

***INVESTIGACIÓN SOBRE LOS RECURSOS
NATURALES DEL NOROESTE DE MÉXICO,
PARA EL BIENESTAR COMUNITARIO***



ALFREDO ORTEGA-RUBIO

Coordinador

***INVESTIGACIÓN SOBRE LOS RECURSOS
NATURALES DEL NOROESTE DE
MÉXICO, PARA EL BIENESTAR
COMUNITARIO***

Alfredo Ortega-Rubio

Coordinador

***CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL
NOROESTE S.C. (CIBNOR) LA PAZ,
B.C.S. MÉXICO, 2025***

Investigación sobre los recursos naturales del noroeste de México, para el bienestar comunitario. Ortega-Rubio Alfredo. (Coordinador). 2025. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. La Paz, Baja California Sur. México. 547 pág: il; 55.

© Derechos Reservados

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.

Instituto Politécnico Nacional # 195. Col. Playa Palo de Santa Rita Sur
C.P. 23096. La Paz, Baja California Sur. México.

Todos los derechos reservados. El contenido de esta publicación se puede reproducir parcialmente únicamente con autorización previa por escrito de los autores de cada Capítulo y siempre y cuándo se den los créditos correspondientes a los mismos y al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.

Las opiniones expresadas por los autores (Textos, Tablas, Figuras y Fotografías) no necesariamente reflejan la postura de la institución editora de la publicación.

Diseño Gráfico y Editorial. Alfredo Ortega-Rubio. Fotografía de la Portada. Rubén Andrade.

Primera Edición. Octubre 2025.

ISBN: 978-607-7634-51-5

Publicación de investigación del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.

Preparación de este documento:

La edición del libro “*Investigación sobre los recursos naturales del noroeste de México, para el bienestar comunitario*”, estuvo a cargo del Dr. Alfredo Ortega-Rubio. En este libro se describen las principales contribuciones que el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., (CIBNOR), ha aportado en la generación de conocimiento, formación de recursos humanos, y apropiación social del conocimiento científico, enfatizando su incidencia en el bienestar social.

Agradecimientos:

El Coordinador de esta obra agradece a todas y todos las y los Coautores de esta obra, por compartir con la sociedad las aportaciones que en sus distintas actividades han generado para el bienestar de las comunidades humanas del noroeste de México, especialmente las más vulnerables. Asimismo, agradece al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste por la oportunidad de permitirnos generar, a través de los resultados de nuestras investigaciones científicas, alternativas viables con pertinencia social y ambiental, que realmente han sido aplicadas en beneficio de nuestra sociedad, quien es la que nos financia y a quien nos debemos.

Para citar esta obra:

Ortega-Rubio Alfredo. (Coordinador). 2025. *Investigación sobre los recursos naturales del noroeste de México, para el bienestar comunitario*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. La Paz, B.C.S. México. 547 pp.

**INVESTIGACIÓN SOBRE LOS RECURSOS NATURALES
DEL NOROESTE DE MÉXICO, PARA EL BIENESTAR
COMUNITARIO**

ÍNDICE

PRÓLOGO

*María Elena Álvarez-Buylla Roces ** 1

PREFACIO

*José Alejandro Díaz Méndez ** 3

**SECCIÓN I
INTRODUCCIÓN**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

*José Alfredo Arreola Lizárraga * y Alfredo Ortega-Rubio* 7

**SECCIÓN II
PROGRAMAS ACADÉMICOS**

**CAPÍTULO 2. APORTACIONES HISTÓRICAS DEL PROGRAMA
ACADÉMICO DE PLANEACIÓN AMBIENTAL Y
CONSERVACIÓN AL BIENESTAR COMUNITARIO**

*Alejandro López Cortés ** 15

CAPÍTULO 3. APORTACIONES HISTÓRICAS DEL PROGRAMA DE AGRICULTURA EN ZONAS ÁRIDAS AL BIENESTAR COMUNITARIO	
<i>Luis Guillermo Hernández Montiel *</i>	39
CAPÍTULO 4. APORTACIONES HISTÓRICAS DEL PROGRAMA DE ACUICULTURA Y SU IMPACTO EN EL BIENESTAR COMUNITARIO	
<i>Carolina Casanova-Valero, Héctor Acosta-Salmon, Perla Sol Cervantes-Bernal y Danitzia Adriana Guerrero-Tortolero*</i>	55
CAPÍTULO 5. APORTACIONES HISTÓRICAS DEL PROGRAMA DE ECOLOGÍA PESQUERA COMO VÍNCULO VITAL AL BIENESTAR SOCIAL	
<i>Crisalejandra Rivera-Pérez *</i>	77

SECCIÓN III UNIDADES FORÁNEAS

CAPÍTULO 6. LA UNIDAD FORÁNEA GUERRERO NEGRO: HISTORIA, HUMANISMO Y VINCULACIÓN	
<i>Raúl López Aguilar *, Rogelio Ramírez Serrano†, Rigoberto López Amador, Andrés Orduño Cruz y Marco Antonio Ramírez Mosqueda</i>	99
CAPÍTULO 7. CONTRIBUCIÓN AL BIENESTAR COMUNITARIO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA UNIDAD HERMOSILLO	
<i>Juan Bautista Vega Peralta * y José Arturo Sánchez-Paz</i>	117
CAPÍTULO 8. UNIDAD GUAYMAS: UNA TRAYECTORIA DE QUEHACER CIENTÍFICO CON COMPROMISO SOCIAL	
<i>José Alfredo Arreola Lizárraga *</i>	133

CAPÍTULO 9. APORTACIONES DE LA UNIDAD NAYARIT AL BIENESTAR COMUNITARIO

*Alfonso Nivardo Maeda-Martínez *, Rodolfo Navarro-Murillo, Ricardo García-Morales, Luis Daniel Espinosa-Chaurand, Rosa María Morelos-Castro y Rodolfo Garza-Torres*

149

**SECCIÓN IV
CASOS DE ESTUDIO DEL PROGRAMA DE PLANEACIÓN AMBIENTAL Y CONSERVACIÓN**

CAPÍTULO 10. VALORACIÓN ECONÓMICA DE RECURSOS GENÉTICOS ASOCIADOS A CONOCIMIENTOS TRADICIONALES EN BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

Gerzaín Avilés-Polanco, Luis Felipe Beltrán-Morales y Alfredo Ortega-Rubio*

175

CAPÍTULO 11. CONTRIBUCIONES DE LOS MANGLARES DEL NOROESTE DE MÉXICO, PARA EL BIENESTAR COMUNITARIO

Patricia González-Zamorano, Giovanni Ávila-Flores, Blanca Estela Romero López, Jonathan Giovanni Ochoa-Gómez, Mercedes Marlenne Manzano-Sarabia, Joanna Acosta-Velázquez y José Alfredo Arreola-Lizárraga*

191

CAPÍTULO 12. COSTAS DEL NOROESTE DE MÉXICO

*Saúl Chávez López * y Miguel Ángel Imaz Lamadrid*

221

CAPÍTULO 13. AGROQUÍMICOS Y SUS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA

*Gerardo Alfonso Anguiano Vega, Estela Ruiz Baca, Jesús Ricardo Parra Unda, Jaime Rendón von Osten, María Guadalupe Nieto Pescador y Celia Vázquez Boucard**

243

**CAPÍTULO 14. APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL
BORREGO CIMARRÓN, POR COMUNIDADES EJIDALES DE
BAJA CALIFORNIA SUR.**

Israel Guerrero-Cárdenas, Rafael Ramírez-Orduña, Gustavo
Arnaud, Guillermo Romero-Figueroa, José Ángel
Armenta-Quintana y Fany Reyes-Bolaños.*

261

**SECCIÓN V
CASOS DE ESTUDIO DEL PROGRAMA DE
ECOLOGÍA PESQUERA**

**CAPÍTULO 15. VALORIZACIÓN DE PRODUCTOS PESQUEROS
DEL NOROESTE DE MÉXICO**

*Julio Humberto Córdova Murueta, Norma Y. Hernández
Saavedra y Crisalejandra Rivera Pérez**

295

**CAPÍTULO 16. APROVECHAMIENTO DE LA MEDUSA BOLA DE
CAÑÓN EN EL NOROESTE DE MÉXICO, LA PESQUERÍA Y
SU DIMENSIÓN HUMANA EN EL CONTEXTO DE LA CRISIS
DEL SECTOR RIBEREÑO**

*Juana López Martínez, Eloísa Herrera Valdivia, Cintya A.
Nevárez López *, Rufino Morales Azpeitia, Javier Álvarez
Tello y Edgardo B. Farach Espinoza*

319

**CAPÍTULO 17. INVASIÓN DE ASCIDIAS SOBRE BANCOS DE
HACHAS EN LA BAHÍA DE LA PAZ, BCS**

*Moreno-Dávila Betzabé y Leonardo Huato-Soberanis**

339

**CAPÍTULO 18. ESTUDIOS GENÉTICOS PARA LA CONSERVACIÓN
Y MANEJO DE RECURSOS PESQUEROS EN EL NOROESTE
DE MÉXICO: CASO DE ESTUDIO PESQUERÍA DE ABULÓN.**

*Jorge Alberto Mares-Mayagoitia, Carmen Elvira Vargas-Peralta,
Paulina Mejía-Ruíz, Fabiola Lafarga-de-la-Cruz, Fausto
Valenzuela-Quiñonez**

363

CAPÍTULO 19. IMPACTO SOCIAL DE LA PESCA EN LAS COMUNIDADES LITORALES DEL ALTO GOLFO DE CALIFORNIA	
<i>Eugenio Alberto Aragón-Noriega *</i>	385

CAPÍTULO 20. LA PESCA COMO DETONANTE DEL BIENESTAR COMÚN DEL PUEBLO YAQUI.	
<i>Edgar Alcántara-Razo*, Jesús Guadalupe Padilla-Serrato, Eugenio Alberto Aragón-Noriega y Guillermo Ismael Padilla-Serrato</i>	405

