



# LA ACUICULTURA Y SU IMPACTO EN LA ZONA COSTERA DEL GOLFO DE CALIFORNIA

THE AQUACULTURE AND THEIR IMPACT IN THE COASTAL ZONE OF THE GULF OF CALIFORNIA

**Del Río Salas Martha<sup>1</sup>, Martínez Durazo Angel<sup>2</sup> y Jara Marini Martín Enrique<sup>\*3</sup>**

<sup>1</sup> Programa de maestría, Posgrado en Biociencias del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora.

<sup>2</sup> Programa de maestría, Posgrado en Ciencias del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Carretera a La Victoria, Km 0.6, Ejido La Victoria, 83304 Hermosillo Sonora.

## RESUMEN

La zona costera del Noroeste de México cuenta con una gran cantidad de lagunas costeras, con características y condiciones favorables para el desarrollo de la industria de la acuicultura. Actualmente, el cultivo de camarón es una de las industrias con mayor crecimiento en el mundo. Esta industria ha tenido un crecimiento acelerado en Norte y Sudamérica, y particularmente en México en el Golfo de California. En 2010, 70.3% de la producción acuícola de México provino del litoral del Golfo de California, de la cual 97.7% fue de granjas de camarón. Sin embargo, se han documentado diversos efectos adversos de la acuicultura: conflicto con otras actividades económicas (por ejemplo agricultura, pesquerías y turismo), el cambio de uso de suelo, la deforestación de manglares y diferentes tipos de contaminación (principalmente asociada a la descarga y filtración de materia orgánica). Los isótopos estables de C y N son una valiosa herramienta para detectar los posibles impactos de la acuicultura en los ecosistemas, ya que ayudan a determinar la dinámica de la materia orgánica descargada y/o filtrada a los ecosistemas marinos. Estos estudios permiten evaluar y planear el desarrollo sustentable de la acuicultura. Este enfoque se relaciona con el uso de los fundamentos de la eco-tecnología, los cuales buscan la auto-regulación y el auto-mantenimiento de los ecosistemas, causando alteraciones ecológicas mínimas.

**Palabras clave:** Golfo de California, Acuicultura, Isótopos estables de C y N, Desarrollo sustentable.

## ABSTRACT

The coastal zone of Northwest of Mexico has many coastal lagoons with characteristics and conditions for the development of aquaculture industry. Actually, shrimp aquaculture is one of the industries with the major development in the world. This industry has had an accelerate growth in North and South America, and in México, particularly around the Gulf of California. In 2010, around 70.3% of the aquaculture production came from the Gulf of California littoral, and 97.7% of this total was from shrimp farms. However, there are documented many adverse effects associated to aquaculture: conflicts with other activities (e.g. agriculture, fisheries and tourism), change of use of land, mangrove deforestation and

different types of pollution (mainly associated to discharge and filtration of residual organic matter). The stable isotopes of C and N are a valuable tool in studies to detect the possible impacts of aquaculture on ecosystems, because help to determine the dynamic of organic matter discharged and/or filtered to marine environments. These studies allow evaluate and plan the sustainable development of aquaculture. This approach is related to eco-technology fundamentals which seeks auto-regulation and auto-maintenance of ecosystems, causing minimal ecological disruption.

**Keywords:** Gulf of California, Aquaculture, C and N stable isotopes, Sustainable development.

## INTRODUCCIÓN

La zona costera es una región con características únicas ya que es un área de acoplamiento entre el océano y el continente. Muchos asentamientos humanos se han desarrollado en los márgenes y cercanías de esta zona a lo largo del mundo. En México, muchas ciudades de la zona costera son polos de desarrollo por sus actividades industriales, portuarias y turísticas. Además, en muchas áreas costeras sin grandes asentamientos humanos se desarrollan actividades agrícolas de forma extensiva e intensiva (De la Lanza-Espino *et al.*, 1993; Páez-Osuna *et al.*, 1998). En el Noroeste de México, la zona costera tiene como característica la presencia de numerosas lagunas costeras ya que desde el Río Colorado en Sonora hasta San Blas en Nayarit hay 35 ecosistemas de este tipo. Las lagunas costeras tienen una gran variedad de hábitats como áreas de manglares, marismas, ciénegas, humedales salobres, lagunas interiores de agua dulce y sistemas de agua salada. Todos poseen alta biodiversidad, son sitios de anidación y desarrollo de especies endémicas y migratorias, y sus tramas tróficas llegan a ser muy complejas (Flores-Verdugo *et al.*, 1992). Además, son sitios con condiciones favorables para el desarrollo de la acuicultura. De hecho, estos ecosistemas proveyeron de los ejemplares del cultivo pos-larvario del camarón en el noroeste de México (Páez-Osuna *et al.*, 2003), y actualmente se han desarrollado varias granjas de desarrollo de pos-larvas para cultivo (Mariscal-Lagarda *et al.*, 2012).

\*Autor para correspondencia: Martín Enrique Jara Marini  
Correo electrónico: [mjara@ciad.mx](mailto:mjara@ciad.mx)

Recibido: 11 de julio de 2016

Aceptado: 06 de octubre de 2016

La acuicultura es una actividad que se ha practicado de manera artesanal durante muchos años, principalmente en el oriente. A nivel mundial, los principales productores acuícolas se encuentran en Asia, aportando el 89% de la producción mundial del 2010, mientras que los productores de América del Norte aportaron solo el 1.1% (FAO, 2012). Es por ello que esta actividad se considera emergente en esta región. Hace algunos años se estimó que en México hay 335 000 ha disponibles para el desarrollo de la acuicultura, de las cuales el 70.4% (236 000 ha) se encuentra en el noroeste del país (De la Lanza-Espino *et al.*, 1993). La acuicultura es una de las actividades de mayor crecimiento en el mundo. En 1982 la producción de camarón de acuicultura fue de 1 millón de toneladas y en el 2010 fue de aproximadamente 3.5 millones de toneladas, con un valor aproximado de 14 600 millones de dólares y representando el 34% de la producción total de camarón (captura más acuicultura) y el 55% del total de especies provenientes de la acuicultura (FAO 2012).

En México esta actividad se maneja de manera intensiva, semi-intensiva y extensiva; en 1993 se reportaron 189 granjas de camarón (extensión de 12 217 ha), de las cuales 80% operaban con un sistema semi-intensivo, 17% con un sistema extensivo y 3% con un sistema intensivo (Páez-Osuna *et al.*, 2003). Los sistemas de producción mundial utilizados en la cultivo de camarón son el extensivo, semi-intensivo, intensivo e hiper-intensivo. La acuicultura extensiva es la que se realiza en áreas de aguas naturales continentales o en áreas costeras semi-cerradas, como las lagunas, con densidades de entre 4 y 10 postlarvas/m<sup>2</sup>; su producción está limitada por la capacidad del medio y se alcanza una sobrevivencia del 50%. Para desarrollarla se utilizan poblaciones naturales, donde aprovechan el alimento natural para su crecimiento y engorda, pero donde no se tiene control sobre ninguna condición ni variable. Como en estos cuerpos de agua naturales existen otras especies (que generalmente pueden ser competidoras o depredadoras del camarón), el rendimiento de la acuicultura extensiva está limitado. En los sistemas semi-intensivos, se hace en áreas cerradas donde se controlan condiciones y factores que permiten aumentar la producción. La densidad de siembra fluctúa entre 10 y 30 postlarvas/m<sup>2</sup>, y tasas de recambio diario entre 3 y 6% del volumen del estanque. En cambio, en los sistemas intensivos se caracterizan por combinar altas densidades de siembra (entre 60 y 300 postlarvas/m<sup>2</sup>) y tasas de recambio entre 10 y 15% de volumen del estanque (Páez-Osuna, 2001a). En los sistemas hiper-intensivos las densidades fluctúan entre 300 y 450 postlarvas/m<sup>2</sup> y tasas de recambio >20% de volumen del estanque. El porcentaje de sobrevivencia de organismos en los semi-intensivo, intensivo e hiper-intensivo es de 75% (FAO, 2014). Algunas granjas han implementado el uso aireadores para disminuir las tasas de recambio de agua o bien alcanzar altos porcentajes de las misma en menor tiempo (SAGARPA, 2013).

