

*Review*

## Los calígidos ¿Patógenos potenciales para el cultivo de peces marinos en México?

Francisco Neptalí Morales-Serna<sup>1,2</sup>, Juan Manuel Martínez-Brown<sup>1,2</sup>

Rosa María Medina-Guerrero<sup>2</sup> & Emma Josefina Fajer-Ávila<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CONACYT, <sup>2</sup>Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C.

Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental, Mazatlán, Sinaloa, México

Corresponding author: Francisco Neptalí Morales-Serna (francisco.morales@ciad.mx)

**RESUMEN.** Los copépodos parásitos de la familia Caligidae, comúnmente llamados “piojos de mar”, son descritos como uno de los problemas más serios que afectan a la industria del salmón en la etapa de engorda en el mar a nivel mundial, causando lesiones en la piel, crecimiento lento y mortalidad. Gran parte de los conocimientos biológicos y ecológicos de estos organismos se han obtenido a partir de especies de aguas frías o templadas. En México, el conocimiento de este grupo de parásitos se ha limitado a registros esporádicos de especies nuevas o ya conocidas, pero poco se sabe sobre su biología y ecología. La diversidad de calígidos en peces silvestres puede ser alta en las costas mexicanas, por lo que no debería descartarse su potencial riesgo sanitario en áreas de interés para la piscicultura marina. En este artículo se resume el conocimiento actual sobre el ciclo de vida, localización de hospedero, ecología, efecto en la salud de los peces y métodos de control de calígidos. Mejorar el conocimiento de este grupo de parásitos facilitaría no sólo posibles estrategias de prevención y control de enfermedades de los peces, sino también el manejo y conservación de recursos naturales, ya que las granjas de peces pueden producir parásitos que impacten las poblaciones naturales de peces.

**Palabras clave:** Siphonostomatoida, calígidos, crustáceos, parasitismo, biología, ecología, Latinoamérica.

### Caligids-potential pathogens for marine finfish aquaculture in Mexico?

**ABSTRACT.** Parasitic copepods of the family Caligidae, the so-called sea lice, may be deleterious to marine or brackish finfish aquaculture. To date, biological and ecological studies of sea lice have been mostly restricted to species from cold or temperate regions. In Mexico there are some records of sea lice species on marine fishes; however, the research regarding their biology and ecology has been scarce. It is possible that a high biodiversity of sea lice is distributed in coastal waters of Mexico; therefore, their significance as pathogenic parasites should increase. The purpose of this review is to outline the current knowledge of the life cycle, host location, ecology, effect on fish health, and control strategies of sea lice in order to establish supportive basis for natural resource management and control of parasites and diseases of marine fish cultured in Mexico.

**Keywords:** Siphonostomatoida, caligids, crustaceans, parasitism, biology, ecology, Latin America.

### INTRODUCCIÓN

Desde 1960 la acuicultura ha sido a nivel mundial la actividad productora de alimentos con mayor tasa de crecimiento anual. Entre los años 2000 a 2012 la producción acuícola aumentó a una tasa media anual de 6,2% (FAO, 2014). En el 2013, el cultivo de peces representó el 67% de la producción total de la acuicultura y de este porcentaje, el 5% correspondió a peces marinos (FAO, 2015). El aumento de la intensidad y densidad de cultivo en las piscifactorías marinas

es consecuencia de la búsqueda de eficiencia productiva y aumento de la rentabilidad mediante las economías de escala. Las principales unidades de cultivo para la producción de peces marinos son las jaulas flotantes (Beveridge, 2004). Estas unidades presentan ventajas técnicas y económicas importantes que las hacen más rentables respecto a las unidades de cultivo en tierra (Langan, 2012; Masser, 2012). Sin embargo, una de sus principales desventajas es la imposibilidad de contar con un estricto control sanitario. La exposición directa de los peces en cultivo

a los agentes biológicos que habitan naturalmente el ambiente circundante puede desencadenar diversos tipos de enfermedades, que se intensifican de manera proporcional a la densidad del cultivo (Beveridge, 2014).

Un paso importante para establecer estrategias de bioseguridad para la prevención y control de enfermedades de los organismos en cultivo es incrementar la comprensión de la biodiversidad y de los procesos que regulan la dinámica de los agentes patógenos (Bondad-Reantaso *et al.*, 2005; Subasinghe, 2005). En mares tropicales la situación es más compleja con respecto a los mares templados, ya que en latitudes bajas hay más especies parásitas y niveles de infección más altos que pondrían en riesgo el desarrollo de la acuicultura (Leung & Bates, 2013). Además, el cambio climático y la contaminación de los océanos, aunados a un crecimiento de la acuicultura basado en prácticas de manejo inadecuadas, puede provocar problemas sanitarios importantes en los sistemas de producción de peces marinos (Callaway *et al.*, 2012; Leung & Bates, 2013). Entre los agentes patógenos que han causado los problemas más graves en los cultivos de especies de alto valor (*e.g.*, *Salmo salar*), se encuentran los copépodos calígidos (Copepoda: Siphonostomatoide: Caligidae). A la fecha, el cultivo de peces marinos en México es incipiente y en la mayoría de los casos los esfuerzos se han realizado a escala experimental sin que se hayan registrado problemas relacionados con los calígidos. No obstante, el riesgo potencial de estos parásitos podría aumentar cuando los cultivos se realicen a gran escala, como es el caso de los peces salmónidos. En la presente revisión se abordan aspectos biológicos y ecológicos de estos parásitos, con un enfoque dirigido hacia el establecimiento de las bases para la planificación de estrategias de control de estos parásitos en el contexto del desarrollo de la piscicultura marina en México.