CAPÍTULO 21. EL CALLO DE HACHA: BIOLOGÍA Y BASES PARA UN MANEJO SUSTENTABLE	
<i>Mercedes Magali Gómez Valdez * y Lucía Ocampo</i>	431

SECCIÓN VI CASOS DE ESTUDIO DEL PROGRAMA DE AGRICULTURA DE ZONAS ÁRIDAS

CAPÍTULO 22. CULTIVANDO EL FUTURO DE LAS ETNIAS DEL NOROESTE DE MÉXICO CON CIENCIA AGRÍCOLA Y BIENESTAR COMUNITARIO	
<i>Gracia Alicia Gómez Anduro *, David Raúl López Aguilar, Julio Antonio Hernández, Efraín Payan Cázares y José Manuel Melero Astorga</i>	455

CAPÍTULO 23. MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO EN LOS SISTEMAS AGROACUÍCOLAS	
<i>Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo y Rodolfo Garza Torres *</i>	471

**CAPÍTULO 24. RECURSOS VEGETALES EMERGENTES PARA LA
AGRICULTURA DE ZONAS ÁRIDAS ANTE EL
AGOTAMIENTO HÍDRICO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO**

*Joselyn Seminario Peña, Alejandra Nieto Garibay *, Enrique
Trovo Diéguez y Bernardo Amador Murillo*

505

**SECCIÓN VII
CONCLUSIONES**

CAPÍTULO 25. CONCLUSIONES

*Luis Felipe Beltrán Morales * y Alfredo Ortega Rubio*

531

PRÓLOGO

Este libro integra investigaciones de diversos sistemas socioecológicos en ambientes terrestres, marinos y costeros del Noroeste de México. Refleja la calidad, diversidad y profundidad de las investigaciones que se llevan a cabo en uno de los más importantes Centros de Investigación de la Región: el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. CIBNOR, coordinado por el CONAHCYT.

Un grupo destacado de investigadores de este Centro Público del CONAHCYT resume sus resultados de sistemas agrícolas, de explotación de algunos recursos marinos, de manglares, hasta de microorganismos, entre otros. Todas las investigaciones reseñadas en este libro se han desarrollado con un claro compromiso social y se han desarrollado con rigor científico. Los resultados de los estudios integrados en este volumen son relevantes para la conservación, uso, manejo y aprovechamiento de importantes recursos naturales de la región Noroeste. El CIBNOR ha sido un faro de conocimiento y catalizador para el avance de las ciencias socio-ambientales en la Región y en el país.

Algunos de los resultados sintetizados en este libro, se podrán usar para elaborar propuestas más concretas de mayor incidencia en diversas comunidades a favor de la conservación de sus ecosistemas, de la biodiversidad regional, y también de la calidad de vida de sus comunidades, sobre todo, las más vulnerables. A partir de los estudios resumidos acá, se podrán, por ejemplo, elaborar planes de manejo, de explotación o conservación relevantes para la Región, en colaboración con las comunidades locales y los distintos niveles de gobierno.

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Roces

Directora General del CONAHCYT.

Cd. de México, a 16 de junio, 2024

PREFACIO

A casi medio siglo de su creación, el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C (Cibnor-Conahcyt) ha mostrado su compromiso no solo con la generación de conocimiento de alto rigor y la formación de especialistas científicos, sino con la atención de problemáticas sociales y ambientales orientadas a la conservación y aprovechamiento de recursos naturales, por el sector social y productivo del Noroeste de México, impulsando también, desde uno de los territorios más aislados, la conciencia social sobre el cuidado de medio ambiente.

En el trabajo que han desarrollado a lo largo de los años, las y los investigadores del Cibnor, encontramos bosquejos de lo que en la nueva Ley General en Materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación, se garantiza como derecho humano a la ciencia, con el fin de que toda persona goce de los beneficios del desarrollo científico y tecnológico y de otros derechos humanos facilitados por el ejercicio de las humanidades, ciencias, tecnologías e innovación, con un enfoque centrado en la persona, que incluya la preservación y protección del ambiente, pues es de esta forma, como el pueblo de México puede acceder al bienestar.

Este libro que nos entrega el Cibnor, arroja luz sobre el excepcional trabajo llevado a cabo por las y los investigadores de este Centro Conahcyt, a lo largo de su historia. En sus líneas se encontrará como lugar común el diálogo de saberes, y con diferentes actores sociales que enriquecen el quehacer científico desarrollado en muchas ocasiones en el territorio, como el lugar de encuentro natural. La obra es más que un compendio de aportes y resultados de investigación, son testimonio del compromiso incansable de su personal científico, tecnológico y administrativo que han convertido a Cibnor-Conahcyt en una referencia nacional, indiscutible, en ciencias biológicas y en el uso, manejo y preservación de los recursos naturales.

Asimismo, esta obra es un homenaje a las Unidades Foráneas de Cibnor-Conahcyt que han nacido en varias ciudades de nuestro país convirtiéndose en motores que impulsan la búsqueda de respuestas a las preguntas más apremiantes de su entorno socio-ecológico relacionado con problemáticas regionales y locales. Temas comunes son el agua; la alimentación; la producción y el impacto ambiental de las actividades productivas como la agrícola, pecuaria y pesca; el valor de los conocimientos tradicionales; el impacto del cambio climático en los ecosistemas, entre otros temas, que se cruzan con los Programas Nacionales Estratégicos del Conahcyt, en la búsqueda de soluciones integrales que tengan incidencia en el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades y el bienestar de las personas.

Desde Conahcyt reconocemos el trabajo que se realiza en el Cibnor-Conahcyt y deseamos que esta obra contribuya a la reflexión del bien que representa la ciencia, cuando su interés es el bien público, el bien común.

Dr. José Alejandro Díaz Méndez

Titular de la Unidad de Articulación Sectorial y Regional, CONAHCYT.

Cd. de México, a 16 de junio, 2024

CAPÍTULO 23

Manejo del Recurso Hídrico en los Sistemas Agroacuícolas

Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo y Rodolfo Garza Torres *

rgarza@cibnor.mx

Resumen

El agua es un recurso esencial que afronta una creciente escasez y contaminación en México, lo que pone en riesgo la producción de alimentos y el crecimiento económico del país. El sector acuícola enfrenta desafíos debido a su importante huella hídrica, particularmente en sistemas intensivos. Los Sistemas Acuícolas de Recirculación (SAR) y la Tecnología de Biofloc (TBF) emergen como soluciones sostenibles, reduciendo drásticamente el consumo de agua en un 80-99% y mejorando la calidad de los cultivos y el uso del espacio. Sin embargo, para avanzar hacia la producción circular de alimentos, los sistemas productivos acuícolas han evolucionado hacia los sistemas agroacuícolas; que comparten infraestructura, espacio y materias primas. Estos sistemas incluyen policultivos, acuaponía, floconía, y abarcan la producción de dos o más especies de cultivo, fomentando la eficiencia hídrica y reduciendo los impactos ambientales. Para brindar un esquema general de los sistemas productivos integrados, en este capítulo, presentamos una descripción de su conformación y aplicación, e incluimos proyectos en el noroeste de México que muestran el potencial de estos sistemas para promover la gestión del agua, mejorar la producción de alimentos y apoyar a las comunidades locales. Recalamos la relevancia de las innovaciones y la incorporación de la Inteligencia Artificial (IA) y el Aprendizaje Automático (AA); herramientas que facilitan el monitoreo, la simulación y la automatización avanzada al aprovechar los datos de múltiples fuentes, como sensores, estaciones meteorológicas, diversos dispositivos

y tecnologías, contribuyendo a la producción. Esto ha permitido la toma de decisiones informadas sobre el rendimiento, la calidad del producto, la dinámica del deterioro de los alimentos y el monitoreo de los recursos utilizados para la producción, además de facilitar predecir el riesgo de patógenos y otros fenómenos naturales. Al fomentar la adopción de tecnologías sostenibles e integrar los sistemas agroacuícolas a las prácticas productivas, el país puede mejorar la seguridad alimentaria y proteger sus valiosos recursos hídricos.

Palabras clave: *Recurso hídrico; Sistemas Agroacuícolas; Pesquerías; Acuicultura; Agricultura.*

Abstract

Water is an essential resource facing increasing scarcity and contamination in Mexico, putting the country's food production and economic growth at risk. The aquaculture sector faces challenges due to its significant water footprint, particularly in intensive systems. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) and Biofloc Technology (TBF) emerge as sustainable solutions, drastically reducing water consumption 80-99% and enhancing crop quality and space utilization. However, to advance towards circular food production, aquaculture systems have evolved into agro-aquaculture systems, sharing infrastructure, space, and raw materials. These systems include polycultures, aquaponics, and floconics, and encompass the production of two or more species promoting water efficiency and reducing environmental impacts. To provide an overview of integrated production systems, in this chapter, we present a description of their composition and application, including projects in Northwest Mexico that showcase the potential of these systems to promote water management, improve food production, and support local communities. We emphasize the relevance of Innovations and the incorporation of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML), tools that facilitate monitoring, simulation, and advanced automation by leveraging data from multiple sources, such

as sensors, weather stations, various devices, and technologies contributing to production. This has enabled informed decision-making on performance, product quality, food spoilage dynamics, and monitoring for food production, as well as facilitating prediction of the risk of pathogens and other natural phenomena. By promoting the adoption of sustainable technologies and integrating agro-aquaculture systems into productive practices, the country can improve food security and protect its valuable water resources.

Key words: *Water resources; Agro-Aquaculture Systems; Fisheries; Aquaculture; Agriculture.*

Introducción

Recurso hídrico de México

El recurso hídrico, conocido comúnmente como agua, es una parte fundamental en nuestro planeta, integral en su clima y condiciones meteorológicas. Este recurso, es esencial para la vida y primordial en el desarrollo de nuestras civilizaciones, donde ha desempeñado y participa en papeles básicos en la salud, la alimentación, la producción de energía y crecimiento económico para el bienestar humano (Ringler et al., 2022). Un factor primordial para resaltar es la importancia que tiene en los sistemas alimentarios del mundo, los cuales están totalmente respaldados por el agua. Tomando en cuenta, que la población sigue aumentando; se estima que para el 2050, llegará a casi 10 mil millones de personas (ONU, 2019). De las cuales, alrededor del 75% se ubicarán principalmente en economías en desarrollo y emergentes y vivirán en áreas urbanas, requiriendo un aumento de al menos el 70% en la producción de alimentos con respecto a los niveles de 2017 (Hunter et al., 2017), para alcanzar este porcentaje, el recurso hídrico juega un papel vital.