Particularmente en el noroeste, durante el 2003 alrededor del 97% del camarón cultivado en México provino de los estados que rodean al Golfo de California (Baja California,

Baja California Sur, Sonora y Sinaloa). Existe una preocupación por el acelerado crecimiento de esta actividad debido a los diversos problemas que han sido documentados como los conflictos con otras actividades productivas (pesca, agricultura y turismo), la deforestación de bosques de manglares y diversos tipos de contaminación (Páez-Osuna *et al.*, 1998; Páez-Osuna *et al.*, 2003; Miranda *et al.*, 2007; Berlanga-Robles *et al.*, 2011; Serrano-Grijalva *et al.*, 2011).

En el presente trabajo se plantea un panorama general sobre el estado de la acuicultura y el futuro de ésta actividad, desde la perspectiva de la producción y la generación de divisas, y de los efectos que está teniendo sobre el medio ambiente en el que se desarrolla.

### La acuicultura en Sonora

Sonora cuenta con una línea de costa de 1250 km y desde 1980 la acuicultura ha sido una actividad de un gran crecimiento. Las principales especies que son cultivadas en el estado son el bagre (*Ictalurus punctatus*), el camarón (*Litopenaeus vannamei*), la carpa (*Cyprinus carpio communis*), el ostión (*Crassostrea gigas*) y la tilapia (*Oreochromis niloticus*). El área de cultivo de acuicultura total aumentó de 5 mil ha en 1999 a 27 mil ha en 2011 y hasta 2010 fue el líder en producción acuícola y actualmente se ubica como el segundo productor nacional de camarón de cultivo. Es una actividad altamente productiva, considerada como un eje de desarrollo en el noroeste de México; en Sonora la producción acuícola estimada durante 2010 fue de 49 717 ton y aunque disminuyó a 18 480 ton en el 2013, sigue siendo una actividad económica preponderante (864.70 millones de pesos (CONAPESCA, 2011; 2013). Durante 2013, la producción de la acuicultura en el litoral del Pacífico fue de 151 093 ton, y Sonora aportó el 12% (18 480 ton) de la producción nacional. Del total producido en Sonora durante 2013, el 78.9% fueron de camarón (14 591 ton), 12.8% de tilapia (2 374 ton), 2.2% de carpa (401 ton), 3.4% de bagre (623 ton) y 0.9% de ostión (159 ton) (CONAPESCA, 2013).

La acuicultura del camarón se desarrolla tierra adentro, en estanques acondicionados cerca de la línea de costa para que exista una buena fuente de abastecimiento de agua. Se desarrolla en la zona costera con una temperatura media anual del agua entre 25 y 30°C, y un intervalo de salinidades de 20 a 40 ups, con un óptimo de 35 ups. Los sistemas de producción utilizados en Sonora en la producción de camarón son el semi-intensivo e intensivo (Páez-Osuna, 2001a). Las granjas en operación utilizan, generalmente, sistemas de cultivo semi-intensivo con rendimientos promedio de 1.35 ton/ha (COSEAES, 2014), a través de 2 ciclos de cultivo al año (entre 3 y 5 meses cada ciclo). Algunas granjas realizan ciclos de cultivo largos, donde pueden tener hasta 3 pre-cosechas, las cuales están enmarcadas por la talla de los organismos y la capacidad de carga del sistema. Uno de los principales problemas de la acuicultura en Sonora es el de los grandes recambios de agua que se requieren para satisfacer la necesidad de agua y de esta manera aumenta considerablemente las descargas hacia cuerpos de agua receptores (Casillas-

Hernandez *et al.*, 2006). El aumento de materia orgánica en los cuerpos receptores, principalmente lagunas costeras, tiene efectos adversos que se discutirán a detalle mas adelante. En Sonora la especie más cultivada es el camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*), del cual se conoce prácticamente toda su biología. Se ha intentado el cultivo de otras especies, como es el caso del camarón café (*Farfantepenaeus californensis*) y azul (*Litopenaeus stylirotris*), pero no se logró con éxito. Actualmente existen granjas de cultivo de camarón blanco en las siguientes áreas de Sonora: Estero La Cruz en Bahía de Kino, Estero El Cardonal, Estero Tastiota, Estero Cruz de Piedra, Bahía Lobos, Estero Los Mélagos, Estero San José, Laguna El Tóbari, Estero El Siari, Bahía Borobampo, Estero Aquiropo, Estero Riito, Estero Santa Bárbara y Laguna Agiabampo (IAES, 2016).

Asimismo, se han planteado alternativas al cultivo del camarón, como lo son los cultivos de ostiones y peces. El cultivo de ostión se hace en varias fases, dependiendo del estadio del organismo: intensivo para larvas, post-larvas y juveniles, semi-intensivo para juveniles, y extensivo para la engorda. En teoría, los porcentajes de sobrevivencia son de entre 70 y 80% para el cultivo extensivo y de entre 80 y 90% para los cultivos semi-intensivo e intensivo. Las superficies destinadas al cultivo de ostión en Sonora son significativamente menores en comparación con los estados de mayor producción en México (Veracruz, Tabasco, Nayarit y Tamaulipas), por lo que su producción es baja, además de otros factores. Los porcentajes de la producción nacional de ostión japonés de Jalisco, Michoacán, Sinaloa y Sonora pasó del 1.8% de la producción total acuícola en 2002 al 0.60% en 2011, pero aumentó significativamente en los estados de Nayarit y Baja California (1.35% de la producción nacional en el 2013); la producción de estos 4 estados tuvo su pico máximo en 2007 (2.5% de la producción nacional) y en 2010 (2.2% de la producción nacional) (SAGARPA, 2013). Particularmente en Sonora, se reportó un aumento del 30% en la producción del bivalvo del 2010 al 2011 (IAES, 2012), pero aun así su producción es baja (159 ton en el 2013). La causa de esta baja producción ha sido que, desde 1997 a la fecha, se han presentado mortandades masivas en la etapa juvenil, donde se alcanzan porcentajes de sobrevivencia de entre 15 y 50%, pero la producción ha bajado en un 80% y no se han vuelto a alcanzar los niveles de producción anteriores a 1997 (Benítez García y Portillo Clark, 2011). Se han hecho estudios para determinar el origen de estas mortandades y se encontró que están asociadas a la presencia de los patógenos Herpes virus y *Perkinsus marinus* (Audemard *et al.*, 2004; Cáceres-Martínez *et al.*, 2004). Actualmente se están haciendo esfuerzos para aumentar la producción de ostión. Una alternativa es la modificación de las artes del cultivo, pasando del uso de las canastas Nestier al uso de postas de fijación de campo, y cestas de cultivo australianas y las linternas para cultivo en mar abierto (Castro-Longoria, comunicación personal). Otra alternativa a esto ha sido el desarrollo del cultivo del ostión de mangle (*Crassostrea corteziensis*), aunque con tallas comerciales menores al ostión japonés; sin embargo, tiene

la ventaja de ser nativo de la región y, por tanto, adaptada a todas las condiciones y factores imperantes en las costas del estado (Castillo-Durán *et al.*, 2010).

