



ACUAPONÍA: UNA ALTERNATIVA VERSÁTIL E INTEGRAL EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS PARA EL ENTORNO MEXICANO

AQUAPONICS A VERSATILE AND INTEGRATED ALTERNATIVE IN FOOD PRODUCTION FOR THE MEXICAN ENVIRONMENT

Flores-Aguilar Priscila S. ^{1*}, García-Trejo Juan Fernando ^{1*}, Sergio Iván Martínez-Guido ^{1*}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, Carretera a Chichimequillas s/n, km 1, el Marqués, Querétaro, 76265, México.

* Autores de correspondencia: pflores21@alumnos.uaq.mx. fernando.garcia@uaq.mx. mciq.martinez@gmail.com

Resumen

La agricultura tradicional es responsable de un gran porcentaje de la huella ecológica. Sin embargo, la acuaponía, considerada un sistema de producción agrícola moderno, es sostenible en términos de uso eficiente de recursos naturales. La acuaponía es una técnica que ocupa dos tipos de cultivos, el cultivo de peces (acuicultura) y el de plantas (hidroponía). Esta manera de cultivar, además de sostenible, es versátil y se puede adaptar tanto a los entornos urbanos mexicanos, como a peri-urbanos y rurales. Se presenta una clasificación sobre diferentes diseños de la acuaponía considerando acomodos espaciales, especies utilizadas y adaptaciones en la recirculación del agua. La información incluida en este manuscrito pretende informar sobre la creación de sistemas acuapónicos a pequeña escala y semi-comercial, que cumplan las necesidades de México. Una vez que se establecen estos sistemas, es necesario generar una base de datos respecto a la inversión, gasto de recursos y rendimiento de estos sistemas, ya que la información nacional es limitada. Esta información podrá confirmar lo que las tendencias mundiales dicen con respecto a la eficiencia y sostenibilidad de la acuaponía y propiciar la propagación de esta técnica para desarrollarla con más confianza a nivel nacional y disminuir la huella ecológica que actualmente tiene el país.

Palabras claves: *agricultura urbana, biosistemas, conservación de recursos, huella hídrica, productividad, sostenibilidad.*

Abstract

Traditional agriculture is responsible for a large percentage of the ecological footprint. However, aquaponics, considered a modern agricultural production system, is sustainable in terms of the efficient use of natural resources. Aquaponics is a technique that occupies two types of culture, fish (aquaculture) and plant (hydroponics). This way of growing is also versatile and can be adapted to Mexican urban, peri-urban, and rural environments. Thus, a classification of different designs, spatial arrangements, species used, and adaptations in the recirculation of water in aquaponics are presented. The information provided pretend to inform about small and semi-commercial scale aquaponic systems that meet the Mexican requirements. Once established, it is necessary to generate a database regarding investment, resource expenditure, and performance of these systems since national information is limited. This information will be able to confirm what global trends say regarding the efficiency and sustainability of aquaponics and to propitiate the use of this technique with more confidence at the national level and reduce the ecological footprint that occur nowadays.

Keywords: *urban agriculture, biosystems, resource conservation, water footprint, productivity, sustainability.*

1. Introducción

Desde hace más de 50 años, el aumento de la población y su actividad han rebasado la capacidad biológica de regeneración de los recursos naturales de nuestro planeta. En 1970, el déficit de recursos disponibles alcanzó el 1% y en el 2019 este valor sobrepasó el 50% (GFN, 2020). Lo anterior sugiere que los patrones de consumo de la población tienen una relación estrecha con la huella ecológica (Lara y Falfán, 2012).

En este marco, la sección del sector agrícola dedicada a la producción de alimentos es una de las que tiene mayor huella ecológica, principalmente debido a sus requerimientos de nutrientes (fertilizantes) y consumo de agua (Mateo-Sagasta y Zadeh, 2018). En México se emplean 61.7 kg de fertilizante por cada hectárea cultivable, lo cual equivale al 10% de los gases de efecto invernadero (Bank y CIAT, 2015). De esa cantidad de fertilizantes solamente el 50% es aprovechable por las plantas y el resto se filtra a los suelos o se arrastra con las aguas de riego. Este efecto adverso es uno de los tantos que impactan no solo a México, sino a todos los lugares en donde se realizan prácticas agrícolas. Otros efectos causados por estas actividades son: i) disminución y cambios en los patrones de precipitación pluvial, ii) incremento en la variabilidad del clima, iii) incremento en la temperatura global, iv) eutrofización en cuerpos de agua dulce (Antigua, 2016). Ante la problemática causada por las malas prácticas agrícolas han surgido algunas alternativas. Por ejemplo, se ha propuesto la siembra de variedades agrícolas resistentes a plagas, rotación de cultivos, manejo integrado de plagas (FAO, 2018). También se han implementado técnicas de riego por goteo, así como los cultivos protegidos, es decir en invernaderos o túneles plásticos (Lozano y Ruiz, 2016). Otra alternativa de producción agrícola es la acuaponía. La acuaponía es la combinación de la acuicultura (cultivo de organismos acuáticos) y la hidroponía (cultivo sin suelo) en la que las aguas residuales acuícolas se utilizan para regar las plantas en lugar de las soluciones nutritivas hidropónicas. Estas aguas residuales proveen más del 50% de los nutrientes necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas y pueden permanecer recirculando en el sistema por periodos prolongados (Palm y Knaus, 2018b). En particular, la

