansin, T. Cakmakci, O. Cakmakci, and U. Sahim. 2018. The effect of cucumber (*Cucumis sativus*) cultivation in aquaponic and hydroponic system on plant nutrient elements and antioxidant enzyme activity. *Fresenius Environmental Bulletin* 27:553-558.

Hafsi, C., A. Debez, and C. Abdelly. 2014. Potassium deficiency in plants: Effects and signaling cascades. *Acta Physiologiae Plantarum* 36(5): 1055-1070.

Halliwell, B., and J. Cuttridge. 1995. Biochemistry of oxidative stress. *Free Radical Biology and Medicine* 1: 125-12.

Hassan, M., and D. Soto. 2017. Improving Feed Conversion Ratio and its Impact on Reducing Greenhouse Gas Emissions in Aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 44p.

Holm, C., T. Refstie, and S. Bø. 1990. The Effect of fish density and feeding regimes on individual growth rate and mortality in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 89: 225-232.

Hu, Z., J. Woo, K. Chandran, S. Kim, A. Coelho, and S. Kumar. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology* 188:92-98.

Hutchinson, L. 2005. *Ecological Aquaculture: A Sustainable Solution*. Permanent Publications, Hampshire, England.

Janpen, C., N. Kanthawang, C. Inkham, F. Ying and S. Sommano. 2019. Physiological responses of hydroponically-grown Japanese mint under nutrient deficiency. Peer-Reviewed & Open Access 7: e7751. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6766367/> (Consultado en diciembre de 2019).

Jia, Y., X. Yang, Y. Feng, and G. Jilani. 2008. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency. *Journal of Zhejiang University Science* 9(5):427-434.

Jobling, M. 1993. Bioenergetics: feed intake and energy partitioning. 1-44. *In*: Rankin, J., and F.Jensen (eds.) *Fish Ecophysiology*, Chapman and Hall, London, UK.

Koeypudsa, W., P. Phadee, J. Tangtrongpiros, and K. Hatai. 2005. Influence of pH, Temperature and Sodium Chloride Concentration on Growth Rate of *Saprolegnia sp.* *Journal of Scientific Research* 30: 123-130.

- Laurrari, J., C. Sanchez, and F. Saura. 1998. Effects of Temperature on the Free Radical Scavenging Capacity of Extracts from Red and White Grape Pomace Peels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46(7):2694-2697.
- Lee, J., A. Rahman, H. Azam, H. Kim, and M. Kwon. 2017. Characterizing nutrient uptake kinetics for efficient crop production during *Solanum lycopersicum* var. *carasiforme* Alef. growth in a closed indoor hydroponic system. *PLoS ONE* 12 (5): 1-21
- Lennard, W., and B. Leonard. 2006. A comparison of three different hydroponic subsystems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. *Aquaculture International* 14:539-550.
- Licamele, J. 2009. Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. 173p. PhD thesis. University of Arizona, Department of Agriculture and Biosystems Engineering, Arizona, USA.
- Liu, T., M. Yang, Z. Han, and D. Ow. 2016. Rooftop production of leafy vegetables can be profitable and less contaminated than farm-grown vegetables. *Agronomy for Sustainable Development* 36(6):41.
- Llorach, R., A. Martínez, F. Tomás, M. Gil, and F. Ferreres. 2008. Characterization of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry* 108:1028-1038.
- Lorca, O. 2018. Calidad y procesos hidrogeoquímicos en el agua de la Región Metropolitana: Estudio del área concesión SMAPA. 71 p. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Lovegrove, S., and B. Eddy. 1982. Uptake and accumulation of zinc in juvenile rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Environmental Biology of Fishes* 7: 285-289.
- Mauricieri, C., C. Nicoletto, R. Junge, Z. Schmutz, P. Sambo, and M. Borin. 2018. Hydroponic system and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy* 13:1-11.
- Mauricieri, C.; C., Nicoletto; E., Os; D., Anseeuw; R., Havermaet and R., Junge. 2019b. Hydroponic Technologies. p 77-112. *In*: Goddek, S.; A., Joyce; B., Kotzen and G., Burnel (eds.). *Aquaponics Food Production Systems*. Springer. Gewerbestrasse, Switzerland.
- Mauricieri, C.; C., Nicoletto; G., Zanin; M., Birolo; A., Trocino; P., Sambo; M., Borin and G., Xiccato. 2019a. Effect of stocking density of fish on water quality and growth performance of European Carp and leafy vegetables in a low-tech aquaponic system. *PLoS One* 14 (5).
- Merino, G. 2018. Procesos y Componentes de Nitrificación. Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte. Presentación VII Congreso Nacional de Acuicultura.
- Michaud, L. 2007. Microbial Communities of Recirculating Aquaculture Facilities: Interaction Between Heterotrophic and Autotrophic Bacteria and the System Itself. 142p. PhD Thesis. Université Montpellier II, Département de Biologie Animale ad Ecologie Marina. Montpellier, Francia.

MINSAL. 2014. Reglamento sanitario de los alimentos. Diario oficial 13 de mayo 1997. Decreto supremo 977. Actualizado en septiembre del 2014. Depto. de Asesoría Jurídica. Ministerio de Salud Pública de Chile, Santiago, Chile. 181 p.

Mitic, V., V. Stamkov, M. Dimitrijevic, J. Cvetkovic, and G. Stojanovic. 2013. Effect of Food Preparation Technique on Antioxidant Activity and Plant Pigments Content in Some Vegetable Species. *Journal of Food and Nutrition Research* 6:121-127.

Monsees, H., J. Keitel, M. Paul, W. Kloas, and S. Wuertz. 2017. Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: Evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Acuaculture Environment Interactions* 9:9-18.

Morales, G. 2004. Crecimiento y eficiencia alimentaria de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) en jaulas bajo diferentes regímenes de alimentación. Tesis para acceder al título de ingeniero agrónomo, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina. 51 p.

Morgan, J., and E. Connolly. 2013. Plant-Soil Interactions: Nutrient Uptake. *Nature Education Knowledge* 4(8):2.

Nguyen, P., and E. Niemeyer. 2008. Effects of Nitrogen Fertilization on the Phenolic Composition and Antioxidant Properties of Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56:8685-8691.

Nicoletto, C., C. Mauricieri, Z. Schmautz, M. Borin, P. Sambo, R. Junge. 2018. Babyleaf NFT production and water managment in aquaponic system. *Acta horticulturae* 1215:159-164.

Ninfali, P., and D. Angelino. 2013. Nutritional and functional potential of *Beta Vulgaris* cicla and rubra. *Fitoterapia* 89: 188-199.

ODEPA. 2014. Diagnostico pesquero 2014. Sector pesquero: evolución de sus desembarques, uso y exportación en las últimas décadas. Oficina de estudios y políticas agrarias, Santiago, Chile. Disponible en <http://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/sector-pesquero-evolucion-de-susdesembarques-uso-y-exportacion-en-las-ultimas-decadas-febrero-2014> (Consultado en diciembre de 2019).

ODEPA. 2016. Boletín de hortalizas frescas. Información de precios y de comercio exterior a junio 2016. Oficina de estudios y políticas agrarias, Santiago, Chile. Disponible en <http://static.elmercurio.cl/Documentos/Campo/2016/08/02/2016080291518.pdf> (Consultado en marzo de 2019).

