

La pesca ilegal de la totoaba y su producción mediante acuacultura: trazabilidad y métodos para identificar el origen

Totoaba trade: Traceability and methods to identify wild and farmed fish

Julián Gamboa Delgado*

Universidad Autónoma de Nuevo León, México

julian.gamboadlg@uanl.edu.mx

 <http://orcid.org/0000-0001-9041-1388>

Recepción: 23 de febrero de 2024

Aprobación: 20 de septiembre de 2024



Ricardo Sánchez-Díaz

Instituto Tecnológico de Sonora, México

ricardo.sanchez@itson.edu.mx

 <http://orcid.org/0000-0003-2173-7995>

RESUMEN

Se examinan dos de los métodos que pueden apoyar la trazabilidad y conservación de totoaba y otras especies sujetas a pesca ilegal. Se enfatiza la aplicación de biomarcadores genéticos e isotópicos que han permitido discernir entre peces silvestres y los derivados de cultivo. En el caso de los biomarcadores isotópicos de carbono y nitrógeno, diferencian entre totoabas cultivadas ($\delta^{13}\text{C} = -18.3 \pm 0.6\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = 11.7 \pm 0.7\text{‰}$) y silvestres ($\delta^{13}\text{C} = -15.3 \pm 2.4\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = 21.7 \pm 3.7\text{‰}$). *Totoaba macdonaldi* es un gran pez marino habitante del golfo de California. Se encuentra catalogado como una especie vulnerable debido a capturas excesivas históricas y más recientemente para extraer su vejiga natatoria. Investigaciones intensivas han derivado en la exitosa producción de la totoaba mediante acuacultura.

PALABRAS CLAVE: pez totoaba, fauna marina, especies vulnerables, acuacultura, trazabilidad, isótopos estables.

ABSTRACT

The present article explores two of the methods that can support the traceability and conservation of this and other illegally extracted species. The use of genetic and isotopic biomarkers to identify wild and farmed fish is emphasized. In the particular case of the isotopic biomarkers of carbon and nitrogen, these were successfully applied to distinguishing farmed ($\delta^{13}\text{C} = -18.3 \pm 0.6\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = 11.7 \pm 0.7\text{‰}$) from wild totoaba ($\delta^{13}\text{C} = -15.3 \pm 2.4\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = 21.7 \pm 3.7\text{‰}$). *Totoaba macdonaldi* is a large fish endemic to the Gulf of California. Totoaba is currently listed as a vulnerable species due to intensive overfishing, recently exacerbated by the high value of the fish swimming bladder. Intensive research on the biology of totoaba has led to its successful production through aquaculture.

KEYWORDS: totoaba fish, marine fauna, vulnerable species, aquaculture, traceability, stable isotopes.

INTRODUCCIÓN

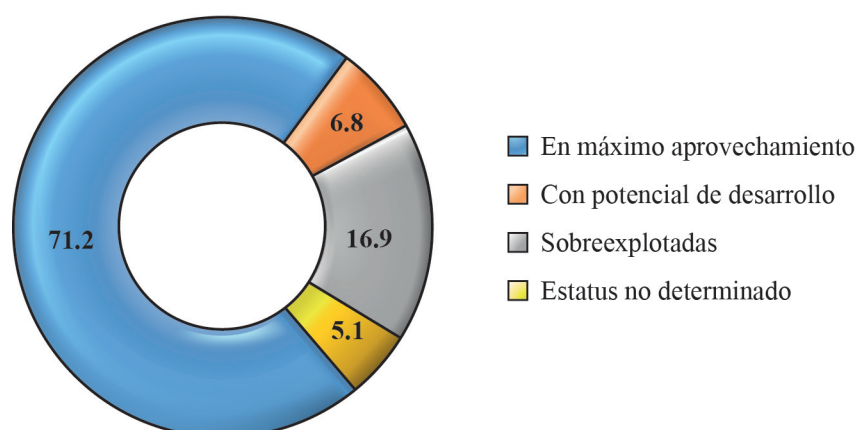
Entre la amplia biodiversidad acuática de México existen más de 589 especies de organismos acuáticos con importancia comercial, divididas de la siguiente manera: 402 especies de peces óseos, 73 especies de peces cartilaginosos (tiburones y rayas), 66 especies de moluscos (caracoles, almejas y pulpos), 52 especies de crustáceos (camarones y cangrejos), 21 especies de equinodermos (estrellas de mar, erizos y pepinos de mar) y 1 especie de medusa (Conabio, 2022). En nuestro país, el único instrumento regulatorio pesquero-ambiental que indica el estado de salud de las poblaciones de organismos marinos comerciales es la *Carta Nacional Pesquera*. Este documento oficial además emite diversas restricciones y límites para la extracción de algunas especies (INAPESCA, 2022). En la actualidad, el aprovechamiento pesquero se concentra en diversas pesquerías, dentro de las cuales trabajan más de 160 000 hombres y mujeres, quienes dependen económicamente de esta

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

julian.gamboadlg@uanl.edu.mx

actividad (Delphinus, 2023). La actividad pesquera no está libre de problemas y uno de los principales es la sobreexplotación de algunas especies, así como la captura incidental de otras especies que conllevan menor valor comercial. De acuerdo con la *Carta Nacional Pesquera*, se divide a las especies comerciales en diversas categorías de acuerdo con su estado de explotación y conservación: *a)* con potencial de desarrollo, *b)* en máximo aprovechamiento permisible y *c)* en deterioro. En el primer caso es posible aumentar las capturas de las poblaciones indicadas en este apartado, pero de manera precautoria y controlada. En la segunda categoría el uso de las poblaciones se considera óptimo, pero diversos indicadores ecológicos indican que ya no es posible aumentar las capturas ni los permisos de pesca correspondientes. En la tercera categoría se indican las poblaciones de especies sujetas a capturas mayores al rendimiento sostenible; por lo tanto, es necesario reducir los esfuerzos de captura para evitar la disminución poblacional debido a las capturas excesivas (gráfica 1). La pesca excesiva de los recursos marinos representa un grave problema ambiental para los ecosistemas marinos. En nuestro país, se estima que del 14 al 17% de las especies destinadas a la pesca se encuentran sobreexplotadas, mientras que más de 70% se encuentran en niveles máximos de extracción (INAPESCA, 2022). La sobreexplotación de las especies marinas no solo causa un deterioro a las poblaciones naturales, sino que también conlleva a una disminución de las capturas y a una serie de impactos ecológicos adversos bien documentados (Akita *et al.*, 2022). Por ejemplo, se ha reportado que hasta 43% de las especies pesqueras en México se encuentran en peligro, principalmente debido a la mala gestión de esta práctica en el país (Oceana, 2022). En México, algunos de los grupos de organismos derivados de las pesquerías marinas y que se encuentran en su mayoría sobreexplotados están representados por los pulpos (*Octopus* spp.), las langostas (Palinuridae), los atunes (*Thunnus* spp.), los huachinangos (*Lutjanus* spp.), los meros (*Epinephelus* spp.), las sardinas (Engraulidae, Clupeidae) y los tiburones (Delphinus, 2022; FAO *et al.*, 2020). Por otro lado, estimaciones recientes indican que en México más de 40% de las capturas totales de peces e invertebrados provienen de actividades de pesca ilegal, ya sea pesca no declarada o no reglamentada (Sader-Conapesca, 2020). Como se mencionó, esta problemática, asociada a un bajo cumplimiento del marco regulatorio, conduce al agotamiento de las poblaciones naturales y perturban significativamente los hábitats marinos causando desequilibrios ecológicos que afectan también a otras especies. Aunado a esto, existe un notable impacto social negativo debido a que se crea una desventaja para los pescadores legales, quienes tienen que competir con los productos ilegales, los cuales usualmente se venden a menor precio (Oceana, 2023a).