acuaponía es uno de los sistemas de producción agrícola más eficiente y sostenible. La acuaponía o sistemas acuapónicos posibilitan resolver los problemas de los sistemas agrícolas convencionales, los cuales incluyen baja productividad, consumo excesivo de agua, baja diversificación de productos, desperdicio de nutrientes y agua (Gooley y Gavine, 2003). En este sentido, los sistemas acuapónicos pueden ser identificados como sistemas sostenibles (König y Junge, 2016; Lobillo-Eguíbar y Fernández-Cabanás, 2020). Los beneficios de cultivar de esta manera integrada se conocen desde hace 1500 años y sus variantes y modificaciones en el diseño se han estudiado durante las últimas 4 décadas (Yang y Kim, 2020). Dentro de los sistemas acuapónicos se han cultivado con éxito al menos 150 especies de plantas entre las cuales están hierbas de olor, flores, vegetales y árboles pequeños (Australia, 2015), y sus diseños se han adaptado para diferentes dimensiones espaciales (Palm y col., 2018b). Con todo, aún no se explota de manera completa el potencial de esta técnica integrada de producción. La versatilidad de los sistemas también pueden ser de beneficio para las prácticas agrícolas actuales de México; inclusive, para las zonas con un limitado acceso a fuentes de agua dulce (FAO, 2018). Por esta razón, se obtendrían beneficios ambientales, sociales y económicos. Sin embargo, debe tenerse un conocimiento previo del manejo de estos sistemas o al menos, investigar sobre los diferentes diseños que se usan actualmente para que, los mismos, sean más eficientes. También es necesario conocer las condiciones climáticas del lugar, ya que éstas pueden afectar variables tales como pH, temperatura, oxígeno disuelto y concentración de nutrientes y, conociendo éstas, pueden adecuarse las condiciones para obtener un rendimiento adecuado de los peces y de las plantas. En el presente artículo se brinda una clasificación sobre diferentes diseños, acomodos espaciales, especies utilizadas y adaptaciones en la recirculación del agua utilizados en la acuaponía. También se describen las ventajas y desventajas de cada uno de estos sistemas. De esta manera se espera proporcionar al lector una visión general, así como la versatilidad de los sistemas acuapónicos. Adicionalmente, se desea despertar el interés de incursionar en este tipo de cultivo.

2. Clasificación de sistemas acuapónicos

Los sistemas acuapónicos (AQ) fueron propuestos hace 40 años, y desde entonces éstos han evolucionado de manera significativa.

La Figura 1 muestra una clasificación de los sistemas acuapónicos, la cual incluye 6 aspectos principales que se deben conocer para que tener un conocimiento general sobre ellos.

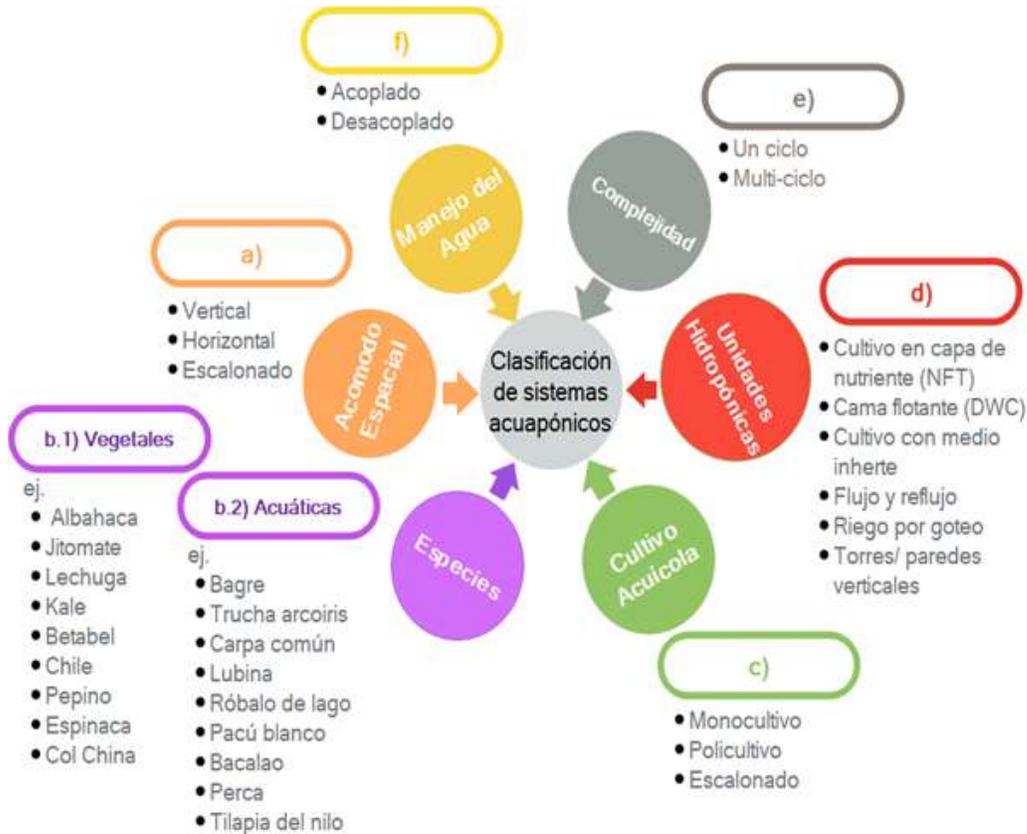


Figura 1. Clasificación general de sistemas acuapónicos respecto a 6 tópicos.