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

El recurso hídrico de un territorio comprende toda el agua dulce y salobre de los cuerpos de aguas continentales, como lagos, ríos y sus cuencas, además de aguas subterráneas en sus acuíferos. En México, las aguas subterráneas son esenciales para el desarrollo socioeconómico, representando el 38.7% del volumen total concesionado para usos consuntivos como población, riego e industria. México tiene 653 acuíferos, pero 195 de ellos (30%) no tienen disponibilidad ya que toda la capacidad ya está asignada; 106 (16%) están sobreexplotados, 31 (5%) son salinos y 15 (2%) presentan intrusión marina. En el país existen más de 5,163 represas, que almacenan cerca de 150,000 hm³ de agua, y sólo 181 cargan más de 103,000 hm³. Las presas y lagos son los embalses más importantes del país. México tiene pocas lagunas y lagos, y el más grande es el Lago de Chapala, con 1,116 km² (CONAGUA, 2015).

De acuerdo con los datos publicados por la CONAGUA, al 2022, anualmente en México se reciben con las lluvias aproximadamente 1.5 billones de metros cúbicos (m³) de agua. Se estima que el 71.4% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 0.4 billones de m³ de agua dulce renovable. La disponibilidad de agua en el país pasó de 10,000 m³ por habitante por año en 1960 a 3,663 m³ para el 2021 y en el 2024, se redujo a 3,200 m³, se estima que para el 2030 será <3,000 m³ (IMCO, 2023) (Figura 1). Sin embargo, de manera regional existe una gran diferencia entre el norte y el sureste del país, siendo la región “Frontera Sur” la que mayor cuota de agua por habitante posee (19,819 m³), en contraste con las de menor cuota, “Río Bravo” (981 m³) y “Valle de México” (145 m³). Esta diferencia también se puede observar en los niveles de precipitación en las regiones.

Los estados con lluvias por arriba del promedio son Tabasco, Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo, mientras las regiones con déficit de

precipitación son la península de Baja California, el noroeste y los estados costeros del Pacífico mexicano, exceptuando Jalisco y Colima. Gran parte del norte de México alcanza niveles extremadamente altos de estrés hídrico (80%) (Mekonnen et al., 2015).

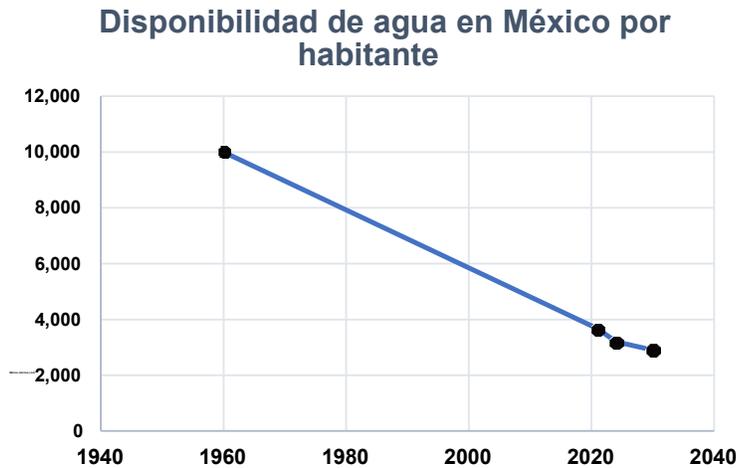


Figura 84. Disponibilidad de agua en México por habitante (1960-2030)

Hablando del recurso hídrico y producción de bienes y servicios, el 76% del total de agua disponible en México se utiliza para la agricultura, ganadería y acuicultura, el 15% para el abastecimiento público, el 5% para la industria y el 4% para las termoeléctricas (CONAGUA, 2018). Sumado a este panorama, se tiene que recalcar que, en muchas regiones, el agua para producir alimentos de fuente animal o vegetal no se utiliza de manera eficiente (D'Odorico et al., 2020). Llevando esta hacia la destrucción y contaminación de hábitats naturales, incluyendo el abatimiento de los mantos acuíferos (Willett et al., 2019).

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

Actualmente, México vive una crisis hídrica que, al 15 de enero del 2024, afectó con sequías a la mayoría de los municipios del país (IMCO, 2024). Siendo especialmente vulnerables las regiones del norte y centro del país. Este aumento en las sequías es consecuencia de la suma de diversos factores: el cambio climático, cambios en los patrones de precipitación, aumento de la temperatura en promedio de 1.6 °C en los últimos 40 años. Además, a esta problemática se pueden añadir el desperdicio general durante todos los procesos productivos, la falta de infraestructura, el escaso mantenimiento y el crecimiento poblacional. Esto da como resultado, el panorama actual que se vive en el país, donde el agua disponible per cápita es 64% menos que a mediados del siglo pasado (Lara et al., 2013), y con un poco más de 100 presas de agua por debajo del 50% de su capacidad. Además, el Programa Nacional Hídrico 2020-2024, reporta la contaminación del agua por medio de agroquímicos en las descargas industriales y municipales sin tratamiento (CONAGUA, 2022). En general, cerca del 61.5% del territorio mexicano está afectado por la crisis hídrica. Esta situación pone en riesgo todas las actividades económicas y vitales del país.

En el caso del sector productivo, es de suma importancia considerar los modelos actuales, y las metodologías que se implementan, que, en algunos casos, se remontan al siglo pasado. Una de las bases que se han establecido para manejar un estándar en la dirección y evaluación de los sistemas productivos es aumentar la producción de alimentos, mitigar las consecuencias ambientales adversas y al mismo tiempo salvaguardar la seguridad alimentaria para las generaciones actuales y futuras a nivel local y global. Este esfuerzo pone igual énfasis en las ramificaciones económicas, sociales y ecológicas a lo largo de toda la cadena de suministro de alimentos (Godfray et al., 2010; Steiner et al., 2019).

Pesca, acuicultura y agricultura

La producción de alimentos y su diversidad persisten como un aspecto primario en el uso humano de la tierra. La mayor parte de nuestro sustento calórico proviene de

INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

fuentes terrestres, lo que conlleva uno de los importantes desafíos ambientales y de salud del siglo XXI (Fresco, 2009; Willet et al., 2019). Históricamente, la producción de alimentos se ha basado en cuatro sistemas principales: a) agricultura, b) ganadería, c) pesca y d) acuicultura. Estos sistemas productivos, sostienen la producción de proteína vegetal (legumbres, granos, cereales, vegetales y frutas) y proteína animal como animales terrestres (vacas, gallinas, cerdos, etcétera) o animales acuáticos (peces, crustáceos, entre otros) para la nutrición humana (Blanchard et al., 2017). No obstante, cada sector productivo enfrenta problemas, que pueden ser sintetizados a grandes rasgos; uso de combustibles fósiles, generación de emisiones de CO₂, pérdida de biodiversidad, contaminación; que está relacionada con la expansión de las actividades y el aumento en el uso de pesticidas, plaguicidas, fertilizantes, entre otros. Manejo ineficiente de insumos (agua, suelo, energía), falta de conservación y restauración de recursos naturales, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), alta generación de residuos, falta de mejora del bienestar y salud animal, incluyendo la calidad de los cultivos, reducción de la mano de obra, cadena de suministro, uso ineficiente de las poblaciones nativas, falta de control de enfermedades, manejo de los índices de captura y producción, liberación de residuales nitrogenados, falta de gestión de la tierra, el agua, las materias primas y la energía (Shukla et al., 2019; Muller, 2009; Kremsa, 2021; Boulay et al., 2021; Purcell et al., 2023; Briton et al., 2020; Boyd et al., 2020).

Analizando a detalle, el recurso hídrico es compartido en todos los sistemas productivos, siendo un factor preponderante para alcanzar el bienestar. La huella hídrica (HH) ha sido utilizada como una herramienta para calcular las cantidades de agua dulce consumidas y contaminadas a lo largo de la cadena de producción de un bien o servicio específico. Esta medida se expresa en volúmenes de agua por unidad de producto (Hoekstra et al., 2011). El concepto incluye tres componentes: i) la HH azul relacionado con el consumo de superficie o agua subterránea pérdida por evaporación, incorporada a un producto o transferido a otro cuerpo de agua; ii) la HH verde referido al agua de lluvia consumido a lo largo de las cadenas de

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

producción; y iii) la HH gris, de agua dulce cantidades requeridas para asimilar cargas contaminantes (Hoekstra et al., 2011). Esta herramienta ha ayudado a esclarecer la cantidad de agua, que requiere un bien o servicio, y analizar los procesos que pueden ser mejorados para reducirla. Por ejemplo, el 29% de la huella hídrica (HH) mundial es requerida para producir alimentos para animales, mientras que un tercio de la HH mundial está relacionada con la carne vacuna (Mekonnen y Hoekstra, 2012). Se espera que el consumo mundial de alimentos de origen animal aumente aún más. En la tabla 12, se presentan la HH, de los principales productos que se consumen como alimento.

Tabla 12. Huella Hídrica (HH) generada por los principales alimentos consumidos a nivel mundial. Está representada por la cantidad de litros de agua que se requieren para producir un kilogramo de producto.

Huella hídrica de los principales alimentos (l/kg)					
Carne de res	15,000	Lentejas	5,874	Manzanas	822
Carne de puerco	5,988	Frijol	5,053	Plátanos	790
Pollo	4,325	Trigo	1,827	Papas	287
Huevos	3,265	Arroz	1,673	Repollo	280
Leche	1,020	Maiz	1,222	Tomates	214

Nota: Datos obtenidos de Mekonnen y Hoekstra, 2011; 2012.

