

De la nitrificación al control de enfermedades

las funciones de las comunidades microbianas en la producción de plantas en acuaponía

From nitrification to disease control: the roles of microbial communities
in aquaponic plant production

Resumen

La explotación desmedida de los recursos naturales pone en riesgo la soberanía alimentaria en todo el mundo. Por lo cual, se buscan sistemas de producción de alimentos que aprovechen de manera eficiente los recursos naturales disponibles. Una alternativa viable es la acuaponía, porque el agua y los nutrientes son aprovechados de manera más eficiente que en los sistemas individuales de

Recursos Naturales y Sociedad, 2021. Vol. 7 (3): 07-17. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0003>

Tomás Rivas-García¹, Ramsés Ramón González-Estrada² y Bernardo Murillo-Amador^{3*}

¹ Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5. Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56230.

² Tecnológico Nacional de México/I. T. Tepic, Av. Tecnológico #2595. Colonia Lagos del Country, Tepic, Nayarit, México. C.P. 63175.

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., Avenida Instituto Politécnico Nacional No. 195. Colonia Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, México. C.P. 23096.

* Autor de correspondencia: bmurillo04@cibnor.mx

producción de peces y plantas. Las comunidades microbianas o conjunto de microorganismos son importantes porque interactúan con peces, plantas y entre ellos mismos en el sistema. Predomina información sobre las bacterias nitrificantes en el sistema. Sin embargo, empieza a difundirse más información sobre microorganismos desfavorables como patógenos de humanos, patógenos de plantas, bacterias reductoras de sulfato y bacterias desnitrificadoras, así como microorganismos benéficos como bacterias nitrificadoras, bacterias promotoras del crecimiento vegetal y microorganismos antagonistas. Las tecnologías “Ómicas” están facilitando el estudio y caracterización de estas comunidades microbianas. El control biológico surge como alternativa a las limitantes en cuanto a métodos de desinfección y/o tratamientos contra patógenos. Entender las funciones de las comunidades microbianas permitirá mejorar la productividad y eficiencia en este sistema alternativo de producción de alimentos.

Palabras clave: acuicultura; hidroponía; control biológico; sustentabilidad

Abstract

The excessive exploitation of the natural resources puts at risk the food sovereignty around the world. Therefore, the seeking for food production systems that use more efficiently the natural resources is ongoing. An alternative is aquaponics, because nutrients and water are utilized more efficiently than in individual fish and plant production systems. Microbial communities are important because they interact with fish, plants and with each other in the system. Information about nitrifying bacteria predominates in these production systems. However, more information is beginning to disseminate about unfavorable microorganisms such as human pathogens, plant pathogens,

sulfate-reducing bacteria, and denitrifying bacteria; and on beneficial microorganisms such as nitrifying bacteria, plant growth promoting bacteria and antagonistic microorganisms. “Omics” technologies are facilitating the study and characterization of these microbial communities. Biological control arises as an alternative to the limitations in terms of disinfection methods and/or treatments against pathogens. Understanding the functions of microbial communities will improve the productivity and efficiency in this alternative food production system.

Key words: aquaculture; hydroponics; biological control; sustainability

Antecedentes

En México y el mundo, la explotación desmedida de los recursos naturales pone en riesgo la soberanía alimentaria. Por ello, los gobiernos, la comunidad científica y la

sociedad en general buscan sistemas de producción de alimentos que aprovechen de manera eficiente los recursos naturales disponibles. A partir de los años setenta surgen las primeras publicaciones científicas sobre acuaponía (Naegel *et al.*, 1975). En este sistema, el agua y los nutrientes son aprovechados de manera más eficiente que en los sistemas individuales de producción de peces y plantas sin disminuir su rentabilidad y productividad.