### Los calígidos

Dentro de los copépodos parásitos de peces, la familia Caligidae es la más común con 31 géneros y más de 450 especies, de las cuales 250 pertenecen al género *Caligus* y 120 a *Lepeophtheirus* (Dojiri & Ho, 2013; Walter & Boxshall, 2014). Los calígidos, conocidos comúnmente como “piojos de mar”, han llamado la atención dada su amplia distribución y sus efectos deletéreos en peces de importancia acuícola (Johnson *et al.*, 2004; Costello, 2006).

Los calígidos se caracterizan por tener el cuerpo dorso-ventralmente aplanado que se divide en cuatro partes: cefalotórax, segmento que lleva el cuarto par de patas, complejo genital y abdomen, las hembras ovígeras llevan un par de sacos de huevos. En México

se conocen cerca de 50 especies, siendo *Caligus bonito*, *C. mutabilis*, *C. productus*, *C. serratus* y *Lepeophtheirus dissimulatus* las más comunes (Morales-Serna *et al.*, 2012, 2014). Esta es una cifra importante considerando que en toda la región Neotropical se han registrado alrededor de 120 especies de calígidos (datos no publicados). Sin embargo, la biodiversidad de estos parásitos seguramente es mayor. Por ejemplo, recientemente se encontraron alrededor de 20 especies de calígidos en peces silvestres de la Bahía de Chamela, Jalisco, donde se realizan pruebas para el cultivo de lutjánidos (Morales-Serna *et al.*, 2014). No se descarta la posibilidad de que alguna de estas especies se transmita y cause daños en los peces cultivados. Dado el interés creciente por el cultivo de peces marinos en México, es conveniente mejorar el conocimiento sobre su diversidad.

### Ciclo de vida

Conocer el ciclo de vida de los calígidos es útil para entender sus estrategias de infección y mejorar el control de sus niveles de infección en la acuicultura (González & Carvajal, 2003; Hamre *et al.*, 2013). Estos parásitos tienen un ciclo de vida directo (requieren de sólo una especie hospedera). Hasta ahora se conoce el ciclo de vida de 20 especies, incluyendo 14 *Caligus* (*C. centrodonti*, *C. clemensi*, *C. curtus*, *C. elongatus*, *C. epidemicus*, *C. fugu*, *C. latigenitalis*, *C. minimus*, *C. orientalis*, *C. pageti*, *C. punctatus*, *C. rogercresseyi*, *C. rotundigenitalis* y *C. spinosus*) y seis *Lepeophtheirus* (*L. dissimulatus*, *L. elegans*, *L. hospitalis*, *L. pectoralis*, *L. salmonis* y *L. simplex*) (Ho & Lin, 2004; Ohtsuka *et al.*, 2009; Madinabeitia & Nagasawa, 2011; Venmathi-Maran *et al.*, 2013; Morales-Serna *et al.*, 2015).

En *Lepeophtheirus* y *Caligus* existen dos etapas de nauplio de vida libre y seis etapas posnaupliares parasíticas (Hamre *et al.*, 2013; Venmathi-Maran *et al.*, 2013). En *Caligus*, después del segundo nauplio sigue una etapa de copepodito, cuatro etapas de chalimus y la etapa adulta. En *Lepeophtheirus*, después del segundo nauplio sigue una etapa de copepodito, dos etapas de chalimus, dos etapas de preadulto y la etapa adulta. El copepodito es una larva infectiva encargada de buscar al hospedero para iniciar la fase parasítica. Chalimus (chalimi, en plural) es una etapa juvenil caracterizada por tener un filamento frontal que les sirve para agarrarse firme y permanentemente al tejido de su hospedero. Los adultos carecen del filamento frontal y a diferencia de los chalimi pueden desplazarse en el hospedero e incluso pasar de un hospedero a otro. No es raro que los calígidos adultos se encuentren nadando libremente, incluso especies como *Caligus evelynae* y *C. undulatus* han sido descritas originalmente a partir de especímenes encontrados en muestras de plancton

(Venmathi-Maran & Ohtsuka, 2008; Suárez-Morales *et al.*, 2012). Experimentos de laboratorio han señalado que los adultos de *C. rogercresseyi* pueden estar hasta siete días sin su hospedero (Bravo, 2010).

En especies de aguas frías, como *C. elongatus*, *Caligus rogercresseyi* y *L. salmonis*, su tiempo generacional (de huevo a adulto) varía de 40 a 50 días a 10°C, pero puede disminuir a medida que aumenta la temperatura (Costello, 2006); por ejemplo, en *C. rogercresseyi* el tiempo generacional se reduce ~20 días a 16,7°C (González & Carvajal, 2003). Las especies de aguas tropicales o subtropicales tienen tiempos generacionales más cortos, como *C. pageti* que requiere de ~10 a 11 días para completar un ciclo a 24-26°C (Lin & Ho, 1993). Este periodo también se ha observado en *L. simplex* a 22°C (Morales-Serna *et al.*, 2015). Estos resultados sugieren que el aumento de temperatura en los océanos no sólo modificaría la distribución de los copépodos parásitos (Cantatore *et al.*, 2012), sino también aceleraría su reproducción alcanzando niveles de infección más altos en las poblaciones de peces silvestres y cultivados.

### Localización del hospedero

Los calígidos responden a una variedad de estímulos para encontrar a sus hospederos, lo cual sucede básicamente en dos pasos: orientación y reconocimiento. Sus anténulas llevan una serie de elementos (setas y estetas), útiles para la recepción de señales mecánicas y químicas. El movimiento del agua generado por el nado de los peces parece ser el factor principal que induce las infecciones por calígidos. Esto fue demostrado por Heuch *et al.* (2007), quienes simulaban la hidrodinámica de un pez y observaron que los copépodos parásitos buscaban infectar la fuente de movimiento del agua, mientras que por el contrario, copépodos holoplactónicos (presas de los peces) buscaban alejarse.