Estado de las pesquerías en México 2023



GRÁFICA 1

Clasificación porcentual del estado de aprovechamiento*

Fuente: elaborado con datos publicados en la *Carta Nacional Pesquera*, 2023.

Nota: * = de los 51 principales tipos de pesquerías reportados en México.

1. EL CASO PARTICULAR DE LA TOTOABA, *TOTOABA MACDONALDI*

La totoaba (*Totoaba macdonaldi*) es un gran pez marino que pertenece a la familia Sciaenidae (figura 1a). Esta especie se distribuye en una zona oceánica restringida, ya que sus poblaciones son endémicas al Golfo de California. Su distribución histórica se reporta desde el delta del río Colorado hasta el río Fuerte en Sinaloa y del lado peninsular hasta Bahía Concepción. Las totoabas crecen hasta los 2 m de longitud, talla en la que alcanzan los 100 kg de peso. Dado que esta especie logra vivir hasta 25 años, tal longevidad implica que su tasa de repoblamiento es baja. Y aunque el crecimiento somático es alto durante el primer año de vida, se estima que la edad de madurez reproductiva ocurre hasta los 6 años en machos y hasta los 7 años en hembras. Las hembras desovan una vez al año y su fecundidad estimada depende del peso corporal, que es de alrededor de 15 millones de huevecillos para hembras alrededor de los 20 kg (120 cm de longitud) (Cisneros-Mata *et al.*, 1995). En la actualidad, y al igual que muchas otras especies de organismos marinos, las poblaciones de totoaba se encuentran muy diezmatadas debido a la sobrepesca. Tan solo hace 50 años, las poblaciones todavía eran abundantes y soportaban una significativa pesca artesanal y deportiva en el Golfo de California. Sin embargo, a partir de los años setenta las poblaciones disminuyeron de forma abrupta y, en consecuencia, se decretó una veda permanente por parte de las autoridades mexicanas. Adicionalmente, la totoaba ingresó por primera vez a las listas de animales vulnerables en 1976 (CITES, 2023a). A pesar de tales acciones encaminadas a la protección de la totoaba, existe evidencia de que las capturas de cientos de ejemplares continúa en la actualidad (EIA, 2024). Sin embargo, tales capturas ilegales no están dirigidas a la obtención de la carne de totoaba, sino hacia uno de sus órganos, la vejiga natatoria (figura 1b). La función fisiológica de la vejiga natatoria en los peces es la de controlar la flotabilidad en la columna de agua. Las vejigas natatorias (buches) son muy demandadas en Asia, en particular por la medicina tradicional china. Dado que en China las poblaciones de peces similares a la totoaba (*e. g. Bahaba taipingensis*) fueron a su vez severamente disminuidas por la sobrepesca, hoy en día existe un tráfico ilegal millonario de vejigas natatorias deshidratadas, las cuales alcanzan un extraordinario valor en el mercado negro internacional. El alto valor de las vejigas natatorias ha conllevado a que el tráfico de este recurso sea en parte controlado por la delincuencia organizada, lo cual genera desventajas de índole ecológico y social a nivel local, y una problemática de tráfico que se extiende a nivel nacional e internacional. En vista de la alta demanda actual de las vejigas natatorias, con frecuencia se captura a las totoabas solamente para extraerles este órgano y después son descartadas, en particular las hembras, ya que presentan mayor tamaño corporal y, por ende, mayor tamaño de vejigas natatorias.

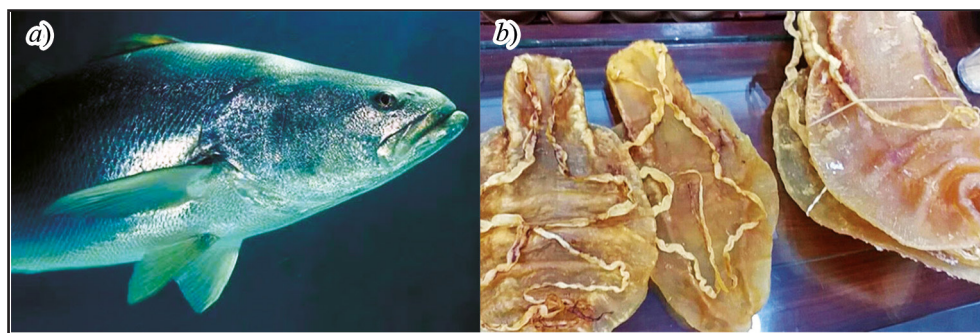


FIGURA 1

Totoaba macdonaldi

a) espécimen adulto de *Totoaba macdonaldi*, b) muestras de vejigas natatorias deshidratadas*

Fuente: Semarnat, 2018; y Grupo Clarín, 2020.

Nota: * = con frecuencia confiscadas y destruidas para evitar su ingreso al mercado negro.