2.1. Acomodo espacial

El acomodo espacial se refiere a la manera en cómo se arreglan las plantas dentro de ciertas estructuras en un espacio disponible. Las tres principales estructuras de los AQ tienen formas vertical, horizontal y escalonado. El uso de cada estructura dependerá del espacio disponible.

2.1.1. Vertical

En el sistema acuapónico con estructura vertical, el agua proveniente del cultivo acuícola riega las plantas de arriba hacia abajo. El exceso de agua en la parte superior cae hacia las plantas inferiores. Estos sistemas pueden o no recuperar el agua para recircularla. La principal ventaja de los sistemas con forma vertical es que aprovechan mejor el volumen completo del lugar en términos de espacio. Una desventaja que tiene este acomodo espacial es que

en la parte más alta del sistema la incidencia de luz UV será mayor. Esto puede causar que las plantas crezcan más en la parte superior y creen sombra sobre las plantas de abajo, o simplemente que la luz excesiva las dañe. En este tipo de acomodo se deben colocar plantas de corta altura ya que si son de alturas superiores a un metro existe el riesgo de que caigan del soporte. Estos sistemas se ocupan en su mayoría en zonas urbanas, debido a los espacios reducidos. Un ejemplo de plantas que se pueden cultivar en estos sistemas son lechuga, fresa o albahaca (Al-Kodmany, 2020).

2.1.2. Horizontal

El sistema acuapónico con estructura horizontal consta de uno o varios tubos horadados en la parte superior en donde se colocan las plantas (fig. 2). También pueden

usarse canaletas, en este caso las plantas deberán ir en algún soporte físico como bolsas horadadas con medio inerte. Es este sistema, el agua proveniente del cultivo acuícola entra por un extremo del tubo (A) hasta llegar al otro extremo (B) o viceversa según convenga al productor. De esta manera el agua permanece recirculando en el sistema y las raíces de las plantas están en contacto continuo con ella.

Esta estructura es la más conocida y en general se lleva a cabo con la técnica de NFT abordada más adelante. Una ventaja de estos sistemas es que son los más sencillos de instalar y requieren menos cuidado en sus tuberías pues no suelen taparse con los sólidos disueltos del agua. Otra ventaja de éste sistema, es que las plantas que se cultivan aquí pueden ser de diferentes tamaños. La desventaja principal de la estructura horizontal, es que requieren de gran espacio para que el cultivo de las plantas sea rentable. A pesar de eso, esta disposición espacial se ocupa para escalas semi-comerciales y gran escala (Hughey, 2005).



Figura 2. Representación de un sistema acuapónico con estructura horizontal

2.1.3 Escalonado

El sistema acuapónico con estructura escalonada es una mezcla entre las dos primeras estructuras. En estos sistemas el agua fluye de la parte superior hacia la inferior. Al igual que en la estructura horizontal, el agua va de un extremo al otro para regar todo el sistema. Dependiendo de lo que se desee, el agua puede llegar a

cada tubo o canaleta de manera individual sin regar otros tubos adyacentes. Luego, el agua excedente de cada tubo puede recuperarse de manera separada o en conjunto en algún reservorio. Otro modo de irrigar las plantas se da conectando todos los tubos a modo de zigzag. De esta manera el agua pasa desde el extremo superior al final del primer tubo y sigue su ruta por el extremo del tubo inferior. La ventaja de la estructura escalonada es que permite colocar diferentes especies de plantas, tanto pequeñas como grandes, y diversificar la producción. Este tipo de arreglo aprovecha el espacio y al mismo tiempo proporciona soporte a diferentes tamaños de plantas. Con base en los requerimientos nutricionales de las plantas se debe considerar cuales plantas poner arriba y cuales abajo. Por lo general las plantas que reciben primero el agua, es decir, en donde se inicia el riego, tienden a crecer más que las últimas que reciben el agua. Este fenómeno se debe a que las primeras plantas absorben primero los nutrientes dentro del agua. De tal manera, que el agua que llega a las últimas plantas reciben un agua con menos nutrientes que la primera. De igual forma que en el sistema vertical, las plantas de la parte superior siempre tienen mayor incidencia de luz, lo que favorece su crecimiento. Así que se recomienda que las plantas con mayor requerimiento nutricional sean las primeras en recibir el agua del cultivo acuícola (Rakocy y Shultz, 2003).

2.2. Especies cultivadas

En la categoría anterior abordamos lo concerniente a las estructuras más comunes que se usan en los sistemas acuapónicos. Ahora consideraremos algunas de las especies más comunes, tanto acuáticas como vegetales, que se cultivan en los sistemas acuapónicos. Las especies vegetales dentro de los sistemas acuapónicos sirven como un filtro natural de los desechos de los peces (heces y orina) junto con la comida no consumida. Las raíces de las plantas, de manera natural, alojan microorganismos que transforman los desechos de los peces en formas químicas que ellas pueden absorber para nutrirse.

Dependiendo de la densidad de peces que se cultiven en el estanque será el requerimiento de plantas que se pueda cultivar. Si se pone menor cantidad de plantas se requerirá hacer recambios en el estanque de los peces para eliminar los nutrientes extra a fin de mantener la

calidad del agua para los peces. Si se pone una mayor cantidad de plantas que las que el sistema puede nutrir se requerirá añadir una mayor cantidad de fertilizantes al agua. Esto generará un mayor gasto económico y la necesidad de monitoreo del agua más estrictos a fin de no intoxicar a los peces.