En este esfuerzo por mejorar y diversificar la actividad acuícola, se creó el Centro Reproductor de Especies Marinas del Estado de Sonora (CREMES), que es soporte de parte de la actividad acuícola ya que produce crías mejoradas y acondicionadas de especies de moluscos bivalvos y peces. Entre estas están el ostión japonés *Crassostrea gigas*, el ostión de mangle *Crassostrea corteziensis*, el callo de hacha *Atrina maura*, la totoaba *Totoaba macdonaldi* y el jurel *Seriola lalandi*. Se han hecho estudios con diferentes especies para desarrollar su cultivo, que tengan un impacto económico y social a mediano y largo plazo. Minjarez-Osorio *et al.* (2012) hicieron una investigación acerca de la adaptabilidad a los medios de cultivo y a las dietas formuladas del lenguado (*Paralichthys aestivalis*) y de la totoaba (*Tototaba macdonaldi*), y encontraron que las dos son especies viables para la acuicultura. Así mismo, Abdo de la Parra *et al.* (2013) desarrollaron la biotecnología para la producción masiva de juveniles del botete diana *Sphoeroides annulatus*, un pez marino con alto valor comercial en el mercado mexicano; desarrollaron los protocolos para la inducción hormonal, el desove, la fertilización y la incubación de huevos, y los cultivos de alimento vivo y de larvas, por lo que hay gran viabilidad para su desarrollo acuícola. También se han desarrollado sistemas de cultivo para el pargo *Lutjanus guttatus* (Hernández *et al.*, 2015), una especie marina de amplio consumo en el mundo; los autores encontraron que su cultivo es viable de explotación comercial usando cajas de flotación. La adaptación de los organismos marinos es de gran importancia ya que son un potencial en la industria acuícola, además de la factibilidad económica considerando su posible consumo y rendimiento.

### Impacto económico de la acuicultura

Ninguna actividad económica, ha alcanzado en estos últimos 30 años un crecimiento tan acelerado como la camaricultura en las zonas costeras del mundo. A diferencia de periodos previos de aceleramiento de otras actividades como la agricultura y el turismo, el desarrollo de la camaricultura, paralelamente ha estado acompañado por un debate controvertido y cada vez mayor sobre los impactos ambientales, económicos y sociales. Actualmente su crecimiento se ha mantenido pero a un menor ritmo. México, al igual que otros países del sureste Asiático y parte de Latinoamérica, ha experimentado tal expansión. Entre las causas que permiten explicar los elevados índices de crecimiento de la camaricultura están la alta demanda del mercado (sobre todo de los países desarrollados), el avance tecnológico y la reducción de los volúmenes de producción procedentes de las poblaciones silvestres (por la sobre-explotación) (FAO, 2014).

La acuicultura suministró al mundo unas 47.2 millones de toneladas de productos en 2006, 63.6 millones de toneladas de productos en 2011 (con un valor total estimado de 119 000 millones de USD) y a máximo histórico de 90.4

millones de toneladas en 2012 (con un valor total estimado de 144 400 millones de USD). En América, la producción acuícola representó el 4.78% de la producción mundial del 2012, y México contribuyó con el 7.7% del total producido en el continente (FAO, 2012). En se mismo año, el litoral del Pacífico aportó el 61.5% de la producción acuícola de México (con un valor de 5 592.0 millones de pesos), y de esa producción, el 37.3% fue de camarón (con un valor de 3 628.3 millones de pesos) y el 45.2% fue de tilapia (con un valor de 1 055.1 millones de pesos). De esta región, Sinaloa y Sonora son los mayores productores acuícolas de camarón, con el 78.6% de la producción. El impacto productivo de la actividad es innegable y su impacto en la generación de empleos es alto. En Sonora, se estima que el promedio de la población registrada en la captura y acuicultura de especies fue de 23 033 personas en el 2003, cifra que disminuyó a 14 549 personas en el 2013 (CONAPESCA, 2013); en cambio, en Sinaloa el promedio de la población fue de 41 648 personas en el 2003 y de 46 652 personas en el 2013. La disminución de las personas empleadas en Sonora está relacionado con las mortandades masivas en las granjas de cultivo de camarón, por diferentes agentes infecciones (principalmente el virus de la mancha blanca) ocurridas durante el 2010 y el 2014. Así, el impacto económico directo aproximado de la acuicultura en Sonora creció de 1 950 millones de pesos en el 2003 a 4 318 millones de pesos en el 2009, año en que alcanzó un máximo. En 2013, la producción de acuícola tuvo un aporte de unos 864 679 millones de pesos y se espera que crezca significativamente en los próximos años con la prevención de la prevalencia de las enfermedades (CONAPESCA, 2013).

### Efectos adversos de la acuicultura

La acuicultura del camarón se ha convertido en una de las principales industrias de muchos países costeros de la franja tropical y subtropical, destinándose la mayor parte de su producción a la exportación. Económicamente es una actividad altamente rentable por lo que se apoya y fomenta en países en vías de desarrollo, en muchos casos minimizando su potencial de impacto a los ecosistemas costeros. El crecimiento de la actividad industrial camaronícola ha sido resultado, en gran medida, de un proceso de agotamiento o reducción de las capturas por pesca. A partir de 1950 y hasta mediados de la década de los ochenta, el incremento en la captura de los recursos pesqueros fue en aumento, pasando de aproximadamente 20 millones a cerca de 70 millones de toneladas por año. De 2006 a 2011 la captura de pesca continental y marítima de mantuvo en alrededor 90 millones de toneladas anuales, mientras que la acuicultura pasó de 47.3 millones de toneladas en 2006 a 66.6 millones de toneladas en 2012 (FAO, 2014).

En términos del desarrollo sustentable, entendido como el crecimiento ordenado de las actividades humanas, con mínimo impacto sobre los sistemas naturales, que permita el mantenimiento de sus funciones vitales, evite la extinción de especies y prolongue el uso de los recursos y servicios que se desprenden de su utilización, el crecimien-

to acelerado de la camaronicultura representa un dilema en México, sobre todo por los posibles impactos al medio ambiente. Los impactos adversos pueden ser mayores y de carácter irreversible en los estados adyacentes al Golfo de California (Baja California, Baja California Sur, Sonora, y Sinaloa), considerando que producen el mayor porcentaje del camarón de acuicultura (81.8% de la producción nacional en el 2013). Diversos estudios han documentado conflictos con otras actividades productivas (pesca, agricultura y turismo), la deforestación de bosques de manglares y diversos tipos de contaminación (Páez-Osuna *et al.*, 1998; Páez-Osuna *et al.*, 2003; Miranda *et al.*, 2007; Berlanga-Robles *et al.*, 2011; Serrano-Grijalva *et al.*, 2011).

Otro efecto adverso importante del desarrollo acuícola es el cambio en el uso del suelo, ya que modifica el desarrollo hidrológico de los ecosistemas, afectando la capacidad del almacenamiento de agua y los patrones de drenaje de los paisajes, que acopladas con un cambio radical de la vegetación, resultan en la disminución en las tasas de captación y residencia del agua dentro de las cuencas (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 2001). El impacto del cambio en los usos del suelo sobre los ecosistemas, depende del grado de modificación del hábitat, así como de los patrones y de la extensión del cambio, llegando a afectar la conectividad de los paisajes, inhibiendo de esta manera la capacidad de algunos procesos ecológicos para moverse a través del paisaje. Si la conectividad de un paisaje es alterada por la creación de obras de infraestructura para la camaronicultura, como por ejemplo canales de entrada y salida de agua, y bordos de contención, las poblaciones con poca o escasa movilidad quedarían aisladas y, en casos extremos, podrían llegar a la extinción local debido a la inestabilidad demográfica o por la exacerbación de las interacciones competitivas, ya que en hábitats aislados la disponibilidad de recursos disminuye (Gardner *et al.*, 1991).