Las comunidades microbianas se definen como el conjunto de microorganismos que interactúan entre sí en determinado ambiente. Se sabe que las comunidades microbianas tienen numerosas funciones en los sistemas de acuaponía (Joyce *et al.*, 2019). Por ejemplo, existen bacterias que tienen la capacidad de transformar el nitrógeno disponible durante la producción de peces a compuestos químicos nitrogenados que son asimilables para las plantas. Además, coexisten bacterias que pueden ingresar al intestino de los peces cultivados causando efectos benéficos (probióticos). Por otro lado, en la producción de plantas se sabe que concurren microorganismos que favorecen la asimilación de nutrientes para la planta, estimulan su desarrollo, crecimiento, y pueden prevenir y controlar el establecimiento de fitopatógenos (Rivas-García *et al.*, 2020). Sin embargo, el modelo de estudio de las comunidades microbianas en plantas suelen ser los sistemas convencionales de producción en suelo.

Recientemente, se inició el estudio de las comunidades microbianas en la producción de plantas en sistemas sin suelo, así como el efecto de las mismas en los diferentes módulos de los sistemas de acuaponía (Bartelme *et al.*, 2018; 2019). Por lo antes mencionado, en este artículo se abordan las funciones de las comunidades microbianas para mejorar la eficiencia en la producción de plantas y su efecto sobre todo el sistema de acuaponía. Además, para entender cómo influyen diferentes componentes del sistema en la proliferación de microorganismos,

se describen los componentes básicos del sistema. Además, se mencionarán los principales microorganismos benéficos, así como los patógenos reconocidos con la producción de plantas en acuaponía

Asimismo, se abordan las perspectivas a futuro sobre este sistema.

¿Cómo funciona un sistema de acuaponía?

La acuaponía es un sistema donde existe un flujo continuo de los nutrientes y el agua.

Se clasifica de acuerdo con el tipo de tecnológica que se utiliza para los cultivos y de acuerdo con si es un sistema acoplado o desacoplado.

Describiendo de forma general estos sistemas, los peces se cultivan en tanques de fibra de vidrio, concreto, plástico, entre otros materiales, mientras que; el agua de los tanques pasa a través de filtros mecánicos y biofiltros. Los filtros mecánicos retienen las partículas sólidas y evitan la proliferación de biopelículas microbianas, las cuales limitan

la disponibilidad de oxígeno para las plantas. Mientras que, los biofiltros favorecen la proliferación de bacterias que transforman el amoníaco (NH_3) y nitrito (NH_2^-) en nitratos (NO_3^-), para detoxificar el agua para los peces y para que las plantas asimilen el nitrógeno disponible.

Cuando el agua llega al sistema de hidroponía, las plantas absorben los nutrientes disponibles disminuyendo las partículas sólidas disueltas y los iones. Para finalizar, el agua puede regresar al módulo de acuicultura (sistema acoplado) o se puede desechar y/o utilizar para regar cultivos convencionales (sistema desacoplado) (Somerville *et al.*, 2014).

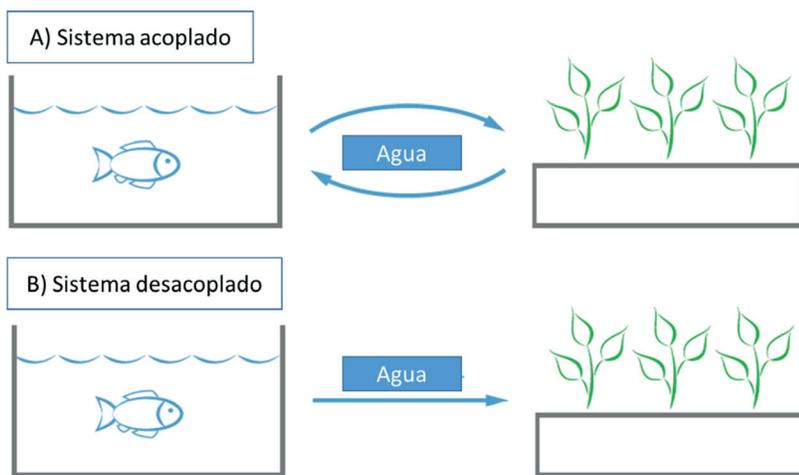


Figura 1. Descripción general del funcionamiento de un sistema de acuaponía

¿Qué organismos vivos cohabitan en el sistema de acuaponía?