La huella hídrica varía según los diferentes cultivos, por categoría de cultivo y también por región de producción, pero en general esta es una aproximación muy acertada (Mekonnen y Hoekstra, 2011). Existe una serie de factores que deben ser mejorados para garantizar la producción sostenible de alimentos a largo plazo. Cada sistema productivo presenta una serie de retos que hacen que la producción de alimentos siga siendo uno de los temas prioritarios. La búsqueda de procesos más eficientes, sostenibles y circulares es una acción presente y futura. En este sentido

el manejo del recurso hídrico se ha vuelto fundamental para dirigir el diseño de metodologías y procesos que garanticen el reducir su uso, o ampliar su uso en más de un proceso.

Monocultivos Acuícolas

La demanda mundial de alimentos requiere la contribución de la acuicultura, y aboga por un enfoque alineado con los principios de la producción circular, con orientación a reducir, reusar y reciclar (Campanati et al., 2022). La naturaleza multifacética de la acuicultura, facilitada por la utilización de diversas técnicas y respaldada por más de seiscientos especies distintas, acentuó su potencial para producir productos alimenticios de alta calidad (Cai et al., 2023). El pescado procedente de la acuicultura muestra un gran potencial para contribuir a la seguridad alimentaria a nivel global (Pauly et al., 2002).

En México, la producción acuícola es una actividad económica, alimenticia y social importante. Se desarrolla tanto en sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos, los cuales presentan diferentes impactos ambientales (Boyd et al., 2007). Por ejemplo, los sistemas extensivos, utilizan mayor espacio, generalmente en estanques, con menor consumo energético en comparación con los otros sistemas, pero generan menor producción y dependen de fertilizantes externos para preparar los cultivos. Los sistemas semi-intensivos, aumentan la densidad de cultivo y son dependientes del recurso energético, hídrico y alimento comercial. En el caso de los sistemas intensivos, la naturaleza del cultivo, lo liga a mayor consumo energético (bombeo, aireación), hídrico, y dependiente del alimento comercial, y al recambio de agua (Yacout et al., 2016; Guzman-Luna et al., 2021).

La tilapia (*Oreochromis* sp.), presenta una producción importante, siendo el segundo pescado mayor producido a nivel global, después de las carpas (Wang y Lu, 2016). En México, la acuicultura de tilapia se lleva a cabo en los tres sistemas

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

antes descritos, y en los diversos cuerpos de agua tales como presas, ríos, lagunas y embalses ubicados alrededor de la República Mexicana (Flores-Nava, 2007). Los mayores productores se ubican en Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Michoacán y Chiapas (CONAPESCA, 2022). México es el noveno productor de tilapia a nivel mundial. En la producción nacional de 2020, se contabilizaron 96,977 t de tilapia procedentes de actividades acuícolas. De este total, el 5.6% provino de sistemas controlados, mientras que el 43.3% se derivó de pesquerías basadas en el cultivo (Urías-Sotomayor y Maeda Martínez, 2023).

Dentro de los problemas generales que presenta la acuicultura se encuentra el uso de alimentos acuícolas y fertilizantes, los cuales contaminan el agua, especialmente a través del nitrógeno (N) y el fósforo (P), el manejo de antibióticos y el consumo de agua para la producción, que compite con actividades como la agricultura, la industria y la ganadería (Verdegem y Bosma, 2009). Guzman-Luna y colaboradores en el 2021, calcularon la huella hídrica, energética y de suelo en el cultivo de tilapia en los sistemas de producción extensiva, semi-intensiva e intensiva (Tabla 13).

Tabla 13. Huella Hídrica, Energética y de suelo calculada para la producción de una tonelada de filete de tilapia en los sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos en México.

	Extensivos	Semi-intensivos	Intensivos
Huella Hídrica Azul (m ³ /ton)	927	2,909	13,027
Huella Hídrica Verde (m ³ /ton)	5	7,827	7,831
Huella Hídrica Gris (m ³ /ton)	398	1,873	1,873
Huella energética (MJ/ton)	4,241	14,451	22,200
Huella de suelo (m ² /ton)	1,193	10,723	10,711

INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

Los valores generados en la huella hídrica se deben en gran medida a los métodos de producción. Por ejemplo: La producción de tilapia realizada en un sistema de acuicultura intensiva presenta una huella hídrica azul 4.5 veces mayor que en los semi-intensivos y 14 veces mayor que en los sistemas extensivos. Esto se debe principalmente a que, en los sistemas intensivos debido a la alta densidad y tasa de alimentación, los recambios de agua son necesarios para mantener la calidad de agua del cultivo.

En general, se ha descrito que aproximadamente hay un recambio del 250% del agua por día de los sistemas intensivos, en los sistemas semi-intensivos las tasas son sólo del 30% y en los extensivos no se genera recambio de agua, solo en caso de requerirse alguna emergencia sanitaria. Los sistemas intensivos requieren mucha electricidad, dos veces más que en el sistema semi-intensivo, debido principalmente a una mayor aireación y bombeo. La huella de suelo, indica la cantidad de suelo para generar un producto, en el caso de la acuicultura tanto los sistemas intensivos e intensivos presentan una huella similar debido a que ambos sistemas son dependientes del alimento comercial. Este cálculo incluye el uso directo de la tierra para embalses y estanques y el uso indirecto de la tierra relacionado con los alimentos acuícolas (Guzman-Luna et al., 2021)

La acuicultura ha trabajado en el diseño e implementación de sistemas más eficientes en el uso de la energía, espacio y el recurso hídrico, incluso en el desarrollo de diversas estrategias para mejorar el consumo de alimento, el manejo de residuales y la liberación de estos al medio ambiente (Costa-Pierce et al., 2010). Con relación al manejo del recurso hídrico, la acuicultura presenta avances singulares, por ejemplo, el desarrollo de sistemas productivos más eficientes en el manejo del agua, lo que impulsa cada vez más la atención para este sector como primer suministro de proteína animal (Costello et al., 2012). En términos de los sistemas productivos desarrollados; a nivel mundial, dos sistemas son reconocidos como metodologías eficaces: el Sistema Acuícolas de Recirculación (SAR) y la Tecnología Biofloc (TBF) (Tabla 14).

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

Tabla 14. Descripción de los Sistemas Acuícolas de Recirculación (SAR) y los Sistemas de Tecnología de Biofloc (TBF).

Sistemas Acuícolas de Recirculación (SAR)

Características

Los Sistemas Acuícolas de Recirculación (SAR) se caracteriza por la capacidad de soportar altas densidades y alta producción neta (Timmons et al., 2002). El cultivo de tilapia en SAR está ampliamente distribuido en diferentes partes del mundo, especialmente en áreas que enfrentan escasez de agua dulce y/o condiciones climáticas adversas (El-Sayed, 2020).

Ventajas y desventajas

La utilización del agua en SAR abarca solo el 20% de lo que se utiliza para el cultivo en estanques abiertos, en promedio utiliza de 2.9 a 3.6 L/min de flujo disponible por cada kg de biomasa (Parker, 2012). Son ambientalmente sostenibles: usan del 90 al 99% menos de agua que los sistemas de acuicultura convencionales, SAR consume aproximadamente 250-1000 l/kg pescado, y descarga menos efluente en comparación con sistemas abiertos, reduciendo el volumen y el costo de tratamiento de aguas residuales (Shnel et al., 2002), solo el 10% del flujo diario total es reemplazado por agua nueva, para compensar el agua evaporada y para diluir la concentración de nitratos (Timmons et al., 2002). Sin embargo, dentro de sus desventajas se encuentra el alto costo de inversión y la alta capacitación requerida para su manejo e implementación.

Tecnología de Biofloc (TBF)

Características

Los Sistemas de Tecnología de Biofloc (TBF) se destacan por su bajo o nulo recambio de agua, permite reciclar nutrientes y desechos a través de comunidades microbiológicas autótrofas y heterótrofas, que incluyen bacterias, hongos, microalgas y zooplancton formando flóculos, además de generar un aporte proteico importante (Emerenciano et al., 2021).

Ventajas y desventajas

Este sistema ofrece la posibilidad de incrementar la densidad del cultivo, obteniendo mayor productividad por unidad de área, disminuyendo la utilización del agua y del espacio, favoreciendo con esto la reducción en los costos de producción. No obstante, es necesario un buen manejo de los parámetros de calidad del agua y la acción simbiótica de los microorganismos dentro del sistema (Emerenciano et al., 2021).

En términos generales, estas técnicas mejoran la utilización del agua, la calidad del cultivo, la eficiencia espacial y la optimización de la infraestructura, convirtiéndolas en enfoques sostenibles para la producción de alimentos. Sin embargo, cabe señalar que, a pesar de sus ventajas, tanto SAR como TBF se aplican comúnmente en sistemas de monocultivo (Zimmermann et al., 2023).

Otra condicionante, si se analiza el panorama mexicano con relación a la adopción de estas tecnologías encontramos que menos del 1% de las granjas utiliza estrategias para reducir el consumo de agua, aunado a que el monocultivo sigue siendo el pilar en la producción acuícola, por ejemplo, el 50% del total de las granjas acuícolas en México, se dedican a la producción de Tilapia, en sistemas extensivos y semi-intensivos (Betanzos-Torres et al., 2020). Respecto al recurso hídrico, la mayoría de las granjas productoras no tratan sus aguas residuales, algunas las reutilizan para la agricultura (García y Calvario, 2008). En general, faltan regulaciones oficiales que controlen la descarga de aguas residuales de las actividades acuícolas (Hermoso, 2016). Todavía hay un largo trabajo por hacer para aumentar la producción a la par que se garantice un manejo adecuado de los recursos naturales, especialmente el recurso hídrico. En 2020, se registró un déficit de producción de tilapia, abriendo paso a una importación de 140,393 t (con un valor estimado de \$266.8 millones de USD) generalmente de países como China (Urías-Sotomayor y Maeda-Martínez, 2023). Esto resalta la importancia de la actualización en el manejo de las nuevas tecnologías y de hacer frente a los retos actuales que presenta la acuicultura de tilapia, que permitan aumentar las producciones. En este sentido, la acuicultura a nivel global, desde hace un par de décadas ha optado por retomar conocimientos ancestrales y combinarlos con las tecnologías existentes, y es aquí donde los sistemas integrados, mejor conocidos como; sistemas agroacuícolas han encontrado un papel preponderante para la búsqueda de soluciones a largo plazo.