Okumus, I., and M. Mazlum. 2002. Evaluation of Commercial Trout Feeds: Feed Consumption, Growth, Feed Conversion, Carcass Composition and Bio-economic Analysis. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 2:101-107.

Olagnero, G., G. Carolina, A. Irei, and B. Silvia. 2007. Alimentos funcionales: Conceptos, Definiciones y Marco Legal Global. *DIAETA* 25:31-39.

Palm, H., U. Knaus, S. Appelbaum, S. Strauch, and B. Kotzen. Coupled Aquaponics Systems. p. 162-200. In: Goddek, S., A. Joyce, B. Kotzen, and G., Burnell (eds.) Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future. Springer, Cham, Switzerland.

Pan, W., I. Madsen, R. Bolton, L. Graves and T. Sistrunk. 2016. Ammonia/Ammonium Toxicity Root Symptoms Induced by Inorganic and Organic Fertilizers and Placement. *Agronomy* 108(6): 2485-2492.

Pantenella, E., M. Cardarelli, and G. Colla. 2012. Aquaponics vs. Hydroponics: Production and Quality of Lettuce Crop. *Acta Horticulturae* 927:887-893.

Pardossi, A., L. Incrocci, D. Massa, G. Carmassi, and R. Maggini. 2009. The Influence of Fertigation Strategies on Water and Nutrient Efficiency of Tomato Grown in Closed Soilless Culture with Saline Water. *Acta Horticulturae* 807(2): 445-450.

Peng, S., A. Sanico, F. Garcia, R. Laza, R. Visperas J. Descalsota, and K. Cassman. 1999. Effect of Leaf Phosphorus and Potassium Concentration on Chlorophyll Meter Reading in Rice. *Plant Production Science* 2(4):227-231.

Petrea, S., V. Cristea, L. Dediu, M. Contoman, P. Lupoae, M. Mocanu, and M. Coadă. 2013. Vegetable Production in an Integrated Aquaponic System with Rainbow Trout and Spinach. *Animal Science and Biotechnologies* 70(1):45-54.

Pyo, Y., T. Lee, L. Longendra and R. Rosen. 2004. Antioxidant activity and phenolic compounds of Swiss chard (*Beta vulgaris* subspecies *cykla*) extracts. *Food Chemistry* 85: 19-26.

Pineda, J., I. Miranda, J. Rodríguez, J. Ramírez, E. Pérez, I. García, and J. Morales. 2017. Nutritional balance in aquaponic lettuce production. *Acta Horticulturae* 1170:1093-1100.

Rafiee, G. and C. Saad. 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis sp.*) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 244:109-118.

Rakocy, J., M. Masser, and T. Losordo. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication 454, Stoneville, Mississippi, USA.

Red agrícola. 2018. El silencioso desarrollo de las hortalizas gourmet. *Revista Redagrícola*. Disponible en <https://www.redagricola.com/cl/el-silencioso-desarrollo-de-las-hortalizas-gourmet/> (Consultado en octubre 2019).

Resh, H. 2013. *Hydroponic Food Production*. Seventh Edition. CRC Press, Florida, USA.

Revista Aqua, 2017. La trucha es la especie salmonídea de Chile que más ha aumentado su precio de exportación. Disponible en <http://www.aqua.cl/2017/08/16/la-trucha-la-especiesalmonidea-chile-mas-ha-aumentado-precio-exportacion/> (Consultado en mayo de 2019).

Revista Aqua. 2015. Estrategias para mejorar el FCR. Comunidad y salmonicultura: Una relación por estrechar. Revista Aqua 108:18-21.

Revista Mundo Acuícola. 2013. Truchas y hortalizas: La tecnología del primer cultivo acuapónico en Chile. 94:6-9.

Ruamrungsri, S., T. Ohyama, T. Konno, and T. Ikarashi. 1996. Deficiency of N, P, K, Ca, Mg, or Fe Mineral Nutrients in *Narcissus* cv. "Garden Giant". Soil Science and Plant Nutrition 42(4):809-820.

Saha, S., A. Monroe, and M. Day. 2016. Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems. Annals of Agricultural Science 61(2):181-186.

Sánchez, I., W. Sanguino, A. Gómez, and R. García. Evaluation of a rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) culture water recirculating system. Revista MVZ Colombia 19 (3):4226-4241.

Schwarz, M. 1968. Guide to commercial hydroponics. Israel Universities Press, Jerusalem, Israel. 136p.

Seawright, D., R. Stickney, and R. Walker. 1998. Nutrient Dynamics in integrated Aquaculture-Hydroponics system. Aquaculture 160:215-237.

Selma, M., M. Luna, A. Martínez, J. Tudela, D. Beltrán, C. Baixauli, and M. Gil. 2012. Sensory quality, bioactive constituents and microbiological quality of green and red fresh-cut lettuces (*Lactuca sativa* L.) are influenced by soil and soilless agricultural production systems. Postharvest Biology and Technology 63(1):16-24.

Sharma, N., S. Acharya, K. Kumar, N. Singh, and O. Chaurasia. 2018. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. Journal of Soil and Water Conservation. 17(4): 364-371.

Shebis, Y., D. Iluz, Y. Kinel-Tahan, Z. Dubinsky, and Y. Yehoshua. 2013. Natural Antioxidants: Function and Sources. Food and Nutrition Sciences 4:643-649.

Singleton, V., and J. Rossi. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdicphosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture 16:144-157.

Sirsat S., and J. Neal. 2013. Microbial profile of soil-free versus in-soil grown lettuce and intervention methodologies to combat pathogen surrogates and spoilage microorganisms on lettuce. Foods 2(4):488-498.

Soberg, E. 2016. The Growth and Development of Lettuce, Coriander and Swiss chard in a Cold Water Aquaponic System Optimized for Lettuce Production. 83p. Master thesis. Norway University of Life Sciences, Faculty of Veterinary Medicine and Bioscience, The Department of Plant Sciences, Nordic.

Somerville, C., E. Pantanella, M. Cohen, A. Stankus, and A. Lovatelli. 2014. Small-scale Aquaponic Food Production. FAO Publication - Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589, Rome, Italy.

Sonneveld, C., and W. Voogt. 2009. Plant Nutrition of Greenhouse Crops. Springer, Boston, USA.

Spellman, F., and N. Whiting. 2006. Environmental Science and Technology. 2nd edition. Government Institutes. Oxford, United Kingdom.

Stefanelli, D., S. Winkler, and R. Jones. 2011. Reduced nitrogen availability during growth improves quality in red oak lettuce leaves by minimizing nitrate content and increasing antioxidant capacity and leaf mineral content. *Agricultural Sciences* (4):477-486.

Storebakken, T., and E. Austreng. 1987. Ration level for salmonids II: growth, feed intake, protein digestibility, body composition, and feed conversion in rainbow trout weighting 0.5-1.0 kg. *Aquaculture* 60:207-221.

Subpesca. 2019. Levantamiento de información de pisciculturas en Chile y su incorporación a la IDE de la división de acuicultura, segunda etapa. Geozone, Fondo de Investigación Pesquera, Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Concepción, Chile. 101p.

Subpesca. 2019. Informe sectorial de pesca y acuicultura, Departamento de Análisis Sectorial. Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Disponible en: <http://www.subpesca.cl/portal/616/articles-104821_documento.pdf> (Consultado en enero de 2020).