La combinación entre peces y plantas dependerá, primeramente, de la temperatura en la que crecen mejor. Por ejemplo, la tilapia, el bagre y la carpa crecen bien en temperaturas cálidas y suelen cultivarse con albahaca, col y lechuga. Aunque la lechuga y el pepino crece mejor en temperaturas más bajas. Lo que se hace en estos casos es tener una temperatura intermedia de la preferida (Somerville y Cohen, 2014). En estudios recientes se reportó que hay combinaciones de especies acuáticas y vegetales que muestran mejor rendimiento. Ejemplos de lo anterior son la combinación de jitomate con tilapia o jitomate con perca (Hu y Lee, 2015; Yang y Kim, 2020).

2.2.1. Especies vegetales

Para escoger las plantas que se utilizarán en cualquiera de las estructuras descritas, se debe analizar el mercado. La especie vegetal que conviene cultivar es la que tiene un mayor consumo local. Sin embargo, también se debe considerar que esta especie sea resistente a altos porcentajes de nitrógeno pues el agua residual acuícola tiene esta característica. Los vegetales de hojas verdes han sido los preferidos dentro de los sistemas acuapónicos, la razón es que crecen bien en aguas con alto contenido de nitrógeno, su ciclo de crecimiento es corto y no tienen altos requerimientos nutricionales. Entre las especies más cultivadas se encuentran espinaca, jitomate, col china, albahaca, pepino, y lechuga. Otras especies vegetales que se están probando actualmente son los árboles frutales, entre ellos están papaya, mango, naranja y cítricos (Australia, 2015), además de los ejemplos mencionados en la fig. 1. Existen otras especies que se pueden cultivar y que son tolerantes a baja salinidad; estas especies se trabajan en conjunto con organismos marinos. Ejemplos de ellos son el nabo, rábano, lechuga, camote, haba, maíz, repollo, espinaca, espárragos, remolacha, calabaza, brócoli y pepino (Kotzen y Emerenciano, 2019).

2.2.2. Especies acuáticas

Las especies acuáticas requieren un alimento específico.

El pescado necesita en su alimentación 7 minerales (Ca, F, K, Na, Cl, Mg y S) y 15 oligoelementos. Sin embargo, por comodidad hacia los productores acuícolas, se han estandarizado alimentos para suplir la mayoría de los requerimientos nutrimentales que los peces necesitan. La especie acuícola que se cultiva por excelencia es la tilapia (Oniga y Jurcoane, 2018). Otras especies que comúnmente se cultivan son el bagre, la perca, la trucha y el langostino. Incluso, son utilizados peces ornamentales como las carpas doradas y koi, además de los ejemplos que se muestran en la fig. 1.

De igual manera existen sistemas acuapónicos con especies marinas (haloponía). Aunque este tipo de sistemas no son tan populares pues requieren mayor control de sus variables (temperatura, oxígeno disuelto y conductividad de las sales, entre otros). Las especies que se cultivan son plantas amantes de la sal (halófitas), moluscos marinos y de aguas salobres, peces de aleta y crustáceos marinos. Se pueden cultivar, en conjunto, plantas marinas o con algunas de agua dulce tolerantes a salinidad (Kotzen y col., 2019).

2.2.3 Cultivo acuícola

Se refiere a cómo se realiza la “siembra” de los peces en los estanques. La primera manera de cultivar los organismos acuícolas es por monocultivo y se refiere a cultivar una sola especie acuícola en el estanque. En el policultivo o “poliponía” se cultivan al menos dos especies dentro del mismo estanque. Las combinaciones de especies se basan en la profundidad, en el agua del estanque, que prefieren estas especies. Se deben escoger especies que no compitan por la misma profundidad en el agua, sino que una prefiera el fondo y la otra el medio o la superficie. Esto permite que el alimento se consuma mejor y que el agua permanezca con menos sólidos disueltos. Aunque la poliponía puede ampliar la diversidad en la producción, también requiere una mayor habilidad en el manejo del cultivo. Esto hace que esta técnica se aplique menos; sin embargo tiene mucho potencial de explotación (Yep y Zheng, 2019).

En el cultivo por lotes o escalonado, lo primero que se hace es colocar una densidad de alevines (cría de pez) conocida en el estanque. Aproximadamente un mes después se divide, dependiendo la densidad, en dos o más partes y se coloca en nuevos estanques. Al primer

estanque se añaden alevines para mantener la densidad inicial. En el siguiente mes se cosechan los peces con mayor tamaño y se vuelve a añadir alevines. De esta manera se puede mantener un cultivo constante (Palm y Knaus, 2018a). La ventaja de este método de cultivo es que se tiene una producción constante y por lo tanto una venta constante. La desventaja de esta técnica es la necesidad de tener al menos tres o cuatro estanques a los cuales se les deberá cuidar la calidad del agua para que no enferme ningún organismo. En este caso, si llegara a enfermar algún organismo requeriría sacrificarlos inmediatamente o utilizar antibióticos, lo cual baja la calidad del producto final.