Cabe resaltar que el diseño, mejoramiento y la implementación de nuevos procesos y tecnologías continuará en el futuro inmediato. Teniendo en mente la meta de producir más en menor tiempo y de una manera sostenible a largo plazo que garantice el bienestar social, económico, político, cultural y ambiental de las sociedades y sus conjuntos.

Sistemas agroacuícolas

La producción de alimentos dentro de un corredor de sostenibilidad requiere innovaciones que superen los paradigmas tradicionales, reconociendo la complejidad que surge de eficientizar el manejo de los recursos naturales (Leach et al., 2012; McIntyre et al., 2009; Pretty et al., 2020). Para lograr lo anterior, las acciones locales, regionales y globales son críticas para mejorar la sostenibilidad de la producción reduciendo al mismo tiempo el uso de fuentes de energía no renovables, el exceso uso de espacio y recursos hídrico, y las medidas adaptativas para reducir el impacto ambiental (Sarkar et al., 2020; Wilhelmina et al., 2010).

Algo a considerar, es que el crecimiento poblacional más significativo se dará en las áreas urbanas. Una preocupación mundial es ser más sostenible en la producción de alimentos dentro de las ciudades, donde cuanto mayor es la densidad de población, el precio de la propiedad, la tierra y el agua son escasos, y la necesidad de un sistema de producción eficiente es una necesidad absoluta (Proksh et al., 2019). La producción circular de alimentos encarna un concepto que enfatiza las prácticas respetuosas con el medio ambiente en todas las facetas de la producción, en particular optimizando la reutilización de residuos a lo largo del ciclo de producción.

Es imperativo alinear las estrategias con este marco conceptual. Para abordar este desafío, gana importancia la adopción de sistemas integrados capaces de realizar una producción multifacética utilizando infraestructura, espacio y materia prima compartidos, ejemplificados por los sistemas agroacuícolas. Un desafío importante, es la integración de un sistema más eficiente que abarque la producción simultánea de dos o más especies que abarcan diferentes niveles tróficos, fomentando el desperdicio cero y avanzando en la producción circular de alimentos.

En general, los sistemas agroacuícolas están orientados a maximizar la eficiencia en el uso de los recursos; su historia se remonta a diversos periodos, comenzando con los egipcios en donde se toman los primeros registros acuícolas grabados en la tumba de Nebamun (1350 a.C.) de un cultivo de plantas y peces en estanques cerrados (Feidi, 2018). En China (1135 a.C.), en sus cultivos de arroz inundados, se cosechaban también diversos tipos de carpas (Ruddle y Zhong, 1988).

Del otro lado del mundo, los Aztecas, antiguos habitantes de la cuenca de México (1100 a.C.), utilizaban en sus lagunas el sistema de “chinampas”, que son parcelas artificiales flotantes para la producción de plantas con flores en un medio acuático. Estas “islas” fueron increíblemente fértiles aprovechando las excretas de los peces y las microalgas para nutrir sus cultivos (Kledal y Thorarinsdottir, 2018). En la actualidad, la integración y rediseño de los sistemas productivos, está basándose en la cercanía a los centros consumidores; zonas periurbanas y urbanas.

En el caso de la acuicultura, la evolución de los sistemas hacia la sostenibilidad puede ser descrita de la siguiente manera: policultivos, acuaponía y floccionia (Tabla 15). Nombrados en su conjunto como sistemas agroacuícolas, por permitir la producción acuícola y agrícola dentro de la misma infraestructura y con interconexión en el uso del recurso energético, hídrico y materia prima. Cada sistema tiene una complejidad y una forma de integrar los residuos desde un nivel trófico, generalmente animal, plantas y microorganismos (Martínez-Córdova et al., 2023).

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

Tabla 15: Clasificación y descripción de los sistemas agroacuícolas: policultivos, acuaponia y floconic.

Clasificación	Características	Ventajas y desventajas
Policultivos	Los policultivos (especies de igual nivel trófico) y cultivos multitróficos (especies de distinto nivel trófico), son sistemas que reciclan de manera eficiente el recurso hídrico y los nutrientes desechados de un cultivo a otros. Dentro de los organismos que se cultivan están peces, invertebrados, moluscos, macroalgas, así como otros vegetales.	De manera económica, los policultivos tienen la ventaja de diversificar sus productos ampliando la oferta. Desde el punto ecológico, reduce la contaminación resultante de la acuicultura. Sin embargo, con el incremento de cultivos intensivos, la carga orgánica supera a los sistemas (Rosa et al., 2020)
Acuaponia	Este sistema agroacuícola integra la hidroponía, cultivo vegetal sin suelo, con la acuicultura de recirculación (SAR), cultivo acuícola, generalmente de peces o crustáceos. Este sistema representa una alternativa a la producción sustentable agrícola.	La producción acuapónica reporta un rendimiento 6 veces mayor, en un sexto de espacio utilizando un sexto de agua en comparación con acuicultura y agricultura convencionales (Nelson y Pade, 2017). Por otro lado, el costo de estos sistemas puede ser elevado y complicado (Okomoda et al., 2023).
Floconia	Floconia es un sistema reciente pero prometedor, que exhibe características notables como una alta eficiencia en el uso de nutrientes que oscila entre el 10 y el 27 % en comparación con el BFT, una reducción del 10 % en los desechos en comparación con la acuaponía y tasas de crecimiento mejoradas observadas tanto en peces como en cultivos (Pinho et al., 2022).	A pesar de sus ventajas y potencial para la producción sostenible de alimentos, la adopción generalizada de sistemas integrados se ve obstaculizada por una deficiencia en estrategias que optimicen la integración y faciliten la escalabilidad. La información sobre la optimización de Floconics es escasa.

La evidencia empírica sugiere que la unificación de sistemas integrados presenta una estrategia potencialmente viable para suplantar los sistemas de monocultivo convencionales, conocidos por su contaminación ambiental e ineficiencia. En este contexto, los sistemas integrados emergen como una opción factible, dada su adaptabilidad a diversas escalas de operación (Colt et al., 2021).

INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

Cabe destacar que, tradicionalmente, los proyectos agroacuícolas se han iniciado principalmente con tres objetivos generales: promover prácticas dietéticas más saludables, mejorar la producción de alimentos y facilitar la investigación científica. Por ejemplo, en el Noroeste de México, existen diversos modelos implementados que permiten manejar diversas producciones compartiendo el recurso hídrico.

En Baja California Sur, una investigación del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y la Universidad de Tottori, conjuntó investigadores y técnicos para desarrollar el proyecto: “Acuaponía combinada con cultivo a cielo abierto adaptado a regiones áridas para la producción sustentable de alimentos” (Figura 85 c). Este sistema de producción de alimentos en zonas áridas fue diseñado para abastecerse con una red fotovoltaica para establecerse en lugares donde la energía es escasa, además utilizó como recurso hídrico, agua de pozo salobre, común en los acuíferos de esta parte del país, filtrándola mientras da paso por las diferentes etapas hidropónicas evitando la salinización del suelo (Baiyin et al., 2020). En la parte acuícola se implementó el cultivo de tilapia bajo el sistema de recirculación acuícola (SAR), calculando el requerimiento diario de proteínas de los peces en vez del porcentaje de biomasa, se mejoró el crecimiento y la producción (Fimbres-Acedo et al., 2019).

La integración generada en el sistema permitió diseñar metodologías para el manejo del recurso hídrico de la parte acuícola a la parte de producción hidropónica, utilizando como base niveles acumulados de nitratos (NO_3^-) en el agua de cultivo, al alcanzar aproximadamente los 250 mg/L, el agua se trasladaba a los sistemas hidropónicos de cama flotante con cultivos de acelga (Kaburagi et al., 2020).

Otra aportación importante, fue generar la base metodológica para integrar como biofiltros las macroalgas *Ulva lactuca* para el aprovechamiento de los compuestos residuales en el agua, reduciendo las cargas de amonio en un 95%, 92% de fósforo y 50% de nitritos y nitratos (Barbosa-Romo, 2019). Una vez

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

terminado este ciclo de cultivo, el agua biofiltrada por las raíces de las plantas fue utilizada para riego en suelo para el cultivo de chile habanero (JICA, 2020).

El modelo antes descrito, se transfirió a una granja ubicada en la zona desértica de Los Planes, B.C.S., (Figura 85 d) en donde, junto con los agricultores locales se trabajó con cultivo de tilapia en SAR en conjunto con un sistema hidropónico con acelgas para finalizar con la siembra en tierra de chile habanero, además de epazote, verdolaga, betabel y salicornia, eficientizando así el manejo del recurso hídrico escaso en estas regiones (JICA, 2020).

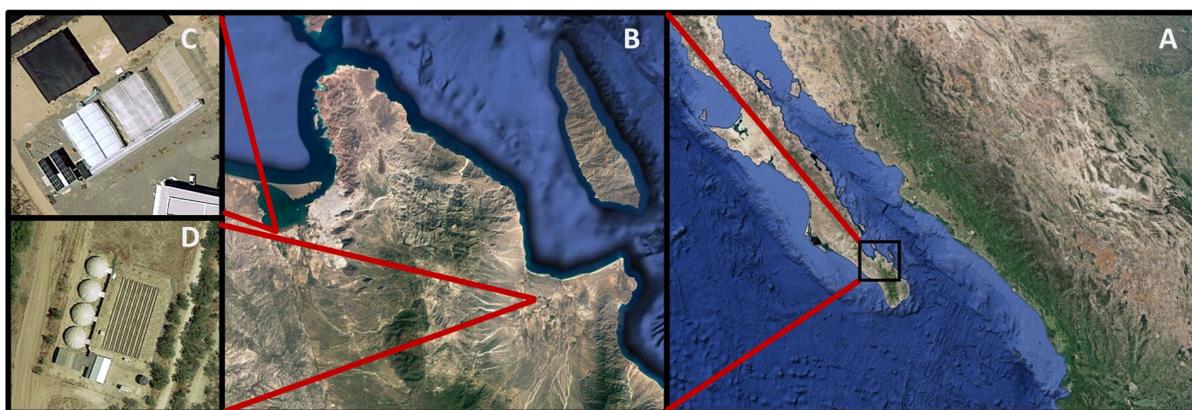


Figura 85. A) Noroeste de México, B) Municipio de la Paz, Baja California Sur, C) Sistema agroacuícola en CIBNOR y D) Sistema agroacuícola en Los Planes, B.C.S.