Suhl, J., D. Dannehl, W. Kloas, D. Baganz, S. Jobs, G. Scheibe, and U. Schmidt. 2016. Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural Water Management* 178:335-344.

Thaipong, K., U. Boonprakob, K. Crosby, L. Cisneros-Zevallos, and D. Hawkins. 2006. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extract. *Journal of Food Composition and Analysis* 19:669-675.

Timmons, M., J. Ebeling, F. Wheaton, S. Summerfelt, and B. Vinci. 2002. Recirculating aquaculture systems. 2nd edition. Northeastern Regional Aquaculture Center, Maryland, USA.

Toor, R., G. Savage, and A. Heeb. 2006. Influence of different types of fertilizers on the major antioxidant components of tomatoes. *Journal of Food Composition and Analysis* 19:20-27.

Torres, C. 2017. Dinámica de nutrientes en sistemas cerrados de circulación en el cultivo de *Piaractus brachypomus*, *Oreochromis sp.* y *Cyprinus carpio*, para su aplicación en la acuaponía. 27 p. Tesis de Maestría. Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, Colombia. 27p.

Turnbull, L., C. Philipson, D. Purves, R. Atkinson, J. Cunniff, A. Goodenough, Y. Hautier, J. Houghton, T. Marthews, C. Osborne, C. Paul-Victor, K. Rose, P. Saner, S. Taylor, F. Woodward. A. Hector, and M. Ress. Plant growth rates and seed sizes. *Ecology* 93:1283-1289.

- Tyson, R., E. Simone, J. White, and E. Lamb. 2004. Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics: pH levels. *Proceeding Florida State Horticultural Society* 117:79-83.
- Velichkova, K., I. Sikarov, S. Stoyanova, and Y. Staykov. 2019. Cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* W.) in the aquaponic recirculation system. *Journal of Central European Agricultural* 20(3):967-973.
- Venegas, N. 1990. Control microbiológico de alimentos: Técnicas actualizadas y métodos acelerados. Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 160 p.
- Vimal, S., J. Singh, N. Arora, and S. Singh. 2017. Soil-Plant-Microbe Interactions in stressed Agriculture Management: A Review. *Pedosphere* 27(2):177-192.
- Vinson, J., and B. Hontz. 1995. Phenol Antioxidant Index: Comparative Antioxidant Effectiveness of Red and White Wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 43(2):401-403.
- Wacyk, J., M. Powell, K. Rodnick, K. Oventurf, R. Hill, and R. Hardy. 2012. Dietary protein source significantly alters growth performance, plasma variables and hepatic gene expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed amino acid balanced diets. *Aquaculture* 356: 223-234.
- Wagner, E., T. Bosakowski, and S. Intelmann. 2011. Combined Effects of Temperature and High pH on Mortality and the Stress Response of Rainbow Trout after Shocking. *Transactions of the American Fisheries Society* 126(6):985-998.
- Welker, T., K. Overturf, and J. Abernathy. 2019. Effect of aeration and oxygenation on growth and survival of rainbow trout in a commercial serial-pass, flow-through raceway system. *Aquaculture reports* 14:100-194.
- Whiting, D., C. O'Meara, and C. Wilson. (2014) *Vegetable Planting Guide*. Colorado State University, Colorado, USA. Disponible en <https://extension.colostate.edu/topic-areas/agriculture/?target=publications> (Consultado en noviembre de 2019).
- Wongkiew, S., Z. Hu, K. Chandran, J. Woo-Lee, and S. Kumar. 2017. Nitrogen transformations in aquaponic system: A review. *Aquacultural Engineering* 210:81-87.
- Wortman, S. 2015. Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Scientia Horticulturae* 194:34-42.
- Woynarovich, A., G. Hoitsy, and M. Poulsen. 2011. Small-scale rainbow trout farming. *Fisheries and Aquaculture Technical Paper* 561, 81p.
- Xiong, D., J. Chen, T. Yu, W. Gao, X. Ling, Y. Li, and S. Peng. 2015. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Science Reports* 5: 1-12.

- Xu, Q., and B. Huang. 2000. Effects of differential air and soil temperature on carbohydrate metabolism in creeping bentgrass. *Crop Science* 40:1368-1374.
- Xu, Q., and B. Huang. 2006. Seasonal changes in root metabolic activity and nitrogen uptake for two cultivars of creeping bentgrass. *HortScience* 41:822-826.
- Yadav, A., R. Kumari, A. Yadav, J. Mishra, S. Srivastava, and S. Prabha. 2016. Antioxidants and its functions in human body – A Review. *Research in Environment and Life Science* 9:1328-1331.
- Yavuzacan, H., L. Robaina, J. Pirhonen, E. Mente, D. Domínguez, and G. Parisi. Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with Emphasis on Feed and Faeces- A Review. *Water* 9(1):1-17.
- Zein, H., A. El-Moneim, S. Hashish, and G. Ismaiel. The antioxidant and Anticancer Activities of Swiss Chard and Red Beetroot Leaves. *Current Science International* 4(4):491-498.
- Zhang, S., J. Liu, S. Weu, J. Gao, D. Wang, and K. Zhang. 2006. Impacts of aquaculture on eutrophication in Changshou Reservoir. *Chinese Journal of Geochemistry* 25:90 -96.
- Zhao, X., Q. Du, Y. Zhao, H. Wang, Y. Li, X. Wang, and H. Yu. 2015. Effect of Different Potassium Stress on Leaf Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence in Maize (*Zea Mays* L.) at Seedling Stage. *Agricultural Sciences* 7(1):44-53.
- Zlatev, Z., F. Cebola, and M. Kaimakanova. 2012. Plant physiological responses to UV-B radiation. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 24(6):481-501.
- Zou, Y., Z. Hu, J. Zhang, H. Xie, C. Guimbaud, and Y. Fang. 2016. Effects of pH on nitrogen transformations. *Bioresource Technology* 210:81-87.

APENDÍCE I

Memoria de cálculos

Cálculos relación entre componentes

A raíz de la gran variedad de recomendaciones que va desde los 15 g m⁻² día⁻¹ a los 100 g m⁻² día⁻¹ (Endut *et al.*, 2010; Somerville *et al.*, 2014; Rakocy *et al.*, 2006), y que no consideran factores como la densidad de plantación, estado fenológico y especie utilizada, es que en este trabajo se propuso igualar la tasa de producción de TAN diaria a la tasa de absorción diaria de N.