Una vez que el parásito llega al hospedero entran en juego los semioquímicos (señales químicas emitidas por un organismo que alteran el comportamiento de otro organismo). Los peces emiten sustancias químicas a través del mucus y productos de excreción que los copépodos identifican para saber si se encuentran en el hospedero correcto. Entre las sustancias que atraen a *L. salmonis* se encuentran las kairomonas isoforona y 6-metil-5-hepten-2-ona, generadas por el salmón del Atlántico *Salmo salar* (Bailey *et al.*, 2006). Una señalización parecida fue observada entre *C. rogercresseyi* y *S. salar* (Pino-Marambio *et al.*, 2007). Las bases moleculares para entender los procesos mediante los cuales los calígidos localizan a sus hospederos se han comenzado a dar recientemente. A nivel transcriptómico, Nuñez-Acuña *et al.* (2014)

identificaron cuatro genes que codifican para los receptores ionotrópicos relacionados al sistema olfatorio de *C. rogercresseyi*, habiendo un patrón de expresión de acuerdo a la etapa de desarrollo del parásito. La continuidad de este tipo de investigaciones podría generar desarrollos biotecnológicos que permitan inhibir la comunicación entre peces y parásitos con el fin de reducir las infecciones.

### Ecología

La abundancia de los calígidos depende de factores intrínsecos, como la fecundidad y las tasas de crecimiento y desarrollo; y de factores extrínsecos, incluyendo la temperatura del agua y algunas características del hospedero como tamaño, abundancia, distribución y mecanismos de defensa (Costello, 2006). Identificar los factores que más influyen en la dinámica de estos parásitos podría ser de utilidad en estrategias de prevención o control de brotes parasitarios en sistemas de cultivo, pudiendo sugerir sitios o épocas más convenientes para el cultivo de peces.

Tanto en peces silvestres como cultivados se ha visto que la temperatura juega un papel preponderante en la dinámica de los calígidos, haciendo que sus poblaciones sean generalmente más abundantes en verano. Por ejemplo, la prevalencia e intensidad de *C. elongatus* y *L. salmonis* en salmones silvestres (*Salmo trutta*) de Noruega tienden a aumentar en primavera y a disminuir en invierno (Schram *et al.*, 1998; Rikardsen, 2004). Heuch *et al.* (2007) observaron que la prevalencia e intensidad de *C. elongatus* en varias especies de peces de Noruega es mayor en otoño que en primavera. En el lenguado (*Platichthys flesus*) de Portugal, la prevalencia y abundancia de *L. pectoralis* fueron más altas en verano (Cavaleiro & Santos, 2009). Igualmente, en el botete (*Sphoeroides annulatus*) del Pacífico mexicano, la prevalencia e intensidad de *L. simplex* fueron mayores en los meses más cálidos del año (Morales-Serna *et al.*, 2011).

Sin embargo, hay otros factores que pueden influir además de la temperatura. Por ejemplo, la disminución en la salinidad durante la etapa infectiva de *L. salmonis*, trae como consecuencia que los copepoditos disminuyan su habilidad para responder y fijarse a su hospedero, reduzcan su supervivencia y se hundan más rápido (Bricknell *et al.*, 2006). No obstante, se ha sugerido que el mucus de los peces puede brindar sales a los calígidos, favoreciendo su supervivencia ante reducciones en la salinidad del agua (Connors *et al.*, 2008). En su estudio, Bravo *et al.* (2008) observaron que el gradiente de salinidad influyó notablemente en que la prevalencia e intensidad de *C. rogercresseyi* variara de una localidad a otra, impidiendo detectar patrones bien definidos; además, sugirieron que

individuos de lugares con amplias fluctuaciones temporales de salinidad podrían tolerar concentraciones menores de salinidad, que individuos de localidades más estables.

### Efectos de los calígidos en sus hospederos

Los calígidos se alimentan de mucus, piel y sangre de sus hospederos, provocándoles daños entre sutiles y graves. Esto depende de la fase de desarrollo en que se encuentren los parásitos, siendo las etapas pre-adulta y adulta las que causan mayor daño. También depende de la especie de hospedero; así, el salmón del Atlántico (*S. salar*) es de los hospederos más susceptibles a infecciones por *L. salmonis*, por el contrario el salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*) es más resistente. Las infecciones fuertes pueden producir erosión de la epidermis, exposición del músculo, hemorragias e infecciones secundarias por bacterias o virus que pueden causar la muerte de los peces. En el salmón del Atlántico, las infecciones por *L. salmonis* provocan alteraciones fisiológicas que incluyen niveles altos de cortisol plasmático y glucosa, y reducción de la capacidad de osmorregulación y de inmunidad inespecífica; mientras que los efectos subletales incluyen alteración del funcionamiento cardíaco, reducción del crecimiento, menor rendimiento reproductivo y de nado y, daños en el sistema inmune (Finstad *et al.*, 2007; Wagner *et al.*, 2008; Tveiten *et al.*, 2010).

Las enfermedades y mortalidad de los peces se pueden incrementar por condiciones subóptimas en la calidad del agua. Finstad *et al.* (2007, 2012) observaron que, en comparación con peces no expuestos a la acidificación, los peces que habían pasado por agua dulce acidificada fueron más propensos a morir al ser transferidos a agua marina e infectados con *L. salmonis*, incluso cuando los peces pasaron por un lapso de recuperación antes de la infección. Por lo tanto, es recomendable evaluar las condiciones ambientales de los sitios de importancia para la maricultura y determinar el efecto combinado de la contaminación acuática y los parásitos sobre los peces.