Los organismos que interactúan en el sistema son peces, plantas y microorganismos. Los peces cultivados son de agua dulce principalmente, destacando las especies de tilapia (*Oreochromis spp.*) debido a que se desarrollan rápido y son capaces de adaptarse a variaciones de temperatura y pH (Delaide *et al.*, 2017). Las plantas cultivadas en acuaponía son las mismas que se cultivan en los sistemas de hidroponía. Por ejemplo, tomate, pimientos, lechuga, espinaca, acelga, entre otras

especies. Es recomendable que las plantas cultivadas no tengan variaciones amplias en cuanto a los requerimientos nutrimentales, porque es difícil modificar la alimentación de peces para suplir estos requerimientos (Jones, 2002). Los microorganismos que cohabitan con peces y plantas en el sistema son principalmente bacterias y hongos en menor porcentaje (Rojas-Tirado *et al.*, 2017).

¿Qué parámetros permiten la proliferación de peces, plantas y microorganismos?

Para que los peces, plantas y microorganismos cohabiten, se desarrollen y proliferen en los sistemas de acuaponía es importante monitorear diversos parámetros medio-ambientales (Joyce *et al.*, 2019). El valor óptimo en el medio acuoso se obtiene por un balance de los valores idóneos para la proliferación de los tres tipos de organismos vivos que cohabitan en el sistema.

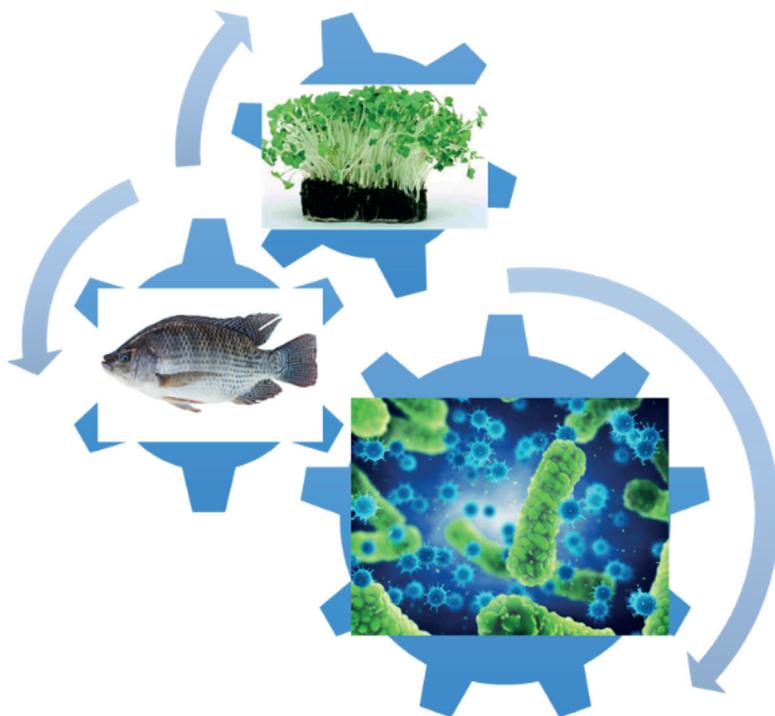


Figura 2. Peces, plantas y microorganismos cohabitan en el sistema de acuaponía.

Cuadro 1. Parámetros medio ambientales óptimos para la proliferación de los organismos vivos que cohabitan en el sistema de acuaponía.

Parámetro	Valores óptimos		
	Peces (Tilapia)	Plantas	Bacterias
pH	7-9	6-6.5	6.8-7
Temperatura (°C)	Agua templada (22-32) Agua fría (10-18)	16-30	14-34
Oxígeno disuelto (mg mL ⁻¹)	>6	4-8	>2
Conductividad eléctrica (dS cm ⁻¹)	>0.002-0.004		
Amoniaco (mg mL ⁻¹)	<1	<30	<3
Nitritos (mg mL ⁻¹)	<1		
Nitratos (mg mL ⁻¹)	5-150		

¿Qué son las comunidades microbianas en acuaponía?

