

SISTEMAS AGRO-ACUÍCOLAS INTEGRADOS [INTEGRATED AGRI-AQUACULTURE SYSTEMS]

Eliza Magdalena Martínez-Antonio^{1&}; Ernesto Castañeda-Hidalgo², Gisela Margarita Santiago-Martínez², Salvador Lozano-Trejo², Gustavo Omar Díaz-Zorrilla²

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Programa de Doctorado en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas. Estancias posdoctorales por México Mujeres Indígenas.

[&]Autor para correspondencia: (elizamartínezantonio@gmail.com).

RESUMEN

El incremento de la demanda de alimentos como consecuencia del crecimiento poblacional ha promovido el crecimiento intensificado de los sistemas productivos alimentarios sin tomar en cuenta las consecuencias medio-ambientales y sociales. Lo cual ha dejado entre dicho la capacidad de la humanidad para garantizar el suministro de alimentos para las generaciones futuras, siendo ésta la mayor crisis alimentaria de todos los tiempos. Con la intención de gestar un nuevo camino productivo, los sistemas de producción basados en la Agroecología han despertado interés en las tres últimas décadas con la finalidad de enfrentar la crisis no solo productiva, también la económica mundial contemporánea que conlleva la misma. Por lo cual, se han desarrollado nuevas tecnologías que sean más eficientes con el uso de los recursos naturales. Sin embargo, es probable que lo novedoso tenga que ver más con esquemas productivos tradicionales en un tiempo actual que con la creación de nuevas tecnologías por lo cual la dimensión social toma una mayor relevancia en éste nuevo camino. En el presente artículo de revisión se propone a los Sistema Agro-Acuícolas Integrados (SAAI) como una estrategia con gran potencial para incrementar la producción de alimentos en las zonas con mayor vulnerabilidad con gran factibilidad económica y pertinencia social.

Palabras clave: Acuicultura integrada, acuicultura multitrófica, eficiencia del agua, sistemas agro-acuícola integrados, sistemas productivos.

ABSTRACT

The increase in food demand as a result of population growth has promoted the intensified growth of food production systems without taking into account the environmental and social consequences. Which has left in doubt the ability of humanity to guarantee the food supply for future generations this being the greatest food crisis of all time. With the intention of gestating a new productive path, the production systems based on agroecology have aroused interest in the last three decades in order to face not only the productive crisis, also the contemporary world economy that this same one entails. Therefore, new technologies have been developed that are more efficient with the use of natural resources. However, it is likely that novelty has more to do with traditional production schemes at present than with the creation of new technologies. This review article proposes the integration of agriculture and aquaculture as a strategy with great potential to increase food production in the most vulnerable areas with great economic feasibility and social relevance.

Key words: Integrated aquaculture, multitrophic aquaculture, water efficiency, integrated agro-aquaculture systems, productive systems.

INTRODUCCIÓN

La agricultura, la ganadería, la pesca y la acuicultura representan a los sectores que producen los alimentos utilizados por la humanidad. Sin embargo, el incremento de la demanda de alimentos como consecuencia del crecimiento poblacional ha promovido el crecimiento intensificado de estos basado en la conversión de sistemas ecológicos a sistemas productivos alimentarios sin tomar en cuenta las consecuencias medio-ambientales y sociales que impactan directamente en el crecimiento de estos mismos sectores (Mazoyer y Roudart, 2009). Por lo tanto, actualmente la producción de alimentos se enfrenta a los más grandes retos de todos los tiempos: 1. cubrir la demanda de alimento de calidad; 2. disminuir el impacto ambiental; 3. garantizar la seguridad y equidad alimentaria (Godfray *et al.* 2010; Caos *et al.* 2021; Zajdband, 2011).

Históricamente, la agricultura es la industria de mayor desarrollo junto con la ganadería. La demanda de alimentos ha sido cubierta por medio de la tecnificación y especialización de monocultivos de las revoluciones agrícolas en los siglos VIII y XIX. Sin embargo, actualmente es claro que la agricultura industrial ha conllevado a consecuencias ambientales y sociales que se ha convertido en la mayor amenaza no solo para los ecosistemas naturales esenciales para la vida en la tierra, sino también para los modos de vida y la soberanía alimentaria, limitando así la capacidad de la humanidad para producir alimentos para las generaciones futuras (Godfray *et al.*, 2010; FAO, 2013).

Por otro lado, la acuicultura es actualmente la industria de mayor crecimiento a nivel mundial debido al incremento de su crecimiento relativamente reciente, en el siglo XX. Éste crecimiento es debido a la intensificación de los sistemas de cultivo (mayor producción en menor área) y al aumento de la internacionalización del comercio de productos. En este contexto los sistemas de producción rural están optando por la intensificación mediante la tecnificación del sistema, lo cual está provocando una selección entre productores con el capital para el crecimiento de sus granjas bajo estos términos. De esta manera cada vez menos productores rurales tienen acceso a la comercialización de sus productos. Analógicamente lo que ha pasado en las revoluciones verdes de la agricultura, está por repetirse en ésta nueva y actual revolución azul (Sheriff *et al.*, 2008; Demaine, 2009). Para alcanzar el objetivo anterior se debe definir dimensiones socioeconómicas ya que los sectores productivos se encuentran inmersos en el sistema económico global y por lo tanto son responsables de mantener millones de medios de vida (Prein y Ahmed, 200; Rockström *et al.*, 2009).