2.3. Unidades Hidropónicas

Cuando hablamos de unidad hidropónica nos referimos a la manera o técnica hidropónica específica de regar las plantas. Estas técnicas son las siguientes:

2.3.1. Cultivo en capa de nutriente

El cultivo en capa de nutriente (nutrient film technique- NFT) es una técnica en la cual la solución nutritiva se suministra lentamente y forma una capa delgada en los tubos. En este caso la solución nutritiva es el agua residual acuícola. En esta técnica son necesarios un reservorio con agua nutritiva para alimentar a las plantas, una bomba y que los tubos estén horadados para colocar las plantas. Una vez que se colocan las plantas dentro del agujero de los tubos las raíces de las plantas deben estar en contacto con esta agua nutritiva. La ventaja de los NFT es que su costo inicial es bajo al igual que su consumo de agua; sin embargo, presenta los menores rendimientos por lo que es la técnica menos utilizada en el mercado (Yep y Zheng, 2019).

2.3.2. Cama flotante

También conocida como técnica de raíz flotante (Deep water culture- DWC), mantiene a las plantas flotando en poliestireno con sus raíces sumergidas en solución nutritiva estacionaria. Esta técnica es la más sencilla y tiene el mayor rendimiento de biomasa vegetal. Además, tiene un impacto ambiental menor que otras técnicas hidropónicas. Una desventaja de la DWC es que se necesita añadir solución nutritiva constantemente para mantener los niveles de nutrientes óptimos. Esta adición requiere

mediciones constantes de las variables del agua para evitar daño a las plantas por acumulación de nutrientes que no se absorbieron en el agua (Yep y Zheng, 2019).

2.3.3. Cultivo con medio inerte

El cultivo con medio inerte o sustrato inerte se utiliza para dar sostén a las plantas mientras son regadas con el agua rica en nutrientes. Esta técnica hidropónica es la más utilizada. La primera ventaja es que el medio inerte proporciona mayor estabilidad a las raíces de las plantas; principalmente a aquellas especies que son voluminosas como los árboles frutales. Otra ventaja es que el medio proporciona mayor superficie para que los microorganismos benéficos transformen los nutrientes del agua para las plantas. Esta técnica es utilizada en pequeña escalas y rara vez se usa para escalas comerciales (Yep y Zheng, 2019).

2.3.4. Flujo y reflujo y riego por goteo.

La técnica flujo y reflujo consiste en inundar charolas hasta un nivel establecido, una vez que se llega a este nivel el agua cae por un drenaje. Después el agua regresa al reservorio y vuelve a subir a la charola con la ayuda de una bomba sumergible (Knaus y Palm, 2017b). Las plantas se pueden colocar en bolsas o macetas horadadas. La ventaja de la técnica de flujo y reflujo es que se pueden cultivar especies vegetales cuyas raíces son sensibles a encharcamientos. Otra ventaja es que los árboles y arbustos pueden ser sostenidos y crecer dentro de las camas de cultivos si se ocupa la cantidad de medio adecuada. Estos arbustos se pueden colocar en macetas horadadas del tamaño que necesite la planta y ponerse encima de la charola inundada. La desventaja de este sistema es que las charolas, macetas y bombas pueden representar una inversión alta. El riego por goteo, como su nombre indica, nutre las plantas poco a poco. La ventaja del riego por goteo es el ahorro sustancial de agua que se usa. Sin embargo, la inversión inicial puede elevarse dependiendo de la dimensión del sistema. Además, las mangueras por donde pasa el agua, se pueden tapar con el tiempo por lo que se requiere mantenimiento constante.

2.4. Complejidad

Ahora abordaremos que tan complejos o simples pueden ser los sistemas acuapónicos. Dependiendo de cuántos

elementos o unidades extra se le añaden al sistema (fig. 3) se puede generar complejidad en el manejo y monitoreo de los sistemas. En los sistemas acuapónicos acoplados (secc. 2.5.1) se tiene una recirculación completa del agua residual, la cual pasa por las plantas, las riega y regresa con menos nutrientes al estanque acuícola. En los

sistemas acuapónicos desacoplados (secc. 2.5.2) el agua residual pasa a las plantas para regarlas, pero no regresa de nuevo al estanque acuícola. Los sistemas desacoplados recirculan el agua en cada una de sus unidades y solo se pasa una cantidad determinada a las plantas de tiempo en tiempo generando así dos ciclos en el agua.