Otra situación relacionada con el cambio de uso de suelo es la deforestación. En el noroeste de México, diversos estudios se han realizado en diferentes regiones de Sinaloa con el propósito de valorar el grado de desarrollo de la camaronicultura y otras actividades antropogénicas (agricultura, urbanismo y turismo), su impacto en manglares y marismas como en los ecosistemas terrestres circundantes. Desde 1973 hasta el 2000, la mayoría de los estudios encontraron impactos menores de deforestación de manglares por el desarrollo acuícola en las costas de Sinaloa (Ramírez-Sabala, 1998; Agraz-Hernández, 1999; Hernández-Cornejo y Ruiz-Luna, 2000; Lieberknecht, 2000; Martín-Aristín, 2000). Sin embargo, Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (1999) observaron un proceso de desecación del cuerpo lagunar Huizache-Caimanero, con una pérdida del 20% del espejo de agua de 1973 a 1997 y una significativa disminución en los manglares (50% de la superficie total) de 1973 a 1990, con una tendencia de mantenerse constante de 1990 a 1997; estos deterioros fueron asociados tanto a la agricultura como a la acuicultura. Aunque los análisis digitales de perturbación en manglares por la acuicultura en México se han realizado mediante diversas técnicas apli-

cadras a imágenes de satélite y han demostrado una perturbación poco significativa, estas estimaciones determinan la cobertura vegetal y no la estructura forestal en términos de la densidad y el área basal. Agraz-Hernández (1999) observó en el Estero de Urías una disminución del 50% en la densidad del manglar adyacente a una granja camaronícola en comparación con manglares en otros sitios del mismo sistema. Un estudio reciente demostró que hay una deforestación significativa de manglares en el ecosistema Teacapán-Agua Brava-Las Haciendas del sur de Sinaloa, con una degradación del 40% del área de manglar total (Kovacs *et al.*, 2009). Esto es evidencia del desplazamiento de estos tipos de manglar por la estanquería de la camaronicultura. La magnitud del deterioro y sus implicaciones aún se desconocen.

Por otro lado, el uso del suelo también modifica cualitativa y cuantitativamente la entrada y salida de nutrientes en el área costera, siendo uno de los impactos más comunes la eutrofización de las aguas a partir de la lixiviación de los fertilizantes y de las descargas de materia orgánica. Esta materia orgánica contiene una gran cantidad de nutrientes en sus distintas formas químicas ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{PO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), además de sólidos orgánicos suspendidos (Clorofila *a* y materia orgánica particulada). A corto plazo, esto produce efectos como el deterioro de la calidad del agua en las aguas receptoras (disminución del oxígeno disuelto y reducción de la penetración de la luz), y a mediano y largo plazo cambios en la macrofauna béntica, la eutrofización y las mareas rojas. La eutrofización genera un enriquecimiento neto de nutrientes y produce el aumento en la producción primaria y secundaria (Páez-Osuna *et al.*, 1997; 2003). Los efectos adversos potenciales provocados por los efluentes de los estanques camaronícolas sobre la calidad del agua de los ambientes receptores dependen, por un lado de la magnitud y la composición de las descargas, y por el otro de las características de las aguas receptoras en cuanto a la calidad del agua que originalmente tienen, la tasa de dilución, la capacidad de asimilación, el tiempo de residencia del agua y el régimen de mareas (Páez-Osuna *et al.*, 1997; 1998; Barraza-Guardado *et al.*, 2015).

La cantidad de efluentes y la cantidad de materia orgánica en los mismos dependerá, asimismo, del sistema de cultivo que se emplee, del Factor de Conversión Alimenticia (FCA, definido como la relación de la cantidad de alimento añadido, en peso seco, dividido entre el peso húmedo de camarón cosechado) (Casillas-Hernández, *et al.*, 2006; Miranda, *et al.*, 2007) y de las condiciones en las que se realice el cultivo (Páez-Osuna *et al.*, 1997; Páez-Osuna, 2001b). Así, mientras los estanques de tipo extensivo producen pocos desechos, los de tipo semi-intensivo producen cargas intermedias, y es claro que con el grado de intensificación (i.e. mayor densidad de siembra, uso de agua, alimento y fertilizantes), se produce una mayor carga de desechos. Páez-Osuna *et al.* (1997) calcularon los aportes totales de fósforo (P) y nitrógeno (N) de las descargas de una granja camaronícola bajo el sistema semi-intensivo y estimaron que el aporte es de 8.4 kg P/ha y 52.1 kg N/ha, por cada ciclo de cultivo. Considerando todas

las posibles salidas de nutrientes en la camaronicultura, la ruta de salida más importante de fósforo y nitrógeno es a través de los efluentes de descarga y su acumulación en los sedimentos. Basados en los valores antes mencionados y haciendo las consideraciones de las superficies destinadas a la camaronicultura en el Noroeste de México durante 1997, se estimó que en esa región se vertieron 403 ton de fósforo y 2501 ton de nitrógeno en ese año. Páez-Osuna (2001c) hizo una estimación del aporte de P y N de la camaronicultura haciendo una equivalencia con lo que produce un habitante en Sinaloa, de acuerdo a datos estimados en 1998 (6 g N por habitante/día y 1.4 g P por habitante/día) (Páez-Osuna *et al.*, 1998). Así, la carga de los efluentes de los estanques camaronícolas representa un aporte de nutrientes que corresponde al generado como aguas municipales (sin tratar) producidas por 789 000 y 1 142 000 habitantes en términos de fósforo y nitrógeno, respectivamente. Es pertinente aclarar que las principales fuentes de N y P en la zona costera del noroeste de México son la agricultura (141 232 ton N/año y 35 272 ton P/año) y las descargas municipales (49 980 ton N/año y 16 097 ton P/año) (Páez-Osuna *et al.*, 1998). Esto indica que globalmente, el aporte de la camaronicultura es solamente del orden de 1.5 y 0.9% del aporte antropogénico de fósforo y nitrógeno, respectivamente. Sin embargo, los efluentes acuícolas pueden llegar a ser críticos para los cuerpos de aguas receptores, sobre todo considerando el crecimiento que ha tenido la camaronicultura desde 1998 a la actualidad.

La respuesta de las aguas costeras a la adición de nutrientes depende de varios factores, entre ellos, de la estratificación y de la turbidez. Frecuentemente tales adiciones promueven los florecimientos algales y conducen a la eutrofización y sus problemas asociados. Estos eventos crean hipoxia o anoxia en aquellos cuerpos de agua susceptibles culminando en algunos casos con mortandades de organismos diversos. En México, muchos de los más importantes puertos y poblaciones pesqueras están comenzando a manifestar, localmente, síntomas de contaminación por nutrientes (Páez-Osuna *et al.*, 1998), tal es el caso de Bahía de Guaymas, Bahía y Puerto de Mazatlán, lagunas de Cancún y Puerto de Veracruz. Particularmente, las mareas rojas (tóxicas y no tóxicas) y los florecimientos de fitoplancton son producidos por varias especies de microalgas, eventos generalmente asociados a los dinoflagelados por las especies involucradas en esos fenómenos. La mayoría de las especies pertenecen al plancton y solamente algunas son bentónicas. En México se han identificado alrededor de 157 especies asociadas con mareas rojas, siendo potencialmente tóxicas 45. Actualmente se han identificado 70 especies plantónicas y no plantónicas tóxicas en las costas de México; entre ellas, tres especies han sido relacionadas con casos de envenenamiento y mortalidad de peces (*Gymnodinium catenatum*, *Gymnodinium brevis*, *Pyrodinium bahamense* y *Karenia brevis*), pero hay muchas otras especies de las que aún se desconoce su toxicidad (Cortés-Altamirano *et al.*, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Hernández-Becerril, 2014).