Primer ensayo

Si bien se establecen como rangos óptimos para la densidad en el estanque de cultivo acuícola entre 10 a 20kg m⁻³ (Somerville *et al.*, 2014), otros autores establecen que, en sistemas acuapónicos de baja tecnología, con el fin de mantener parámetros óptimos de calidad de agua, se debe reducir la densidad, proponiendo densidades entre 2,5 a 4,6 kg m⁻³ (Maurieci *et al.*, 2019). Es por lo anterior que durante el primer ensayo se utilizaron 4 truchas por tratamiento, manteniendo una biomasa total por estanque al inicio del experimento de 357,4 g (3,5 kg m⁻³), siendo alimentados a una tasa del 2 % del peso vivo.

$$357,4 \text{ g estanque}^{-1} \times 2\% = 7,1492 \text{ g día}^{-1}$$

Según Wongkiev *et al.* (2017), se considera que la producción de nitrógeno amoniacal en el sistema se calcula en función de la siguiente formula:

$$PTAN = 0,092 \times F \times PC$$

Donde PTAN es la tasa de producción de TAN (kg día⁻¹), F corresponde a alimentación diaria (kg día⁻¹) mientras que PC hace referencia al contenido proteico del alimento (en fracción). Por lo tanto, la PTAN durante los ensayos es la siguiente.

$$PTAN_{1er \ ensayo} = 0,092 \times 0,42 \times 7,5 \text{ g día}^{-1}$$

$$PTAN_{1er \ ensayo} = 0,2898 \text{ g TAN día}^{-1}$$

En base a lo anterior, es posible determinar la tasa de producción de compuestos nitrogenados y, por ende, la tasa de entrega de este nutriente a las plantas. En un ensayo realizado por Albornoz y Lieth (2015), establecieron la absorción diaria de ciertos nutrientes en función de la materia fresca (MF) de la planta, y reportaron que lechugas cultivadas en un sistema hidropónico, es capaz de absorber 0,00254, 0,00232, 0,00142 y 0,00084 gr N (NO₃+NH₄⁺) gr⁻¹ MF día⁻¹ en la primera, segunda, tercera y cuarta semana de crecimiento respectivamente, generando una disminución en la tasa al avanzar las semanas de crecimiento debido a una disminución en la eficiencia de crecimiento. Es por lo anterior que se generó un balance entre la producción de TAN y la NO₃ con el fin de establecer una relación adecuada entre el componente vegetal y acuícola.

Semana 1

$$\begin{aligned} \text{Absorción por planta} &= 5g \text{ MF} \times 0,00273 g \text{ N día}^{-1} g \text{ MF}^{-1} \\ \text{Absorción por planta} &= 0,01366 g \text{ N día}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de plantas cultivables} &= \frac{0,2898 g \text{ TAN día}^{-1}}{0,01366 g \text{ N día}^{-1}} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= 21 \text{ plantas} \end{aligned}$$

Semana 4

$$\begin{aligned} \text{Absorción por planta} &= 35g \text{ MF} \times 0,00087 g \text{ N día}^{-1} g \text{ MF}^{-1} \\ \text{Absorción por planta} &= 0,0261 g \text{ N día}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de plantas cultivables} &= \frac{0,2898 g \text{ TAN día}^{-1}}{0,0261 g \text{ N día}^{-1}} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= 9 \text{ plantas} \end{aligned}$$

Es por los cálculos anteriores que, con el fin de no perjudicar la calidad de agua para los peces durante el comienzo del ensayo y a su vez no contar con una entrega de nutrientes muy baja al término de ensayo, se optó por trabajar con la media de ambas, correspondiente a 15 plantas. Lo anterior correspondería a una relación de $15 \text{ gr m}^{-2}\text{día}^{-1}$, lo cual coincide con la recomendación mínima de Endut *et al.* (2010).

Segundo ensayo

A raíz de los bajos rendimientos obtenidos en el componente vegetal al término del ensayo anterior se decidió aumentar la carga en ambos componentes del sistema. Se mantuvo misma la lógica para realizar el cálculo, sin embargo, esta vez se comenzó el ensayo una biomasa por estaque de 947,2

$$947,2 g \text{ estanque}^{-1} \times 2\% = 18 g \text{ día}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{PTAN}_{2do \text{ ensayo}} &= 0,092 \times 0,42 \times 18 g \text{ día}^{-1} \\ \text{PTAN}_{2do \text{ ensayo}} &= 0,69552 g \text{ TAN día}^{-1} \end{aligned}$$

Semana 1

$$\begin{aligned} \text{Absorción por planta} &= 5g \text{ MF} \times 0,00273 g \text{ N día}^{-1} g \text{ MF}^{-1} \\ \text{Absorción por planta} &= 0,01366 g \text{ N día}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de plantas cultivables} &= \frac{0,69552 g \text{ TAN día}^{-1}}{0,01366 g \text{ N día}^{-1}} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= 51 \text{ plantas} \end{aligned}$$

Semana 2

$$\begin{aligned} \text{Absorción por planta} &= 10g \text{ MF} \times 0,002428 g \text{ N día}^{-1} g \text{ MF}^{-1} \\ \text{Absorción por planta} &= 0,024283 g \text{ N día}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de plantas cultivables} &= \frac{0,69552 g \text{ TAN día}^{-1}}{0,0243 g \text{ NO}_3 \text{ día}^{-1}} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= 29 \text{ plantas} \end{aligned}$$

Semana 3

$$\text{Absorción por planta} = 25g \text{ MF} \times 0,001472 g \text{ N día}^{-1} g \text{ MF}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{Absorción por planta} &= 0,0368 \text{ g N día}^{-1} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= \frac{0,069552 \text{ g TAN día}^{-1}}{0,0368 \text{ g NO}_3\text{día}^{-1}} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= 19 \text{ plantas} \end{aligned}$$

Sin embargo, a raíz de las deficiencias nutricionales obtenidas en las acelgas y el cambio en el método de cosecha, en comparación al primer ensayo, se decidió cambiar el método de aproximación a la cantidad de plantas cultivables en el sistema. En este caso se calculó mediante la media de las tres primeras semanas de cultivo, considerando que al cabo de dos semanas se ejecutó cada cosecha, correspondiente a 33 plantas, estableciendo una relación de $34,6 \text{ gr m}^{-2}\text{día}^{-1}$. Lo anterior también coincide con lo recomendado por Endut *et al.* (2010)

Reajuste de masa

Al término del primer mes, y producto de un aumento en la mortalidad de los estanques, se modificó la carga en el sistema. Se decidió volver a la relación del primer ensayo considerando la media estadística entre la primera y cuarta semana. En este caso se trabajó en este caso con $5,5 \pm 0,5$ truchas por estanque manteniendo una biomasa por estanque al inicio del experimento de 736,65 g (correspondiente al doble de la biomasa inicial del primer ensayo).

$$\begin{aligned} \text{PTAN}_{2do \text{ ensayo}} &= 0,092 \times 0,42 \times 14 \text{ g día}^{-1} \\ \text{PTAN}_{2do \text{ ensayo}} &= 0,54096 \text{ g TAN día}^{-1} \end{aligned}$$

Semana 1

$$\begin{aligned} \text{Absorción por planta} &= 5 \text{ g MF} \times 0,00273 \text{ g N día}^{-1} \text{ g MF}^{-1} \\ \text{Absorción por planta} &= 0,01366 \text{ g N día}^{-1} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= \frac{0,54096 \text{ g TAN día}^{-1}}{0,01366 \text{ g NO}_3\text{día}^{-1}} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= 40 \text{ plantas} \end{aligned}$$

Semana 4

$$\begin{aligned} \text{Absorción por planta} &= 30 \text{ g MF} \times 0,00087 \text{ g N día}^{-1} \text{ g MF}^{-1} \\ \text{Absorción por planta} &= 0,0261 \text{ g N día}^{-1} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= \frac{0,54096 \text{ g TAN día}^{-1}}{0,00,0261 \text{ g NO}_3\text{día}^{-1}} \\ \text{Cantidad de plantas cultivables} &= 21 \text{ plantas} \end{aligned}$$

Considerando los dos parámetros calculados anteriormente se utilizó la media de dichas semanas, llegando a una cantidad similar de plantas correspondiente a 31 plantas, pero con estableciendo una relación de $26,9 \text{ gr m}^{-2}\text{día}^{-1}$.