Cronológicamente, el escenario adverso por el cual atraviesa la totoaba, se complicó aún más cuando fue demostrado que la captura ilegal de totoaba silvestre también afecta a las poblaciones de la vaquita marina. La vaquita marina

(*Phocoena sinus*) es un mamífero cetáceo que pertenece a las marsopas y ha recibido una notable atención internacional debido a que su estado de conservación es extremadamente crítico, ya que se han reportado de 10 a 13 individuos sobrevivientes en 2023 (Rodríguez-Pérez *et al.*, 2023). Las poblaciones de este cetáceo se redujeron drásticamente debido a que las vaquitas marinas quedan atrapadas y asfixiadas en las redes de enmalle utilizadas para la captura de totoaba y también para la pesca comercial de otras especies en el Golfo de California (CITES, 2019a). En 2023, un comité de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES por sus siglas en inglés) calificó como no apropiado un plan de manejo que presentó México, el cual estuvo orientado a proteger ambas especies, a la totoaba y a la vaquita marina. Eventualmente, el plan de manejo fue revisado, aprobado y su aplicación permanece en el presente bajo intensa vigilancia internacional (CITES, 2023b; EIA, 2024).

2. PRODUCCIÓN DE TOTOABA MEDIANTE CULTIVOS ACUÍCOLAS

La acuicultura se define como el cultivo de organismos acuáticos bajo condiciones controladas; peces, moluscos, crustáceos, equinodermos e incluso micro y macroalgas representan tales organismos. La acuicultura es una práctica milenaria que surgió en Asia y África, pero como actividad económica ha tenido un alto desarrollo global durante las últimas décadas. En México la pesca y la acuicultura aportan una considerable cantidad de productos al consumo nacional y a las exportaciones (Enbiomex, 2017). En adición a la importancia económica, la acuicultura alivia parte de la presión que reciben las poblaciones naturales al ser extraídas por la pesca. En oposición a lo que sucede con varios grupos de especies marinas, los organismos derivados de las granjas (camarón, ostión, cocodrilo) no están sujetos a vedas estacionales ni permanentes.

En este contexto, la totoaba es un pez que presenta un alto valor comercial debido a las buenas características de su carne y se han realizado intentos para criar esta especie en cautiverio (figura 2). Tales esfuerzos han sido exitosos y en este momento la totoaba logra reproducirse en cautiverio a ciclo cerrado bajo diferentes tecnologías de cultivo y alimentación (Curiel-Bernal *et al.*, 2023). La especie presenta rápido crecimiento, es adaptable a las condiciones fluctuantes del agua y además acepta alimento artificial desde los estadios larvarios y juveniles (figura 2a). La totoaba puede engordarse hasta un tamaño comercial (3-5 kg) tanto en estanques como en jaulas flotantes (figura 2b). Recientemente, una empresa mexicana obtuvo aprobación internacional por parte de CITES para cultivar y exportar totoaba (CITES, 2019b). En México, por lo tanto, ya existe una distribución y disponibilidad comercial de carne de totoaba derivada de la acuicultura; sin embargo, los datos de producción aún no figuran en los registros oficiales de producción por acuicultura (CONAPESCA, 2023). A pesar de los esfuerzos regulatorios, la pesca ilegal de varias especies todavía es muy persistente, incluso en las áreas marinas protegidas sujetas a una mayor vigilancia (Aceves-Bueno *et al.*, 2021). Una de las preocupaciones ambientales más relevantes consiste en la sustitución fraudulenta de productos pesqueros comercializados. Diversas organizaciones no gubernamentales han reportado resultados de muestreos aleatorios en los cuales se evidencia la constante venta de productos que no pertenecen ya sea a lo declarado por quien realiza la venta o que no concuerdan con las etiquetas. Estas sustituciones frecuentemente no son accidentales sino deliberadas (Oceana, 2023b).

3. LOS SISTEMAS DE TRAZABILIDAD Y SU PAPEL ANTE LA SOBREPESCA

Con el fin de proteger a las poblaciones naturales mediante un manejo adecuado de los recursos naturales, la comercialización de productos derivados de animales se encuentra cada vez más regulada debido a nuevas legislaciones nacionales (DOF, 2014) e internacionales (Parlamento Europeo, 2018). Además, los consumidores que adquieren tales productos tienden a ser cada vez más conscientes acerca del origen y la forma de producción (Gamboa-Delgado *et al.*, 2022). En este escenario, ha aumentado el interés para verificar analíticamente la forma de producción de los organismos acuáticos, es decir, confirmar si el producto se extrajo del medio natural o si fue

producido por prácticas de acuicultura. En el caso de la totoaba, los organismos producidos en cautiverio son sujetos a un marcaje bajo la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-169-SEMARNAT-2018 (Semarnat, 2018). Diversos métodos analíticos disponibles asisten en este proceso de trazabilidad y validación. Un buen sistema de trazabilidad *a)* provee información relevante relacionada a la especie comercializada, *b)* confirma el apego a temporadas abiertas de captura y *c)* verifica el uso de implementos autorizados. Por lo tanto, la trazabilidad tiene un rol significativo en el cumplimiento de protección a las especies silvestres, tales como la vaquita marina en el caso de la pesca ilegal de la totoaba. La trazabilidad comienza desde el control inmediato una vez que la especie de interés ha sido capturada (o cosechada mediante prácticas de acuicultura); después se realiza un buen seguimiento a través de protocolos de trazabilidad tanto electrónicos como basados en papel. De esta forma, es posible determinar con un buen grado de confianza el origen de diversos productos animales. Los protocolos de trazabilidad electrónicos usan desde códigos QR en el producto (figura 2c) hasta una trazabilidad geográfica por satélite. Lo anterior presenta retos en cuestiones de organización y mantenimiento de la autenticidad, pero tales medidas han resultado en medios efectivos para reducir la sustitución de productos. Desafortunadamente, y a pesar de los protocolos de trazabilidad y las evaluaciones analíticas, todavía son muy persistentes los casos relacionados a productos que no corresponden a la información descrita en los empaques y etiquetas (Reilly, 2018). Así también, se ha demostrado mediante pruebas de ADN que pescaderías y restaurantes en México incurren en porcentajes muy altos de sustitución en los productos ofrecidos, con valores que están en un rango del 36 al 69% (Oceana, 2023b), valores muy altos cuando se comparan al 6 a 9% de sustitución reportado para algunas especies de peces marinos en otros países (Helyar *et al.*, 2014; Luque y Donlan, 2019). Por lo general, tales sustituciones de productos son realizadas mediante especies de menor valor, por ejemplo reemplazar marlín por atún, mero por bagre basa y pargo por tilapia (Oceana, 2023b). Por lo tanto, las sustituciones de productos pueden ser de una especie por otra o también de un producto derivado de acuicultura por uno silvestre y viceversa (Kroetz *et al.*, 2020).