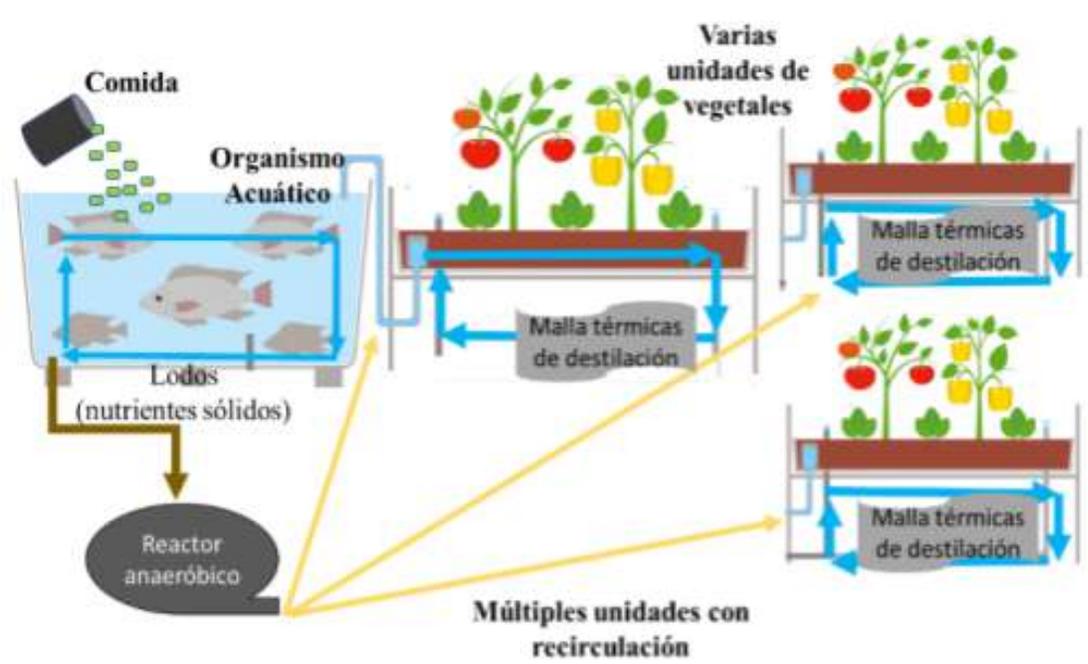


Figura 3. Diagrama de sistema acuapónico desacoplado y multi-ciclo. Las flechas azules muestran la recirculación del agua individualmente

De igual manera, los lodos producidos en el estanque acuícola pueden dirigirse hacia otras unidades generando un ciclo. Cada unidad extra que se añada resuelve algún problema con respecto a los sólidos disueltos en el agua, los lodos generados en el agua, los nutrientes acumulados que no se absorben por las plantas o la presencia de microorganismos patógenos para los cultivos. Con la adición de cada una de las unidades se hace más eficiente el sistema y se mantiene la calidad apropiada en el agua para los peces y las plantas. Aunque cada unidad tiene un propósito y beneficio definidos, es necesario sopesar su uso dentro del sistema, pues su desventaja es que cada unidad aumenta costos. Además, cada una tiene ciertas variables que se deben regular, por lo que el manejo del sistema se complica (Goddek y Joyce, 2019). Las unidades que se pueden añadir a los sistemas acuapónicos son:

Digestores aeróbicos (en presencia de oxígeno) y anaeróbicos (sin presencia de oxígeno)- transforman los nutrientes que se encuentran en los lodos del estanque haciéndolos disponibles para las plantas (Monsees y Keitel, 2017b).

Bioreactores- principalmente para recuperar el fósforo e incorporarlo en el cultivo vegetal. Los bioreactores también se pueden dividir en dos etapas con dos condiciones diferentes.

La primera etapa es para producir gas metano (metanogénesis); esto se logra con un pH alrededor de 7. El metano que se obtiene se puede incorporar como energía al sistema. La segunda etapa se encarga de transformar los lodos remanentes y hacerlos disponibles para las plantas. Esta etapa se lleva a cabo de una manera más eficiente en pH cercanos a 4.

Separadores gravitacionales- su función es la filtración

de sólidos del agua para concentrar los lodos antes de entrar al bioreactor.

Malla de destilación- el objetivo es mantener la concentración de nutrientes del estanque de peces y de los vegetales en los respectivos niveles deseados (Goddek y Keesman, 2018c).

Osmosis Inversa y equipos para desinfección- permite recuperar nutrientes en forma de sales, sin afectar la integridad de las bacterias benéficas para la transformación normal de los lodos (Goddek y Keesman, 2020). Los equipos de desinfección se ocupan para eliminar los microorganismos en el agua que puedan afectar negativamente a las especies que se cultivan. P. ej. radiación UV, tratamientos térmicos y de ozono (Maucieri y Nicoletto, 2019).

2.5. Manejo del Agua

En el último lugar de la clasificación se encuentra el punto del manejo del agua. Este punto considera las dos formas actuales de recircular el agua en el sistema acuapónico sin considerar el tipo de unidad hidropónica que se añada. A continuación, se describen ambas formas de recirculación:

2.5.1. Sistema acuapónico acoplado

Los sistemas acuapónicos acoplados (AQT) se refieren a los sistemas acuapónicos tradicionales. En estos sistemas, como hemos mencionado, el agua recircula continuamente y sin restricción, del estanque de los peces a las plantas (fig. 4). Una vez que el agua pasa por las plantas, estas por medio de sus raíces absorben algunos nutrientes para su crecimiento. Los nutrientes que no fueron absorbidos, junto con el remanente de agua, regresa nuevamente al estanque de peces en ciclos indefinidos. Durante las 4 décadas pasadas, se trató de hacer más eficiente la recirculación del agua y al mismo tiempo generar menos desechos. Durante este tiempo, también se observó que recircular libremente el agua de los peces hacia las plantas genera un equilibrio en el pH. Este proceso es desfavorable para el rendimiento, ya que no permite que cada unidad (peces y plantas) tengan su pH apropiado. Las plantas requieren un pH de 5.5 - 6.0; los peces un pH de 7.0 - 8.0. Además, los microorganismos que transforman los desechos de los peces hacia formas químicas asimilables por las plantas requieren un pH de 7.0 - 9.0 (Tyson y Simonne, 2008).