La respuesta del hospedero al ataque de calígidos incluye inflamación, hiperplasia, proliferación de fibroblastos e infiltración celular. La respuesta inflamatoria del salmón del Atlántico puede ser escasa ante juveniles y aumentar ante adultos de *L. salmonis*. En el salmón coho se ha observado que las infecciones por *L. salmonis* son reducidas debido a una respuesta rápida del sistema inmune que involucra señalización e infiltración de células/neutrófilos (etapas tempranas de la inflamación), motilidad celular y cicatrización de la herida, la cual no se observa en hospederos más susceptibles; además, los peces presentan anticuerpos específicos para los antígenos del parásito (Fast, 2014).

En las secreciones de *L. salmonis* hay moléculas inmunosupresoras, como la tripsina y prostaglandina E<sub>2</sub> (PGE<sub>2</sub>), capaces de modificar la respuesta inmune innata del hospedero. Los peces menos susceptibles no estimulan dichas secreciones al mismo nivel que los peces más susceptibles (Fast *et al.*, 2003). Macrófagos del riñón cefálico del salmón del Atlántico incubados con secreciones y PGE<sub>2</sub> de *L. salmonis* revelaron una inhibición importante en la expresión de la interleucina-1 $\beta$  (IL-1 $\beta$ ) y del gen de mayor histocompatibilidad (MHC I) (Fast *et al.*, 2007). Asimismo, Lewis *et al.* (2014) demostraron que las secreciones de *L. salmonis* afectan directamente la funcionalidad de los macrófagos del salmón rosado (*Oncorhynchus gorbuscha*), salmón chum (*O. keta*) y salmón del Atlántico (*S. salar*). Estos autores sugieren que las secreciones de *L. salmonis* provocan una activación alternativa de los macrófagos de los peces, ya que hubo un incremento del índice fagocítico pero escasa explosión oxidativa en macrófagos de los salmones chum y del Atlántico. Por el contrario, los macrófagos del salmón rosado tuvieron mayor explosión oxidativa pero un índice fagocítico bajo. Así, se cree que el salmón rosado tiene la capacidad de dar una respuesta inflamatoria contra *L. salmonis*, que puede ser retrasada o impedida en el salmón del Atlántico y salmón chum, permitiendo no sólo la permanencia del parásito sino también el desarrollo de infecciones secundarias por otros microorganismos.

### Impacto de los calígidos en la acuicultura

En peces silvestres, los calígidos son comunes pero generalmente sus niveles de infección son bajos y los daños en el hospedero son sutiles. Por el contrario, estos parásitos pueden causar daños serios en los peces en confinamiento. Debido a su ciclo de vida directo y a la alta densidad de peces en las jaulas, los calígidos pueden alcanzar prevalencias e intensidades de infección muy altas. *Caligus elongatus* y *L. salmonis* en el hemisferio norte y *C. rogercresseyi* en Chile han afectado seriamente a los salmónidos en cultivo, generando pérdidas económicas globales que han superado los 400 millones de dólares por año (Costello, 2009); por lo tanto, estas tres especies han sido ampliamente estudiadas.

Otros calígidos también han afectado el cultivo de peces. Sobresale *Caligus epidemicus*, considerado el calígido más peligroso en Asia y un agente patogénico relevante en el Indo-Pacífico, con capacidad de infectar a varias especies de peces (36 más un híbrido), resiste grandes variaciones en salinidad (2-30) y su distribución abarca aguas tropicales, subtropicales y templadas (Nagasawa, 2013). *Caligus multispinosus* ha causado mortalidades en el espárido *Acanthopagrus*



*schlegelii* cultivado en Taiwán (Lin *et al.*, 1997). *Caligus chistos* ha sido asociado a lesiones oculares severas del atún aleta azul cultivado en Australia (Hayward *et al.*, 2008). *Caligus sclerotinosus* ha sido abundante en el espárido *Pagrus major* cultivado en Corea y Japón (Venmathi-Maran *et al.*, 2012). Interesantemente, *C. sclerotinosus* se ha encontrado, aunque raramente, en lutjánidos cultivados en aguas costeras del Pacífico mexicano, tanto en peces silvestres (Morales-Serna *et al.*, 2014) como de una planta productora de larvas (F.N. Morales-Serna, *obs. pers.*). Otra especie potencialmente riesgosa para el cultivo de peces en el Pacífico mexicano podría ser *Caligus serratus*, ya que es capaz de infectar a varias especies de peces (Morales-Serna *et al.*, 2013). Aunque estos antecedentes no son suficientes para sugerir a los calígidos como parásitos de riesgo sanitario para el cultivo de peces marinos en México, tal posibilidad no debería descartarse.

Los problemas con calígidos han ocurrido principalmente en peces cultivados en jaulas, en las cuales hay poco o ningún control sobre la calidad del agua y sobre la presencia de otros organismos, lo que facilita la transmisión de parásitos de los peces silvestres a los cultivados, aumentando así los procesos de infección y brotes de enfermedades (Nowak, 2007). El problema aumenta si se considera que las jaulas podrían ser una fuente de parásitos o foco de infección para los peces silvestres, con potencial para modificar los sistemas naturales hospedero-parásito. Este tema es controvertido en la salmicultura, habiendo presión por grupos conservacionistas para mantener los números de calígidos al nivel más bajo posible. Krkošek *et al.* (2007) demostraron una disminución en las poblaciones naturales de salmónes (*Oncorhynchus gorbuscha*) asociado a los parásitos *L. salmonis* de las granjas. Sin embargo, Riddell *et al.* (2008) argumentaron que el análisis de datos de Krkošek *et al.* (2007), estuvo sesgado y sus resultados fueron exagerados. De acuerdo con Lafferty *et al.* (2015), para determinar si las poblaciones naturales de peces están siendo afectadas por los parásitos de las granjas, es importante generar una línea base con datos de los niveles de infección de patógenos en peces silvestres antes del establecimiento de las granjas acuícolas.