Durante los últimos años ha sido cada vez más urgente atender estos retos son precedentes en la historia de la humanidad. Por lo cual, se han propuesto el desarrollo de nuevas tecnologías que hagan uso eficiente de los recursos con el fin de garantizar el suministro de alimentos, con mayor énfasis en poblaciones vulnerables. Sin embargo, es probable que lo novedoso tenga que ver más con la implementación de esquemas productivos tradicionales en un tiempo actual que con la creación de nuevas tecnologías. Debido a que los sistemas productivos tradicionales han demostrado ser capaces de suministrar alimentos diversificados y suficientes para el consumo en poblaciones marginadas (Mazoyer y Roudart, 2009; Alexandratos y Bruinsma, 2012).

En éste contexto la integración de la agricultura y acuicultura mediante los sistemas agro-acuícolas integrados (SAAI) cobran sentido de pertinencia. Estos tipos de sistemas comparten el uso de los recursos para producir varias especies al mismo tiempo, por medio de la sinergia que genera la integración de dos sistemas de cultivo. Aumentando de esta manera la producción y la diversificación del cultivo, el uso eficiente del agua y nutrientes y la incidencia de cultivos multitróficos con beneficios socioeconómicos (Odd-Ivar, 2013).

A pesar de que los SAAI han sido realizados desde la antigüedad, actualmente en México no han sido explorados como una alternativa a la intensificación de los sistemas productivo aunado al crecimiento de la acuicultura mexicana y a la actual crisis ambiental mundial. Por lo tanto, el presente artículo pretende

analizar la crisis alimentaria actual y los sistemas productivos actuales como punto de partida de la pertinencia a la integración de la agricultura y acuicultura como una estrategia con gran potencial para incrementar la producción de alimentos en las zonas con mayor vulnerabilidad, de mayor eficiencia en el uso del agua, con la incidencia de cultivos multitroóficos, y una mayor factibilidad económica y social para lograr el suministro de alimentos para presentes y futuras generaciones.

DESARROLLO

La crisis

La población mundial alcanzó los 7,000 millones en 2011 y se ha proyectado una población mundial de 8,100 millones de personas en 2025 y 9,600 millones en 2050, lo cual indica un crecimiento poblacional del 37% en tan solo 39 años (United Nations, 2013). Éste crecimiento poblacional se traduce en el 60% de aumento de la demanda de alimentos para el año 2050, demanda que deberá ser cubierta por parte de los sistemas productivos (FAO, 2009; Alexandratos y Bruinsma, 2012). Puesto de otra manera, en los próximos 50 años más alimentos tendrán que ser producidos que los que se han producido en los últimos 400 años (Keating *et al.*, 2014). Por lo cual, se ha proyectado que para el 2050 la producción anual de cereales debería aumentar 46%, la producción de carne 76%, 60% la producción de maíz y la producción de soya un 80%. Además, casi el 90% del aumento de la producción anual se produciría en los países en desarrollo, como México, lo que aumentaría su participación en la producción agrícola mundial del 67% en 2005/07 al 74% en 2050 (Alexandratos y Bruinsma, 2012).

Los sistemas productivos están basados en la disponibilidad de los recursos naturales, tales como, tierra, agua dulce, agua marina, energía fósil, nutrientes, entre otros (Conijn *et al.*, 2018). Sin embargo, desde la revolución agrícola contemporánea a mitades del siglo XX, el desarrollo de tecnologías y la expansión e intensificación de los sistemas productivos, han sido las estrategias centrales para enfrentar la demanda de alimentos, ocasionado la sobreexplotación y contaminación de los recursos naturales. Este deterioro ambiental, se ha convertido en la mayor amenaza no solo para los ecosistemas naturales esenciales para la vida en la tierra, sino también para los mismos sistemas productivos, comprometiendo así la capacidad de la humanidad para producir alimentos. (Godfray *et al.*, 2010; Caos *et al.*, 2021; Zajdband, 2011). Ya que, con los niveles de explotación actuales de los recursos naturales se requeriría un equivalente de 2.9 planetas para cubrir la demanda de alimentos para el año 2050 (WWF, 2012). Entonces se tiene que, si se sigue produciendo de la misma manera en que lo ha venido realizado, es decir, con sistemas convencionales con tendencia a la expansión e intensificación, cada vez será más difícil garantizar el suministro de alimentos a la población, convirtiéndose en un grave problema de seguridad y equidad alimentaria (FAO, 2009 y 2013).

Las revoluciones agrícolas en los siglos VIII y XIX promovieron en general la motorización, mecanización, fertilización mineral, selección, especialización para atender la demanda de alimentos en un sistema económico mediante la agricultura industrial. Y si bien se mejoró la producción de alimentos, también se evidenció no ser sostenible al causar daños medio ambientales y pérdidas dramáticas de biodiversidad y del conocimiento tradicional asociado (Gascón y Montagut, 2010).

Además del deterioro de los recursos naturales, el crecimiento intensificado de los sistemas productivos ha provocado una disrupción social. Debido a que, al favorecer agriculturas más productivas, como el monocultivo intensificado, se creó un mercado donde la relación de productividad del trabajo entre la agricultura manual menos productiva del mundo (agricultura rural) y la agricultura motorizada y mecanizada más productiva quintuplicó, pasando de 1 a 10 a principios del siglo XX a 1 a 500, actualmente. Esto no solo llevó al rezago económico y pérdida de empleos, también a la pérdida del bienestar y modos de vida tradicionales (Bailey, 2008; Mazoyer y Roudart, 2009).