El diseño de los sistemas de acuaponía además de permitir el aprovechamiento óptimo de nutrientes y agua, también promueve la proliferación de comunidades microbianas. Como se definió previamente, las comunidades microbianas son el conjunto de especies de microorganismos que interactúan entre sí en

determinado ambiente. Los microorganismos diversos de dicha comunidad, además de interactuar con peces y plantas, también interactúan entre ellos mismos generando interacciones de tipo sinérgico y/o antagonista (Cuadro 2). Con ello se genera un perfil enzimático, genético y metabólico específico para cada comunidad microbiana y por lo tanto con propiedades y características específicas (Konopka *et al.*, 2009).

¿Existen microorganismos desfavorables en las comunidades microbianas en acuaponía?

Una preocupación importante, es el riesgo de contaminación con patógenos para humanos debido a la recirculación del efluente de los tanques de peces, para la producción de plantas. Los patógenos principales que podrían transmitirse por la recirculación del efluente o por manipulación humana son; *Salmonella* spp., *Vibrio* spp.,

Listeria monocytogenes, *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* (Raymond y Ramachandran, 2019). Afortunadamente, se sabe que estos patógenos no suelen estar presentes o se han detectado en concentraciones muy bajas (Munguia-Fragozo *et al.*, 2015; Elumalai *et al.*, 2017).

Cuadro 2. Tipos de interacciones entre microorganismos de una comunidad microbiana (Konopka *et al.*, 2009).

Tipo de interacción	Ejemplos
Competencia por nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> - Transportadores de nutrientes de superficie celular - Enzimas extracelulares - Sideróforos - Lanzaderas de electrones
Metabólicas	<ul style="list-style-type: none"> - Sintrofia - Alimentación cruzada - Utilización secuencial - Modificación química del ambiente
Alelopatía	<ul style="list-style-type: none"> - Metabolitos secundarios de plantas y microorganismos.
Señalizadores	<ul style="list-style-type: none"> - Quorum sensing
Estructurales	<ul style="list-style-type: none"> - Consorcios - Biofilms
Tróficas	<ul style="list-style-type: none"> - Loop microbiano - Parasitismo
Genéticas	<ul style="list-style-type: none"> - Transferencia horizontal - Evolución concertada

Además, hasta el momento no existen brotes documentados de enfermedades infecciosas por estos patógenos en humanos debido al consumo de alimentos producidos en estos sistemas.

Tanto la hidroponía y la acuaponía, coinciden en que existe un flujo continuo de agua y por ello, humedad constante. Por lo tanto, los patógenos para plantas cultivadas en sistemas de acuaponía están adaptados a este tipo de condiciones, por ejemplo, hongos como *Pythium spp.* y *Phytophthora spp.*, son fitopatógenos de raíz que producen zoosporas capaces de diseminarse por el medio acuoso (Somerville *et al.*, 2014).

Existen otros hongos que son oportunistas, porque infectan a las plantas cuando éstas sufren algún daño o cuando se someten a condiciones de crecimiento no favorables, por ejemplo, *Colletotrichum spp.*, *Thielaviopsis spp.*, *Rhizoctonia spp.*, *Fusarium spp.* En menor proporción, bacterias como *Clavibacter spp.*, *Erwinia spp.*, *Xanthomonas spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Ralstonia spp.* y virus como el del mosaico del tomate, virus infeccioso de la lechuga, virus necrótico del melón y virus del mosaico de cucurbitáceas pueden ocasionar enfermedades en plantas cultivadas en el sistema de acuaponía. Otro grupo de microorganismos desfavorables presentes en las comunidades microbianas de los sistemas de acuaponía, son las bacterias reductoras de sulfato y las bacterias desnitrificadoras (Delaide *et al.*, 2017; Wongkiew *et al.*, 2017). Estos dos tipos de bacterias crecen en condiciones de anaerobiosis, que en acuaponía es ocasionada

por la acumulación de materia orgánica en la superficie de los tanques de cultivo. Las bacterias reductoras de sulfato producen el olor característico a podrido, debido a la generación de ácido sulfhídrico (H_2S). Las bacterias desnitrificadoras transforman el nitrato (NO_3^-) (fracción química asimilable para las plantas) en nitrógeno atmosférico N_2



Figura 3. Morfología de *Pseudomonas* spp. que es una bacteria reductora de sulfato y desnitrificadora.