### Métodos de control

La búsqueda de métodos alternativos para combatir parásitos o patógenos ha sido un tema prioritario en la industria acuícola. Tradicionalmente, el control de calígidos en la maricultura ha sido por medicamentos suministrados a través de baños o en el alimento de los peces. Otros métodos involucran peces limpiadores y laser. Las sustancias químicas empleadas para controlar

a los calígidos son el benzoato de emamectina (tratamiento oral); benzoil ureas, diflubenzuron y teflubenzurón (tratamiento oral); peróxido de hidrógeno (tratamiento en baño); azametifos (tratamiento en baños); y piretroides, deltametrina y cipermetrina (tratamiento en baños) (Aaen *et al.*, 2015). Sin embargo, el uso extensivo de tratamientos químicos ha provocado el desarrollo de resistencia de estos parásitos hacia la mayoría de los productos medicinales aplicados y hay indicios de que esta resistencia no desaparece a través de las generaciones de los calígidos (Bravo *et al.*, 2010; Aaen *et al.*, 2015). Por ejemplo, en Escocia se ha observado que la eficacia del benzoato de emamectina para combatir *L. salmonis* ha disminuido a través del tiempo (Lees *et al.*, 2008).

En Chile, la ivermectina fue un tratamiento que se aplicó por 10 años pero fue prohibida a fines de los 90” siendo sustituida por el benzoato de emamectina, el único tratamiento autorizado en ese país para el control de *Caligus* entre 2000 y 2007. Sin embargo, debido a que *C. rogercresseyi* mostró pérdida de sensibilidad al benzoato de emamectina, después del 2007 se permitió el uso de otros compuestos, incluyendo deltametrina, cipermetrina, diflubenzuron y azametifos (Bravo *et al.*, 2008, 2015). Antes de la entrada de estos compuestos, el peróxido de hidrógeno fue la única alternativa al benzoato de emamectina; pero *C. rogercresseyi* al igual que *L. salmonis* puede recuperarse de dicho tratamiento, incluso *Caligus* es más hábil para volver a localizar hospederos sobre todo en balsas-jaulas con mayor cantidad de peces, por lo que el uso de peróxido de hidrógeno tiene que contemplar la colecta de los parásitos inconscientes (Bravo *et al.*, 2010). Asimismo, tratamientos con baños de agua dulce no han mostrado ser una buena opción para el control de *Caligus*, ya que la eficacia general es menor del 60%, con menos efecto en las hembras (41%), hacia las cueles deben ir dirigidas las medidas de control (Bravo *et al.*, 2015).

La resistencia potencial a cualquiera de los compuestos químicos disponibles es una amenaza contra los esfuerzos por mantener bajo control los niveles de infección por calígidos. Por ello, se recomienda diseñar estrategias de rotación de medicamentos y monitorear su eficacia para detectar casos de resistencia. Esta detección se basa generalmente en el uso de bioensayos que cuantifican la supervivencia de los parásitos sometidos a un determinado medicamento. Para aumentar la precisión de los resultados se ha propuesto el empleo de métodos moleculares, ya que estos no requieren organismos vivos y pueden ser configurados como bioensayos automáticos con alta precisión, que puede significar una reducción en los costos; aunque, es necesario realizar varios ajustes antes de establecer estos métodos en la rutina para detectar resistencia (Aaen *et al.*, 2015).

Otro problema relacionado al uso de compuestos químicos en el control de calígidos es su efecto adverso para el ambiente cuando no se emplean correctamente. Por ejemplo, Ait Ayad *et al.* (2011) observaron que la toxicidad de la cipermetrina altera el comportamiento de los mejillones, retardando la apertura de las valvas. Wang *et al.* (2011) demostraron que la cipermetrina también provoca cambios en la estructura comunitaria del fitoplancton, favoreciendo la abundancia de dinoflagelados y posibles florecimientos de algas tóxicas. Por tal motivo, es necesario buscar tratamientos alternativos como los inmunoestimulantes, que ayuden a reducir las infecciones por calígidos y sean amigables con el ambiente. Otra alternativa puede ser el uso de vacunas. Si bien los resultados hasta ahora son limitados, las nuevas tecnologías basadas en la secuenciación masiva de genomas ofrecen una oportunidad para avanzar en el desarrollo de vacunas contra calígidos (Fast, 2014). Tal es el caso del gen *my32* aislado desde *C. rogercresseyi* que demostró tener potencial para desarrollar vacunas que protejan las infecciones causadas por calígidos (Carpio *et al.*, 2011).