En medio de estas tendencias globales, es imperativo proponer estrategias que tanto permitan el suministro de alimentos, así como garanticen la salud del planeta, reto sin precedentes en la historia de la humanidad (Alexandratos y Bruinsma, 2012). El desarrollo de tecnologías novedosas cada vez más eficientes para producir con la menor utilización de recursos naturales, por ejemplo, el riego por goteo, cultivos en invernadero, hidroponía, fertilización orgánica, etc., fueron propuestas como respuesta a la presente crisis. Sin embargo, es probable que lo novedoso tenga que ver más con la implementación de esquemas productivos tradicionales en un tiempo actual que con la creación de nuevas tecnologías. Debido a que los sistemas productivos tradicionales han demostrado ser capaces de suministrar alimentos diversificados y suficientes para el consumo en poblaciones marginadas (Mazoyer y Roudart, 2009).

Estos sistemas tradicionales consisten en el manejo de sistemas agroecológicos complejos, diversos y de menor impacto ambiental. Por lo cual, actualmente la Agroecología como disciplina que se enfoca en productividad, sustentabilidad, sostenibilidad y equidad de los sistemas productivos, es la tendencia a implementar para encarar la crisis de los sistemas productivos (Mazoyer y Roudart, 2009). La Agroecología está diseñada para apoyar la renovación de sistemas productivos de agroindustrias con fines de lucro que se valen de uso y deterioro de recursos no renovables, con sistemas productivos basado en procesos ecológicos naturales y en el conocimiento local de los agricultores (Mazoyer y Roudart, 2009).

A partir de ésta crisis de los sistemas productivos actuales, el concepto de soberanía alimentaria y los sistemas de producción basados en la Agroecología han despertado interés en las tres últimas décadas, con la intención de gestar un nuevo camino productivo para resolver la crisis no solo productiva, también la crisis general económica mundial contemporánea que conlleva la misma (Gascón y Montagut, 2010; Mazoyer y Roudart, 2009).

Los sistemas productivos actuales

El crecimiento de los sistemas productivos actuales ha sido impulsado por el desarrollo de tecnologías y la expansión e intensificación de los cultivos. Los desarrollos de tecnologías aumentan los rendimientos, es decir, mayores producciones en menor tiempo y con menores costos; por ejemplo, la mecanización, selección de variedades de plantas y razas de animales con fuerte potencial de rendimiento, amplia utilización de los fertilizantes y de alimentos formulados para el ganado. Mientras que la expansión de los cultivos se refiere a la utilización de mayores áreas (por ejemplo, tierras agrícolas y acuícolas) para la producción de alimentos e intensificación de los cultivos a mayor producción por unidad de área. Sin embargo, a pesar de que más de un tercio de la superficie terrestre ha sido utilizado como tierras agrícolas solo un 10% de éstas son cultivables actualmente (Mazoyer y Roudart, 2009; Banco Mundial, 2018).

El problema histórico del desarrollo de tecnologías y expansión e intensificación de los cultivos es que han sido diseñados para cultivos de una sola especie, es decir, monocultivos. Lo cual resulta en el aislamiento de una sola especie, que naturalmente se encuentra inmersa y co-dependiente en un ecosistema dinámico. El cultivo de una sola especie implica mayores recursos naturales para mantener las condiciones ambientales, especialmente de nutrientes y agua. Sin embargo, en la naturaleza esto no sucede de ese modo, ya que todo recurso utilizado por una especie proviene del desecho de otra, debido a que no se tratan de sistemas aislados, sino forman parte de los niveles tróficos en la ecología de los ecosistemas naturales.

Los monocultivos de la agricultura convencional han utilizado el 70% de agua disponible a nivel mundial. Y aunado a la creciente demanda, existe una gran presión en el uso eficiente del agua para la producción de alimentos (Caos *et al.*, 2021; WWF, 2012). Por otro lado, la acuicultura representa un alto potencial de producción de alimentos de alta calidad, específicamente de proteínas animales y nutrientes como ácidos grasos esenciales que podrían solventar la desnutrición de la humanidad enfatizada en zonas rurales de países en desarrollo. Además, es la industria de mayor crecimiento a nivel mundial, debido a la estabilización en la producción de las pesquerías. Sin embargo, en los últimos años ha aumentado la

preocupación por los efectos del crecimiento de la acuicultura intensiva sobre el medio ambiente y los recursos naturales, especialmente la contaminación del agua (Kawarazuka, 2010; Zajdband, 2011; Prein y Ahmed, 2000). Y aunque la acuicultura presenta una gran variedad de sistemas productivos, pero al igual que la agricultura, su crecimiento atiende a la expansión e intensificación de los cultivos, generando el deterioro de los recursos naturales y marginación social (Adger, 2000; Naylor *et al.*, 2009; Tacon *et al.*, 2010).

El sistema abierto de flujo de agua constante es el más común que se lleva a cabo en la acuicultura intensiva a nivel mundial. En el cual, los desechos generados por el sistema son liberados en el ambiente aledaño a las granjas, ocasionando problemas ambientales como la eutrofización del agua. Se estima que el 85% del fósforo, 80-88% del carbono y 52-95% del nitrógeno es desechado. Sin embargo, dichos desechos pueden ser aprovechados como fertilizantes para la agricultura y/o hidroicultura, con la finalidad de desarrollar cultivos de plantas (Estim *et al.*, 2015).