Cálculo de biofiltro

Autores establecen que a una temperatura de 24°C la tasa de nitrificación corresponde a $1 \text{ g TAN m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en condiciones óptimas, teniendo una reducción del 50 al 60% en aguas con una menor temperatura (Merino, 2018; Sommerville *et al.*, 2014). Por lo anterior, considerando los requerimientos térmicos de la trucha arcoíris, se consideró una disminución del 50%, considerando que la tasa de nitrificación del biofiltro corresponde a $0,5 \text{ g TAN m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

$$0,69552 \text{ g TAN día}^{-1} \times \left(1/0,4 \text{ g TAN m}^{-2}\text{día}^{-1}\right) = 1,7388 \text{ m}^2$$

Considerando que el medio filtrante utilizado en este ensayo mantiene un área de $600 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ (Sommerville et al., 2014).

$$1,7388 \text{ m}^2 \times \left(1/600 \text{ m}^2\text{m}^{-3}\right) = 0,002898 \text{ m}^3$$

$$0,001582 \text{ m}^3 \times \left(1\text{m}^3/1000 \text{ L}\right) = 2,898 \text{ L}$$

Por lo tanto, en la sección del biofiltro el requerimiento mínimo de volumen en bio-bolas para la conversión de TAN corresponde a un total de 2,898 L.

APENDICE II

Información adicional del primer ensayo

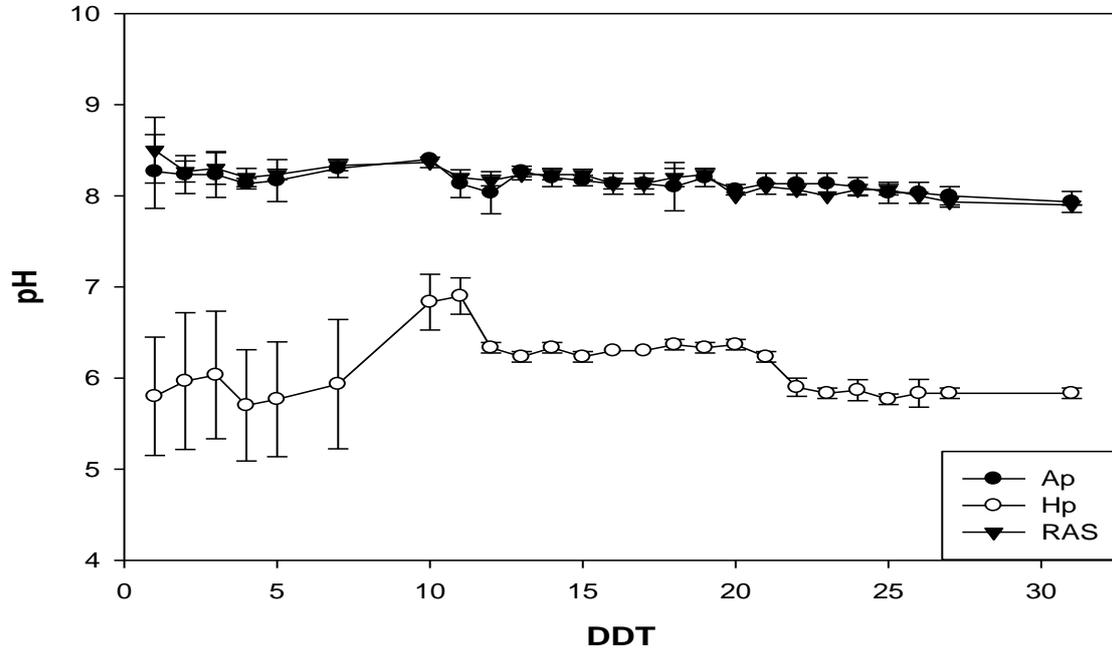


Figura 1. Variación en pH de los tratamientos acuapónico (Ap), hidropónico (Hp) y acuícola (RAS) durante el primer ensayo (30 días) ($n=3$) \pm DE.

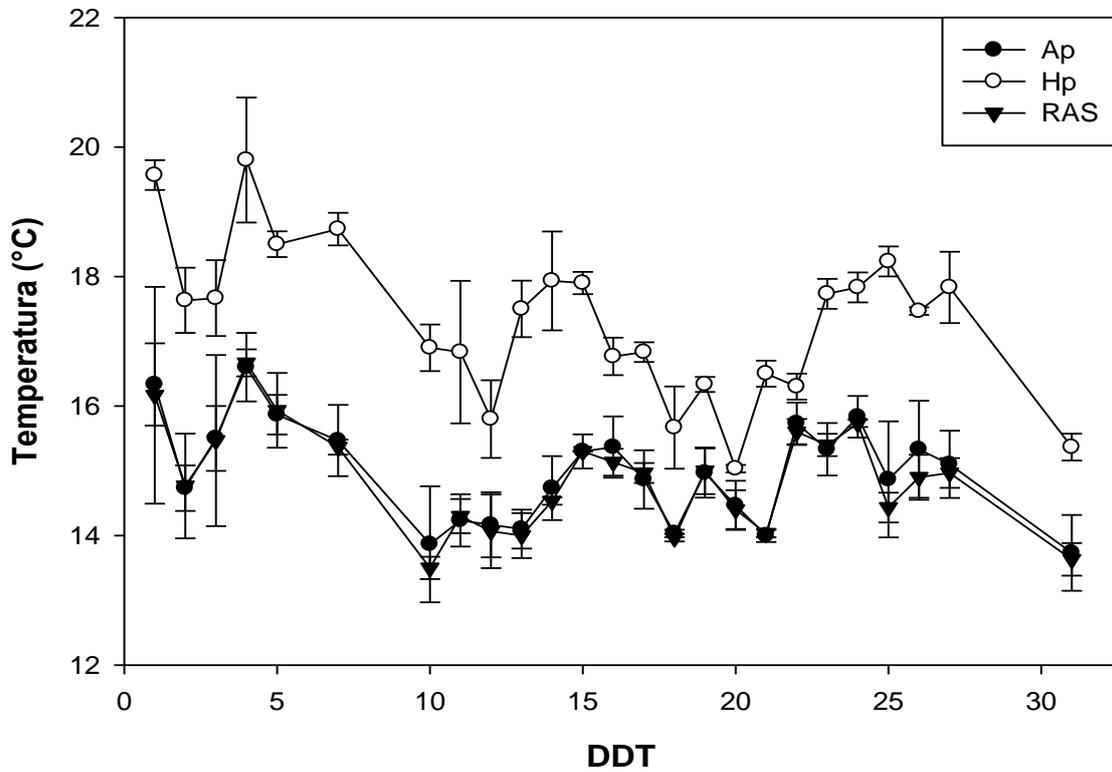


Figura 2. Variación en la temperatura de los tratamientos acuapónico (Ap), hidropónico (Hp) y acuícola (RAS) durante el primer ensayo (30 días) ($n=3$) \pm DE.