### Uso de los isótopos estables de C y N en la acuicultura

Los isótopos son elementos que contienen el mismo número de protones pero diferente número de neutrones; los isótopos estables no sufren decaimiento en el tiempo (Fry, 2006; Hoefs, 2009). El carbono tiene dos isótopos estables ( $^{12}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$ ) con una abundancia de 98.93% y 1.07%, respectivamente; mientras que el nitrógeno posee también dos isótopos estables ( $^{14}\text{N}$  y  $^{15}\text{N}$ ), con una abundancia relativa de 99.63% y 0.37%, respectivamente (Cabana y Rasmussen, 1994; Burdige, 2006; Fry, 2006).

El uso de los isótopos estables de C y N se ha incrementado de manera considerable en las últimas décadas y su uso se ha vuelto común en distintas ramas de la ciencia (Burdige, 2006; Fry, 2006). Su aplicación ha sido en estudios de tramas tróficas y también para seguir la ruta de los contaminantes en los ecosistemas y la manera en que se reflejan en los organismos. Los diferentes procesos bioquímicos que ocurren en los organismos son selectivos en la utilización de los isótopos pesados ( $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$ ) respecto a los ligeros ( $^{12}\text{C}$  y  $^{14}\text{N}$ ), produciendo lo que se conoce como fraccionamiento isotópico. Las abundancias isotópicas se expresan en valores  $\delta$  (partes por mil, ‰), con respecto a la composición de un estándar. Se ha demostrado que el enriquecimiento de  $\delta^{13}\text{C}$  entre una fuente de carbono y otra es un aproximadamente 1‰, mientras que para  $\delta^{15}\text{N}$  la variación entre un nivel trófico y otro es entre 3 y 4 ‰ (Cabana y Rasmussen, 1994; Fry, 2006). Así, los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  indicarán las fuentes de nutrientes, mientras que los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  indicarán las relaciones tróficas (Burdige, 2006; Fry, 2006).

La acuicultura tiene ciclos anuales y los estanques de cultivo son saneados antes de iniciar cada ciclo. El saneamiento implica que los desechos de los cultivos deben ser confinados a lagunas de oxidación; sin embargo, se ha documentado vertimiento a ecosistemas aledaños (principalmente lagunas costeras) y el desbordamiento de lagunas de oxidación, por lo que se generan grandes cargas de materia orgánica residual. Estudios con isótopos de C y N permiten discriminar entre las diversas fuentes de materia orgánica (terrestre o marina, natural o antropogénica), incluso para distinguir mezclas complejas como las industriales, domésticas y/o agrícolas (Fry, 2006; Vizzini y Mazzola, 2006; Serrano-Grijalva *et al.*, 2011; Holl *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2014). Las descargas de materia orgánica de origen antropogénico pueden provocar cambios en la composición y distribución de los microorganismos, que a su vez pueden provocar cambios en la ecología de los ecosistemas (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2000; Valiela, 2006). El efecto de estas descargas puede ser evaluado por la composición de isótopos de C y N de los diferentes componentes del ecosistema (agua, sedimento y los organismos), y pueden relacionarlos con las fuentes de la materia orgánica al medir la composición de las diferentes fuentes (Fry, 2006; Vizzini y Mazzola, 2006; Holl *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2014).

Generalmente, los efluentes acuícolas tienen una composición isotópica de  $\delta^{15}\text{N}$  entre 4.2 y 6‰, mientras que los ecosistemas costeros tropicales y subtropicales tienen

una composición isotópica <3‰ (Lin y Fong, 2008; Holl *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2014). Los organismos de ecosistemas impactados con descargas acuícolas poseen composiciones de  $\delta^{15}\text{N}$  elevadas, lo que se atribuye al fraccionamiento que ocurre durante los procesos de amonificación y volatilización de los compuestos nitrogenados, los cuales se ven reflejados en un enriquecimiento de  $^{15}\text{N}$  (Holl *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2014). De igual manera, el fitoplancton incorpora y utiliza con mayor facilidad el  $^{14}\text{N}$ , lo cual resulta en un enriquecimiento de  $^{15}\text{N}$  en la materia orgánica residual y que es consumida por los consumidores primarios (Hoefs, 2009; Holl *et al.*, 2012). El uso de isótopos estables de C y N en una herramienta muy valiosa para medir los impactos de las diferentes actividades antropogénicas (Burdige, 2006; Fry, 2006), entre las que está la acuicultura, y con ello evaluar y proponer medidas para el desarrollo sustentable.

### Medidas para un desarrollo sustentable

El desarrollo que ha tenido la acuicultura y el futuro de esta actividad ha despertado diversas inquietudes con respecto a la conservación funcional de los ecosistemas costeros, en particular de los manglares y los ecosistemas lagunares y por lo tanto en las pesquerías locales y la biodiversidad. La actividad acuícola requiere de un suministro de agua con las características adecuadas para el óptimo desarrollo de la especie en cultivo, lo que hace necesario la conservación de la zona costera aledaña ya que es la fuente de abastecimiento de agua. Esto hace indispensable un plan de manejo integral por subcuenca hidrológica o unidad hidrológica que regule todas las actividades que se realizan en la zona así como de medidas de mitigación y restauración hidrológica de ecosistemas afectados en menor o mayor grado (Flores-Verdugo *et al.*, 1992). El enfoque principal de este plan de manejo debe ser el mantenimiento de los procesos naturales de los diferentes ecosistemas que lo integran, considerando todas las posibles interacciones, que permitan evaluar la capacidad de carga de la zona, y buscar tecnologías más eficientes y de menor impacto ambiental. Un ejemplo ha sido la implementación de estrategias para el cumplimiento de la Norma Oficial Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente de México, en la que se limitan los sólidos suspendidos y nutrientes en las descargas, obligan la utilización de biofiltros y la disposición de sedimentos acumulables. Salvo escasas excepciones, estos ordenamientos han obedecido a intereses sectoriales, resultando contraproducentes para el manejo apropiado de recursos naturales a largo plazo.

En aras de resolver los problemas asociados con la actividad acuícola, se han propuesto una serie de medidas para mitigar los efectos de los efluentes de las granjas de cultivo (Hopkins *et al.*, 1995; Thi Anh *et al.*, 2010). Entre estas están: a) apoyar los sistemas productivos que reducen las tasas de recambio de agua, aprovechando los procesos autodigestivos en los estanques; b) eliminar el intercambio de agua reduciendo la densidad de siembra y tasa de alimentación; c) usar un área específica a la salida del agua de la granja, para remoción de nutrientes y sólidos, y con ello disminuir

la demanda bioquímica de oxígeno antes de descargar; y d) usar estanques de tratamiento y canales de retroalimentación para reciclar completamente el agua. Asimismo, Agraz-Hernández *et al.* (2001) propusieron algunos criterios ecológicos como medidas de mitigación de la actividad acuícola sobre las zonas de manglares. Destacan, por un lado, el mantenimiento del patrón y capacidad hidrológica a través de obras de cabecera que estén basados en estudios de la capacidad hidrológica y la distribución de vegetación; y por otro, la creación de zonas de amortiguamiento, para lo que el 30% del espacio autorizado a las granjas deberá mantenerse en su forma original, como zona de amortiguamiento entre la granja y los cultivos para limitar la intrusión salina a los cultivos, evitar inundaciones, mantener el libre desagüe de las marismas hacia la laguna adyacente, se una zona potencial de colonización de manglares.