En el Estado de B.C.S., han surgido asociaciones que apoyan el uso racional de los recursos, la aplicación de metodologías sustentables y tecnologías innovadoras que aseguren alimento de calidad a las comunidades. Como Pez Verde A.C., que con la implementación de sistemas acuapónicos contribuye a revitalizar la actividad económica en las comunidades. Los excedentes de producción de estos sistemas se emplean para promover mercados de agricultura orgánica. En Jalisco, la empresa Bofish, funciona como una gestora de proyectos que ha introducido

a través de asesorías y cursos, la acuaponía a base de sistemas de recirculación (SAR), utilizando a la tilapia como especie bandera para cultivar hortalizas a niveles local y comercial con metodologías que favorecen un mejor aprovechamiento y reciclaje del recurso hídrico.

Dentro del CIBNOR, se llevaron a cabo estudios sobre la combinación de la tecnología de Biofloc (TBF) dentro de un sistema acuapónico, una nueva técnica que circula el agua con nutrientes residuales floccionicos del cultivo acuícola al vegetal. Se caracterizaron los nutrientes de interés hidropónico a partir de la fracción particulada de los residuos del cultivo de tilapia (Fimbres-Acedo, 2015). Además se tomaron las algas *Chlorella* como comunidades fotoautótrofas de los cultivos de tilapia, encontrando mayor concentración de nutrientes en comparación con soluciones comerciales para cultivo de 5 especies de plantas (lechuga, pak-choi, arúgula, espinaca y albahaca) en camas hidropónicas (Fimbres-Acedo et al., 2020 a,b). Este tipo de granjas acopladas tienen la oportunidad de comercializar diversos productos utilizando el mismo recurso hídrico, con la oportunidad de hacerlo en múltiples ciclos o devolverla sin residuos a los cultivos en tierra a cielo abierto.

Nuevas estrategias

La cuarta revolución industrial (Industria 4.0) ha ido ganando impulso desde el 2015 y está cambiando la forma en que se producen, transportan, almacenan, reciben y consumen los alimentos en todo el mundo, dando lugar al surgimiento de nuevas tendencias alimentarias (Hassoun et al., 2024). La tendencia predominante es modificar los sistemas de producción para mejorar la resiliencia y la eficiencia, minimizando al mismo tiempo los impactos ambientales y preservando los recursos naturales. Esta transformación tiene como objetivo facilitar la producción de alimentos saludables, rentables y sostenibles. En la actualidad se han destacado diversas metodologías y procesos que van encaminados a aumentar las producciones sin acrecentar los estragos ambientales, sociales, culturales y

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

económicos (Himesh et al., 2018). Por ejemplo, se habla de la Agricultura 5.0, que representa una progresión de la Agricultura 4.0, la cual está marcada por una transformación en la precisión impulsada por las nuevas tecnologías, que permitirá que este sector primario pase al siguiente nivel de productividad y rentabilidad (Klerkx et al., 2020).

Esta transición representa una fase transformadora que integra una variedad de tecnologías establecidas y emergentes, que incluyen, entre otras, la nanotecnología, los drones, el Internet de las cosas (IoT), la tecnología de precisión combinada con la robótica y los sensores, entre otras (Burton, 2018; Davies y Garrett, 2018; De Clercq et al., 2018; Rose y Chilvers, 2018; Grieve et al., 2019; Klerkx et al., 2019; Vishnoi y Goel, 2024). Estas innovaciones, significan un cambio transformador hacia sistemas agrícolas futuristas y de alta tecnología. Cabe destacar que la reciente incorporación de la Inteligencia Artificial (IA) y el Aprendizaje Automático (AA), facilitan el monitoreo, simulación y automatización avanzada, al aprovechar datos de múltiples fuentes, como sensores, estaciones meteorológicas, diversos dispositivos y tecnologías. Lo que permite, la toma de decisiones informadas sobre el rendimiento de los alimentos, la calidad del producto, la dinámica del deterioro de los alimentos y el monitoreo de los recursos utilizados para su producción.

Con una marcada importancia en la precisión en el uso e implementación de la energía, el recurso hídrico y el uso del espacio (Saiz-Rubio y Rovira-Más, 2020), este enfoque garantiza la producción sostenible de alimentos al tiempo que salvaguarda los recursos naturales (Coronado-Apodaca et al., 2023; Karanth et al., 2023). Por ejemplo, la implementación de la tecnología ha permitido la fortificación de alimentos, la generación de alimentos funcionales incluso ha facilitado predecir zonas de riesgo de patógenos y otros fenómenos naturales para asegurar la interrelación entre sostenibilidad y seguridad alimentaria.

La producción circular, ha venido a sustituir la producción lineal. Este nuevo concepto, está enmarcado en el análisis de todo el proceso que conlleva generar

INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

un producto y la detección de los desperdicios que se generan en este, y la aplicación de metodologías que permitan reducir, reutilizar o reciclar estos desperdicios, conllevando así, un mejor uso de los insumos y productos. Este concepto ha sido la base para establecer procesos que permitan reducir la huella hídrica, energética y de suelo (Stahel, 2016; Geisendorf y Pietrulla, 2018).

Una de las ventajas de utilizar la información y aplicarla al manejo, se puede encontrar en los sistemas cero desechos, que trabajan con el balance energético y de nutrientes, lo que permite un manejo óptimo de los recursos (Yogev et al., 2016; Zhu et al., 2022). Los fundamentos de este modelo facultan el diseñar granjas que recuperen energía, que reduzcan las emisiones de CO₂, reciclen los desechos de los peces y plantas; aprovechando una parte de estos residuales para producir biogás, y la otra parte como un fertilizante para mejorar la producción de las plantas. Estos modelos, que están comenzando a analizarse e implementarse, favorecen la generación de alimentos acuícolas y hortícolas sin desechar nutrientes, incluyendo el manejo integral del recurso hídrico dentro de todo el sistema.

Otro concepto que está ganando importancia, es la agricultura regenerativa y de soluciones basadas en la naturaleza. Este concepto se ha propuesto como alternativa para producir alimentos que pueden tener menores -o incluso impactos positivos ambientales y/o sociales (Rhodes, 2017). Se ha resaltado su potencial para formar parte de una estrategia de mitigación del cambio climático (Newton et al., 2020). La base de este enfoque radica en la implementación de una metodología basada en sistemas que busca mejorar la salud del suelo mediante el aumento de la biodiversidad, la reintegración del carbono al suelo y el reciclaje de nutrientes. Estos esfuerzos, contribuyen a aumentar los rendimientos agrícolas, fortalecer la resiliencia frente a la inestabilidad climática y promover el bienestar y la vitalidad de las comunidades agrícolas y ganaderas. Esta iniciativa se guía por la visión de búsqueda de suelos, alimentos y un planeta más saludable, integrada dentro de los principios de la salud del suelo, el bienestar animal y la equidad social (Rhodes, 2017; Moyer et al., 2020).

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

En general, se habla que el sector productivo de alimentos está entrando a un periodo de innovación sin igual, donde en la mesa de discusión está el mejorar los procesos productivos para hacerlos resilientes y sostenibles a largo plazo, con producciones constantes, que generen alimentos inocuos y nutritivos para la población creciente. Estas tecnologías prometen tener impactos profundos y de largo alcance en el futuro de los sistemas alimentarios, con potencial para una transformación significativa. Son los pilares de varios paradigmas agrícolas, incluida la agricultura vertical, la agricultura digital, la bioeconomía, la agricultura circular y los sistemas agroacuícolas como la acuaponía (De Clercq et al., 2018).

Conjuntando lo antes descrito, se puede decir; que el objetivo actual de los sistemas agroacuícolas es llegar a desarrollar “granjas cero desechos”, con procesos circulares y regenerativos, que permitan el reciclaje de nutrientes y reaprovechamiento del recurso hídrico indefinidamente. Sobre todo, la disminución en el uso de recursos naturales, favoreciendo el reciclamiento y reutilización de las materias primas. El recurso hídrico es fundamental, y este tiene que ser manejado de manera visionaria, que permita aumentar las producciones, a la vez que se reutiliza este recurso en toda la cadena productiva. En este sentido, los sistemas agroacuícolas presentan una ventaja que es el desarrollo e implementación de la integración de dos o más sistemas productivos que favorecen generar producto animal y vegetal de forma sostenible. A pesar de esto, todavía hay camino por delante en función a la incorporación de tecnologías que faciliten la integración y la reducción en el consumo de materias primas y en la generación de desechos.

Con todo lo que se ha generado en materia de producción de alimentos, incluyendo nuevas tecnologías, y nuevos enfoques, se puede recalcar que tenemos todas las herramientas necesarias para contribuir positivamente al pleno uso de los residuos en actividades complementarias, cadenas de producción y en la mejora de la productividad y rentabilidad de los sistemas productivos alimenticios. Sin olvidar

el impulso que se debe de dar al sector social, cultural, económico, ambiental y educativo.

Conclusiones

Los sistemas agroacuícolas pueden mejorar la eficiencia hídrica y reducir los impactos ambientales en el sector de producción de alimentos de México.

Las tecnologías, como RAS y TBF, pueden mejorar la eficiencia de la producción y la utilización del agua.

La producción circular y la agricultura regenerativa ofrecen estrategias prometedoras para la producción sostenible de alimentos.

Importancia social

Los sistemas agroacuícolas desempeñan un papel crucial en la seguridad y soberanía alimentaria. Una de sus principales ventajas es la versatilidad en el diseño e implementación, lo que permite integrar la acuicultura y la agricultura para la producción conjunta de organismos vegetales y animales. Esta integración incluye además el aprovechamiento y la reutilización de residuos, lo que se traduce en beneficios directos para el bienestar social y el desarrollo económico.