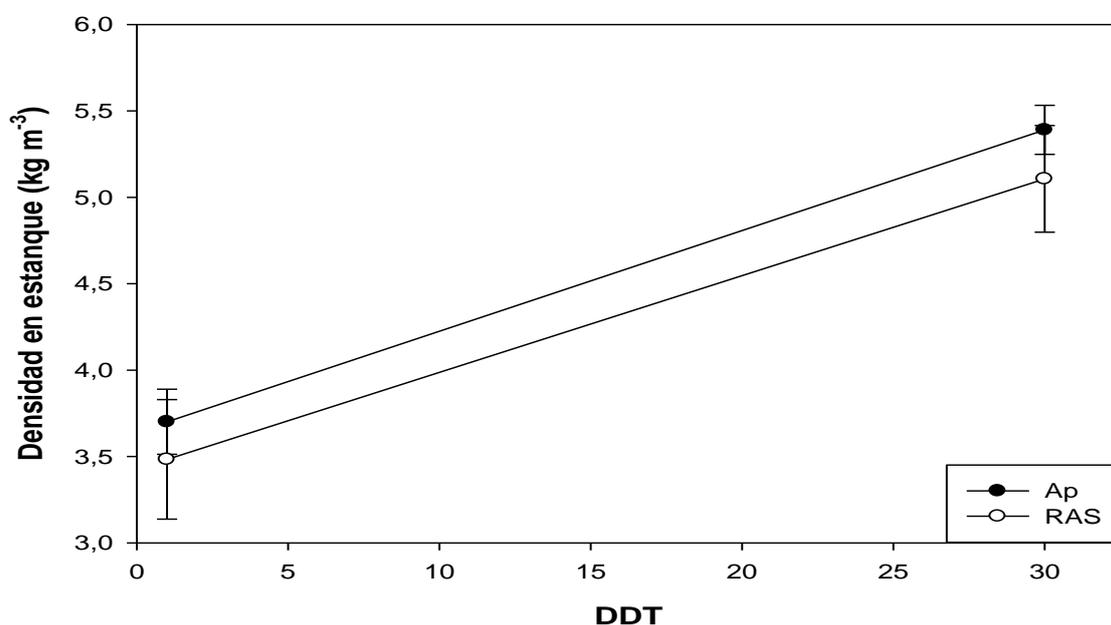


Figura 3. Variación en la densidad del estanque en tratamientos acuapónico (Ap) y acuícola (RAS) durante el primer ensayo (30 días) ($n=3$) \pm DE.

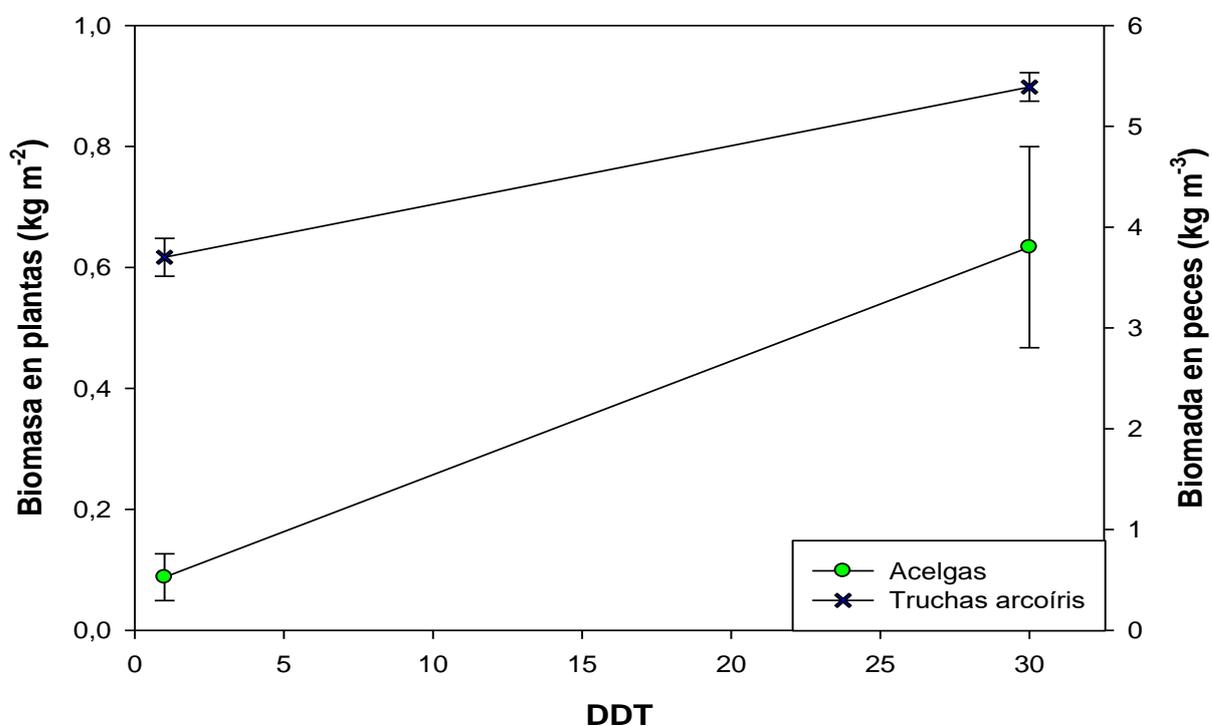


Figura 4. Evolución en la relación de biomasa entre componente acuícola (trucha arcoíris) y componente vegetal (acelga) durante el primer ensayo (30 días) ($n=3$) \pm DE.

Información adicional del segundo ensayo

Cuadro 1. Parámetros productivos en trucha arcoíris medidos y calculados en función a la variación presente al término de la primera mitad del segundo ensayo (30 días).

Parámetro*	Ap	RAS
GP (g pez ⁻¹)	33,8± 12,4a	28,6 ±23,16 ^a
FCA	1,87± 0,59 ^a	6,38 ±8,43 ^a
LT (cm)	22,36± 1,13 ^a	22,9 ±0,55 a
LE (cm)	20,9± 0,66 ^a	21,12± 1,65 ^a
TCE (% día ⁻¹)	0,98± 0,31 ^a	0,81± 0,63 ^a
K (g cm ⁻¹)	1,45± 0,11 ^a	1,41 ±0,53 ^a
S (%)	71,8± 9,23a	66,6 ±5,77 ^a

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas ($p \leq 0,05$). Los valores corresponden a la media entre UE ($n=3$) \pm DE. *Valores calculados hasta el 25 de junio.

Cuadro 2. Prueba de significancia a distintos niveles de confianza para cada factor utilizado en el análisis de los ciclos de crecimiento en acelga durante el segundo ensayo.