Adicionalmente es importante destacar que la producción a pequeña escala o acuicultura rural representa actualmente una de las alternativas viables para promover la producción de alimentos de manera sustentable. Debido principalmente a que este tipo de sistemas pueden ser manejados como unidades familiares para su consumo y complementarse con otras actividades como la agricultura (Zajdband, 2011). Por lo cual diversos autores reportan que el futuro de la acuicultura se encuentra en su integración con otros sistemas productivos donde se aprovechen dichos nutrientes y de esta manera disminuya el impacto al medio ambiente (Estim *et al.*, 2015; Odd-Ivar, 2013).

Integración agricultura-acuicultura

La integración de la acuicultura y la agricultura ha sido realizada desde hace más de 1,000 años en Asia. Y ha sido estudiada y propuesta por múltiples científicos biológicos y sociólogos desde hace más de 40 años, particularmente en países con altos índices de pobreza histórica como Malasia. Pero hasta hoy en día empieza a tener mayor relevancia debido a la exigencia de alternativas a la intensificación de los sistemas productivos que han ocasionado la crisis descrita en el primer apartado, con la finalidad de producir alimentos de manera tanto sustentable como sostenible, donde las prácticas de agricultores ancestrales son finalmente reconocidas (Kadir *et al.*, 1990; Edwards, 1998; Odd-Ivar, 2013).

Se ha definido a la agro-acuicultura integrada como la vinculación concurrente o secuencial entre dos o más actividades productivas, de las cuales al menos una es acuicultura (Zajdband, 2011). Sus características distintivas de éste tipo de sistemas productivo es que la integración genera sinergias entre sus componentes. Es decir, los residuos de un sistema representan los insumos del otro, aumentando así la eficiencia en el uso de los recursos en el sistema integrado, en comparación con los sistemas productivos de monocultivos (Edwards *et al.*, 1998; FAO/IIRR/WorldFish Center, 200).

Entonces, la acuicultura integrada implica el cultivo de varias especies al mismo tiempo, tales como peces, plantas y ganado, donde se promueve el flujo de nutrientes para que el desecho de una especie sea el suministro nutritivo de la otra. Lo cual permite el uso eficiente de los recursos naturales, debido a que las especies a cultivar pertenecen a diferentes niveles tróficos. Donde los productos de la agricultura representan las especies vegetales o productores primarios y los productos acuícolas a las especies animales o productores secundarios (Edwards, 1998; Granada, 2015). Así, por ejemplo, el cultivo de peces ha sido integrado al sistema de riego en Israel, donde los peces herbívoros son cultivados para control de la vegetación acuática y sus desechos con tratamiento secundario son utilizados para la fertilización natural para agricultura de plantas (Edwards, 1998; Granada, 2015).

En China, son comunes los SAAI de gramíneas (centeno, sorgo sutil y mijo) y plantas acuáticas como alimento suplementario de bajo costo para la cría de carpa china, carpa plateada, carpa cabeza y carpa

común. La producción de jacinto de agua, por ejemplo, una planta acuática que puede cultivarse, hasta 300 t de peso fresco/ha/año, en los mismos estanques en donde se alcanza a producir 6 t ha⁻¹/año de peces sin alimentación suplementaria o uso de abonos adicionales. Esto hace que los costos de los insumos alimenticios para los peces usando Jacinto de agua sean 15% menos que al alimentar a los peces con insumos suplementarios (Yang *et al.*, 2003).

Por otro lado, las grandes granjas de cerdo producen grandes cantidades de excremento que puede ser utilizado como fertilizante para forrajes de alto rendimiento, los cuales a su vez son utilizados como base de la alimentación de peces herbívoros. Estos componentes cerdo-pep y gramínea-pep se pueden integrar para optimizar los flujos de los recursos para una mayor productividad. Alrededor de 45 a 60 cerdos pueden soportar 1 ha de producción de gramínea por año (225–300 t de centeno y de sorgo sutil) para un estanque de 2 ha para producir 6 t ha⁻¹/año de peces (Yang *et al.*, 2003).

En Vietnam, la integración del huerto, jardín, ganado y estanque de peces es llamado sistema VAC (*vuon, ao, chuong* que quiere decir huerto/ estanque /corral de ganado) y surgió como modo tradicional de asegurar la alimentación familiar en las regiones rurales pobres. En estos tipos de sistemas los estanques acuícolas están contruidos para realzar el terreno para la casa y el huerto. Este último representa la producción de una variedad de hortalizas (cebolla, papa, berro, etc.) y frutas (plátano, naranja, melocotón, albaricque, etc.) y otros cultivos, como la caña de azúcar, té y mandioca. Esto proporciona una mezcla de cultivos perennes y anuales. Gran parte del estiércol de cerdo u otros animales criados como ganado, es usado en los cultivos agrícolas como abono para árboles y hortalizas. Mientras que los cerdos y aves se alimentan con los desechos de la cocina, y con subproductos de la granja, como mandioca, salvado de arroz, papa, troncos de plátano, y jacinto de agua. Las cifras muestran que el 30 a 60% de los ingresos de la mayor parte de las familias del pueblo puede proceder del sistema VAC; en muchos casos puede llegar hasta el 100% (Luu, 2003). Tal como se describe, existen diversos ejemplos de SAAI, sin embargo, todos ellos cumplen con las características que a continuación se describen.

Uso eficiente del agua y nutrientes

Históricamente en el territorio mexicano, el mayor porcentaje de agua disponible se utiliza para la agricultura. En el 2020 se utilizó el 75.7% del total del agua disponible para dicha actividad productiva, en comparación con 14.7%, 4.6% y 5.0% que fue utilizado para abastecimiento público, energía eléctrica e industria, respectivamente (Sistema Nacional de Información del Agua, 2020). Por lo cual y debido a la problemática medio-ambiental, es necesario hacer uso eficiente del agua para la producción de alimentos por agricultura.

Fernández y Camacho (2005) definen la eficiencia en el uso del agua (EUA) como la relación que existe entre la biomasa de un cultivo por unidad de agua utilizada. La EUA depende del método de producción o tecnología, por ejemplo, para producir 1 kg de jitomate mediante agricultura convencional a campo abierto, se requiere 75 veces más agua que al cultivarlo en invernaderos de alta tecnología (control de temperatura, humedad y CO₂). Por lo cual la EUA es mayor en cultivos en invernaderos en comparación con cultivos convencionales a campo abierto (Salazar *et al.*, 2014).

De forma similar esto ocurre en la acuicultura, donde cultivos hiper-intensivos con tecnificación que permite el control de parámetros fisicoquímicos en el agua, alimentación de los organismos y recambio mínimos de agua, presentan mayor EUA que cultivos extensivos a cielo abierto. Aunque no se cuenta con mayores registros como en el caso de la agricultura, se ha registrado que existen sistemas de cultivo con bajo EUA, ya que por kilogramo de cosecha se utiliza de 45 hasta 53.6 m³ de agua. Mientras que en sistemas tecnificados puede disminuir el gasto de agua hasta 0.5 m³ por kg cosechado. Esta gran diferencia de rangos en el uso de agua en la producción acuícola está además relacionada con las estrategias productivas utilizadas para mantener la calidad de agua de los cultivos por la disponibilidad del recurso. Por lo tanto,

optimizar el uso del recurso del agua desde un punto de vista productivo, ambiental, económico y social (Verdegem *et al.*, 2066).

Ahora bien, en el uso del agua está implícita la utilización de nutrientes que son de hecho los recursos esenciales para el crecimiento de los organismos (animal o vegetal) en cultivo. En el caso de la agricultura se conoce ampliamente que debido a la intensificación de los cultivos durante más de 50 años y a partir de la revolución verde, se ha producido un empobrecimiento progresivo de la fertilidad de los suelos, es decir, disminución de nutrientes en el suelo. Por lo cual se ha optado mundialmente por la fertilización de los suelos por medio de la adición de compuestos inorgánicos (minerales sintéticos) para tratar de corregir dicha deficiencia de nutrientes. Se estima que la eficiencia en uso de nitrógeno de los cultivos por agricultura convencional se encuentra entre 20 y 40%. Porcentaje que depende del tipo de cultivo, características edafoclimáticas, así como de las condiciones en las que se desarrollen las plantas. Entonces tenemos que entre un 80-60% de fertilizante se pierde por diversos mecanismos, como la volatilización, lixiviación y desnitrificación, generando pérdidas económicas y contaminación ambiental (Ramos-Lara *et al.*, 2002).

Por otro lado, el agua utilizada para la acuicultura es desechada o recambiada debido a la alta concentración de compuestos nitrogenados, tales como amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-). Particularmente la concentración de NH_4^+ en el agua es un parámetro crítico, debido a que puede llegar a niveles letales para los organismos acuáticos (Randall y Tsui, 2002). Sin embargo, los NO_3^- son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, por lo que, con la debida transformación microbiológica, el agua de acuicultura puede ser utilizada para un segundo sistema de cultivo, como las plantas, incrementando de esta manera la eficiencia en el uso del agua para producir alimentos (Odd-Ivar, 2013).

Al analizar la eficiencia en el uso de N y P en los sistemas acuícolas, se observa que se encuentra entre el 28-40% y 5-15%, respectivamente. Es decir, entre un 60-70% y 85-95% aproximadamente del nitrógeno y fósforo que se introduce al sistema acuícola no es aprovechado por los organismos en cultivo y por lo tanto es desechado mediante los recambios de agua realizados (Handy y Poxton, 1993).

La baja eficiencia en el uso de nutrientes y agua tanto en sistemas agrícolas como acuícolas, representa un grave problema económico y socio ambiental. Debido a que los sistemas productivos son responsables del 85% de las emisiones reactivas de nitrógeno que provocan problemas ambientales tales como la eutrofización, cambio de la composición de las especies en la formación de ozono troposférico de los ecosistemas, agotamiento del ozono estratosférico y emisiones significativas de gases de efecto invernadero (Groenvelde *et al.*, 2018).

Por lo anterior, es pertinente el planteamiento de estrategias que permitan el aprovechamiento de los nutrientes residuales por medio de la integración de la acuicultura y la agricultura para generar sinergias entre sus componentes ya que los residuos del sistema acuícola representan insumos potenciales para sistemas agrícolas, aumentando así la eficiencia en el uso de los recursos agua y nutrientes.

Incidencia de cultivos multitróficos

En los ecosistemas naturales la materia y energía fluyen a lo largo de los diferentes grupos tróficos de los organismos vivos. Por lo cual, los desechos de un nivel trófico representan los insumos de otro. En comparación con los sistemas productivos de alimentos actuales, son representados por sistemas aislados, por lo que los desechos no son considerados parte del sistema productivo. Por lo cual se ha propuesto a los cultivos multitróficos como la incorporación de especies de diferente nivel trófico para su cultivo en el mismo sistema, como estrategia de sistemas productivos con mayor sostenibilidad ambiental y diversificación de productos (Chopin y Robinson, 2004; Chopin, 2006).

Los sistemas productivos acuícola y agrícolas, se consideran en la naturaleza como dos tipos de ecosistemas diferentes. Los componentes biológicos de estos ecosistemas pueden clasificarse como autótrofos y heterótrofos, respectivamente. El primer grupo está constituido por productores primarios, capaces de sintetizar materia orgánica, estos incluyen a las algas, macrófitos, bacterias y plantas. En contraste, los heterótrofos son los organismos consumidores de la materia orgánica producida por los autótrofos. En éste grupo se encuentran, hongos, bacterias heterótrofas, moluscos, crustáceos y peces (Zajdband, 2011).

Al promover cultivos agrícolas (autótrofos) y acuícolas (heterótrofos) al mismo tiempo, se promueve el reciclamiento de nutrientes debido a los diferentes niveles tróficos que pueden integrarse, tal como sucede en los ecosistemas naturales. Resultando así en la producción de proteína animal, representada por la parte acuícola (Ejemplo: peces, crustáceos, moluscos, entre otros) y la parte agrícola representa la producción de proteína vegetal (ejemplo: algas, hortalizas, plantas aromáticas, entre otras), lo cual permite el uso eficiente de diversos nichos de alimentación (Zajdband, 2011).

Es necesario hacer la distinción con policultivos, en los cuales se cultiva especies del mismo nivel trófico pero de diferente especie. Tal como sucede en la practicas milenarias de cultivos de diferentes especies de peces. Sin embargo, debido a que los organismos representan el mismo sistema biológico y la misma función en las transformaciones de la materia y energía, se presentan pocos beneficios para el reciclamiento de estos y por lo tanto su manejo es menos intensivo. La integración en los cultivos multitróficos permite la intensificación del cultivo ya que la transformación de la materia y energía es más eficiente debido al acercamiento de los niveles tróficos en este tipo de sistemas de cultivo (Barrington *et al.*, 2009).

Por último, se debe destacar que los sistemas acuapónicos, acuicultura fraccionada, SAAI, sistemas peri-urbano acuícolas integrados, sistemas pesqueros y acuícolas integrado son considerados como variantes de los sistemas multitróficos integrados. De esta manera se evidencia la flexibilidad de este tipo de sistemas, por lo que hay registro de sistemas abiertos, cerrados, dulceacuícolas, marinos y con una gran variación de combinaciones de especies cultivadas, tales como moluscos, crustáceos, peces, algas, plantas, entre otros (Neori *et al.*, 2004).

Beneficios socioeconómicos

A pesar de que la acuicultura es actualmente la industria de mayor crecimiento económico a nivel mundial, en México aún no se ha desarrollado lo suficiente para competir económicamente con otros países. Lo cual, representa un área de oportunidad importante para el crecimiento de la acuicultura mexicana y aunado a la actual crisis ambiental expuesta en los apartados anteriores del presente artículo, también es un reto ambiental. Por lo tanto, es necesario promover sistemas de cultivos más eficientes con los recursos naturales para disminuir el impacto ambiental sin dejar de lado la dimensión económica como objetivo principal (Platas-Rosado *et al.*, 2017).

Para alcanzar el objetivo anterior se debe definir dimensiones socioeconómicas ya que los sectores productivos se encuentran inmersos en el sistema económico global y por lo tanto son responsables de mantener millones de medios de vida, desde agricultores, comerciantes intermediarios, hasta los mismos consumidores (Prein y Ahmed, 200; Rockström *et al.*, 2009).

En particular los SAAI presentan una serie de beneficios socioeconómicos debido a que aumenta la eficiencia productiva (menores costos de producción y/o mayor producto en menor tiempo) y diversificación de la producción. La eficiencia productiva se obtiene por medio de la optimización y uso eficiente de los insumos (agua y nutrientes proporcionados en el sistema acuícola), y desechos que son utilizados como insumos para el sistema agrícola (agua y compuestos nitrogenados). De esta manera y con el debido manejo

no es necesaria la aplicación de fertilizantes inorgánicos en el sistema agrícola, lo cual representa menores costos de producción. Ésta sinergia de la integración de la acuicultura y agricultura permiten aumentar la productividad, así como la necesidad de insumos externos, convirtiéndose así en una opción de fácil acceso a los agricultores de menores recursos (FAO, 2009; Lu *et al.*, 2003). Además, la diversificación permite la comercialización de productos tanto acuícolas como agrícolas, lo cual representa una mayor entrada económica y/o una opción para el consumo de los propios agricultores, mejorando así la nutrición familiar y proporcionando ingresos económicos (Godfray *et al.*, 2010).

Debido a estos beneficios socioeconómicos, SAAI tiene una mayor pertinencia en áreas de mayor vulnerabilidad donde la acuicultura y agricultura es aún a nivel rural. Ya que se ha reportado que los SAAI que se integran con acuicultura rural en pequeña escala con dinámicas sociales, resultan en sistemas no solo de menor impacto en el ambiente, también permite utilizar los recursos locales con mejoramiento en la calidad de vida de los productores y su familia como consecuencia del aumento de la disponibilidad de proteína animal de bajo costo relativo (Ahmed y Lorica, 2002).