### CONCLUSIONES

Los calígidos son parásitos comunes de peces marinos y de aguas salobres. A pesar de ello, su conocimiento en México es limitado y probablemente, el conocimiento sobre su biodiversidad aún es insuficiente. Además, la información referente a la ecología o epidemiología de las especies ya conocidas es escasa. Este conocimiento podría ser necesario dado el interés creciente en el cultivo de peces marinos en México. Como se ha señalado, los calígidos tienen características biológicas (*e.g.*, ciclo de vida directo, tiempos generacionales que disminuyen al aumentar la temperatura y especies con baja especificidad de hospedero) que les permiten proliferar en los sistemas de cultivo y provocar enfermedad y muerte de peces. Entonces, si los calígidos han sido problemáticos en otros países, por qué no considerarlos como patógenos potenciales para la acuicultura en México. Excepto por la producción a una baja escala comercial de *Seriola lalandi* en Baja California Sur, el cultivo de peces marinos en México se ha mantenido en una fase de ensayo en diferentes especies (*e.g.*, *Cynoscion othonopterus*, *Lutjanus argentiventris*, *L. guttatus*, *L. peru*, *Paralabrax maculatofasciatus*, *Seriola rivolina*, *Totoaba macdonaldi*). Hasta ahora no se han registrado problemas con calígidos u otros copépodos parásitos; sin embargo, una vez que aumente la producción a gran escala podría aumentar el riesgo de infecciones. Actualmente, los conocimientos biológicos y ecológicos

de los calígidos corresponden principalmente a especies de aguas frías o templadas. Por lo tanto, el estudio de especies tropicales, particularmente con el empleo de información molecular y la exploración de los genomas, podría mejorar la comprensión de la diversidad y de los procesos biológicos y ecológicos que subyacen en las interacciones hospedero-parásito. La disponibilidad cada vez mayor de las tecnologías genómicas influirá en que pronto se expliquen mejor los mecanismos que regulan la abundancia y distribución de los calígidos, con lo cual se apoyarían estrategias de prevención o control de enfermedades en peces.

### REFERENCIAS

- Aaen, S.M., K.O. Helgesen, M.J. Bakke, K. Kaur & T.E. Horsberg. 2015. Drug resistance in sea lice: a threat to salmonid aquaculture. *Trends Parasitol.*, 31: 72-81.
- Ait-Ayad, M., M. Ait-Fdil & A. Mouabad. 2011. Effects of cypermethrin (pyrethroid insecticide) on the valve activity behavior, byssal thread formation, and survival in air of the marine mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Arch. Environ. Con. Toxicol.*, 60: 462-470.
- Bailey, R.J.E., M.A. Birkett, A. Ingvarsdóttir, A.J. Mordue (Luntz), W. Mordue, B. O'Shea, J.A. Pickett & L.J. Wadhams. 2006. The role of semiochemicals in host location and non-host avoidance by salmon louse (*Lepeophtheirus salmonis*) copepodids. *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 63: 448-456.
- Beveridge, M.C.M. 2004. *Cage aquaculture*. Blackwell, Oxford, 368 pp.
- Beveridge, M.C.M. 2014. Overview of cage culture. In: P.T.K. Woo, D.W. Bruno & L.H.S. Lim (eds.). *Diseases and disorders of finfish in cage culture*. CABI, Wallingford, pp. 41-59.
- Bondad-Reantaso, M.G., R.P. Subasinghe, J.R. Arthur, K. Ogawa, S. Chinabut, R. Adlard, Z Tan & M. Shariff. 2005. Disease and health management in Asian aquaculture. *Vet. Parasitol.*, 132: 249-272.
- Bravo, S. 2010. The reproductive output of sea lice *Caligus rogercresseyi* under controlled conditions. *Exp. Parasitol.*, 125: 51-54.
- Bravo, S., V. Pozo & M.T. Silva. 2008. The tolerance of *Caligus rogercresseyi* to salinity reduced in southern Chile. *Bull. Eur. Ass. Fish Pathol.*, 28: 198-206.
- Bravo, S., V. Pozo & M.T. Silva. 2015. Evaluación de la efectividad del tratamiento con agua dulce para el control del piojo de mar *Caligus rogercresseyi* Boxshall & Bravo, 2000. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 43(2): 322-328.