¿Qué microorganismos benéficos concurren en las comunidades microbianas en acuaponía?

Las bacterias nitrificadoras son las más estudiadas en los sistemas de acuaponía (Schmautz *et al.*, 2017).

Inicialmente participan bacterias que transforman el amoníaco a nitrito, por ejemplo, *Nitrosomonas* spp., *Nitrosococcus* spp. y *Nitrospira* spp. También participan bacterias que transforman el nitrito en nitrato, por ejemplo, *Nitrospina* spp., *Nitrospira* spp., *Nitrobacter* spp. y *Nitrococcus* spp.

Las bacterias heterótrofas han sido poco estudiadas en estos sistemas (Eck *et al.*, 2019). Son bacterias que mineralizan el exceso de materia orgánica, pero podrían limitar la proliferación

de bacterias nitrificantes, por ejemplo, *Bacterioidetes* spp., *Firmicutes* spp. y *Fusobacteria* spp. También existen bacterias que oxidan el amoníaco, nitrito y amonio en nitrógeno gaseoso (N_2).

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPC) como su nombre lo indica, promueven el crecimiento de las plantas por medio de mecanismos como la mineralización de materia orgánica, la fijación del nitrógeno, la estimulación del crecimiento radicular, el incremento de la biodisponibilidad de nutrientes y protección contra fitopatógenos (Khalifa *et al.*, 2016). En ambientes sin suelo como la acuaponía, el estudio de este tipo de bacterias ha generado un interés por los efectos benéficos antes mencionados. De las bacterias identificadas como BPC en acuaponía destacan, *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Enterobacter* spp., *Streptomyces* spp., *Chryseobacterium* spp. y *Gliocladium* spp.

Los agentes de control biológico son microorganismos que tienen un efecto antagonista sobre los fitopatógenos porque limitan o inhiben su crecimiento. Las bacterias como *Bacillus spp.* y *Pseudomonas spp.* son ampliamente conocidas como agentes de control biológico contra fitopatógenos en sistemas convencionales de producción de plantas (Shafi *et al.*, 2017). En hidroponía, existe poca información sobre el uso de microorganismos como agentes de control biológico (Resh, 2016). En acuaponía, la investigación al respecto es relativamente nueva (Rivas-García *et al.*, 2020). Por ejemplo, Sirakov *et al.*, (2016) aislaron microorganismos de diferentes compartimentos de un sistema de acuaponía y los confrontaron contra diferentes cepas patógenas de peces y plantas, para demostrar su actividad inhibitoria, de lo cual concluyeron que 42 cepas de los aislados eran capaces de inhibir a ambos patógenos.

filtros y biofiltros, entre otros. Aunado a esto, cada subunidad tiene diferentes parámetros óptimos de funcionamiento y organismos vivos diferentes.

Sin embargo, las tecnologías “Ómicas” (metabolómica, proteómica, transcriptómica y metagenómica) incrementan la posibilidad de estudiar y caracterizar estas comunidades microbianas aislando el material genético completo de las diferentes subunidades en lugar de genomas específicos (Bartelme *et al.*, 2019). Por ejemplo, la metabolómica genera información sobre los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes disponibles y los efectos de cualquier variable modificada en el interior del sistema (van Dam y Bowmeester, 2016). La proteómica permite elucidar que proteínas son secretadas por las comunidades microbianas, lo que les confiere características de patogenicidad, antagonismo y promoción del crecimiento vegetal, entre otros (Martínez-Porchas y Vargas-Albores, 2017).