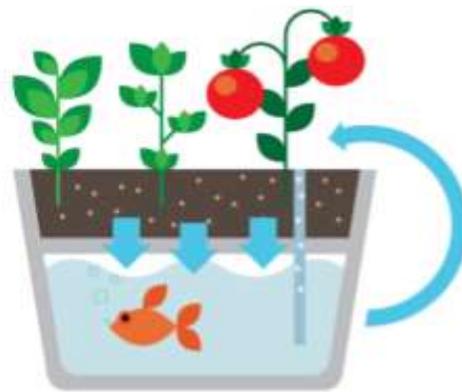


Figura 4. Esquema general de la recirculación del agua en un sistema acuapónico tradicional o acoplado

2.5.2. Sistema acuapónico desacoplado

Teniendo como base el equilibrio en el pH de los AQT debido a la recirculación libre en el 2015 se hizo una modificación con respecto a este punto. La modificación consistió en que el agua que regaba a las plantas no se regresaba al estanque de peces sino recirculaba solamente en la unidad de las plantas. A los sistemas que recircularan de esta manera el agua se les nombró sistemas acuapónicos desacoplados (AQD) (Kloas y Groß, 2015). De esta forma, cada ciclo del agua por separado en cada unidad de producción mantiene el pH adecuado. Esta separación de unidades también permite un mejor manejo del oxígeno disuelto. También permite que los fertilizantes que se requiera añadir a las plantas no estén en contacto con los peces. Así es posible que las plantas aprovechen mejor los nutrientes que se encuentran en el agua residual aumentando el rendimiento tanto para los peces como para las plantas.

Los AQD son los sistemas sofisticados entre los acuapónicos y producen igual o mayor que los AQT y los sistemas hidropónicos puros. Los AQD también ahorran significativamente los nutrientes del agua residual acuícola además que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (Monsees y col., 2019). Pese a estos datos favorables, los AQD tienen como desventaja el costo de inversión. Los AQD requieren al menos 3 unidades para que se lleve a cabo una producción rentable y alto monitoreo de sus unidades. Esta es la razón por la que no se recomiendan usar en escalas pequeñas (Goddek y Espinal, 2016). Por lo anterior, hoy en día estos sistemas sólo se utilizan a escala semi-comercial y comercial.

3. Perspectivas de los sistemas acuapónicos y su aplicación en México

Cada vez son más los países (Omán, Algeria, Egipto, entre otros) que se suman a usar sistemas acuapónicos y aprovechan sus beneficios (FAO, 2018). México por su parte, se ha comprometido por medio de sociedades internacionales en cumplir algunas de las 17 metas de desarrollo sostenible (Government, 2018). No obstante, en México se cuenta con pocos sistemas de producción sostenible como los sistemas acuapónicos. México es un país donde se produce principalmente en sistemas ejidales. La mayoría de los propietarios tienen 5 ha o menos de terreno (Bank y col., 2015); por lo que las escalas pequeñas y semi-comerciales de sistemas acuapónicos podrían establecerse. Por la parte de sistemas acuícolas, México no cuenta con un padrón actualizado (COPESCAAALC, 2019). Sin embargo, es uno de los principales productores acuícolas y el octavo productor de alimentos del mundo. Si la producción acuícola se modifica hacia la acuaponía se podría obtener diversificación de alimentos y un aumento en las ganancias de los productores. Ya que la información nacional es limitada, se necesita que más número de productores tanto acuícolas como agrícolas mexicanos se sumen a este tipo de prácticas sostenibles. Además, se requiere que cada productor lleve registro de datos en su producción de manera cabal. Esto podrá colaborar en la generación de un banco de datos nacional donde se compruebe la rentabilidad, eficiencia y sostenibilidad de los sistemas acuapónicos. Solo entonces, estas prácticas podrán aumentarse y propagarse en todo el territorio nacional no por datos internacionales sino con base en datos nacionales verídicos.

Conclusiones

Se considera que la acuaponía es la mejor alternativa para cultivar debido a su versatilidad, eficiencia y generación económica. Los sistemas acuapónicos permiten un cultivo integral de plantas y peces; de esta manera se obtiene diversidad de alimento de manera sostenible aminorando la huella de contaminación medioambiental. A la fecha no existe un sistema acuapónico definido como el mejor. El sistema que más ajuste a cada productor dependerá de la imaginación del mismo. Sólo se requiere una asesoría

inicial para poder establecer sistemas acuapónicos en diversos entornos mexicanos (casas, oficinas, zonas-urbanas y peri-urbanas).

A la fecha existe la necesidad de cuidar los recursos naturales de planeta y evitar la escasez de agua en el mundo. Cada persona que se sume a aplicar esta manera de cultivar contribuirá a lograrlo. Cada uno de nosotros podemos ayudar a recuperar la capacidad biológica de regeneración del planeta. No hay nada más satisfactorio que comer lo que nuestras propias manos cultivaron y los sistemas acuapónicos nos puedes ayudar a lograr este gusto. Esperamos que muchos lectores puedan iniciar su aprendizaje con esta información. También esperamos escuchar pronto sobre nuevas combinaciones de especies en sistemas acuapónicos mexicanos y que todos sean casos de éxito. El alimento producido por acuaponía en las casas mexicanas será el más rico y saludable para nuestro planeta.

Referencias bibliográficas

- Al-Kodmany, K. (2020). *The Vertical Farm: Exploring Applications for Peri-urban Areas*. Smart Village Technology, Springer: 203-232.
- Antigua, I. (2016). "Climate Smart Agriculture in the Eastern Caribbean States: Increasing agricultural productivity through the application of innovative technology to overcome drought and unpredictable climate conditions in Barbuda."
- Australia, E. (2015). "Growing Massive Fruit Trees in Aquaponics." from <http://www.ecofilms.com.au/growing-massive-fruit-trees-in-aquaponics/>.
- Bank, W., CIAT and CATIE (2015). *Climate-Smart Agriculture in Mexico*. C. C. P. f. L. A. Series. Washington D.C., The World Bank Group.
- COPESCAAALC (2019). *Panorama de la pesca continental y la acuicultura en América latina y el Caribe*. C. d. P. C. y. A. p. A. L. y. e. C. C. e. c. c. l. FAO. La Habana, Cuba, Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Decimosexta Reunión.
- FAO (2018). Cada gota cuenta, <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1113809/>. 2020.
- FAO. (2018). "Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta." from <http://www.fao.org/news/story/es/item/1141818/icode/>.