- Bravo, S., S. Sevatdal & T.E. Horsberg. 2008. Sensitivity assessment of *Caligus rogercresseyi* to emamectin benzoate in Chile. *Aquaculture*, 282: 7-12.
- Bravo S., S. Sevatdal & T.E. Horsberg. 2010. Sensitivity assessment in the progeny of *Caligus rogercresseyi* to emamectin benzoate. *Bull. Eur. Ass. Fish Pathol.*, 30: 92-98.
- Bravo, S., J. Treasurer, M. Sepúlveda & C. Lagos. 2010. Effectiveness of hydrogen peroxide in the control of *Caligus rogercresseyi* in Chile and implications for sea louse management. *Aquaculture*, 303: 22-27.
- Bricknell, I.R., S.J. Dalesman, B. O'Shea, C.C. Pert & A.J.M. Luntz. 2006. Effect of environmental salinity on sea lice *Lepeophtheirus salmonis* settlement success. *Dis. Aquat. Organ.*, 71: 213-223.
- Callaway, R., A.P. Shinn, S.E. Grenfell, J.E. Bron, G. Burnell, E.J. Cook, M. Crumlish, S. Culloty, K. Davidson, R.P. Ellis, K.J. Flynn, C. Fox, D.M. Green, G.C. Hays, A.D. Hughes, E. Johnston, C.D. Lowe, I. Lupatsch, S. Malham, A.F. Mendzil, T. Nickell, T. Pickerell, A.F. Rowley, M.S. Stanley, D.R. Tocher, J.F. Turnbull, G. Webb, E. Wootton & R.J. Shields. 2012. Review of climate change impacts on marine aquaculture in the UK and Ireland. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.*, 22: 389-421.
- Cantatore, D.M.P., P.E. Braicovich, A.J. Alarcos, A.L. Lanfranchi, M.A. Rossin, D.G. Vales & J.T. Timi. 2012. New records of parasitic copepods (Crustacea, Copepoda) from marine fishes in the Argentinean Sea. *Acta Parasitol.*, 57: 83-89.
- Carpio, Y., L. Basabe, J. Acosta, A. Rodríguez, A. Mendoza, A. Lisperger, E. Zamorano, M. González, M. Rivas, S. Contreras, D. Haussmann, J. Figueroa, V.N. Osorio, G. Asencio, J. Mancilla, G. Ritchie, C. Borroto & M.P. Estrada. 2011. Novel gene isolated from *Caligus rogercresseyi*: a promising target for vaccine development against sea lice. *Vaccine*, 29: 2810-2820.
- Cavaleiro, F.I. & M.J. Santos. 2009. Seasonality of metazoan ectoparasites in marine European flounder *Platichthys flesus* (Teleostei: Pleuronectidae). *Parasitology*, 136: 855-865.
- Connors, B.M., E. Juarez-Colunga & L.M. Dill. 2008. Effects of varying salinities on *Lepeophtheirus salmonis* survival on juvenile pink and chum salmon. *J. Fish Biol.*, 72: 1825-1830.
- Costello, M.J. 2006. Ecology of sea lice parasitic on farmed and wild fish. *Trends Parasitol.*, 22: 475-483.
- Costello, M.J. 2009. The global economic cost of sea lice to the salmonid farming industry. *J. Fish Dis.*, 32: 115-118.
- Dojiri, M. & J.-S. Ho. 2013. Systematics of the Caligidae, copepods parasitic on marine fishes. Koninklijke Brill NV, Leiden, 448 pp.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2014. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. FAO, Roma, 253 pp.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2015. Fisheries and aquaculture software. FishStatJ - software for fishery statistical time series. In: FAO Fisheries and Aquaculture Department Updated 23 June 2015 [<http://www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstatj/en>]. Revisado: 26 Noviembre 2015.
- Fast, M.D. 2014. Fish immune responses to parasitic copepod (namely sea lice) infection. *Dev. Comp. Immunol.*, 43: 300-312.
- Fast, M.D., J.F. Burka, S.C. Johnson & N.W. Ross. 2003. Enzymes released from *Lepeophtheirus salmonis* in response to mucus from different salmonids. *J. Parasitol.*, 89: 7-13.
- Fast, M.D., S.C. Johnson, T.D. Eddy, D. Pinto & N.W. Ross. 2007. *Lepeophtheirus salmonis* secretory/excretory products and their effects on Atlantic salmon immune gene regulation. *Parasite Immunol.*, 29: 179-189.
- Finstad, B., F. Kroglund, P.A. Bjørn, R. Nilsen, K. Pettersen, B.O. Rosseland, H.-C. Teien, T.O. Nilsen, S.O. Stefansson, B. Salbu, P. Fiske & L.O.E. Ebbesson. 2012. Salmon lice-induced mortality of Atlantic salmon postsmolts experiencing episodic acidification and recovery in freshwater. *Aquaculture*, 362-363: 193-199.
- Finstad, B., F. Kroglund, R. Strand, S.O. Stefansson, P.A. Bjørn, B.O. Rosseland, T.O. Nilsen & B. Salbu. 2007. Salmon lice or suboptimal water quality - Reasons for reduced postsmolt survival? *Aquaculture*, 273: 374-383.
- González, L. & J. Carvajal. 2003. Life cycle of *Caligus rogercresseyi* (Copepoda: Caligidae) parasite of Chilean reared salmonids. *Aquaculture*, 220: 101-117.
- Hamre, L.A., C. Eichner, C.M.A. Caipang, S.T. Dalvin, J.E. Bron, F. Nilsen, G. Boxshall & R. Skern-Mauritzen. 2013. The salmon louse *Lepeophtheirus salmonis* (Copepoda: Caligidae) life cycle has only two chalimus stages. *PLoS ONE*, 8: e73539.
- Hayward, C.J., H.M. Aiken & B.F. Nowak. 2008. An epizootic of *Caligus chiastos* on farmed southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii* off South Australia. *Dis. Aquat. Organ.*, 79: 57-63.
- Heuch, P.A., M.H. Doall & J. Yen. 2007. Water flow around a fish mimic attracts a parasitic and deters a planktonic copepod. *J. Plankton Res.*, 29: i3-i16.
- Heuch, P.A., Ø. Øines, J.A. Knutsen & T.A. Schram. 2007. Infection of wild fishes by the parasitic copepod *Caligus elongatus* on the south east coast of Norway. *Dis. Aquat. Organ.*, 77: 149-158.