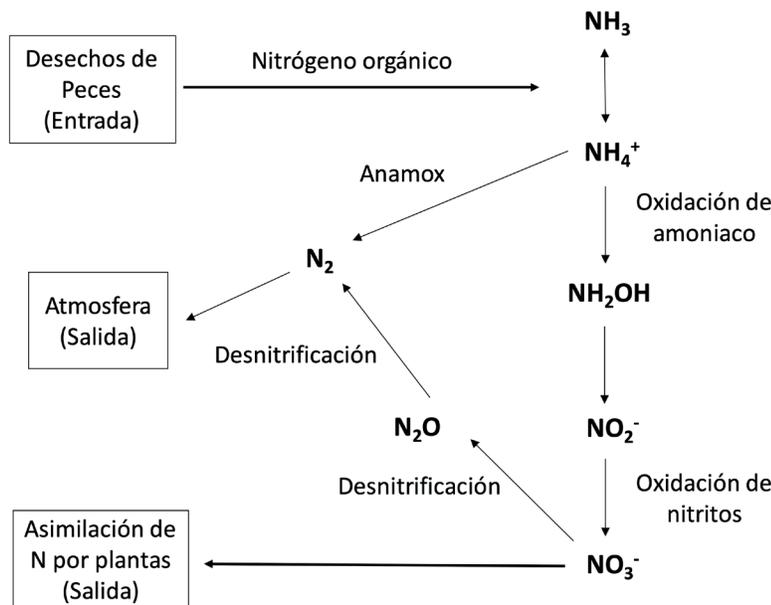


Figura 4. Ciclo del Nitrógeno realizado por diferentes bacterias presentes en los sistemas de acuaponía.

Discusión Académica

El estudio de las comunidades microbianas en los sistemas de acuaponía es un tanto complejo, debido a que existen subunidades como los tanques de cultivo de peces y plantas, los

Una limitante en acuaponía es la disponibilidad de métodos de desinfección y/o tratamientos para controlar la proliferación de patógenos. Como ya se mencionó, en los sistemas acoplados el agua permanece en recirculación, y por ende peces, plantas y microorganismos pueden ser dañados por el uso de cualquier producto químico. Además, cualquier tratamiento físico o químico no discrimina entre microorganismos benéficos o desfavorables. Es importante resaltar que hasta la fecha no hay productos químicos comercializados para controlar la proliferación de patógenos en sistemas de acuaponía (Mori y Smith, 2019).

Consideraciones finales y perspectivas

La producción de alimentos en estos sistemas puede seguir mejorando en cuestiones de sustentabilidad, rendimiento de los cultivos y peces, y eficiencia. El flujo de nutrientes en el agua recirculante sigue siendo un reto ya que los requerimientos y parámetros óptimos difieren para peces, plantas y microorganismos benéficos. El control de enfermedades es otro reto a futuro, ya que no se pueden utilizar agroquímicos convencionales para controlar enfermedades en plantas porque dañarían a los peces y los medicamentos para tratar enfermedades de peces podrían dañar a las plantas. Por ello, el control biológico de enfermedades podría ser una alternativa viable ante tales limitantes. Las tecnologías “Ómicas” permitirán profundizar en los estudios de ecología microbiana para entender mejor el papel fundamental de las comunidades microbianas en los sistemas de acuaponía. Entender las funciones de las comunidades microbianas permitirá mejorar la productividad y eficiencia en estos sistemas alternativos de producción de alimentos.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (subvenciones para proyectos fiscales), por el proyecto CONACYT-PN-4631 (2017-I) del FORDECYT-PRONACES y el proyecto binacional SATREPS-JICA-CIBNOR-CONACYT-Tottori-Universidad. Al DG. Gerardo Hernández García por el diseño editorial de este artículo.

Literatura citada

Bartelme, R.P., Oyserman, B.O., Blom, J.E., Sepulveda-Villet, O.J. y Newton, R.J. 2018. *Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics*. *Frontiers in Microbiology* 9 (2018): 8.