Uno de los principales desafíos en estos sistemas es el manejo adecuado del recurso hídrico, elemento esencial para su éxito y sostenibilidad. En este sentido, la información presentada en el capítulo ofrece una visión integral sobre la gestión del agua, destaca la importancia de implementar prácticas eficientes y subraya el potencial de los sistemas agroacuícolas para fortalecer el sector productivo. Todo

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

ello con el objetivo de maximizar la eficiencia en el uso de los recursos, fomentar una gestión hídrica responsable y promover una producción de alimentos sostenible.

Asimismo, al promover enfoques circulares y regenerativos, los sistemas agroacuícolas no solo contribuyen a la conservación de los recursos naturales, sino que también impulsan el desarrollo de las comunidades locales, revitalizando sus economías y asegurando el acceso a alimentos nutritivos y saludables para las generaciones presentes y futuras.

Perspectivas:

Promover la adopción de sistemas agroacuícolas sostenibles, incluidas las tecnologías emergentes.

Fomentar la integración de estos sistemas en las prácticas agrícolas para maximizar la eficiencia de los recursos.

Fortalecer la inversión en investigación e innovación para desarrollar nuevas soluciones a los desafíos de la gestión del agua en la producción de alimentos.

Literatura citada

Baiyin, B., Tagawa, K., & Gutierrez, J. (2020). Techno-economic feasibility analysis of a stand-alone photovoltaic system for combined aquaponics on drylands. *Sustainability*, 12(22), 9556.

Barbosa-Romo, A. B. (2019). Tesis Maestria. Recuperación de nitrógeno y fosforo por la macroalga *Ulva Lactuca* en un Sistema Acuícola de Recirculación (SAR) integrado con jurel *Seriola rivoliana*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC.

INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

- Betanzo-Torres, E. A., Piñar-álvarez, M. de los Á., Sandoval-Herazo, L. C., Molina-Navarro, A., Rodríguez-Montoro, I., & González-Moreno, R. H. (2020). Factors that limit the adoption of biofloc technology in aquaculture production in Mexico. *Water (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102775>
- Blanchard, J. L., Watson, R. A., Fulton, E. A., Cottrell, R. S., Nash, K. L., Bryndum-Buchholz, A., ... & Jennings, S. (2017). Linked sustainability challenges and trade-offs among fisheries, aquaculture and agriculture. *Nature Ecology & Evolution*, 1(9), 1240-1249.
- Boulay, A. M., Drastig, K., Amanullah, Chapagain, A., Charlon, V., Civit, B., DeCamillis, C., De Souza, M., Hess, T., Hoekstra, A. Y., Ibdhi, R., Lathuilière, M. J., Manzardo, A., McAllister, T., Morales, R. A., Motoshita, M., Palhares, J. C. P., Pirlo, G., Ridoutt, B., ... Pfister, S. (2021). Building consensus on water use assessment of livestock production systems and supply chains: Outcome and recommendations from the FAO LEAP Partnership. *Ecological Indicators*, 124, 107391. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107391>
- Boyd, C. E., Tucker, C., McNevin, A., Bostick, K., & Clay, J. (2007). Indicators of resource use efficiency and environmental performance in fish and crustacean aquaculture. *Reviews in Fisheries Science*, 15(4), 327–360.
- Boyd, R., Thorpe, R., Hyder, K., Roy, S., Walker, N., & Sibly, R. (2020). Potential Consequences of Climate and Management Scenarios for the Northeast Atlantic Mackerel Fishery. In *Frontiers in Marine Science* (Vol. 7). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.00639>
- Briton, F., Macher, C., Merzeréaud, M., Le Grand, C., Fifas, S., & Thébaud, O. (2020). Providing integrated total catch advice for the management of mixed fisheries with an eco-viability approach. *Environmental Modeling & Assessment*, 25(3), 307–325.
- Burton, L., Dave, N., Fernandez, R. E., Jayachandran, K., & Bhansali, S. (2018). Smart gardening IoT soil sheets for real-time nutrient analysis. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(8), B3157.
- Cai, J., Chan, H. L., Yan, X., & Leung, P. (2023). A global assessment of species diversification in aquaculture. *Aquaculture*, 576, 739837. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739837>
- Campanati, C., Willer, D., Schubert, J., & Aldridge, D. C. (2022). Sustainable Intensification of Aquaculture through Nutrient Recycling and Circular Economies: More Fish, Less Waste, Blue Growth. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 30(2), 143–169. <https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1897520>

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

- Colt, J., & Schuur, A. M. (2021). Comparison of nutrient costs from fish feeds and inorganic fertilizers for aquaponics systems. *Aquacultural Engineering*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102205>
- Coronado-Apodaca, K. G., Martínez-Ruiz, M., Iqbal, H. M. N., Sosa-Hernandez, J. E., & Parra-Saldívar, R. (2023). Agro-food sustainability transitions: New Frontiers for food security. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 31, 100412.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015), Estadísticas del agua en México, Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). Estadísticas del agua en México 2018.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2022). Estadísticas del Agua en México 2021. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAPESCA. (Comision Nacional de Acuicultura y Pesca). 2022 La Conapesca promueve la producción y consumo de tilapia en el país | Representación AGRICULTURA Yucatán | Gobierno | gov.mx (www.gob.mx)
- Costa-Pierce, B. A., Bartley, D. M., Hasan, M., Yusoff, F., Kaushik, S. J., Rana, K., ... & Yakupitiyage, A. (2010). Responsible use of resources for sustainable aquaculture. In *Farming the waters for people and food. Proceedings of the Global Conference on Aquaculture* (pp. 113-147).
- Costello, C., Kinlan, B. P., Lester, S. E., & Gaines, S. D. (2012). The economic value of rebuilding fisheries.
- Davies, F. T., & Garrett, B. (2018). Technology for sustainable urban food ecosystems in the developing world: Strengthening the nexus of food–water–energy–nutrition. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 84.
- De Clercq, M., Vats, A., & Biel, A. (2018). Agriculture 4.0: The future of farming technology. *Proceedings of the World Government Summit, Dubai, UAE*, 11–13.
- D'Odorico, P., Chiarelli, D. D., Rosa, L., Bini, A., Zilberman, D., & Rulli, M. C. (2020). The global value of water in agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(36), 21985–21993. <https://doi.org/10.1073/pnas.2005835117>
- El-Sayed, A.-F. M. (2020). Harvesting, processing, economics and value chain. *Tilapia Culture*, 2, 245–260. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816509-6.00010-0>

INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

- Emerenciano, M. G. C., Fitzsimmons, K., Rombenso, A. N., Miranda-Baeza, A., Martins, G. B., Lazzari, R., Fimbres-Acedo, Y. E., & Pinho, S. M. (2021). Biofloc technology (BFT) in tilapia culture. In *Biology and aquaculture of Tilapia* (pp. 258–293). CRC Press.
- Feidi, I. (2018). Will the new large-scale aquaculture projects make Egypt self-sufficient in fish supplies? *Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research*, 1(1), 31–41.
- Fimbres-Acedo, Y. E. (2015). Tesis de Maestría. Caracterización de los nutrientes de interés hidropónico contenidos en la fracción particulada residual de cultivo de tilapia (*Oreochromis* spp.). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC.
- Fimbres-Acedo, Y. E., Magallón-Servín, P., Garza-Torres, R., Emerenciano, M. G. C., Servín-Villegas, R., Masato, E., Fitzsimmons, K. M., & Magallón-Barajas, F. J. (2020). *Oreochromis niloticus* aquaculture with biofloc technology, photoautotrophic conditions and *Chlorella* microalgae. *Aquaculture Research*, 1–24. <https://doi.org/10.1111/are.14668>
- Fimbres-Acedo, Y. E., Rodolfo, A., Torres, G., Endo, M., Servín, R., Kevin, V., Mauricio, M. F., & Barajas, F. J. M. (2019). Performance of *Oreochromis niloticus* in recirculating aquaculture systems at different levels of daily protein intake. July, 3326–3342. <https://doi.org/10.1111/are.14291>
- Fimbres-Acedo, Y. E., Servín-Villegas R., Garza-Torres R., Masato E., Fitzsimmons, K. M., Emerenciano, M. G. C., Magallón-Servín, P., López-Vela, M., y Magallón-Barajas, F. J. (2020). Hydroponic horticulture using residual waters from *Oreochromis niloticus* aquaculture with biofloc technology in photoautotrophic conditions with *Chlorella* microalgae. *Aquaculture Research*, August 2019, 4340–4360. <https://doi.org/10.1111/are.14779>
- Flores-Nava, A. (2007). 6.3 Aquaculture seed resources in Latin America: a regional synthesis. *Assessment of Freshwater Fish Seed Resources for Sustainable Aquaculture*, 501, 91.
- García-Ortega, A., & Calvario-Martínez, O. (2008). Manual de buenas prácticas de producción acuícola de tilapia para la inocuidad alimentaria. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.
- Geisendorf, S., & Pietrulla, F. (2018). The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 771-782.