Factor	Nivel de significancia		
	0,05	0,01	0,001
Tratamiento (T)	ns	ns	ns
Ciclo (C)	*	*	*
Interacción (T x C)	ns	ns	ns
Peso inicial	*	*	ns

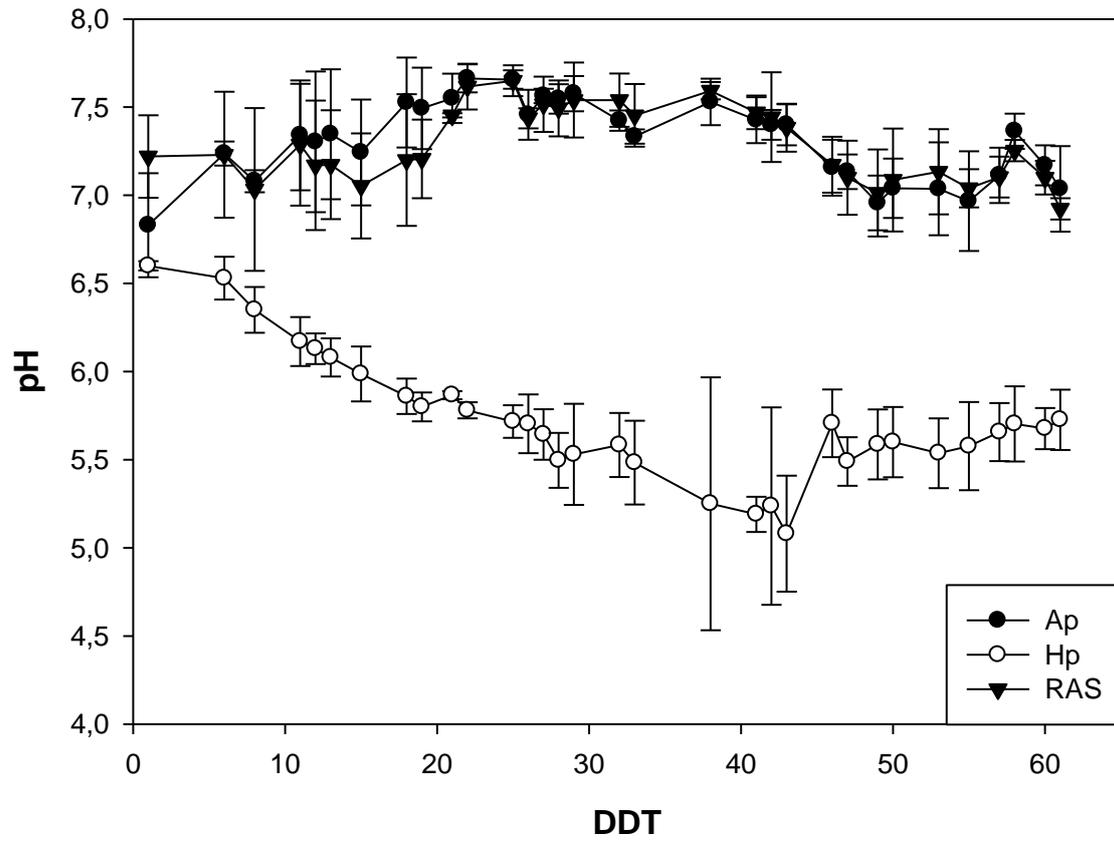


Figura 5. Variación en el pH de los tratamientos acuapónico (Ap), hidropónico (Hp) y acuícola (RAS) durante el segundo ensayo (60 días) ($n=3$) \pm DE.

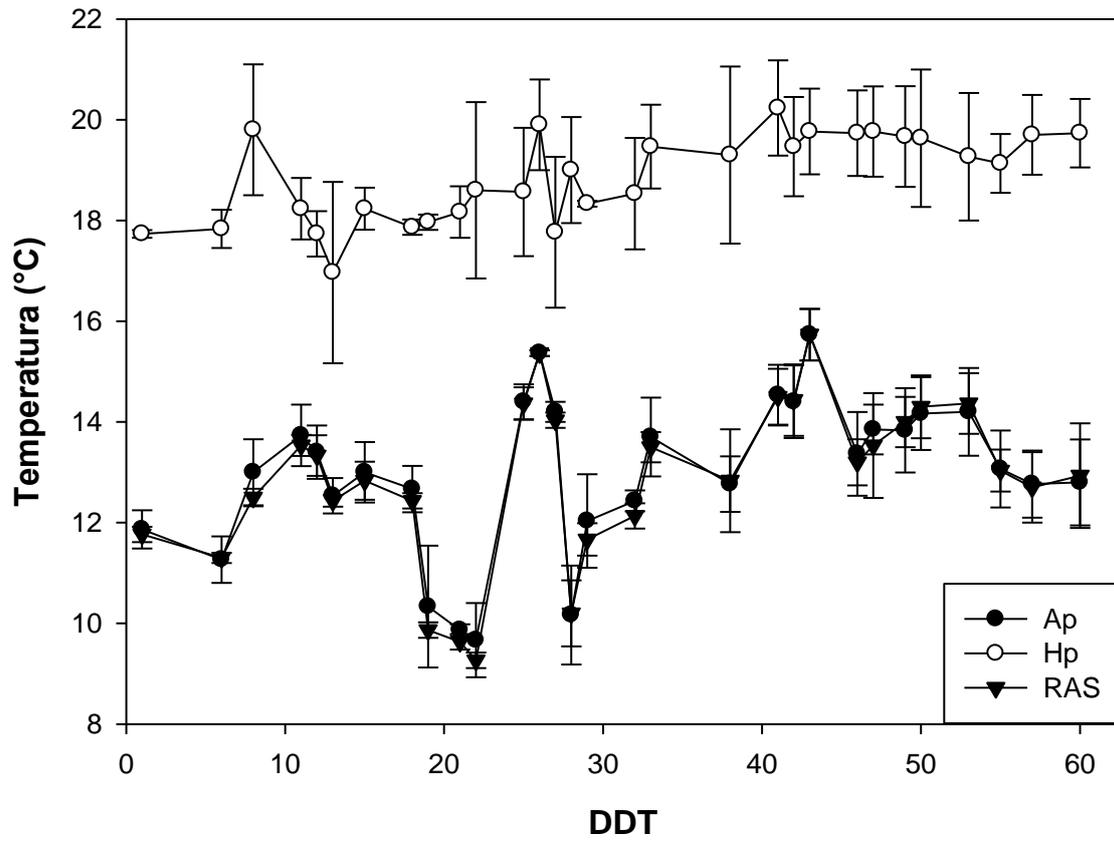


Figura 6. Variación en la temperatura de los tratamientos acuapónico (Ap), hidropónico (Hp) y acuícola (RAS) durante el segundo ensayo (60 días) ($n=3$) \pm DE.

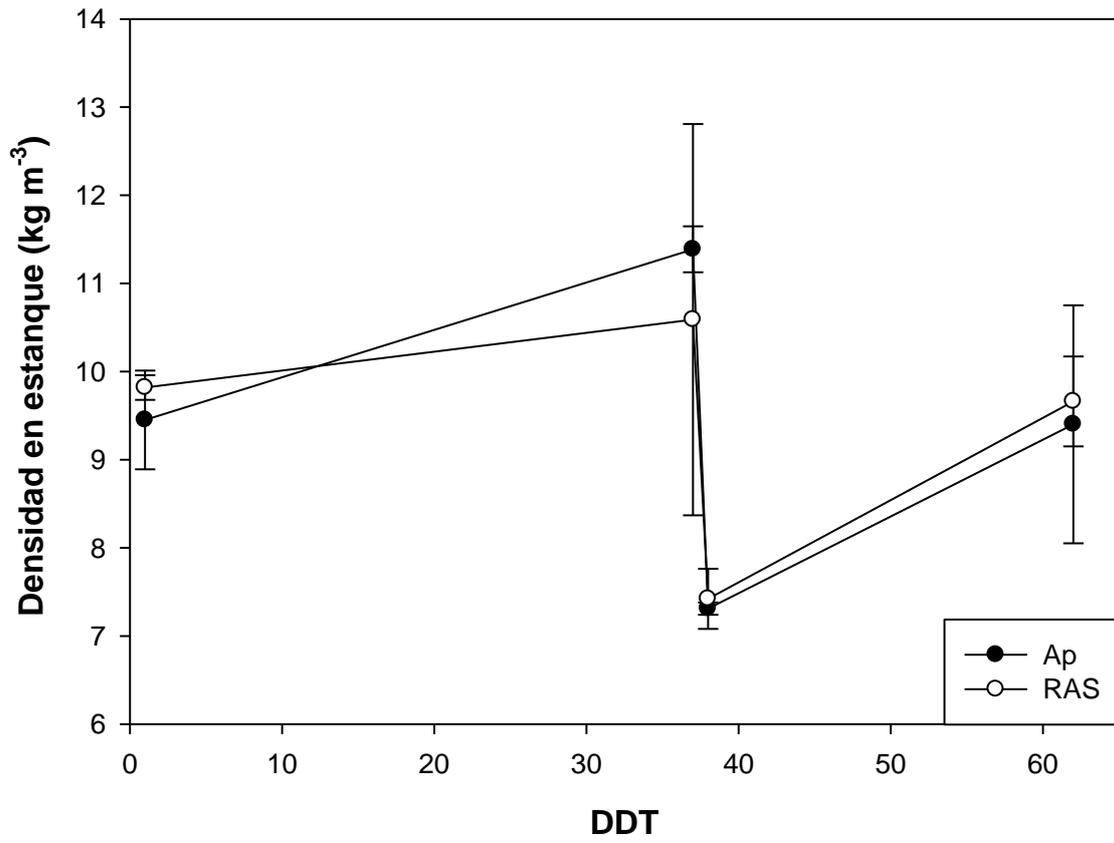


Figura 7. Evolución en la relación de biomasa entre componente acuícola (trucha arcoíris) y componente vegetal (acelga) durante el segundo ensayo (60 días) ($n=3$) \pm DE.

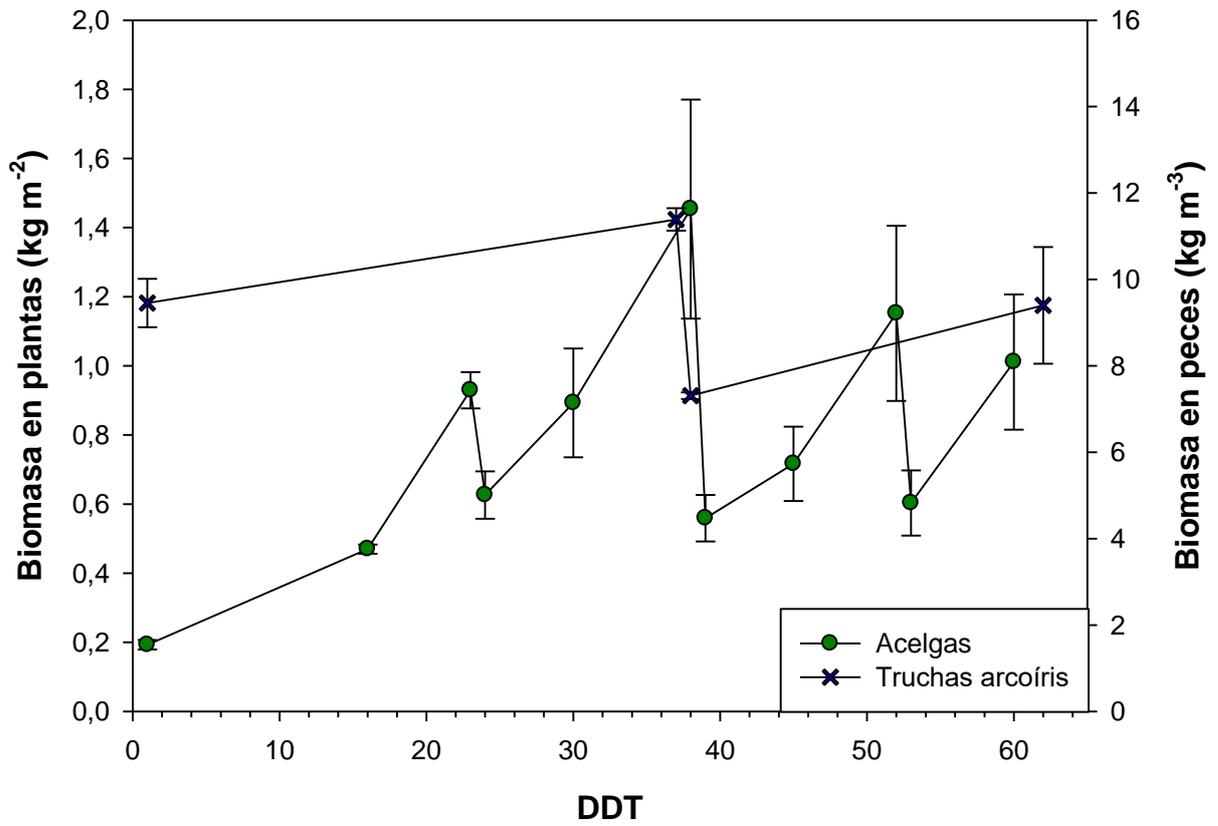


Figura 8. Evolución de la relación de biomasa entre componente acuícola (trucha arcoíris) y componente vegetal (acelga) durante el segundo ensayo (8 semanas) ($n=3$) \pm DE.

ANEXOS

ANEXO I

Cuadro 1. Formulación de sales para solución nutritiva utilizada en tratamiento hidropónico (Hp) para hortalizas de hoja periodo otoño-invierno durante ambos ensayos.

Fertilizante (Macronutrientes)	mg L ⁻¹
Ca(NO ₃) ₂	116
Mg(NO ₃) ₂	221
KH ₂ PO ₄	264
KNO ₃	223
(NH ₄)(NO ₃)	140
Fertilizante (Micronutrientes)	mg L ⁻¹
H ₃ BO ₃	0,41
MnSO ₄	1,18
CuSO ₄	0,01
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0,05
ZnSO ₄	0,13
Quelato de Hierro EDTA (6% Fe)	7,00

ANEXO II

Cuadro 2. Análisis de agua utilizada para recambios de agua en tratamientos acuapónico (Ap) y sistema recirculante de agua (RAS) y como base para la formulación de la solución nutritiva hidropónica (Hp).

Parámetro	
pH	7,46
C.E.	1,4 dS m ⁻¹
Determinaciones (mg L ⁻¹)	
N-amoniacal	0,98
N-nítrico	1,2
P	0,10
B	0,29
Cu	0,03
Fe	0,08
Mn	< 0,01
Zn	0,02
Cationes y aniones (mg L ⁻¹)	
Ca	146
Mg	18
K	3
Na	97
Cl	163
SO ₄	346
HCO ₃	104

Análisis realizado con agua de pozo, Centro de Estudios en Post Cosecha, Universidad de Chile, La Pintana, Santiago, Chile.