- GFN (2020). Global Footprint Network "Advancing the science of sustainability": Earth Overshoot Day. annual.
- Goddek, S., C. Espinal, B. Delaide, M. Jijakli, Z. Schmautz, S. Wuertz and K. Keesman (2016). "Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach." *Water* 8(7): 303.
- Goddek, S., A. Joyce, S. Wuertz, O. Körner, I. Bläser, M. Reuter and K. J. Keesman (2019). *Decoupled Aquaponics Systems*. Aquaponics Food Production Systems, Springer: 201-229.
- Goddek, S. and K. J. Keesman (2018c). "The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems." *Desalination* 428: 76-85.
- Goddek, S. and K. J. Keesman (2020). "Improving nutrient and water use efficiencies in multi-loop aquaponics systems." *Aquaculture International*: 1-10.
- Gooley, G. and F. Gavine (2003). *Integrated agri-aquaculture systems: a resource handbook for Australian industry development*, Rural Industries Research and Development Corporation.
- Government, M. F. (2018). *Voluntary National review for the high-level political forum on sustainable development: Basis for a Long-Term Sustainable Development Vision in Mexico*. S. o. t. N. C. f. t. A. f. S. D. Secretary of Foreign Affairs.
- Hu, Z., J. W. Lee, K. Chandran, S. Kim, A. C. Brotto and S. K. Khanal (2015). "Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics." *Bioresource technology* 188: 92-98.
- Hughey, T. (2005). "Aquaponics for developing countries." *Aquaponics Journal* 38: 16-18.
- Kloas, W., R. Groß, D. Baganz, J. Graupner, H. Monsees, U. Schmidt, G. Staaks, J. Suhl, M. Tschirner and B. Wittstock (2015). "A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts." *Aquaculture Environment Interactions* 7(2): 179-192.
- Knaus, U. and H. Palm (2017b). "Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany [Mecklenburg Western Pomerania]." *Aquaculture* 466: 51-63.
- König, B., R. Junge, A. Bittsanszky, M. Villarroel and T. Kólmíves (2016). "On the sustainability of aquaponics." *Ecocycles* 2(1): 26-32.
- Kotzen, B., M. G. C. Emerenciano, N. Moheimani and G. M. Burnell (2019). *Aquaponics: alternative types and approaches*. Aquaponics Food Production Systems, Springer, Cham: 301-330.
- Lara, J., L. Falfán and A. Villa (2012). *Huella ecológica, datos y rostros*, México DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Lobillo-Eguíbar, J., V. M. Fernández-Cabanás, L. A. Bermejo and L. Pérez-Urrestarazu (2020). "Economic Sustainability of Small-Scale Aquaponic Systems for Food Self-Production." *Agronomy* 10(10): 1468.
- Lozano, D., N. Ruiz and P. Gavilán (2016). "Consumptive water use and irrigation performance of strawberries." *Agricultural Water Management* 169: 44-51.
- Mateo-Sagasta, J., S. M. Zadeh and H. Turrall (2018). "More people, more food, worse water?: a global review of water pollution from agriculture."
- Maucieri, C., C. Nicoletto, E. Van Os, D. Anseeuw, R. Van Havermaet and R. Junge (2019). *Hydroponic technologies*. Aquaponics Food Production Systems, Springer: 77-110.
- Monsees, H., J. Keitel, M. Paul, W. Kloas and S. Wuertz (2017b). "Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions." *Aquaculture Environment Interactions* 9: 9-18.
- Monsees, H., J. Suhl, M. Paul, W. Kloas, D. Dannehl and S. Würtz (2019). "Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer." *PloS one* 14(6): e0218368.
- Oniga, C.-C., Ş. Jurcoane, D. Mocuta and A. T. Rahoveanu (2018). "Studies about the fish farming development in aquaponic systems: a review." *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies* 22: 237-246.
- Palm, H. W., U. Knaus, S. Appelbaum, S. Goddek, S. M. Strauch, T. Vermeulen, M. H. Jijakli and B. Kotzen (2018b). "Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature." *Aquaculture international* 26(3): 813-842.

- Palm, H. W., U. Knaus, B. Wasenitz, A. Bischoff and S. Strauch (2018a). "Proportional up scaling of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) commercial recirculating aquaculture systems disproportionately affects nutrient dynamics." *Aquaculture* 491: 155-168.
- Rakocy, J., R. Shultz, D. Bailey and E. Thoman (2003). Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. South Pacific Soilless Culture Conference-SPSCC 648.
- Somerville, C., M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus and A. Lovatelli (2014). "Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming." FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper(589): I.
- Tyson, R., E. Simonne, D. Treadwell, J. White and A. Simonne (2008). "Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters." *HortScience* 43(3): 719-724.
- Yang, T. and H.-J. Kim (2020). "Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems." *Journal of Cleaner Production* 274: 122619.
- Yep, B. and Y. Zheng (2019). "Aquaponic trends and challenges-A review." *Journal of Cleaner Production*.