- Bartelme, R.P., Smith, M.C., Sepulveda-Villet, O.J. y Newton, R.J. 2019. *Component Microenvironments and System Biogeography Structure Microorganism Distributions in Recirculating Aquaculture and Aquaponic Systems*. Msphere 4 (4): e00143-19.
- Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H. y Jijakli, M.H. 2017. *Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system*. Aquacultural Engineering 78 (2017): 130-139.
- Eck, M., Sare, A.R., Massart, S., Schmutz, Z., Junge, R., Smits, T.H. y Jijakli, M.H. 2019. *Exploring bacterial communities in aquaponic systems*. Water 11 (2): 260.
- Jones, S. 2002. *Evolution of aquaponics*. Aquaponics Journal 6 (1): 14-17.
- Joyce, A., Timmons, M., Goddek, S. y Pentz, T. 2019. *Bacterial Relationships in Aquaponics: New Research Directions*. pp. 145-161. En: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B. y Burnell, G.M. (Eds). Aquaponics Food Production Systems. Springer. Cham, Switzerland. 619 pp.
- Khalifa, A.Y., Alsyeeh, A.M., Almalki, M.A. y Saleh, F.A. 2016. *Characterization of the plant growth promoting bacterium, Enterobacter cloacae MSR1, isolated from roots of non-nodulating Medicago sativa*. Saudi Journal of Biological Science 23 (1): 79-86.
- Konopka, A. 2009. *What is microbial community ecology?* The ISME Journal 3 (11): 1223-1230.
- Martinez-Porchas, M. y Vargas-Albores, F. 2017. *Microbial metagenomics in aquaculture: a potential tool for a deeper insight into the activity*. Reviews in Aquaculture 9 (1): 42-56.
- Mori, J. y Smith, R. 2019. *Transmission of waterborne fish and plant pathogens in aquaponics and their control with physical disinfection and filtration: A systematized review*. Aquaculture 504 (2019): 380-395.
- Naegel, L.C. 1977. *Combined production of fish and plants in recirculating water*. Aquaculture 10 (1): 17-24.
- Raymond, A. y Ramachandran, A. 2019. *Bacterial Pathogens in Seafood—Indian Scenario*. Fishery Technology 56 (2019): 1-22.
- Resh, H.M. 2016. *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC Press. Florida, United States of America. 513 pp.
- Rivas-García, T., González-Estrada, R.R., Chiquito-Contreras, R.G., Reyes-Pérez, J.J., González-Salas, U., Hernández-Montiel, L.G. y Murillo-Amador, B. 2020. *Biocontrol of Phytopathogens under Aquaponics Systems*. Water 12 (7): 2061.
- Schmutz, Z., Graber, A., Jaenicke, S., Goesmann, A., Junge, R. y Smits, T.H. 2017. *Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system*. Archives of Microbiology 199 (4): 613-620.

- Sirakov, I., Lutz, M., Graber, A., Mathis, A., Staykov, Y., Smits, T. y Junge, R. 2016. *Potential for combined biocontrol activity against fungal fish and plant pathogens by bacterial isolates from a model aquaponic system*. *Water* 8 (11): 518.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. 2014. *Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589 (2014): 1.
- Van Dam, N.M. y Bouwmeester, H.J. 2016. *Metabolomics in the rhizosphere: tapping into belowground chemical communication*. *Trends in Plant Science* 21 (3): 256-265.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J.W. y Khanal, S.K. 2017. *Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review*. *Aquaculture Engineering* 76 (2017): 9-19.

Imágen: pexels-ricardo-esquivel-2560900.jpg

Cita de artículo

Rivas-García T., R. R. González-Estrada y B. Murillo-Amador. 2021. De la nitrificación al control de enfermedades: las funciones de las comunidades microbianas en la producción de plantas en acuaponía. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2021. Vol. 7 (3): 07-17. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0003>

Sometido: 18 de marzo de 2021

Revisado: 13 de abril de 2021

Aceptado: 13 de mayo de 2021

Editor asociado: Dr. Aarón Barraza Celis

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández