

EL IMPACTO POSITIVO DE LOS SISTEMAS INTEGRADOS AGRO-ACUÍCOLAS EN EL OBJETIVO PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE 6: AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO

THE POSITIVE IMPACT OF INTEGRATED AGRI-AQUACULTURE SYSTEMS ON THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOAL 6: CLEAN WATER AND SANITATION

Priscila Sarai Flores Aguilar^{1*}
Genaro Martín Soto Zarazúa¹

Universidad Autónoma de Querétaro, México.

*pflores21@alumnos.uaq.mx



Resumen

Los umbrales seguros para la vida en la tierra han sufrido efectos catastróficos, desencadenando consigo eventos intempestivos que irrumpen con la estabilidad humana y natural. Para agravar las cosas, el estado actual de los 9 límites planetarios más el fenómeno de sobrepoblación se traducen en una alerta global, misma que produce zozobra en cuanto al uso apropiado de los recursos alimenticios. Las Naciones Unidas emitieron un plan de acción para reducir y corregir esta problemática en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Un ejemplo patente de la complicación es el manejo inadecuado del agua, la protagonista de la estabilidad y conservación de cualquier biosistema; el depósito global de agua dulce (que constituye el 0.01 % de toda el agua del mundo) se encuentra en un umbral preocupante. El estado actual ha provocado que el espacio operativo penda de una delgada fibra entre el límite seguro y la zona de incertidumbre [6]. El objetivo del plan (en su indicador 6.4) para el 2030 consiste en mejorar la calidad del agua, reducir la proporción de aguas residuales no tratadas y exhortar la práctica del reciclaje y reutilización segura. Por nuestra parte, pretendemos describir cómo los sistemas integrados agro-acuícolas pueden impactar parcial y positivamente en la encomienda [6]. Para ello, la acuaponía funge como piedra angular de nuestro estudio, ya que está conformada por sistemas integrados agro-acuícolas sostenibles de producción de alimentos basados en el *suprarreciclaje* del agua: la reutilización de nutrientes y reducción de aguas residuales con un sentido orgánico. Dentro del territorio nacional se incita el uso de esta tecnología en aras de perpetuar la supervivencia global.

Palabras clave: Agenda 2030 para el Desarrollo Sustentable, agua limpia y saneamiento, sistemas integrados agro acuícolas-IAAS, sistemas urbanos de producción de alimentos, suprarreciclaje del agua.





Abstract

The safe thresholds for life on Earth have suffered catastrophic effects, triggering untimely events that disrupt human and natural stability. To worsen matters, the current state of the 9 planetary boundaries plus the overpopulation translate into a global alert regarding the food resources. The United Nations issued an action plan in the 2030 Agenda for Sustainable Development. A clear example of the complication is the mismanagement of water; the global deposit of fresh water (constituting 0.01% of all the world's water) is at a concerning threshold. The current state has led the operational space to the limit of uncertainty [6]. The goal of the plan (in its indicator 6.4) for 2030 is to improve water quality, reduce untreated wastewater, and promote recycling and reuse. We aim to describe how integrated agro-aquaculture systems can further the mission [6]. Aquaponics serves as the cornerstone of our study, as it is comprised of sustainable integrated agro-aquaculture food production systems based on the super recycling of water: the reuse of nutrients and reduction of wastewater with an organic sense. Within the national territory, the use of this technology is encouraged to perpetuate global survival.

Keywords: 2030 Agenda for Sustainable Development, clean water and sanitation, integrated agro-aquaculture systems (IAAS), urban food production systems, water super recycling.

Introducción

Durante el Holoceno, la capacidad reguladora de la tierra se mantuvo estable y facilitó las condiciones óptimas para el desarrollo humano. Durante este periodo permaneció fija la temperatura, así como la disponibilidad del agua dulce y los flujos biogeoquímicos [1]. Asimismo, los actos de los hombres en el periodo del Antropoceno desestabilizaron 3 de los 9 límites planetarios¹; actividades como la industrialización, agricultura y extracción de combustibles fósiles, por mencionar algunas [2]. Para garantizar la permanencia de las futuras generaciones es menester corregir el empleo de los recursos naturales [3]. Por lo anterior dicho, se han establecido estrate-

¹ Cambio climático, integridad de la biósfera, cambio del uso del suelo, flujos bioquímicos, reducción del ozono estratosférico, uso del agua dulce, acidificación del océano, carga de aerosoles atmosféricos, incorporación de nuevas entidades.



gias para reducir el deterioro de la tierra y el uso de materias primas. A tal efecto, se propone el cambio del actual modelo económico lineal por modelos de economía circular, regenerativa y distributiva [4], [6]. Como resultado de ello, surgen los 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) generados por la ONU [7]. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible incluye, de manera integral, aspectos de los tres pilares de la sostenibilidad, conformados por el económico, social y ambiental. Sin embargo, algunas gobernanzas del mundo desestiman los 17 ODS.

Los sistemas integrados de agro-acuicultura combinan diversas prácticas acuícolas y tienen como propósito aumentar y optimizar la producción de alimento. La acuaponía funge como piedra angular en el presente estudio, debido a la reutilización de nutrientes y reducción de aguas residuales con un sentido orgánico.

En la Tierra fluyen 263 ríos internacionales, mismos que drenan el 45 % de la superficie terrestre [8]. Al día de hoy las zonas de agua dulce contienen alrededor del 0.01 % del agua potable y cubren cerca del 0.8 % de la superficie terráquea [9]. En dicho contexto, el ODS 6 concierne al agua limpia y saneamiento, rubro que sustenta a más del 40 % de la población mundial. Se ha calculado que para el año 2025 la mitad de la población vivirá en áreas con estrés hídrico [9], [10]. La tarea del hombre por mantener la integridad de este pequeño porcentaje, a la par de aprovechar este recurso en la producción de alimento suficiente y garantizar la soberanía alimentaria, ha sido una encomienda titánica [11]. De tal modo, es necesario llevar las prácticas de producción de alimento hacia tecnologías sostenibles que incluyan la utilización eficiente del agua [12].

Los sistemas integrados de agro-acuicultura (IAAS por sus siglas en inglés) combinan diversas prácticas acuícolas y tienen como propósito aumentar y optimizar la producción de víveres mediante operaciones como la siembra, alimentación controlada y protección frente a depredadores. En áreas rurales supone una importante actividad económica, dado que produce alimentos que refuerzan la seguridad de comestibles en las poblaciones [13]. Comencemos por evocar la primera forma de los IAAS; dada su antigüedad se teoriza que fue creada entre los años 1150 y 1350 d. C. y parte del sistema de chinampas, propias del valle de México [14]. Por otro lado, eran comunes las granjas multitróficas en China por el año 5 d. C. (Figura 1). No obstante, hasta 1970 se acuñó el término *acuaponía* [15] gracias a las contribuciones de Lewis y Neagel; derivado de ello, apareció la primera descripción formal de un sistema de recirculación para la producción combinada de peces y plantas. Consiste en aprovechar los nutrientes que los peces excretan al agua en conjunto con la desnitrificación microbiana para maximizar la purificación y recirculación del hábitat y obtener una produc-



ción controlada de peces [16]. La acuaponía ha destacado en la actualidad por su eficiencia y sustentabilidad, al ocupar gran parte de los IAAS (Figura 1). Por consiguiente, puede acelerar (de manera local) el establecimiento del ODS 6, ya que se basa en el suprarreciclaje del agua, la reutilización de nutrientes y reducción de aguas residuales con un sentido orgánico; cabe señalar que es adaptable y versátil a diferentes entornos físicos [18]. A pesar de las repercusiones en torno al aumento poblacional, la contaminación y el desgaste de recursos naturales no renovables, esta tecnología ha ido *in crescendo* para resolver las necesidades climáticas actuales [19], [20], [21], [22]-[24].

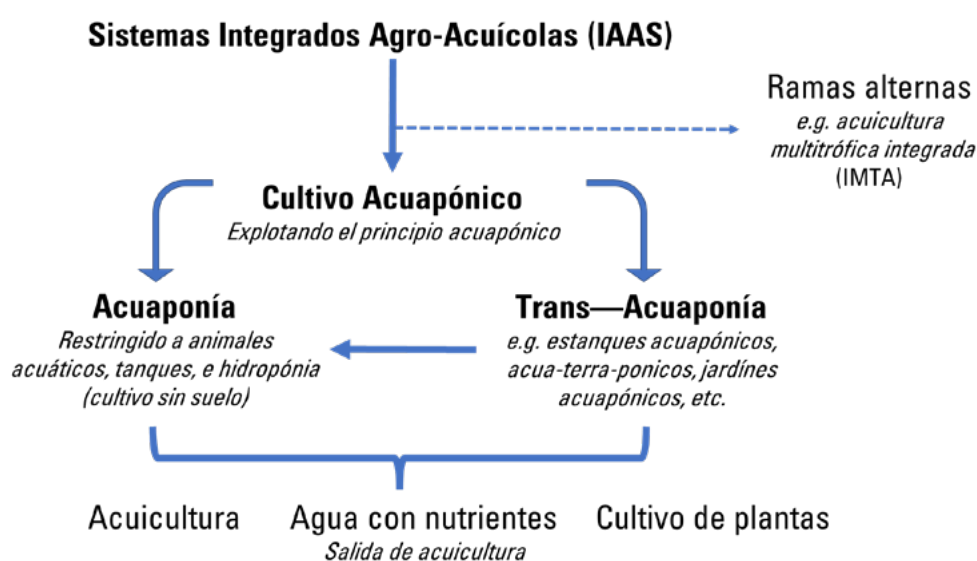


FIGURA 1. Definiciones y dependencias. Extraído y modificado de Baganz et al., (2021). [17]

Como se ha indicado, representa una doble oportunidad al compartir recursos (agua y nutrientes), producir alimento de manera sostenible y obtener dos tipos de proteína, de excelente calidad, con un alto contenido nutricional.

A pesar del reconocimiento de la acuaponía en México perdura su abandono entre agricultores y acuicultores. Es necesaria la apropiación y participación tanto a nivel local como la colaboración nacional y mundial; la ODS 17 estipula alianzas para lograr tal objetivo. El documento describe las contribuciones que las IAAS pueden agregar al entorno para el cumplimiento parcial de la ODS 6; además, alienta la cooperación regional, generación de registros estadísticos y la subsecuente aplicación de mejoras por parte de los programas estatales [25].



Breve historia de los Objetivos del Desarrollo Sostenible

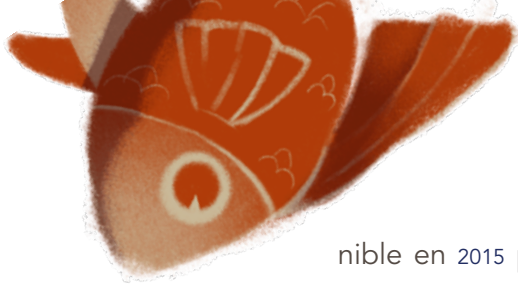
Inicios para formalizar las acciones a nivel mundial

La carrera por definir el modo de alcanzar el desarrollo sostenible comenzó en 1983, en la publicación *Comisión de Brundtland*, y cobró fuerza en 1987 con la impresión de *Nuestro Futuro Común* [26]. En este contexto se crearon movimientos y organizaciones como el *Acuerdo de Bretton Woods*, *Greenpeace*, *Chipko* y *Amigos de la Tierra*, sin embargo, estas cofradías carecieron del efecto social esperado en pos de cincelar un cambio en la mentalidad colectiva. Por otro lado, los gremios que destacan por sus acuerdos sólidos y metas concretadas son el *Protocolo de Kioto* (1997) [27], *8 Objetivos de Desarrollo del Milenio* (2000) [28] y *Objetivos de Desarrollo Sostenible-ODS* (2015) [29]; regido por el lema “No dejar a nadie atrás: la igualdad y la no discriminación en el corazón del desarrollo sostenible”, este último engloba las experiencias adquiridas de los anteriores; considera los fracasos y desafíos que obstaculizan el éxito de su establecimiento [30]. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible generada por la ONU junto con sus 193 miembros, buscan establecer, unificar y generar progresos en las condiciones de vida de la población mundial. Asimismo, su objetivo es disminuir la mala praxis de las industrias y empresas, con el fin de migrar de la economía lineal hacia una economía circular y sostenible. Cada uno de los 17 ODS de la Agenda 2030 cuenta con 232 indicadores; se pretende efectuarlos comunitariamente a través del gobierno y la sociedad (Figura 2).

FIGURA 2. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Extraído de Naciones Unidas (2020).



México ha tomado algunas medidas para concertar un entorno apropiado a las vías sostenibles: implementó las estrategias para el desarrollo sosten-



nible en 2015 por mano del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); durante el mismo año se estableció el Comité Técnico Especializado del Sistema de Información de los Objetivos de Desarrollo del Milenio para medir los indicadores de cumplimiento de los ODS. En 2017 emergió el Consejo Nacional para la Agenda 2030, y en mayo de 2018 tuvo lugar su primera sesión de diálogo abierto, donde se describió el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 [31].

Por desgracia, las limitantes que pesan sobre México solo permiten cumplir con 169 indicadores de 232, los 63 restantes precisan cálculos estadísticos adicionales, de los cuales no se puede rendir cuentas. De los indicadores aplicados a nivel nacional (169), 83 se comprueban periódicamente, 36 no se miden periódicamente y 50 carecen de una metodología para su cálculo [31]. En la página oficial de la Agenda 2030 se exponen los indicadores nacionales marcados con una N, la cual denota un fin determinado [32]. De los 17 objetivos, el ODS 6 presenta ocho metas globales junto con 11 de sus indicadores, por lo que fue necesario sustituir tres metas globales y tres indicadores por dos metas nacionales y tres indicadores (Tabla 1).

Meta 6: agua limpia y saneamiento, y los sistemas integrados agroacuícolas como parte de la solución

El ODS 6 busca garantizar la disponibilidad, saneamiento y gestión sostenible del agua. Tal efecto abarca ocho objetivos (Tabla 1), de los cuales, a nivel mundial, se han concretado 641 acciones en 48 eventos diferentes, y en el año 2020 fueron generadas 30 publicaciones al respecto [33]. Asimismo, en 2021 se cumplieron 42 acciones hasta abril, obteniendo un total de 683 acciones. Durante la misma temporada se ejecutaron acciones relacionadas a once indicadores, tres de ellos nacionales. Por ejemplo, el 14 de abril de 2021 fue la última actualización del indicador nacional 6N.1.1, el cual refiere al porcentaje de la población con acceso diario de agua entubada y saneamiento. Actualmente, se contabilizaron 35 publicaciones, 259 eventos y 1685 acciones, mismos que demuestran el compromiso global activo [34]. Esta acción estadística se implementó en 2018 a nivel república y a la fecha se reconoce que el estado con más del 90 % de acceso al agua entubada es Nuevo León, mientras en Guerrero solo el 10 % gozan de este derecho. Otro indicador nacional es el 6N.2.2, encargado de evaluar la producción de cuatro cultivos básicos, maíz, frijol, trigo y arroz, a través de las zonas con infraestructura





de riego y su unidad de superficie. Esta acción comenzó en el 2019, y para tal efecto se contabilizaron los datos disponibles desde 2012. En la última actualización del 12 mayo de 2021 se advierte un aumento de 1.1 ton ha^{-1} en el rendimiento de estos cultivos, debido al aprovechamiento de la infraestructura de riego. Los metadatos relacionados a cada señalador se pueden consultar y descargar en la página oficial de agenda2030.mx en el apartado "indicadores" [32]. El órgano interno que coordina estas acciones es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en conjunto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Gerencia de Planificación Hídrica y el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) [33].

De esta circunstancia nace el hecho de que tanto la acuaponía como las IAAS presentan un ahorro sustancial respecto al uso del agua dulce para la producción de alimentos. En contraste, la agricultura representa el 70 % del gasto anual [35], mientras que la acuaponía reutiliza el agua residual de la acuicultura, ahorrando cerca del 90 % [17]. Al respecto, conviene mencionar que el elevado ahorro de agua puede destinarse al consumo humano en lugar de la producción de alimentos. La acuicultura es un candidato ideal, dado el porcentaje inferior que refleja en la huella hídrica de un 97 % entre cultivar pescado en sistemas acuícolas de recirculación (RAS, por sus siglas en inglés) y ganado en forma tradicional; en comparación, otras fuentes de proteína como la carne de puerco, gallina o grillo abarcan menos del 91.7 %, 89.7 % y 90.3 % [14]. Es preciso hacer recambios desde un 10 % hasta un 30 % en los RAS, aunque la producción por acuaponía elimina gran parte los recambios y los agrega al agua dulce evapotranspirada por medio del estanque y las plantas; estos efluentes proveen más del 50 % de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas [36].

El desempeño de la acuicultura queda rezagado hasta un 2.5 % del crecimiento anual proyectado para 2022, en contraste con el 6.1 % atribuido al periodo 2003-2012; entre otros agravantes se encuentra la escasez de agua dulce y la disminución de lugares favorables de producción [37]. Una de las principales problemáticas que comparten los sistemas de producción de alimentos es el extenso espacio que requieren, pero los constructos acuapónicos pueden montarse sin suelo, en un medio inerte. Como era de esperar, han relucido numerosos reportes entorno al beneficio ambiental que aporta el uso de nuevos materiales de desecho reincorporados como sustrato inerte, lo que aumenta las virtudes de esta tecnología [38], [39].



TABLA 1. Descripción del total de metas e indicadores del Objetivo 6: *Agua Limpia y Saneamiento* de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Las letras G, N y E indican meta global, nacional y estatal, respectivamente. En cursivas se muestran las metas e indicadores desestimados a nivel nacional [32].

AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO (ODS 6)		
META	INDICADOR	DESCRIPCIÓN
6.1G		Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable segura y asequible para el año 2030.
	6.1.1	Proporción de la población que utiliza servicios de agua potable gestionados de forma segura.
6.2G		Conseguir el acceso al saneamiento e higiene adecuados y equitativos para la población y erradicar la defecación a la intemperie; se priorizarán las necesidades de mujeres, niñas y personas vulnerables.
	6.2.1	Proporción de la población que goza tanto de servicios de saneamiento gestionados de forma segura como de una instalación para lavado de manos.
6.3G		Mejorar la calidad del agua al reducir la contaminación por descargas de productos químicos y materiales peligrosos; tratar la mayor parte de aguas residuales y aumentar sustancialmente el reciclaje y reutilización consciente a nivel mundial.
	6.3.1	Proporción de aguas residuales tratadas de forma segura.
	6.3.2	Proporción de masas de agua con óptima calidad de agua ambiente.
6.4G		Rectificar la escasez hídrica a través de extracciones y suministros sostenibles de agua dulce para todos los sectores hacia 2030 .
	6.4.1	Emplear con eficacia el agua.
	6.4.2	Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce con proporción de la disponibilidad.
6.5G		Aplicar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los estratos incluyendo la cooperación transfronteriza.
	6.5.1	Grado de implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos (0-100).
	6.5.2	Proporción de la cuenca transfronteriza con un acuerdo operacional para la cooperación en materia de agua.
6n.1N E		Brindar acceso universal y equitativo al agua potable y saneamiento, se atenderá principalmente a grupos transgeneracionales y en desventaja.
	6n.1.1	Porcentaje de la población que dispone de agua entubada, así como saneamiento.
6n.2N		Garantizar una gestión integral de recursos hídricos a todos los niveles.
	6n.2.1	Grado de presión sobre el recurso hídrico de las zonas norte y centro del país.
	6n.2.2	Rendimiento de cultivos básicos en zonas con infraestructura de riego.
6.6 <i>No aplica en México</i>		<i>Proteger y restaurar para 2020 los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos montañas, bosques, humedales, ríos, acuíferos y lagos.</i>
	6.6.1	<i>Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua.</i>
6.a <i>No aplica en México</i>		<i>Ampliar la cooperación internacional, junto con el apoyo para los países en desarrollo en cuanto a la creación de actividades y programas relacionados con el tema hídrico, incluidas tecnologías de captación de agua, desalinización, eficiencia hídrica, tratamiento de aguas residuales, reciclado y reutilización hacia 2030.</i>



AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO (ODS 6)		
META	INDICADOR	DESCRIPCIÓN
	6.a.1	Asistencia oficial para el desarrollo relacionado al agua y saneamiento que conforma un plan de gastos coordinado por el gobierno.
6.b No aplica en México		Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión y saneamiento del agua.
	6.b.1	Proporción de unidades administrativas locales con políticas, procedimientos establecidos y operativos para la participación ciudadana y local en la gestión del saneamiento del agua.

México alberga 11 592 km de costa e incluye una red de ríos y arroyos de 633 km de longitud, junto con sistemas de lagos y lagunas que enriquecen el suministro hídrico para la actividad acuícola [40], [41]. En este escenario, México es el segundo productor acuícola con el 82 % de pesca y 18 % de acuicultura. De esta última actividad el primer organismo cosechado es el camarón con más de 180 000 t, el segundo lugar es ocupado por la mojarra con 44 000 t. De las especies antes mencionadas se obtienen estudios sobre su integración en IAAS con la finalidad de aumentar sus eficiencias [42-46]. Para ilustrarlo mejor, tomamos el número de toneladas producidas (reportadas) de mojarra y consideramos un recambio de aguas residuales del 20 %, mismos que logran cuantificar un efluente de más de 3 millones de m³. Este volumen equivale alrededor de 1000 piscinas olímpicas repletas de partículas orgánicas disueltas como producto del metabolismo de los peces y el alimento desaprovechado. Si estas aguas se integraran a un IAAS se obtendrían al menos 98 t de hortalizas y vegetales, los cuáles se venderían por 3.6 veces el valor del pescado [47], [48]; además, se obtiene un ahorro de más 2 t de macronutrientes y más de 500 kg de micronutrientes [16]. Estos cálculos son aproximados por semana, ya que los recambios en los sistemas acuícolas se pueden realizar diariamente o cada tercer día, según sea la necesidad [49]. En este sentido, la tecnología acuapónica puede tanto disminuir el gasto de agua dulce destinado a la producción como evitar la contaminación y eutroficación ocasionadas por las descargas de aguas residuales hacia los cuerpos acuáticos. Concebimos pues, que la acuaponía tiene un impacto positivo a nivel local y directo al ODS 6; particularmente en el punto 6.3.1, por otro lado, en los 6.3.2 y 6.4 el impacto es indirecto mas también positivo (Tabla 1).



TABLA 2. Producción acuícola por entidad federativa en México.

Entre los 32 estados que conforman la República, los que poseen un número considerable de unidades de producción acuícola (UPA) son:

ENTIDAD	UPA	ENTIDAD	UPA	ENTIDAD	UPA
PUEBLA	1093	QUERÉTARO	110	MORELOS	270
SINALOA	1294	TLAXCALA	121	VERACRUZ	574
SONORA	325	GUERRERO	538	NAYARIT	400
BAJA CALIFORNIA NORTE	222	HIDALGO	418	OAXACA	592
BAJA CALIFORNIA SUR	176	JALISCO	213	CHIAPAS	526
CAMPECHE	163	ESTADO DE MÉXICO	512	TABASCO	694
COLIMA	148	MICHOACÁN	450	YUCATÁN	67

Cabe mencionar que, a pesar de la ínfima cantidad de unidades en Yucatán, este estado representa el octavo lugar nacional como productor pesquero [50]. Los territorios antes mencionados podrían comenzar una transformación paulatina hacia el rendimiento por medio de IAAS (Figura 3) e instituir anuarios estadísticos de elaboración acuapónica, ya que la información de tal tópico es limitada de manera nacional. Varias investigaciones se han dedi-



cado a los trabajos acuapónicos nacionales, pero es imposible garantizar la permanencia de alguno de ellos. Se han escrito reportes al respecto por parte de casas de estudio como la Universidad Autónoma de Querétaro, Universidad Autónoma de Guadalajara, Universidad Autónoma Juárez de Tabasco, Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora, Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, Instituto Tecnológico de Boca del Río y el Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrarias [41], [43]. A nivel corporativo se encuentran BOFISH en Jalisco y Acuicultura del Desierto en Baja California, Escuela Frontera Sur (ECOSUR) con unidades en Campeche, Chetumal, San Cristóbal, Tapachula y Villahermosa [51], [52].

FIGURA 3. Diagrama de un sistema acuapónico acoplado tradicional; la fuente principal de nutrición es la comida proveída a los peces, la cual se metaboliza y después se transforma en fuente de nutrición para el cultivo vegetal.

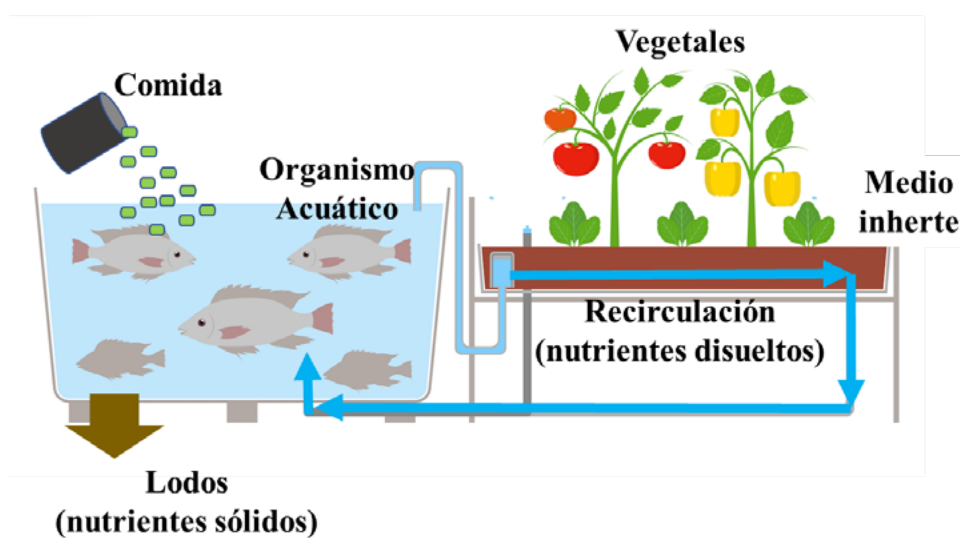
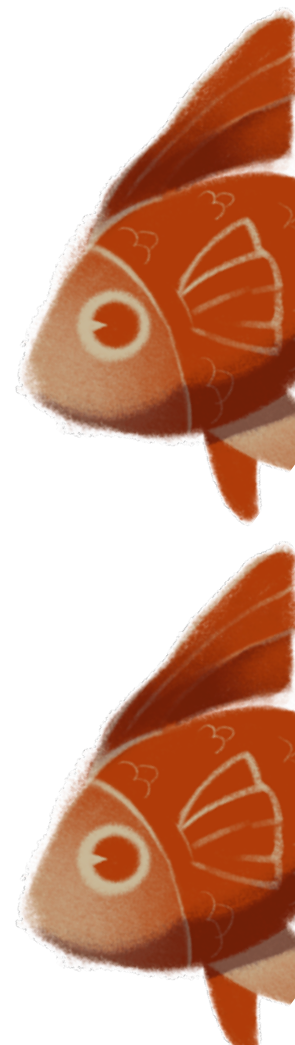
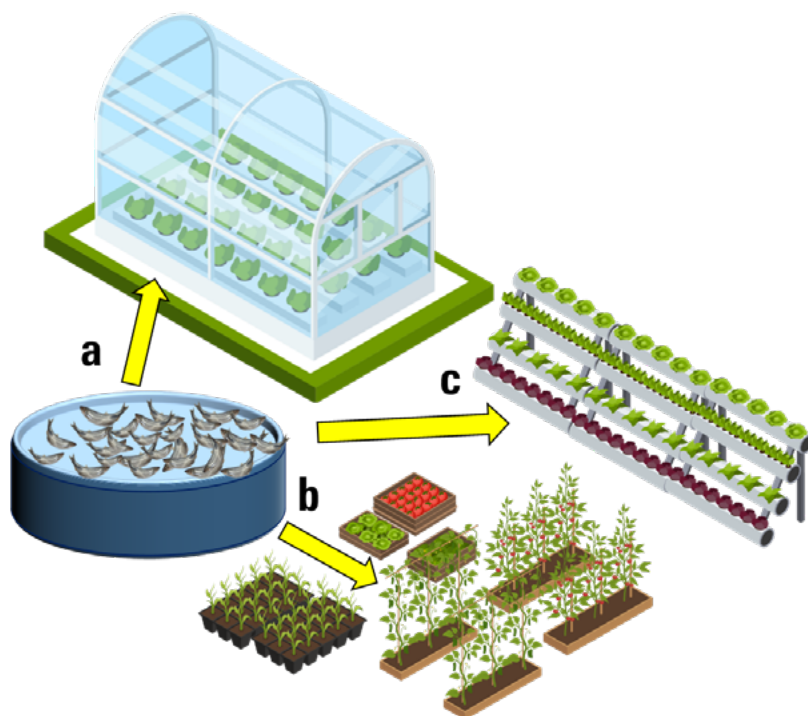


FIGURA 3. (continuación) Posibles usos para el agua residual proveniente de las Unidades de Producción Acuícola hacia sistemas protegidos (a), camas de cultivo con o sin suelo (b) y sistemas hidropónicos en cualquiera de sus modalidades (c).





Conclusiones

La acuaponía como principal modelo de sistema integrado agro-acuícola es una herramienta sostenible de producción de alimentos. Se caracteriza por ahorrar hasta un 90 % de agua y brindar más de la mitad de los nutrientes básicos para el crecimiento vegetal. De esta manera la producción alimentaria se diversifica y le brinda un valor agregado tanto al producto residual en la acuicultura como a los efluentes. Estos últimos, a pesar de su naturaleza remanente, son ricos en nutrientes utilizables para la producción de hortalizas, vegetales e ingresos. Así pues, es posible reducir la contaminación al eliminar en un porcentaje considerable los efluentes que ocasionan eutroficación. Según dicta el indicador 6.3, la meta es disminuir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar. En este sentido, las estadísticas nacionales sobre los lugares de pesca y acuicultura son favorables para el aumento del reciclado y reutilización del agua. En conclusión, aunque existe la posibilidad de lograr la meta sin los IAAS, su implementación a nivel nacional beneficiaría el cumplimiento del Objetivo 6, en particular el indicador 6.3.

Agradecimientos

Extendemos nuestra gratitud al Conacyt, que financió parcialmente este trabajo a través de la beca 2019-000037-02NACF-01190 para estudios doctorales.

Referencias

- [1] W. Steffen, "Trajectories of the Earth System in the Anthropocene," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, no. 33, pp. 8252–8259, 2018.
- [2] J. Rockström, "Planetary boundaries," en *Harvesting the Biosphere*, V. Smil, Estados Unidos,: MIT Press, 2010.
- [3] J. Gott, R. Morgenstern, y M. Turnšek, "Aquaponics for the Anthropocene: Towards a 'Sustainability First' Agenda," *Aquaponics Food Production Systems*, pp. 393-432, 2019, DOI: 10.1007/978-3-030-15943-6_16
- [4] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, y E. J. Hultink, "The Circular Economy - A new sustainability paradigm?," *Journal of Cleaner Production*, vol. 143. Elsevier Ltd, pp. 757-768, Febrero 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
- [5] K. Raworth, "A Safe and Just Space for Humanity: Can we



- live within the doughnut?".
Oxfam.org. www.oxfam.org/grow
- [6] M. Leach, K. Raworth, y J. Rockström, "Between social and planetary boundaries: Navigating pathways in the safe and just space for humanity," 2013.
- [7] Organización de las Naciones Unidas, "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development". <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [8] L. Wang Erlandsson, "A planetary boundary for green water," *Nat Rev Earth Environ*, pp. 1-13, 2022.
- [9] D. Dudgeon, "Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges," *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 81, no. 2, pp. 163-182, Mayo 2006. DOI: 10.1017/S1464793105006950
- [10] FAO, IFAD, UNICEF, WFP, y WHO, "The State of Food Security and Nutrition in the World 2020," FAO, 2020. DOI: 10.4060/ca9692en
- [11] FAO, IFAD, UNICEF, WFP, y WHO, "The State of Food Security and Nutrition in the World 2021," FAO, Julio 2021. DOI: 10.4060/CB4474EN
- [12] T. Gleeson, "The water planetary boundary: interrogation and revision," *One Earth*, vol. 2, no. 3, pp. 223-234, 2020
- [13] A. D. Zajdband, "Integrated Agri-Aquaculture Systems," pp. 87-127, 2011. DOI: 10.1007/978-94-007-1521-9_4
- [14] A. Joyce, S. Goddek, B. Kotzen, y S. Wuertz, "Aquaponics: Closing the Cycle on Limited Water, Land and Nutrient Resources," *Aquaponics Food Production Systems*, pp. 19-34, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-15943-6_2
- [15] H. Palm, "Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature," *Aquaculture International*, vol. 26, no. 3, pp. 813-842, Junio 2018. DOI: 10.1007/s10499-018-0249-z
- [16] W. Kloas, "A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts," *Aquac Environ Interact*, vol. 7, no. 2, pp. 179-192, 2015. DOI: 10.3354/aei00146
- [17] V. T. Okomoda, S. A. Oladimeji, S. G. Solomon, S. O. Olufeagba, S. I. Ogah, y M. Ikhwanuddin, "Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption," *Food Sci Nutrition*, vol. 11, no. 3, pp. 1157-1165, Marzo 2023. DOI: 10.1002/FSN3.3154
- [18] P. S. Flores Aguilar, J. F. García Trejo, y S. I. Martínez Guido, "Aquaponic: A Versatile and Integrated alternative in Food



- Production for the Mexican environment," *Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)*, vol. 13, pp. 43-53, 2020.
- [19] C. Jaeger, P. Foucard, A. Tocqueville, S. Nahon, y J. Aubin, "Mass balanced based LCA of a common carp-lettuce aquaponics system," *Aquac Eng*, vol. 84, pp. 29-41, Febrero 2019. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2018.11.003
- [20] S. Wongkiew, Z. Hu, K. Chandran, J. W. Lee, y S. K. Khanal, "Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review," *Aquacultural Engineering*, vol. 76, pp. 9-19, Enero 2017. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2017.01.004
- [21] B. S. Cerozi, y K. Fitzsimmons, "Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system," *Agric Syst*, vol. 153, pp. 94-100, Mayo 2017. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.020
- [22] H. Monsees, W. Kloas, y S. Wuertz, "Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes," *PLoS One*, vol. 12, no. 9, Septiembre 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0183056
- [23] W. Kloas, S. Wuertz, y H. Monsees, "Comparisson of coupled and decoupled aquaponics-Implications for future system design", en *Aquaculture Europe (EAS)*, Edimburgo, Escocia, 2016. <https://www.researchgate.net/publication/314305063>
- [24] H. Monsees, J. Suhl, M. Paul, W. Kloas, D. Dannehl, y S. Würtz, "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*, vol. 14, no. 6, Junio 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0218368
- [25] FAORLC, "Panorama de la Pesca Marina y Continental en América Latina y el Caribe," La Habana, Cuba, 2019. <https://www.fao.org/3/cc3839es/cc3839es.pdf>
- [26] T. Redek, P. Domadenik, y M. Koman, "Sustainable Development Goals in the EU and the Challenges in Their Implementation," *Challenges on the Path Toward Sustainability in Europe*, pp. 11-29, Diciembre 2020. DOI: 10.1108/978-1-80043-972-620201003
- [27] N. Maamoun, "The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success," *J Environ Econ Manage*, vol. 95, pp. 227-256, Mayo 2019. DOI: 10.1016/J.JEEM.2019.04.001
- [28] S. Kumar, N. Kumar, y S. Vivekadhish, "Millennium Development Goals (MDGs) to Sustaina-



- ble Development Goals (SDGs): Addressing Unfinished Agenda and Strengthening Sustainable Development and Partnership," *Indian J Community Med*, vol. 41, no. 1, pp. 1-4, Enero 2016. DOI: 10.4103/0970-0218.170955
- [29] J. Randers, "Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries," *Global Sustainability*, vol. 2, 2019. DOI: 10.1017/SUS.2019.22
- [30] United Nations, "Equality and Non-Discrimination at the Heart of Sustainable Development Leaving No One Behind: A Shared United Nations System Framework for Action United Nations System Chief Executives Board for Coordination," Nueva York, 2017.
- [31] Gobierno de México, "Voluntary National Review For the High-Level Political Forum on Sustainable Development. (Basis for a long-Term Sustainable Development vision in Mexico). Progress on the implementation of the 2030 Agenda 2018". <https://www.gob.mx/agenda2030/documentos/61637>
- [32] INEGI., "México SIODS (Sistema de Información de los Objetivos de Desarrollo Sostenible)". <https://agenda2030.mx/index.html?lang=en#/home>
- [33] Organización de las Naciones Unidas, "Sustainable Development Goals (SDGs)". <https://sdgs.un.org/>
- [34] Organización de las Naciones Unidas, "The 17 Goals Sustainable Development". <https://sdgs.un.org/es/goals>
- [35] FAO, *Water for Sustainable Food and Agriculture A report produced for the G20 Presidency of Germany*, ONU: Food & Agriculture Org., 2018.
- [36] W. Lennard and S. Goddek, "Aquaponics: The Basics," *Aquaponics Food Production Systems*, pp. 113-143, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-15943-6_5
- [37] FAO, "The State of World Fisheries and Aquaculture 2022," FAO, Junio 2022. DOI: 10.4060/CC0461EN
- [38] R. P. Bartelme, B. O. Oyserman, J. E. Blom, O. J. Sepulveda Villet, y R. J. Newton, "Stripping away the soil: Plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics," *Front Microbiol*, vol. 9, pp. 8, Enero 2018. DOI: 10.3389/FMICB.2018.00008/BIBTEX
- [39] A. S. Oladimeji, S. O. Olufeagba, V. O. Ayuba, S. G. Sololmon, y V. T. Okomoda, "Effects of different growth media on water quality and plant yield in a catfish-pumpkin aquaponics system," *J King Saud Univ Sci*, vol. 32, no. 1, pp. 60-66, Enero 2020. DOI: 10.1016/j.jksus.2018.02.001



- [40] CONAPESCA, "Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2018". https://nube.conapesc.gob.mx/sites/cona/dgp-pe/2018/ANUARIO_2018.pdf
- [41] A.V. Zamora, "Análisis y perspectivas de la Acuaponía en México," Tesis individual, Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, Texcoco, Edo. de México, 2018.
- [42] A. D. Armenta Bojórquez, A. R. Valenzuela Castañeda, K. Fitzsimmons, E. S. López Álvarez, G. Rodríguez Quiroz, y W. Valenzuela Quiñónez, "Pacific white shrimp and tomato production using water effluents and salinity-tolerant grafted plants in an integrated aquaponic production system," *J Clean Prod*, vol. 278, pp. 124064, Enero 2021. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.124064
- [43] G. A. Peña Herrejón, J. Sánchez Velázquez, J. F. García Trejo, G. M. Soto Zarazúa, y E. Rico García, "Effect of stocking density on growth and survival of the prawn *macrobrachium tenellum*, cultured in a recirculating aquaculture system," *Lat Am J Aquat Res*, vol. 47, no. 2, pp. 342-348, Mayo 2019. DOI: 10.3856/VOL47-ISSUE2-FULLTEXT-14
- [44] J. Rakocy, M. Masser, y T. Lo-sordo, "Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture". <http://osu-facts.okstate.edu>
- [45] U. Knaus y H. Palm, "Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania)," *Aquaculture*, vol. 473, pp. 62-73, Abril 2017. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2017.01.020
- [46] D. Karimanzira, K. J. Keesman, W. Kloas, D. Baganz, y T. Rauschenbach, "Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system," *Aquac Eng*, vol. 75, pp. 29-45, Noviembre 2016. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2016.10.004
- [47] J. Rakocy, "The University of the Virgin Islands Aquaponics System - AquacultureHub," 2010.
- [48] J. Rakocy, D. Bailey, R. Shultz, y J. Danaher, "Preliminary Evaluation of Organic Waste from Two Aquaculture Systems as a Source of Inorganic Nutrients for Hydroponics," 2007.
- [49] C. Somerville, "Small-scale aquaponic food production Integrated fish and plant farming," 2014.



- [50] CONAPESCA, "Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca de la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca". <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuicultura-y-pesca>
- [51] E. Fernández Juárez, M. del P. Navarro Rodríguez, I. Landero Torres, F. C. Gómez Merino, y J. A. Pérez Sato, "La acuaponía rústica: una alternativa para contribuir a la soberanía alimentaria en comunidades rurales," *Agro Productividad*, vol. 12, no. 12, Diciembre 2019. DOI: 10.32854/agrop.vi0.1557
- [52] F. Iriarte Rodríguez, M. Mendoza Carranza, R. Gómez Álvarez, J. Cornelis Van Der Wal, M. Alicia, y P. García, "Viabilidad técnica-financiera de un Sistema Acuapónico de Baja Intensidad (SABI) para la seguridad alimentaria familiar", 2017.
- [53] G. Baganz, "The aquaponic principle- It is all about coupling," *Reviews in Aquaculture*. John Wiley and Sons Inc, Enero 2021. DOI: 10.1111/raq.12596.
- [54] United Nations, "Sustainable Development Goals; Guidelines for the use of the SDG logo including the colour wheel, and 17 icons," Nueva York, Mayo 2020.