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Grieve, B. D., Duckett, T., Collison, M., Boyd, L., West, J., Yin, H., Arvin, F., & Pearson, S. (2019). The challenges posed by global broadacre crops in delivering smart agri-robotic solutions: A fundamental rethink is required. *Global Food Security*, 23, 116–124.
- Guzmán-Luna, P., Gerbens-Leenes, P. W., & Vaca-Jiménez, S. D. (2021). The water, energy, and land footprint of tilapia aquaculture in Mexico, a comparison of the footprints of fish and meat. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105224.
- Hassoun, A., Bekhit, A. E. D., Jambrak, A. R., Regenstein, J. M., Chemat, F., Morton, J. D., ... & Ueland, Ø. (2024). The fourth industrial revolution in the food industry—part II: Emerging food trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(2), 407-437.
- Hermoso, V., Abell, R., Linke, S., & Boon, P. (2016). The role of protected areas for freshwater biodiversity conservation: challenges and opportunities in a rapidly changing world. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26, 3–11.
- Himesh, S., Rao, E. P., Gouda, K. C., Ramesh, K. V., Rakesh, V., Mohapatra, G. N., ... & Ajilesh, P. (2018). Digital revolution and Big Data: a new revolution in agriculture. *CABI Reviews*, (2018), 1-7.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>
- Hunter, M. L., Acuña, V., Bauer, D. M., Bell, K. P., Calhoun, A. J. K., Felipe-Lucia, M. R., Fitzsimons, J. A., González, E., Kinnison, M., Lindenmayer, D., Lundquist, C. J., Medellín, R. A., Nelson, E. J., & Poschlod, P. (2017). Conserving small natural features with large ecological roles: A synthetic overview. *Biological Conservation*, 211, 88–95. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2016.12.020>
- IMCO (Instituto Mexicano para la Competitividad) - Centro de Investigación en política pública. (2024). La gestión del agua no es una prioridad en México (imco.org.mx) Consulta el 08 de febrero del 2024.
- JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japon). (2020). Manual Técnico de Acuaponía combinada con cultivo a cielo abierto adaptado a zonas áridas. Miyanaga 21-4 Tottori, Japón.

INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

- Kaburagi, E., Yamada, M., Baba, T., Fujiyama, H., Murillo-Amador, B., & Yamada, S. (2020). Aquaponics using saline groundwater: Effect of adding microelements to fish wastewater on the growth of Swiss chard (*Beta vulgaris* L. spp. cicla). *Agricultural Water Management*, 227, 105851.
- Karanth, S., Benefo, E. O., Patra, D., & Pradhan, A. K. (2023). Importance of artificial intelligence in evaluating climate change and food safety risk. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100485.
- Kledal, P. R., & Thorarinsdottir, R. (2018). Aquaponics: A commercial niche for sustainable modern aquaculture. *Sustainable Aquaculture*, 173–190.
- Klerkx, L., & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24, 100347.
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100315.
- Kremsa, V. (2021). Sustainable management of agricultural resources (agricultural crops and animals). *Sustainable Resource Management: Modern Approaches and Contexts*, 99–145. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824342-8.00010-9>
- Lara, A., Laterra, P., Manson, R., & Barrantes, G. (2013). Servicios Ecosistémicos hídricos: estudios de caso en América Latina y el Caribe. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Leach, M., Rockström, J., Raskin, P., Scoones, I., Stirling, A. C., Smith, A., Thompson, J., Millstone, E., Ely, A., & Arond, E. (2012). Transforming innovation for sustainability. *Ecology and Society*, 17(2).
- Martinez-Cordova, L. R., Emerenciano, M. G. C., Miranda-Baeza, A., Pinho, S. M., Garibay-Valdez, E., & Martínez-Porchas, M. (2023). Advancing toward a more integrated aquaculture with polyculture> aquaponics> biofloc technology> FLOCponics. *Aquaculture International*, 31(2), 1057–1076.
- McIntyre, B. D. (2009). International assessment of agricultural knowledge, science and technology for development (IAASTD): global report.
- Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y (2011). The green, blue and gray water footprint of crops and derived crop products, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 1577–1600, <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>, 2011.
- Mekonnen, M. M., Gerbens-Leenes, P. W., & Hoekstra, A. Y. (2015). The consumptive water footprint of electricity and heat: A global assessment.

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

- Environmental Science: Water Research and Technology, 1(3), 285–297. <https://doi.org/10.1039/c5ew00026b>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401-415.
- Moyer, J. D., & Hedden, S. (2020). Are we on the right path to achieve the sustainable development goals? *World Development*, 127, 104749.
- Müller, K. (2009). Remote sensing and simulation modelling as tools for improving nitrogen efficiency for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Christian-Albrechts Universität Kiel.
- Nelson, R. L. (2017). Aquaponics. In *Tilapia in Intensive Co-culture* (pp. 246–260). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118970652.ch15>
- Newton, P., Civita, N., Frankel-Goldwater, L., Bartel, K., & Johns, C. (2020). What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 194.
- Okomoda, V. T., Oladimeji, S. A., Solomon, S. G., Olufeagba, S. O., Ogah, S. I., & Ikhwanuddin, M. (2023). Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption. *Food Science and Nutrition*, 11(3), 1157–1165. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3154>
- ONU- Organizacion de las Naciones Unidas. (2022). World population prospects 2022. Department of Economic and Social Affairs Population Division. [wpp2022_summary_of_results.pdf](https://www.un.org/wpp2022_summary_of_results.pdf) (un.org)
- Parker, R. (2012). *Aquaculture Science. International Edition* (981435488083): NHBS - Cengage learning
- Pauly, D., Christensen, V., Guénette, S., Pitcher, T. J., Sumaila, U. R., Walters, C. J., Watson, R., & Zeller, D. (2002). Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418(6898), 689–695. <https://doi.org/10.1038/nature01017>
- Pinho, S. M., de Lima, J. P., David, L. H., Emerenciano, M. G. C., Goddek, S., Verdegem, M. C. J., Keesman, K. J., & Portella, M. C. (2022). FLOCponics: The integration of biofloc technology with plant production. In *Reviews in Aquaculture* (Vol. 14, Issue 2, pp. 647–675). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/raq.12617>
- Pretty, J. (2020). New opportunities for the redesign of agricultural and food systems. *Agriculture and Human Values*, 37, 629–630.

INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

- Proksch, G., Ianchenko, A., & Kotzen, B. (2019). Aquaponics in the built environment. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, 523–558.
- Purcell, A. M., Dijkstra, P., Hungate, B. A., McMillen, K., Schwartz, E., & van Gestel, N. (2023). Rapid growth rate responses of terrestrial bacteria to field warming on the Antarctic Peninsula. *The ISME Journal*, 17(12), 2290–2302. <https://doi.org/10.1038/s41396-023-01536-4>
- Rhodes, C. J. (2017). The imperative for regenerative agriculture. *Science Progress*, 100(1), 80–129.
- Ringler, C., Agbonlahor, M., Barron, J., Baye, K., Meenakshi, J. V., Mekonnen, D. K., & Uhlenbrook, S. (2022). The role of water in transforming food systems. *Global Food Security*, 33, 100639.
- Rosa, J., Lemos, M. F. L., Crespo, D., Nunes, M., Freitas, A., Ramos, F., Pardal, M. Â., & Leston, S. (2020). Integrated multitrophic aquaculture systems – Potential risks for food safety. *Trends in Food Science and Technology*, 96(July 2019), 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.008>
- Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87
- Ruddle, K., & Zhong, G. (1988). *Integrated agriculture-aquaculture in South China: the dike-pond system of the Zhujiang Delta*. CUP Archive.
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 10(2), 207
- Sarkar, D. J., Sarkar, S. Das, Manna, R. K., Samanta, S., & Das, B. K. (2020). Microplastics pollution: an emerging threat to freshwater aquatic ecosystem of India. *J Inland Fish Soc India*, 52(1), 5–15.
- Shnel, N., Barak, Y., Ezer, T., Dafni, Z., & van Rijn, J. (2002). Design and performance of a zero-discharge tilapia recirculating system. *Aquacultural Engineering*, 26(3), 191–203.
- Shukla, R., Agarwal, A., Sachdeva, K., Kurths, J., & Joshi, P. K. (2019). Climate change perception: an analysis of climate change and risk perceptions among farmer types of Indian Western Himalayas. *Climatic Change*, 152, 103–119.
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438.

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

- Steiner, G., Geissler, B., & Schernhammer, E. S. (2019). Hunger and obesity as symptoms of non-sustainable food systems and malnutrition. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(6), 1–16. <https://doi.org/10.3390/app9061062>
- Timmons, M.B., Ebeling, J.M., Wheaton, F.W., Summerfelt, S.T., Vinci, B.J., (2002). *Recirculating aquaculture systems*, 2 nd. ed. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, NY.
- Urías-Sotomayor, R., & Maeda-Martínez, A. N. (2023). La producción de tilapia del Nilo *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) en México como una alternativa para fortalecer la seguridad alimentaria nacional. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*.
- Verdegem, M. C. J., & Bosma, R. H. (2009). Water withdrawal for brackish and inland aquaculture, and options to produce more fish in ponds with present water use. *Water Policy*, 11(S1), 52–68.
- Vishnoi, S., & Goel, R. K. (2024). Climate smart agriculture for sustainable productivity and healthy landscapes. *Environmental Science & Policy*, 151, 103600.
- Wang, M., & Lu, M. (2016). Tilapia polyculture: a global review. *Aquaculture Research*, 47(8), 2363–2374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.12708>
- Wilhelmina, Q., Joost, J., George, E., & Guido, R. (2010). Globalization vs. localization: global food challenges and local solutions. *International Journal of Consumer Studies*, 34(3), 357–366.
- Willett, R., Loken, J., Springmann, L., Vermeulen, G., Tilman, D., & Wood, J. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 447.
- Yacout, D. M., Soliman, N. F., & Yacout, M. M. (2016). Comparative life cycle assessment (LCA) of Tilapia in two production systems: semi-intensive and intensive. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 806-819.
- Yogev, U., Barnes, A., & Gross, A. (2016). Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. *Water (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/w8120589>
- Zhu, Z., Yogev, U., Goddek, S., Yang, F., Keesman, K. J., & Gross, A. (2022). Carbon dynamics and energy recovery in a novel near-zero waste aquaponics system with onsite anaerobic treatment. *Science of the Total Environment*, 833, 155245. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155245>

Zimmermann, S., Kiessling, A., & Zhang, J. (2023). The future of intensive tilapia production and the circular bioeconomy without effluents: Biofloc technology, recirculation aquaculture systems, bio-RAS, partitioned aquaculture systems and integrated multitrophic aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 15, 22–31.

Para citar esta obra:

Fimbres Acedo Y.E. y R. Garza Torres. 2025. Manejo del Recurso Hídrico en los Sistemas Agroacuícolas. En: Ortega-Rubio A. (Coord.) Investigación sobre los recursos naturales del noroeste de México, para el bienestar comunitario. (pp. 471-503). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. La Paz, B.C.S. México. 547 pp.