A pesar del gran potencial de los SAAI su promoción ha sido baja América Latina, en comparación con el Asia y África. Por ejemplo, se ha reportado que las familias que utilizaron SAAI para la producción de peces y hortalizas en Malawi fueron capaces de subsistir a las sequías. En Bangladesh, un estudio encontró que hay menos cuerpos de agua comunales como resultado de la conversión de estas áreas en campos arroceros, sin embargo, después de un largo camino para regresar al policultivo de arroz y peces autóctonos, los agricultores identifican beneficios como es la fuente de ingresos adicionales y la producción de alimentos adicionales para la familia. En la provincia de Quirino, Filipinas, un estudio que introduce la acuicultura integrada en los hogares lejanos en zonas de amortiguación forestal encontró que los peces cultivados en estanques se utilizaban esencialmente para el consumo doméstico, y aparte de los peces de estanque, una variedad de organismos acuáticos, tales como caracoles, bivalvos, camarones, cangrejos, ranas, y pequeños peces, se capturan de arrozales y arroyos y consumido regularmente en el hogar (Prein and Ahmed, 200).

Particularmente los SAAI en el Sudeste asiático están experimentando rápidas transformaciones para la producción de especies exportables a escala industrial, lo cual es un importante antecedente que sugiere que éste tipo de sistemas contribuyen al alivio de la pobreza en el medio rural, generación de empleo y divisas y el subsecuente fortalecimiento de la seguridad alimentaria (Hishamunda y Ridler, 2006; Brummett *et al.*, 2008).

COMENTARIOS FINALES

Estamos ante los mayores retos sin precedentes en la historia de la humanidad, garantizar el alimento para las generaciones futuras. Y dado el aprendizaje en las revoluciones verdes con sistemas altamente intensivos de la agricultura y ganadería, se está antes la oportunidad idónea para gestar un nuevo camino productivo en la actual Revolución Azul de la acuicultura. Donde la integración de los sistemas productivos, representan un enfoque holístico productivo, económico, ambiental y social para la producción de alimentos que se puede realizar con mayor énfasis junto con poblaciones vulnerables mediante la implementación de los SAAI.

LITERATURA CITADA

- Adger, N.W. 2000. Social and ecological resilience: are they related? *Prog Hum Geogr.* 4(3):347–364.
- Ahmed, M. and M.H. Lorica. 2002. Improving developing country food security through aquaculture development lessons from Asia. *Food Policy* 24 (2): 125-141.
- Alexandratos, N. and J. Bruinsma. 2012. *World agriculture towards 2030/2050*. FAO. Rome, Italy.

- Bailey, C. 2008. Human dimensions of an ecosystem approach to aquaculture. En: Soto, D., J. Aguilar-Manjarrez and N. Hishamunda (eds). Building an ecosystem approach to aquaculture. FAO. Rome, Italy. pp. 37–46.
- Banco Mundial. 2018. Agricultural land (% of land area). URL <https://data.worldbank.org/indicator/ag.lnd.agri.zs>. Accessed 19 Oct 2018.
- Barrington, K., T. Chopin and S. Robinson. 2009. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. In: D. Soto (ed.). Integrated mariculture: a global review. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 529. Rome, FAO. pp. 7–46.
- Brummett, R.E., J. Lazard and J. Moerhl. 2008. African aquaculture: realizing the potential Food Policy 33 (5): 371-385.
- Caos, X., J. Xiao, M. Wu, W. Zen and X. Huang. 2021. Agricultural water use efficiency and driving force assessment to improve regional productivity and effectiveness. Water Resources Management. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02845-z>.
- Chopin, T. and S. Robinson. 2004. Defining the appropriate regulatory and policy framework for the development of integrated multi-trophic aquaculture practices: introduction to the workshop and positioning of the issues. Bulletin of the Aquaculture Association of Canada 104 (3): 4-10.
- Chopin, T. 2006. Integrated multi-trophic aquaculture. What it is and why you should care and don't confuse it with polyculture. Northern Aquaculture 12 (4): 4.
- Conijn, J.G., P.S. Bindraban, J.J. Schröder and R.E.E. Jongschaap. 2018. Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? Agric Ecosyst Environ 251:244–256. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2017.06.001>.
- Demaine, H. 2009. Rural aquaculture: reflections ten years on. En: M.G. Bondad-Reantaso and M. Prein (Eds.) Measuring the contribution of small scale aquaculture: an assessment. FAO, Rome, pp. 45-58.
- Edwards, P. 1998. A systems approach for the promotion of integrated aquaculture. Aquac Econ Manage 2(1):1–12
- Estim, A. 2015. Integrated multitrophic aquaculture. Chapter 6. In Aquaculture Ecosystems: Adaptability and Sustainability, First Edition. S. Mustafa y R. Shapawi (Eds). pp. 164-181.
- Fernández, R.E. y F. Camacho. 2005. Eficiencia en el uso del agua. Revista Viveros. Universidad de Almería en España, pp. 86-89.
- Gascón, J. y X. Montagut. 2010. ¿Cambio de rumbo en las políticas agrarias latinoamericanas? Estado, movimientos sociales y soberanía alimentaria. Icaria (ed.). España. 263 p.
- Godfray, H. C.J., J.R. Beddington, I.R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J.F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S.M. Thomas and C. Toulmin. 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science, 327(812):812–818. doi:10.1126/science.1185383.
- Groenvelt, T.Y., Y. Kohn, A. Gross and N. Lazarovitch. 2018. Optimization of nitrogen use efficiency by means of fertigation management in an integrated aquaculture-agriculture system. Journal of Cleaner Production. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.031
- Granada, L., N. Sousa, S. Lopes and M.F.L. Lemos. 2015. Is integrated multitrophic aquaculture the solution to the sectors' major challenges? A review. Reviews in Aquaculture. 6, 1-18.
- Handy, R.D. and M.G. Poxton. 1993. Nitrogen pollution in mariculture toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish. Reviews in Fish Biology and Fisheries. 3:205-241.
- Hishamunda, N. and N.B. Ridler. 2006. Farming fish for profits: A small step towards food security in sub-Saharan Africa. Food Policy 31: 401-414.
- Kawarazuka, N. 2010. The contribution of fish intake, aquaculture, and small-scale fisheries to improving nutrition: A literature review. The WorldFish Center Working Paper No.2106. The WorldFish Center, Penang, Malaysia. 51 p.
- Keating, B.A., M. Herrero and P.S. Carberry. 2014. Food wedges: framing the global food demand and supply challenge towards 2050. Glob Food Sec 2014 3: 125–32.
- Luu, L.T. 2003. El sistema VAC en Viet Nam del Norte. En Agro-acuicultura integrada. Manual básico. Instituto Internacional para la Reconstrucción Rural. Worldfish Center. Organización de las Naciones Unidas para Agricultura y la Alimentación, Roma. pp. 29-32.

- Mahfuz Ahmed, M.P. 2000. Integration of aquaculture into smallholder farming systems for improved food security and household nutrition. *Food and Nutrition Bulletin*. Vol. 21.No. <https://doi.org/10.1177/156482650002100424>.
- Mazoyer, M. and L. Roudat. 2009. *Histoire des Agricultures du monde: du néolithique à la crise contemporaine*. Fundação Editora da UNESP (FEU). São Paulo, Brazil. 567 p.
- Naylor, R.L., R.W. Hardy, D.P. Bureau, A. Chiu, M. Elliott, A.P. Farrell, I. Forster, D.M. Gatlin, R.J. Goldberg, K. Hua and P.D. Nichols. 2009. Feeding aquaculture in an era of finite resources. *Proc Natl Acad Sci USA* 106(36):15103–15110. doi:10.1073/pnas.0905235106.
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A.H., Kraemer, G.P., Halling, C., Shpigel, M. y Yarish, C. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 231: 361-391.
- Odd-Ivar, L. 2013. Natural systems, integrated aquaculture, aquaponics, biofloc. In *Aquaculture Engineering*. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/9781118496077.ch15>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2013. *FAO statistical yearbook: World food and agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nation.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. En: *Cómo alimentar al mundo en 2050*, Secretaría del Foro de Expertos de Alto Nivel, Italy, Rome, p. 4. Retrived from. <http://www.fao.org/search/en/?cx=018170620143701104933%3Aqq82jsfba7w&q=La+agricultura+mundial+en+la+perspectiva+del+a%C3%B1o+2050&cof=FORID%3A9>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), International Institute of Rural Reconstruction (IIRR) and WorldFish Center. 2001. *Integrated agriculture-aquaculture: a primer*. FAO Fisheries Report 407, Rome.
- Platas-Rosado, D.E., Hernández-Arzaba, J.C. y L. González-Reynoso. 2017. Importancia económico y social. *Agroproductividad*, 10(2), 19–24.
- Randall, D.J. and T.K.N. Tsui. 2002. Ammonia toxicity in fish. *Marine pollution bulletin*, 45(1-12), 17-23.
- Ramos-Lara, C., G. Alcántar-González, A. Galvis-Spinola, A. Peña-Lomeli y A. Martínez-Garza. 2002. Eficiencia de uso del nitrógeno en tomate de cascara en fertirriego. *Terra Latinoamericana*, vol. 20, núm. 4, 465-469 pp.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noonel, A. Persson, F. Stuart-Chapin I.I.I., E.F. Lambin, *et al.* 2009. A safe operating space for humanity. *Macmillan Publishers Limited. Nature* 461: 472–475.
- Salazar, R., A. Rojano e I.L. López. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*. V(2), 177-183.
- Sheriff, N., D.C. Little and K. Tantikamton. 2008. Aquaculture and the poor Is the culture of high-value fish a viable livelihood option for the poor? *Marine Policy*. 32 (6): 1094-1102.
- Tacon, A.G.J., M. Metian, G.M. Turchini and S.S. De Silva. 2010. Responsible aquaculture and trophic level implications to global fish supply. *Rev. Fish Sci.* 18(1):94–105.
- United Nations. 2013. *World population prospects: The 2012 revision key findings and advance tables*. Working paper No. ESA/P/WP 227. United Nations: Population Division.
- Verdegem, M.C.J., R.H. Bosma and J.A.J. Verreth. 2006. Reducing wáter use for animal production through aquaculture. *Water Resources Development* 22 (1): 101-113.
- World Wildlife Fund (WWF). 2012. *Living planet report 2012: Biodiversity, biocapacity and better choices*. Witzerland: World Wide Fund for Nature.
- Yang, H.Z., Y.X. Fang y Z.L. Chen. 2003. *Sistemas integrados de cultivo de peces en pastizales en China. En Agro-acuicultura integrada. Manual básico*. Instituto Internacional para la Reconstrucción Rural. Worldfish Center. Organización de las Naciones Unidad para Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia. pp. 21-25.
- Zajdband, A.D. 2011. Integrated agri-aquaculture systems. In: *Genetics, Biofuels and Local Farming Systems, Sustainable*. E. Lichtfouse (ed.). *Agriculture Reviews* 7. DOI:10.1007/978-94-007-1521-9_4.