Entre los mecanismos propuestos para hacer más eficiente la producción acuícola, y por ende, reducir los impactos adversos sobre los ecosistemas, destacan tres. Uno es la reducción de la cantidad de agua en el cultivo a través de la aireación con ozono, que permite la purificación del agua y su reutilización, con la consecuente disminución en el recambio de agua; actualmente esta técnica se emplea principalmente en la camaricultura en Estados Unidos, Tailandia, Corea y la India. Otro es hacer más efectivo el uso del alimento, para lo que debe conocer la demanda precisa de alimento por parte de las especies de cultivo y determinar el FCA de la dieta suministrada, para evitar el uso excesivo del alimento; esto se ha hecho en varios países asiáticos con muy buenos resultados. Un tercero es la reducción del uso de medicamentos y químicos en los sistemas de cultivo, en donde el productor debe ser asesorado por especialistas sobre aplicación de los productos en etapas precisas del cultivo; esto también ha tenido buenos resultados en países asiáticos y en Estados Unidos (Thi Anh *et al.*, 2010).

Sin embargo, las alternativas para el uso de los efluentes, y al mismo tiempo optimizar el uso de los flujos energéticos, han sido más prometedoras. Una muy importante es el desarrollo de sistemas de producción multiespecíficos en lugar de los típicos sistemas de producción monoespecíficos (Thi Anh *et al.*, 2010; Mariscal-Lagarda *et al.*, 2012; Martínez-Porchas y Martínez-Cordova, 2012). Por ejemplo, Hopkins *et al.* (1995) propusieron la integración del cultivo de moluscos bivalvos a estanques de cultivo intensivo de camarón, de dos maneras: la primera llevando a cabo el cultivo de moluscos dentro del estanque de camarón y la segunda a la salida del efluente de los estanques. En México esto puede ser viable ya que hay muchas especies nativas que pueden ser aprovechadas, incluso usar especies no nativas como el ostión *C. gigas*. Los moluscos bivalvos son filtro-alimentadores con una alta capacidad para remover material suspendido y son transformadores de la energía, además de ser bioindicadores de las características del ambiente acuático (Lin *et al.*, 1995). Por otro lado, las macroalgas también han sido utilizadas para remover nutrientes en sistemas acuícolas con resultados positivo, con lo que se logró reducir el riesgo de eutroficación

de los cuerpos de agua adyacentes a instalaciones acuícolas por exceso de nutrientes. Cuando moluscos y macroalgas son empleados adecuadamente en un sistema biológico, es posible restablecer parcialmente las características de calidad del agua y convertir los materiales eliminados en biomasa (Shpigel *et al.*, 1993; Neori *et al.*, 2004; Martínez-Córdova *et al.*, 2011; Robles de Jesús *et al.* 2016). También se ha propuesto el uso de manglares combinados con otros productores primarios y organismos filtradores, como sistemas eficientes en la remoción de nutrientes en la acuicultura del camarón y de peces (Neori *et al.*, 2004). Más recientemente, Mariscal-Lagarda *et al.* (2012) propusieron el cultivo integral de camarón y tomate para el óptimo aprovechamiento de los efluentes de la acuicultura, en un sistema con agua de baja salinidad y que re-utiliza sus efluentes en el cultivo de tomate; esto fue viable, con rendimientos comerciales tanto de camarón como de tomate, y que puede ser implementado en regiones semi-áridas y áridas, por ejemplo el noroeste de México donde el agua es una limitante. El tratamiento biológico y la re-utilización de los efluentes desempeña un papel muy importante en la búsqueda de la sustentabilidad de la acuicultura (Neori *et al.*, 2004; Mariscal-Lagarda *et al.*, 2012; Martínez-Cordova *et al.*, 2012), cuando se aplican en un sistema de producción integral que provea beneficios sociales y sea amigable y respetuoso con el medio ambiente (Shpigel *et al.*, 1993; Hopkins *et al.*, 1995; Neori *et al.*, 2004; Mariscal-Lagarda *et al.*, 2012).

Es urgente atacar la problemática generada por las diferentes actividades humanas, no solo de la acuicultura, en la zona costera debido al deterioro que la mayoría han provocado. Por ejemplo, Bojórquez-Tapia (1992), con base a análisis de tendencia mediante simulaciones para 40 años, concluye que hay una interacción alta y negativa de la agricultura y la camaricultura sobre el patrón hidráulico; una interacción baja y negativa entre los asentamientos humanos y el patrón hidráulico; y una asociación alta y positiva entre el patrón hidráulico y el sistema lagunar y los manglares. Esto sugiere que de no cambiarse las tendencias actuales en un futuro cercano, es de esperarse un impacto acumulativo elevado en los ecosistemas de manglar y lagunares costeros, principalmente por las actividades agrícolas y acuícolas. Particularmente en México, se ha proyectado un desarrollo acuícola potencial de 335 mil ha, basados principalmente en la disponibilidad de amplias marismas susceptibles de transformarse en estanquería acuícola, bajo la justificación de considerar a estos ambientes como improductivos (De la Lanza-Espino *et al.*, 1993). La realidad es que aún se desconoce la función ecológica completa de las marismas, así como la capacidad de carga de los ecosistemas lagunares adyacentes para remover los nutrientes de los efluentes de las granjas. Uno de los atributos ecológicos conocidos de las marismas es el de funcionar como sistemas de amortiguamiento de las inundaciones y como reservorios estacionales de agua. Se ha propuesto que los sistemas más económicos y eficientes para el control de las inundaciones es la conservación de las llanuras de inundación estacional en su estado natural.

La época de inundación de muchas marismas coincide con la temporada de migración invernal de diversas aves, que utilizan estos ecosistemas como áreas de descanso y alimentación. Consecuentemente se requiere de una cuidadosa planeación integral de actividades, desde un punto de vista holístico y que incluyan la conservación de todos los ecosistemas por la ruta del mínimo conflicto (Agraz-Hernández *et al.*, 2001).

La acuicultura sustentable tiende cada día a enfocarse más hacia el uso de los fundamentos de la ecotecnología, como es la capacidad de auto-organización y auto-mantenimiento de los humedales naturales y semi-naturales, reconociendo los valores de los ecosistemas naturales y su biodiversidad. Esta tecnología está basada en la energía solar por lo que su manipulación requiere de un mínimo de subsidios energéticos y en simbiosis con el entorno natural (Agraz-Hernández *et al.*, 2001).

## CONCLUSIONES

La acuicultura es una actividad económica de gran desarrollo en el Golfo de California, principalmente la camaricultura en los estados de Sinaloa y Sonora. Su impacto económico benéfico es evidente, ya que genera empleos en varios ámbitos y genera divisas porque buena parte de su producción se exporta, principalmente a Estados Unidos. Sin embargo, se han documentado diversos impactos adversos como el cambio de uso de suelo, el deterioro de ecosistemas y la contaminación por descargas. Estos últimos impactos pueden ser estudiados a través del uso de isótopos de C y N, que permitan desarrollar estrategias para el desarrollo sustentable de la acuicultura.

## REFERENCIAS

- Abdo de la Parra, M.I., Rodríguez-Ibarra, L.E., García-Aguilar, N., Velasco-Blanco, G. y Ibarra-Castro, L. 2013. Biotecnología para la producción masiva de juveniles del botete diana *Spherooides annulatus*: inducción hormonal y cultivo larvario. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 48(3):409-420.
- Agraz-Hernández, C.M. 1999. Reforestación experimental de manglares en ecosistemas lagunares estuarinos de la costa noroccidental de México. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. 136 p.
- Agraz-Hernández, C.M., Flores-Verdugo, F.J. y Calvario-Martínez, O. 2001. Impacto de la camaricultura en ecosistemas de manglar y medidas de mitigación. En *Camaronicultura y Medio ambiente*. F. Páez-Osuna (Ed.). Unidad Académica Mazatlán. UNAM. Mazatlán, Sinaloa, México, D.F. pp. 373-393.
- Alonso-Rodríguez, R., Páez-Osuna, F. y Cortés-Altamirano, R. 2000. Trophic conditions and stoichiometric nutrient balance in subtropical waters influenced by municipal sewage effluents in Mazatlán Bay (SE Gulf of California). *Marine Pollution Bulletin*. 40(4):331-339.
- Audemard, C., Reece, K.S. y Burreson, E.M. 2004. Real-Time PCR for Detection and Quantification of the Protistan Parasite *Perkinsus marinus* in Environmental Waters. *Applied and Environmental Microbiology*. 70: 6611-6618.

- Barraza-Guardado, R.H., Arreola-Lizárraga, J.A., Miranda-Baeza, A., Juárez-García, M., Juvera-Hoyos, A., y Casillas-Hernández, R. 2012. Enhancing ecoefficiency in shrimp farming through interconnected ponds. *BioMed Research International*. Vol. 2015, Article ID 873748, 10 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/873748>.
- Benítez García, J.L. y Portillo Clark, R.G. 2011. Comité de Sanidad Acuícola en Sonora, A.C. (COAES). Programa de Trabajo de Sanidad Acuícola del Programa de Soporte para Camarón. Informe final del ciclo 2011. Disponible en <http://www.cosaes.com/>
- Berlanga-Robles, C.A., Ruiz-Luna, A. y Hernández-Guzmán, R. 2011. Impact of shrimp farming on mangrove forest and other coastal wetlands: the case of Mexico. En *Aquaculture and the Environment. A Shared Destiny*. Barbara Sladonja (Ed.), 17-22 pp., InTech. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/aquaculture-and-the-environment-a-shared-destiny/impact-of-shrimpfarming-on-mangrove-forest-and-other-coastal-wetlands-the-case-of-mexico>.
- Bojorquez-Tapia, L. 1992. Programa de Ordenamiento Ecológico para el desarrollo acuícola de la región costera de Sinaloa y Nayarit. Proyecto de Ordenamiento Ecológico de Regiones Geográficas con Actividades Productivas Prioritarias. OEA. Depto. de Desarrollo Regional y Medio Ambiente, SEDESOL-INE. 93 p.
- Burdige, D.J. 2006. Isotope geochemistry. En *Geochemistry of Marine Sediments*. Princeton University Press. New Jersey. pp 27-45.
- Cabana, G. y Rasmussen, J.B. 1994. Modelling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes. *Nature*. 372:255-257.
- Cáceres-Martínez, J., Ramírez-Gutiérrez, S., Vásquez-Yeomans, R., y Macías-Montes de Oca, P. 2004. Reproductive cycle and mortality of the Japanese oyster *Crassostrea gigas* cultured in Bahía Falsa, Baja California, Mexico. *Journal of Shellfish Research*. 23:795-801.
- Casillas-Hernández, R., Magallón-Barajas, F., Portillo-Clark, G. y Páez-Osuna, F. 2006. Nutrient mass balances in semi-intensive shrimp ponds from Sonora, Mexico using two feeding strategies: Trays and mechanical dispersal. *Aquaculture*. 258:289-298.
- Castillo-Durán, A., Chávez-Villalba, J., Arreola-Lizárraga, A. y Barraza-Guardado, R. 2010. Comparative growth, condition, and survival of juvenile *Crassostrea gigas* and *C. corteziensis* oysters cultivated in summer and winter. *Ciencias Marinas*. 36(1):29-39.
- CONAPESCA. 2011. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2011. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 311 p.
- CONAPESCA. 2013. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2013. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 299 p.
- Cortés-Altamirano, R., Alonso-Rodríguez, R. y Sierra-Beltrán, A. 2006. Fish mortality associated with *Chattonella marina* and *C. cf. ovata* (Raphidophyceae) blooms in Sinaloa (Mexico). *Harmful Algae News* 31: 7-8.
- COAES. 2014. Informe final ciclo 2014: Seguimiento a los cultivos de camarón del estado de Sonora. Comité de Sanidad Acuícola del Estado de Sonora, A.C. 98 p.

- De la Lanza-Espino, G., García-Calderón, J. L., Tovilla-Hernández, C. y Arredondo-Figueroa, J. L. 1993. Ambientes y Pesquerías en el litoral Pacífico Mexicano. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- FAO. 2014. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2014. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO. Roma. 274 p.
- Flores-Verdugo, F., González-Farías, F., Zamorano, D. S. y Ramírez-García, P. 1992. Mangrove ecosystems of the Pacific coast of Mexico: distribution, structure, litterfall, and detritus dynamics. In Coastal Plant Communities of Latin America, ed. U. Seeliger, pp. 269-288. Academic Press, San Diego, CA.
- Fry, B. 2006. Stable Isotopes Ecology. Springer Science Business Media, LLC. 308 pp.
- Gardner, R.H., O'Neill, R.V., Turner, M.G. y Lavorel, S. 1991. Simulation of the scale-dependent effects of landscape boundaries on species persistence and dispersal. En Holland M.M., Risser P.G. y Naiman R.J. (Eds.). Ecotones: The role of landscape boundaries in the management and restoration of changing environments. Chapman and Hall, New York. p. 76-89.
- Hernández-Becerril, D.U., Alonso-Rodríguez, R., Alvarez-Góngora, C., Barón-Campis, S.A., Ceballos-Corona G., Herrera-Silveira, J., Meave del Castillo, M.E., Juárez-Ruiz, N., Merino-Virgilio, F., Morales-Blake, A., Ochoa, J.L., Orellana-Cepeda, E., Ramírez-Camarena, C. y Rodríguez-Salvador, R. 2007. Toxic and harmful marine phytoplankton and microalgae (HABs) in Mexican Coasts. Journal of Environmental Science and Health Part A. 42:1349-1363.
- Hernández-Becerril, D.U. 2014. Biodiversidad de algas planctónicas marinas (Cyanobacteria, Prasinophyceae, Euglenophyta, Chrysophyceae, Dictyochophyceae, Eustigmatophyceae, Parmophyceae, Raphidophyceae, Bacillariophyta, Cryptophyta, Haptophyta, Dinoflagellata) en México. Revista Mexicana de Biodiversidad. 85: S44-S53.
- Hernández-Cornejo, R. y Ruiz-Luna, A. 2000. Development of shrimp farming in the coastal zone of southern Sinaloa (Mexico): operating characteristics, environmental issues, and perspectives. Ocean & Coastal Management. 43:597-607.
- Hernández, C., Ibarra-Castro, L., Hernández, C.H., Quintero-Martínez, G., Aragón-Noriega, E.A. y Tacon, A.G. 2015. Growth performance of spotted rose snapper in floating cages and continuous water-flow tank systems. North American Journal of Aquaculture. 77:423-428.
- Hoefs, J. 2009. Stable isotope Geochemistry. University of Göttingen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 293 pp.
- Hopkins, J.S. De Voe, M.R. y Holland, A.F. 1995. Environmental impacts of shrimp farming with special references to the situation in the United States. Estuaries. 8(1):25-42.
- IAES. 2012. Instituto de Acuicultura del Estado de Sonora. [http://www.iaes.gob.mx/index.php?pag=m\\_blog&gad=detalle\\_entrada&entry=126&n\\_pag=8](http://www.iaes.gob.mx/index.php?pag=m_blog&gad=detalle_entrada&entry=126&n_pag=8)
- IAES. 2016. Instituto de Acuicultura del Estado de Sonora. Directorio Acuicola. <http://www.iaes.gob.mx/index.php?pag=directorio-acuicola>.
- Kovacs, J.M., King, J.M.L., Flores de Santiago, F. y Flores-Verdugo, F. 2009. Evaluating the condition of a mangrove forest of the Mexican Pacific based on an estimated leaf area index mapping approach. Environmental Monitoring and Assessment. 157:137-149.
- Lieberknecht, L. 2000. Coastal land use and land use changes in Sinaloa, Mexico. An analysis using LandSat MSS and TM imagery. Tesis de Maestría. University of Wales, Bangor. 138 p.
- Lin, C.K., Ruamthaveesub, P. y Wanuchsoontorn, P. 1995. Integrated culture of green mussel (*Perna viridis*) in wastewater from an intensive shrimp pond: concept and practice. World Aquaculture. 24(2):68-77.
- Lin, D. T. y Fong, P. 2008. Macroalgal bioindicators (growth, tissue N,  $\delta^{15}\text{N}$ ) detect nutrient enrichment from shrimp farm effluent entering Opunohu Bay, Moorea, French Polynesia. Marine Pollution Bulletin. 56:245-249.
- Mariscal-Lagarda, M.M., Páez-Osuna, F., Esquer-Méndez, J.L., Guerrero-Monroy, I., Romo del Vivar, A. y Félix-Gastelum, R. 2012. Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: Management and production. Aquaculture. 366-367:76-84.
- Martín-Aristín, A.C. 2000. Mangrove mapping and carrying capacity assesment of a tropical coastal lagoon in Mexico. Tesis de Maestría. University of North Wales. 97 p.
- Martínez-Córdova, L. R., López-Elías, J. A., Leyva-Miranda, G., Armenta-Ayón, L. y Martínez-Porchas, M. 2011. Bioremediation and reuse of shrimp aquaculture effluents to farm whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*: a first approach. Aquaculture Research. 42(10):1415-1423.
- Martínez-Córdova, L.R. Emerenciano, M., Miranda-Baeza, A. y Martínez-Porchas, M. 2014. Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: an updated review. Reviews in Aquaculture. 6:1-8
- Martínez-Porchas, M. y Martínez-Córdova, L. 2012. World Aquaculture: Enviromental Impacts and Troubleshooting Alternatives. The ScientificWorld Journal. doi:10.1100/2012/389623.
- Minjarez-Osorio, C., González-Félix, M. y Perez-Velazquez, M. 2012. Biological performance of *Totoaba macdonaldi* in response to dietary protein level. Aquaculture 362-363:50-54.
- Miranda, A., Voltolina, D., Brambilla-Gámez, M.A., Frías-Espericueta, M.G. y Simental J. 2007. Effluent characteristics and nutrient loading of a semi-intensive shrimp farm in NW Mexico. Vie et Milieu-Life and Environment. 57(1):1-7.
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A.H., Kraemer, G.P., Halling, C., Shpigel, M. y Yarish, C. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. Aquaculture. 231:361-391.
- Páez-Osuna, F., Guerrero-Galván, S.R., Ruiz-Fernández, A.C. y Espinoza-Angulo, R. 1997. Fluxes and mass balances of nutrients in a semi-intensive shrimp farm in North-western Mexico. Marine Pollution Bulletin. 34:290-297.
- Páez-Osuna, F., Guerrero-Galván, S. R. y Ruiz-Fernández, A.C. 1998. The environmental impact of shrimp aquaculture and the coastal pollution in Mexico. Marine Pollution Bulletin:36: 65-75.
- Páez-Osuna, F. 2001a. Flujo y balance de masas en estanques camarónicas. En Camaronicultura y Medio ambiente. F. Páez-Osuna (Ed.). Unidad Académica Mazatlán. UNAM. Mazatlán, Sinaloa, México, D.F. pp. 193-212.
- Páez-Osuna, F. 2001b. Impacto ambiental de la camaronicultura: causas, efectos y alternativas de mitigación. En

- Camaronicultura y Medio ambiente. F. Páez-Osuna (Ed.). Unidad Académica Mazatlán. UNAM. Mazatlán, Sinaloa, México, D.F. pp. 193-212.
- Páez-Osuna, F. 2001c. Descarga de nutrientes procedente de la camaronicultura, agricultura y las aguas municipales en la zona costera del Golfo de California. En Camaronicultura y Medio ambiente. F. Páez-Osuna (Ed.). Unidad Académica Mazatlán. UNAM. Mazatlán, Sinaloa, México, D.F. pp. 193-206.
- Páez-Osuna, F., Gracia A., Flores-Verdugo, F., Lyle-Fritch, L.P., Alonso-Rodríguez, R., Roque, A. y Ruiz-Fernández, A.C. 2003. Shrimp aquaculture development and the environment in the Gulf of California ecoregion. *Marine Pollution Bulletin*. 46:806-815.
- Ramírez-Sabala, J.R. 1998. Estimación de tendencias de cambio ambiental en el Estero de Urias, Sinaloa, México por medio de análisis multitemporal (1973-1997) con imágenes Landsat. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). 86 p.
- Ruiz-Luna, A. y Berlanga-Robles C.A. 1999. Modifications in coverage patterns and land use around the Huizache-Caimanero Lagoon System, Sinaloa, Mexico: A multi-temporal analysis using LANDSAT images. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49:37-44.
- Ruiz-Luna, A. y Berlanga-Robles, C. 2001. El potencial de la camaronicultura para transformar el paisaje en la zona costera. El sur de Sinaloa como caso de estudio. En Camaronicultura y Medio ambiente. F. Páez-Osuna (Ed.). Unidad Académica Mazatlán. UNAM. Mazatlán, Sinaloa, México, D.F. pp. 193-212.
- SAGARPA. 2013. Acuerdo mediante el cual se aprueba la actualización de la Carta Nacional Acuícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Diario Oficial de la Federación. Segunda Sección. Lunes 9 de septiembre de 2013.
- Serrano-Grijalva, L., Sánchez-Carrillo, S., Angeler, D.G. y Álvarez-Cobelas, M. 2011. Effects of shrimp farm effluents on the food web structure in subtropical coastal lagoons. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 402:65-74.
- Shpigel, M., Neori, A. Popper, D. y Gordin, H. 1993. A proposed model for "environmentally clean" landbased polyculture of fish, bivalves and seaweeds, *Aquaculture*. 117(1-2):115-128.
- Thi Anh, P., Kroeze, C., Bush, S.R. y Mol, A.P.J. 2010. Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: Causes and options for control. *Agricultural Water Management*. 97:872-882.
- Valiela, I. 2006. *Global Coastal Change*. Oxford (United Kingdom): Blackwell Scientific.
- Vizzini, S. y Mazzola, A. 2006. The effects of anthropogenic organic matter inputs on stable carbon and nitrogen isotopes in organisms from different trophic levels in a southern Mediterranean coastal area. *Sci. Total Environ*. 368:723-731.