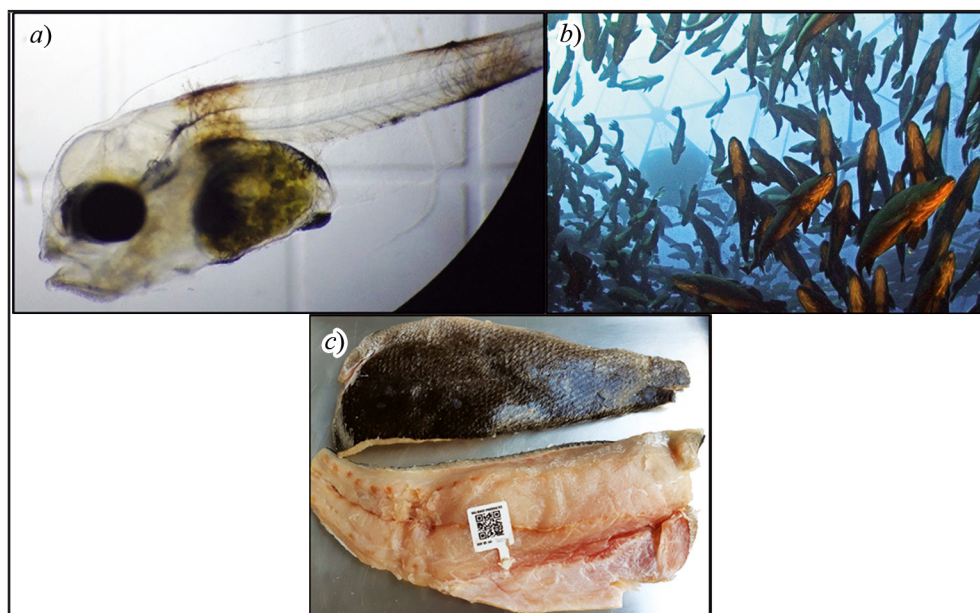


FIGURA 2
Totoaba en cautiverio

Fuente: imagen propia; CREMES, 2024; Series de Mongabay: Estrategias de conservación, 2019.

Nota: *a)* Imagen de una larva temprana de *Totoaba macdonaldi* en proceso de absorción de su saco vitelino.

b) Individuos de totoaba en una instalación de acuicultura consistente en jaulas flotantes en mar abierto. *c)* Filetes de totoaba derivados de la instalación de acuicultura (el código QR tiene la función de mejorar la trazabilidad y asegurar autenticidad a los consumidores).

4. MÉTODOS PARA EVALUAR LA AUTENTICIDAD Y EL ORIGEN DE UN PRODUCTO

La identificación analítica confiable de la autenticidad de un producto o de su forma de producción asiste a los protocolos de trazabilidad y también facilita la certificación de productos. El uso de métodos de verificación también presenta otras ventajas que contribuyen a desalentar las malas prácticas de producción, tales como la adulteración y sustitución de productos o la pesca o captura furtiva de especies protegidas durante las vedas estacionales o permanentes, cuyos productos han llegado a ser etiquetados como “productos de granja” de forma deliberada (Korzik *et al.*, 2020).

A menudo, las normas oficiales emitidas para la protección de especies amenazadas requieren de un apoyo analítico; sin embargo, la determinación del origen de diversos productos animales presenta problemas técnicos que incluyen la dificultad para determinar externamente, o mediante pruebas organolépticas (textura, olor, sabor), si ciertos lotes de productos procesados (*e. g.* carne y pieles) provienen de animales silvestres o de animales de granja. Una aproximación alternativa a las apreciaciones sensoriales es la detección de biomarcadores o trazadores químicos específicos en el producto, los cuales pueden probar de manera confiable su origen (Brombin *et al.*, 2022; Gamboa-Delgado *et al.*, 2022). A continuación, se describen dos de tales métodos.

4. 1. Validación del origen por medio de técnicas genéticas

Dentro de las técnicas moleculares, las metodologías de trazabilidad y autenticidad basadas en el análisis del ADN (ácido desoxirribonucleico), presente en núcleos celulares y mitocondrias constituyentes de los tejidos de los animales, representan algunas de las técnicas más confiables y precisas para determinar la especie de la cual se deriva un cierto producto (carne, pieles). La determinación del “código de barras de ADN” (DNA barcoding) es una técnica usada para identificar el género o la especie a la cual pertenece un organismo o tejido derivado de éste. La técnica implica un tratamiento de la muestra para aislar y purificar el ácido nucleico. Eventualmente se utiliza una secuencia corta de ADN (microsatélite) proveniente de una región estandarizada; esta secuencia tomada de la muestra es comparada con una secuencia de referencia (figura 3).

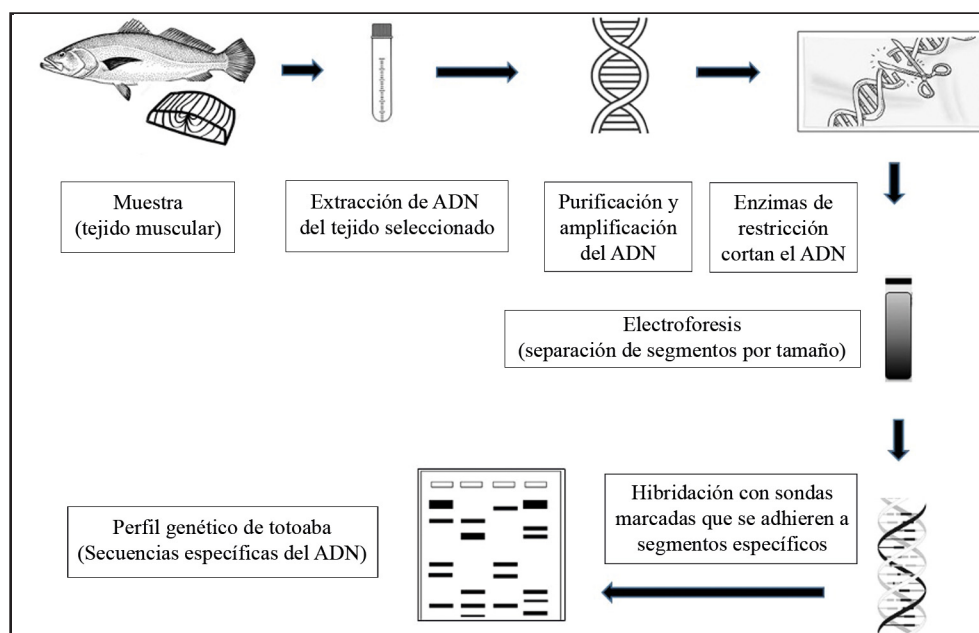


FIGURA 3

Esquema de un procedimiento aplicado para determinar el perfil genético de la totoaba a partir de muestras de su ADN*

Fuente: elaboración propia con base en Fishbase, 2020 y Cermakova *et al.*, 2023.

Nota: * = el ADN es eventualmente purificado, cortado e hibridado con segmentos específicos que permiten una identificación.

La determinación de la variabilidad en ciertos segmentos presentes en el ADN (microsatélites) de un individuo permite finalmente obtener una combinación particular que se denomina *genotipo* (perfil genético) (Bravo y Pinilla, 2011). Se considera que los métodos de identificación basados en ADN (ya sea presente en núcleo o mitocondrias) son más sensibles que otras técnicas como la electroforesis y la cromatografía, las cuales no ofrecen la misma precisión. La molécula de ADN es resistente al calor y además al realizar su secuenciación es posible identificar algunos otros rasgos, tales como la presencia de modificaciones genéticas (Azad *et al.*, 2023). Lo anterior conlleva a determinar con un alto grado de certeza la especie a la cual pertenece un organismo y además otorga información acerca de sus linajes y, por lo tanto, permite también definir si un organismo específico fue cultivado o extraído del medio silvestre. En México este tipo de técnicas ha evidenciado los constantes etiquetados fraudulentos y las frecuentes sustituciones de productos que ocurren en el comercio de varias especies de peces marinos (Munguia-Vega *et al.*, 2022).

4. 2. Validación de la autenticidad usando técnicas isotópicas

Las técnicas isotópicas se originaron en las ciencias geológicas y poco a poco fueron adoptadas por otras disciplinas como la paleontología, la ecología y la nutrición animal. Las técnicas isotópicas se basan en el siguiente principio: la mayor parte de los elementos químicos tiene formas atómicas diferentes llamadas *isótopos* y estos isótopos solamente difieren en el número de neutrones. Los isótopos de los elementos químicos (carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y azufre) que constituyen a un alimento son a su vez transferidos a los diferentes organismos consumidores y estos últimos reflejan características isotópicas particulares. Por lo tanto, las mediciones de valores isotópicos pueden usarse como marcadores naturales para trazar el flujo de nutrientes y para reconstruir la dieta de un organismo (Gamboa-Delgado, 2022). En este contexto, la determinación de los valores isotópicos y su aplicación como biomarcadores hace posible distinguir entre organismos silvestres y entre organismos de granja o cultivados mediante acuicultura debido a que estos animales consumen elementos dietarios muy diferentes, lo cual afecta a sus respectivos valores isotópicos tisulares. Las técnicas isotópicas tienden a ser simples respecto al pretratamiento de las muestras y respecto al análisis elemental e isotópico en el espectrómetro de masas (figura 4). Métodos afines han sido usados con éxito para distinguir la forma de producción (extracción silvestre o acuicultura) de especies marinas, tales como la lubina (*Lates calcarifer*), el salmón del Atlántico (*Salmo salar*) y el camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*) (Gamboa-Delgado *et al.*, 2014; Gopi *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2018).

Un reciente estudio llevado a cabo en nuestro laboratorio se enfocó en coleccionar muestras de músculo de totoaba derivadas de acuicultura (jaulas flotantes en mar abierto, $n = 34$) y también muestras de organismos silvestres (derivadas de colecciones ictiológicas y de especímenes capturados incidentalmente en actividades de pesca artesanal, $n = 35$). Las muestras fueron procesadas mediante deshidratación y molienda para posteriormente analizar sus valores elementales de carbono y nitrógeno, y sus respectivos valores isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, notación que indica la proporción de carbono y nitrógeno pesado y ligero en una muestra). Los resultados indicaron que tanto los valores isotópicos de carbono, como los de nitrógeno, fueron significativamente diferentes entre filetes derivados de totoabas cultivadas ($\delta^{13}\text{C} = -18.3 \pm 0.6 \text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = 11.7 \pm 0.7 \text{‰}$) y aquellos provenientes de totoabas extraídas del medio natural ($\delta^{13}\text{C} = -15.3 \pm 2.4 \text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = 21.7 \pm 3.7 \text{‰}$) (Gamboa-Delgado y Sánchez Díaz, 2025). Los contrastantes valores isotópicos determinados en el músculo de la totoaba (gráfica 2) son causados por los diferentes tipos de alimentación (diversas presas capturadas por los peces silvestres y alimento balanceado constante en los peces de cultivo). Por lo tanto, las firmas isotópicas pueden ser específicas y permiten la creación de bancos de datos referenciales y aplicables para distinguir la forma de producción de esta especie. Como se describió, la totoaba se encuentra en estado vulnerable y además asociada a la problemática de la vaquita marina. Mediciones isotópicas han sido aplicadas previamente en estudios de trazabilidad y mantienen un alto potencial para asistir como herramientas analíticas en los actuales y futuros protocolos de trazabilidad y vigilancia orientados a las especies comerciales.

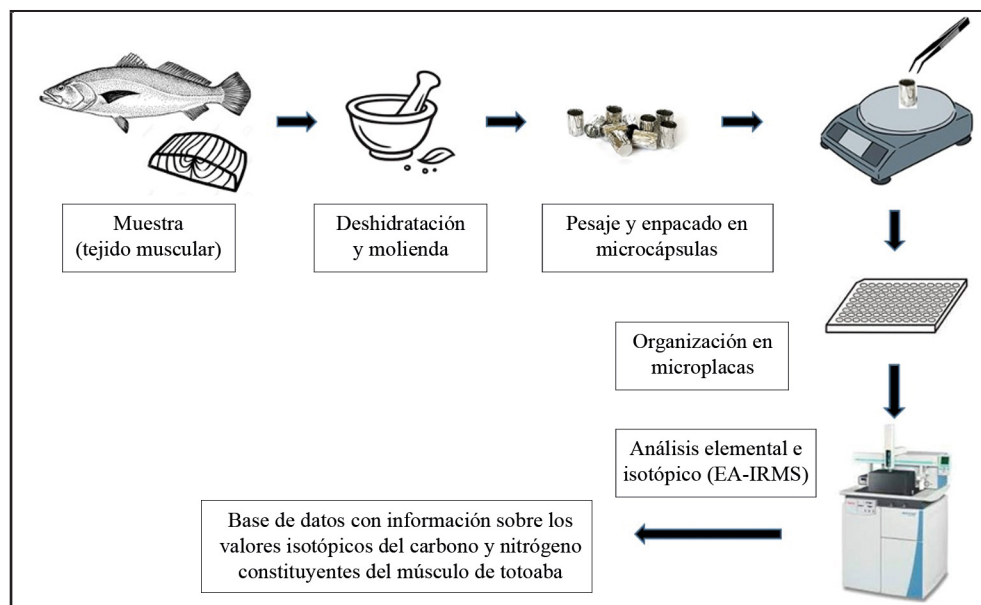
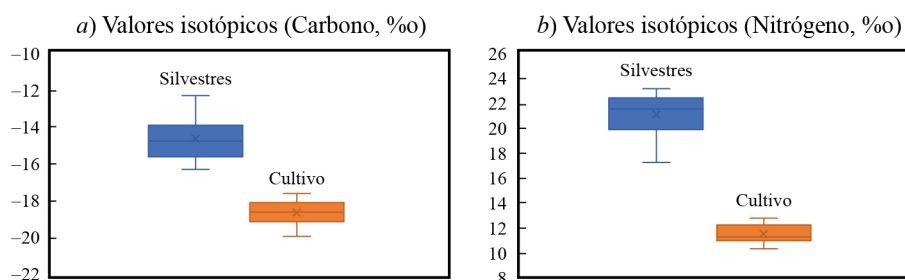


FIGURA 4

Etapas básicas del muestreo y pretratamiento de muestras de totoaba destinadas a un análisis isotópico del carbono o nitrógeno constituyentes del tejido muscular

Fuente: elaboración propia; Fishbase, 2020.



GRÁFICA 2

Valores isotópicos (partes por mil) del carbono y nitrógeno constituyentes de tejido muscular obtenido de totoabas silvestres y cultivadas*

Fuente: elaboración propia.

Nota: * = en ambos casos se detectaron diferencias significativas, lo cual indica el potencial de los valores isotópicos como bio-marcadores para distinguir entre organismos silvestres y derivados de acuicultura.

PROSPECTIVA

La constante aplicación de métodos que garantizan diferenciar la procedencia de un producto tiende a desalentar la pesca ilegal. En el caso específico de la totoaba existe hoy por hoy una significativa y justificada presión a México por parte de diferentes países y organizaciones internacionales para salvar de la extinción a la totoaba y a la vaquita marina. En tal escenario, ha aumentado la vigilancia para evitar la pesca de la totoaba, lo cual se refleja en un impacto positivo para la conservación de ambas especies en virtud de que disminuye el uso de artes de pesca que provocan la asfixia de las marsopas. Además de la vigilancia *in situ*, y ya dentro de las cadenas de distribución, los métodos analíticos asisten de forma efectiva en la detección de productos naturales ilegales.

Para algunas organizaciones el hecho de que especies en peligro (totoaba, pulpo) sean producidas mediante cultivos controlados representa una desventaja dado que se argumenta un aumento en la demanda de estas especies, la cual en ocasiones es cubierta por el mercado negro. No obstante, diversos protocolos analíticos ya establecidos pueden asistir con alta precisión en la definición del origen y modo de producción de un producto. La certificación de tales técnicas analíticas ha derivado en su inclusión dentro de diversas normativas que establecen protocolos de trazabilidad que asisten en la determinación del origen de especies animales y sus productos. Tal es el caso de la Norma Oficial Mexicana NOM-047-SAG/PESC-2014, misma que está orientada a la identificación del origen de camarones cultivados en granja y de camarones silvestres extraídos del medio natural durante las épocas permitidas de pesca. Una de las desventajas de las técnicas analíticas consiste en la necesidad de equipo especializado, lo cual va acompañado de tiempos de análisis que aún son relativamente largos. Con el transcurso del tiempo han surgido varios laboratorios comerciales y, por su parte, los esfuerzos de investigación han derivado en técnicas y procedimientos más eficientes, lo cual ha promovido una reducción de costos y lapsos de tiempo requeridos para los análisis. Dado que las técnicas analíticas también detectan etiquetados fraudulentos y adulteraciones de productos (miel de abeja, productos cárnicos), tales métodos tienden a disminuir las malas prácticas de manejo al mostrar capacidad para discernir entre productos auténticos y aquellos distintos a los estipulados en los empaques. Es posible prever que las técnicas analíticas basadas en mediciones de ácidos nucleicos y valores isotópicos continuarán apoyando indirectamente en la conservación de otras especies marinas que también son vulnerables pero a la vez es posible cultivarlas en cautiverio, como lo es el caso de los robalos y los pulpos. El hecho de que la totoaba sea cultivada bajo ciclo cerrado en cautiverio representa un aspecto fundamental de avance técnico-económico y a la vez representa una posible ventaja ambiental debido a que las empresas que cultivan especies en riesgo también participan en muchas ocasiones en programas de repoblación, como lo es el caso de las granjas de cocodrilos.

CONCLUSIONES

La adecuada trazabilidad de los productos alimenticios representa una ventaja múltiple. Por un lado, se protege a las poblaciones silvestres de la pesca ilegal y, por otro lado, se protege a los pescadores establecidos que compiten en contra de los productos ilegales. Además, se otorga una seguridad a los consumidores finales, quienes reciben un producto real y no un producto sustituido o proveniente de actividades de pesca ilegal, los cuales a menudo no ingresan a los sistemas de inocuidad alimenticia. La acuicultura es una actividad que ha experimentado un rápido desarrollo y en este momento representa un importante sector comercial. Las formas en las cuales se distingue un producto derivado de la pesca de otro producto derivado de una granja son muy variadas. Por ejemplo, hay expertos que determinan estas diferencias mediante las propiedades organolépticas (sabor, textura, olor) si un filete de pescado proviene de animales de granja o silvestres. Sin embargo, las técnicas analíticas ofrecen un método mucho más seguro y confiable para distinguir un producto silvestre de uno cultivado. Tanto las técnicas de trazabilidad genética como las de trazabilidad isotópica presentan una alta resolución para identificar la forma de producción o el origen de un organismo acuático y sus productos. Al comparar ambos métodos es posible indicar que las técnicas de trazabilidad genética tienden a ser procedimientos más sensibles, pero más largos que aquellos requeridos por las técnicas isotópicas debido a las respectivas metodologías de tratamiento de las muestras. El ADN de las muestras debe de estar bien conservado; de lo contrario se compromete el resultado del análisis genético y, en este sentido, las técnicas isotópicas tienden a generar resultados fiables, incluso en productos muestreados en las etapas postcosecha (congelación, inmersión en salmueras, deshidratación, etc.). Se prevé que la constante miniaturización de equipos fomentará la portabilidad y la generación de resultados de forma más rápida. En otras especies estos procedimientos han sido muy útiles al apoyar protocolos de trazabilidad electrónica y al reforzar la vigilancia a lo largo de las cadenas de producción, como sucede con el salmón y los bivalvos en Chile.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los y las árbitros por aportar su tiempo y experiencia para mejorar la estructura y fluidez del artículo. Este trabajo fue apoyado por la Universidad Autónoma de Nuevo León a través del proyecto PAICYT 69-CAT-2022.

REFERENCIAS

- Aceves-Bueno, E., Read, A. J. & Cisneros-Mata, M. A. (2021). Illegal fisheries, environmental crime, and the conservation of marine resources. *Conservation Biology*, 35(4), 1120-1129. <https://doi.org/10.1111/cobi.13674>
- Akita, Y., Kurihara, T., Uehara, M., Shiwa, T., & Iwai, K. (2022). Impacts of overfishing and sedimentation on the feeding behavior and ecological function of herbivorous fishes in coral reefs. *Marine Ecology Progress Series*, 686, 141-157. <https://doi.org/10.3354/meps13996>
- Azad, M. A. K., Dey, M., Khanam, F., Biswas, B., & Akhter, S. (2023). Authentication of meat and meat products using molecular assays: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100586. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100586>
- Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2022). Peces y mariscos comerciales. *Biodiversidad mexicana*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/peces/>
- CONAPESCA (Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca). (2023). *Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca*. https://nube.conapescagob.mx/sites/cona/dgppe/2023/ANUARIO_ESTADISTICO_DE_ACUACULTURA_Y_PESCA_2023.pdf
- Bravo, M. A. N., & Pinilla, E. B. (2011). Genotipificación bovina, la huella de ADN de sus animales. *Revista veterinaria argentina*. <https://www.veterinariargentina.com/revista/2011/07/genotipificacion-bovina-la-huella-de-adn-de-sus-animales/>
- Brombin, V., Natali, C., Frijia, G., Schmitt, K., Casalini, M., & Bianchini, G. (2022). Isotope geochemistry for seafood traceability and authentication: the northern Adriatic manila clams case study. *Foods*, 11(19), 3054. <https://doi.org/10.3390/foods11193054>
- Carta Nacional Pesquera. (2023). Instituto Nacional de Pesca y Acuacultura. DOF: 21/07/2023. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/892410/CNP_2023.pdf
- Cermakova, E., Lencova, S., Mukherjee, S., Horka, P., Vobruha, S., Demnerova, K., & Zdenkova, K. (2023). Identification of fish species and targeted genetic modifications based on DNA analysis: State of the art. *Foods*, 12(1), 228. <https://doi.org/10.3390/foods12010228>
- Cisneros-Mata, M. A., Montemayor-López, G., & Román-Rodríguez, M. J. (1995). Life history and conservation of *Totoaba macdonaldi*. *Conservation Biology*, 9(4), 806-814. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.09040806.x>
- CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora). (2019a). *Totoaba (Totoaba macdonaldi)*. Decimoséptima reunión de la Conferencia de las Partes. <https://cites.org/esp/node/48556>
- CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora). (2019b). Additional information regarding the registration of the operation “Earth Ocean Farms S. de R. L. de C.V.” breeding *Totoaba macdonaldi* (submitted by Mexico). 71st meeting of the Standing Committee. <https://cites.org/eng/node/86905>

- CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora) (2023a). *Checklist of CITES Species*. <https://checklist.cites.org/>
- CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora). (2023b). *Compliance action plan of the Mexican government to prevent illegal fishing and trade of totoaba, its parts and/or derivatives for the protection of vaquita. Preliminary considerations*. Gobierno de México. <https://cites.org/sites/default/files/notifications/E-Notif-2023-092.pdf>
- CREMES (Centro Reprodutor de Especies Marinas del Estado de Sonora). (2024). Instituto de Acuacultura del Estado de Sonora. <https://qa-6.sonora.gob.mx/acuacultura/index.php/areas/areas-estrategicas/cremes>
- Curiel-Bernal, M. V., Cisneros-Mata, M. Á., Rodríguez-Domínguez, G., Sánchez-Velasco, L., Jiménez-Rosenberg, S. P. A., Parés-Sierra, A., & Aragón-Noriega, E. A. (2023). Modelling early growth of *Totoaba macdonaldi* (Teleostei: Sciaenidae) under laboratory conditions. *Fishes*, 8(3), 155. <https://doi.org/10.3390/fishes8030155>
- Delphinus. (2022). *10o Festival de los Océanos, por un brillante planeta azul*. [https://www.festivaldelosoceanos.org.mx/sobrepesca#:~:text=Las%20pesquer%C3%ADas%20marinas%20m%C3%A1s%20sobrexplotadas,at%C3%BA%20\(Thunnus%20spp.\)](https://www.festivaldelosoceanos.org.mx/sobrepesca#:~:text=Las%20pesquer%C3%ADas%20marinas%20m%C3%A1s%20sobrexplotadas,at%C3%BA%20(Thunnus%20spp.))
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-047-SAG/PESC-2014 para la identificación del origen de camarones cultivados, de aguas marinas y de esteros, marismas y bahías*. Sagarpa. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/5355/sagarpa11_C/sagarpa11_C.html
- EIA (Environmental Investigation Agency). (2024). *Ocean. On Borrowed Time: The ongoing illegal totoaba trade driving the critically endangered vaquita to extinction*. <https://eia-international.org/wp-content/uploads/2024-EIA-On-Borrowed-Time-spreads.pdf>
- Enbiomex (Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México). (2017). *La biodiversidad indispensable para la pesca & acuicultura*. Conabio. <https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/pais/files/3.pescacartaVFGenero.pdf>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO. (2020). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2020. Transformación de los sistemas alimentarios para que promuevan dietas asequibles y saludables*. Roma. <https://www.fao.org/publications/home/fao-flagship-publications/the-state-of-food-security-and-nutrition-in-the-world/es>
- Fishbase. (2020). *Totoaba macdonaldi*. Swedish Museum of Natural History. <https://www.fishbase.se/summary/Totoaba-macdonaldi>
- Gamboa-Delgado, J. & Sánchez-Díaz, R. (2025). Wild or farmed: Carbon and nitrogen stable isotope values as natural biomarkers to improve the traceability of endangered totoaba (*Totoaba macdonaldi*, Sciaenidae). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 35(2), e70091. <https://doi.org/10.1002/aqc.70091>
- Gamboa-Delgado, J. (2022). Isotopic techniques in aquaculture nutrition: State of the art and future perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 456-476. <https://doi.org/10.1111/raq.12609>
- Gamboa-Delgado, J., Pacheco-Vega, J. M., Ponce-Campos, P., Pérez-Martínez, S. G., Villarreal Cavazos, D. (2022). Stable isotope measurements as analytical tools for the traceability of crocodile-derived products. *Animal Conservation and Biodiversity*, 45(2), 217-224. <https://doi.org/10.32800/abc.2022.45.0217>
- Gamboa-Delgado, J., Molina-Poveda, C., Godínez-Siordia, D. E. & Villarreal-Cavazos, D., Ricque-Marie, D., & Cruz-Suárez, L. E. (2014). Application of stable isotope analysis to differentiate shrimp extracted by industrial fishing or produced through aquaculture practices. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(10), 1520-1528. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0005>
- Gopi, K., Mazumder, D., Sammut, J., Saintilan, N., Crawford, J., & Gadd, P. (2019). Isotopic and elemental profiling to trace the geographic origins of farmed and wild-caught Asian seabass (*Lates calcarifer*). *Aquaculture*, 502, 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.012>

- Grupo Clarín. (2020). *La cocaína del mar: los buches de la totoaba, el pez mexicano afrodisíaco por el que se pagan fortunas*. Arte Gráfico Editorial Argentino. https://www.clarin.com/internacional/mexico/-cocaina-mar-buches-totoaba-pez-mexicano-afrodisiaco-pagan-fortunas_0_OplCqN_TW.html
- Helyar, S. J., Lloyd, H. a. D., De Bruyn, M., Leake, J., Bennett, N., & Carvalho, G. R. (2014). Fish product mislabelling: Failings of traceability in the production chain and implications for illegal, unreported and unregulated (IUU) fishing. *PLOS One*, 9(6), e98691. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098691>
- INAPESCA (Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura). (2022). *Diario Oficial. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*. <https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/CARTA%20NACIONAL%20PESQUERA/24082012%20SAGARPA.pdf>
- Korzik, M. L., Austin, H. M., Cooper, B., Jasperse, C., Tan, G., Richards, E., Spencer, E. T., Steinwand, B., Fodrie, F. J., & Bruno, J. F. (2020). Marketplace shrimp mislabeling in North Carolina. *PLOS One*, 15(3), e0229512. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229512>
- Kroetz, K., Luque, G. M., Gephart, J. A., Jardine, S. L., Lee, P., Chicojay Moore, K., Cole, C., Steinkruger, A., & Donlan, C. J. (2020). Consequences of seafood mislabeling for marine populations and fisheries management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(48), 30318-30323. <https://doi.org/10.1073/pnas.2003741117>
- Luque, G. M., & Donlan, C. J. (2019). The characterization of seafood mislabeling: A global meta-analysis. *Biological Conservation*, 236, 556-570. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.04.006>
- Munguia-Vega, A., Terrazas-Tapia, R., Dominguez-Contreras, J. F., Reyna-Fabian, M., & Zapata-Morales P. (2022). DNA barcoding reveals global and local influences on patterns of mislabeling and substitution in the trade of fish in Mexico. *PLOS One*, 17(4), e0265960. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265960>
- Oceana. (2022). *¿Cumplirá México compromiso internacional de combatir pesca ilegal?. Agosto 2022*. <https://mx.oceana.org/comunicados/cumplira-mexico-compromiso-internacional-de-combatir-pesca-ilegal/>
- Oceana. (2023a, febrero). *Mexicanos exigen saber el origen del pescado que consumen*. <https://mx.oceana.org/comunicados/mexicanos-exigen-saber-el-origen-del-pescado-que-consumen/>
- Oceana. (2023b, marzo). *Gato X Liebre: Engaño en el Noroeste*. <https://mx.oceana.org/wp-content/uploads/sites/17/2023/03/OCEANA-GATOXLIEBRE-DIGITAL.pdf>
- Parlamento Europeo. (2018). *La producción acuícola en la Unión Europea. Ficha técnica. La política pesquera común*. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/120/la-produccion-acuicola-en-la-union-europea>
- Reilly, A. (2018). *Overview of food fraud in the fisheries sector*. FAO Fisheries and Aquaculture Circular. <https://www.fao.org/3/i8791en/I8791EN.pdf>
- Rodríguez-Pérez, M. Y., Sánchez-Velasco, L., Godínez, V. M., Galindo-Bect, M. S., & Martínez-Rincón, R. O. (2023). Vaquita's habitat suitability in the Upper Gulf of California between two contrasting environmental years: 1997 and 2008. *Regional Studies in Marine Science*, 102907. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102907>
- Sader (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural)-Conapesca (Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca). (2020). *Programa Nacional de Pesca y Acuicultura 2020-2024*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/616554/PROGRAMA_Nacional_de_Pesca_y_Acuicultura_2020-2024baja.pdf
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2018). Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-169-SEMARNAT-2018 que establece las especificaciones de marcaje para los ejemplares, partes y derivados de totoaba (*Totoaba macdonaldi*), provenientes de Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5516146&fecha=14/03/2018#gsc.tab=0

- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2018). <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/la-totoaba-especie-en-peligro-de-extincion-victima-del-trafico-ilegal?idiom=es>
- Series de Mongabay: Estrategias de conservación. (2019). *México: científicos crían en cautiverio totoabas para salvarlas del peligro de extinción*. <https://es.mongabay.com/2019/06/mexico-crian-totoabas-extincion/>
- Wang, Y. V., Wan, A. H., Lock, E. J., Andersen, N., Winter-Schuh, C., & Larsen, T. (2018). Know your fish: A novel compound-specific isotope approach for tracing wild and farmed salmon. *Food Chemistry*, 256, 380-389. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.095>



Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/22917>

Cómo citar el artículo:

Gamboa Delgado, J. y Sánchez-Díaz, R. (2025). La pesca ilegal de la totoaba y su producción mediante acuicultura: trazabilidad y métodos para identificar el origen. *CIENCIA ergo-sum*, 32. <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a33>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a33>



Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar4.0Internacional.

Declaración de autoría (CRediT):

Julián Gamboa-Delgado: conceptualización, investigación, análisis formal, *software*, validación, supervisión, redacción-borrador original.

Ricardo Sánchez-Díaz: investigación, metodología redacción-revisión y edición.