- Ho, J.-S. & C.-L. Lin. 2004. Sea lice of Taiwan (Copepoda: Siphonostomatoida: Caligidae). The Sueichan Press, Keelung, 388 pp.
- Johnson, S.C., J.W. Treasurer, S. Bravo, K. Nagasawa & Z. Kabata. 2004. A review of the impact of parasitic copepods on marine aquaculture. *Zool. Stud.*, 43: 229-243.
- Krkošek, M., J.S. Ford, A. Morton, S. Lele, R.A. Myers & M.A. Lewis. 2007. Declining wild salmon populations in relation to parasites from farm salmon. *Science*, 318: 1772-1775.
- Lafferty, K.D., C.D. Harvell, J.M. Conrand, C.S. Friedman, M.L. Kent, A.M. Kuris, E.N. Powell, D. Rondeau & S.M. Saksida. 2015. Infectious diseases affect marine fisheries and aquaculture economics. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 7: 471-496.
- Langan, R. 2012. Ocean cage culture. In: J. Tidwell (ed.). *Aquaculture production systems*. Wiley-Blackwell, Oxford, pp. 135-157.
- Lees, F., M. Baillie, G. Gettinby & C.W. Revie. 2008. The efficacy of emamectin benzoate against infestations of *Lepeophtheirus salmonis* on farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L) in Scotland, 2002-2006. *PLoS ONE*, 3: e1549.
- Leung, T.L.F. & A.E. Bates. 2013. More rapid and severe disease outbreaks for aquaculture at the tropics: implications for food security. *J. Appl. Ecol.*, 50: 215-222.
- Lewis, D.L., D.E. Barker & R.S. McKinley. 2014. Modulation of cellular innate immunity by *Lepeophtheirus salmonis* secretory products. *Fish Shellfish Immunol.*, 38: 175-183.
- Lin, C.-L. & J.-S. Ho. 1993. Life history of *Caligus epidemicus* Hewitt parasitic on tilapia (*Oreochromis mossambicus*) cultured in brackish water. In: G.A. Boxshall & D. Defaye (eds.). *Pathogens of wild and farmed fish: sea lice*. Ellis Horwood, Chichester, pp. 5-15.
- Lin, C.-L., Ho, J.-S. & S.N. Chen. 1997. Development of *Caligus multispinosus* Shen, a caligid copepod parasitic on the black sea bream (*Acanthopagrus achlegeli*) cultured in Taiwan. *J. Nat. Hist.*, 31: 1483-1500.
- Madinabeitia, I. & K. Nagasawa. 2011. Chalimus stages of *Caligus latigenitalis* (Copepoda: Caligidae) parasitic on blackhead seabream from Japanese waters, with discussion of terminology used for developmental stages of caligids. *J. Parasitol.*, 97: 221-236.
- Masser, M.P. 2012. Cage culture in freshwater and protected marine areas. In: J. Tidwell (ed.). *Aquaculture production systems*. Wiley-Blackwell, Oxford, pp. 121-134.
- Morales-Serna, F.N., M. Rubio-Godoy & S. Gómez. 2011. Seasonality of parasitic copepods on bullseye puffer, *Sphoeroides annulatus* (Pisces: Tetraodontidae), from the northwestern coast of Mexico. *J. Parasitol.*, 97: 565-573.
- Morales-Serna, F.N., S. Gómez & G. Pérez-Ponce de León. 2012. Parasitic copepods reported from Mexico. *Zootaxa*, 3234: 43-68.
- Morales-Serna, F.N., Z.L. Hernández-Inda, S. Gómez & G. Pérez-Ponce de León. 2013. Redescription of *Caligus serratus* Shiino, 1965 (Copepoda: Caligidae) parasitic on eleven fish species from Chamela Bay in the Mexican Pacific. *Acta Parasitol.*, 58: 367-375.
- Morales-Serna, F.N., C.D. Pinacho-Pinacho, S. Gómez & G. Pérez-Ponce de León. 2014. Diversity of sea lice (Copepoda: Caligidae) parasitic on marine fishes with commercial and aquaculture importance in Chamela Bay, Pacific coast of Mexico by using morphology and DNA barcoding, with description of a new species of *Caligus*. *Parasitol. Int.*, 63: 69-79.
- Morales-Serna, F.N., A.I. Rivas-Salas, S. Gómez & E.J. Fajer-Ávila. 2015. Developmental stages and fecundity of *Lepeophtheirus simplex* (Copepoda: Caligidae) parasitic on bullseye puffer fish (*Sphoeroides annulatus*). *Folia Parasitol.*, 62: 004.
- Nagasawa, K. 2013. *Caligus epidemicus* (Copepoda: Caligidae), a pathogenic sea louse of wild and captive fish in Indo-West Pacific Region: a review. *Bull. Hiroshima Univ. Mus.*, 5: 71-86.
- Nowak, B.F. 2007. Parasitic diseases in marine cage culture - An example of experimental evolution of parasites? *Int. J. Parasitol.*, 37: 581-588.
- Nuñez-Acuña, G., V. Valenzuela-Muñoz, J. Pino-Marambio, S. Wadsworth & C. Gallardo-Escárate. 2014. Insights into the olfactory system of the ectoparasite *Caligus rogercresseyi*: molecular characterization and gene transcription analysis of novel ionotropic receptors. *Exp. Parasitol.*, 145: 99-109.
- Ohtsuka, S., I. Takami, B.A. Venmathi Maran, K. Ogawa, T. Shimono, Y. Fujita, M. Asakawa & G.A. Boxshall. 2009. Developmental stages and growth of *Pseudocaligus fugu* Yamaguti, 1936 (Copepoda: Siphonostomatoida: Caligidae) host-specific to puffer. *J. Nat. Hist.*, 43: 1779-1804.
- Pino-Marambio, J., A.J. Mordue (Luntz), M. Birkett, J. Carvajal, G. Asencio, A. Mellado & A. Quiroz. 2007. Behavioural studies of host, non-host and mate location by the sea louse, *Caligus rogercresseyi* Boxshall & Bravo, 2000 (Copepoda: Caligidae). *Aquaculture*, 271: 70-76.
- Riddell, B.E., R.J. Beamish, L.J. Richards & J.R. Candy. 2008. Comment on "Declining wild salmon populations in relation to parasites from farm salmon". *Science*, 322: 1790.



- Rikardsen, A.H. 2004. Seasonal occurrence of sea lice *Lepeophtheirus salmonis* on sea trout in two north Norwegian fjords. *J. Fish Biol.*, 65: 711-722.
- Schram, T.A., J.A. Knutsen, P.A. Heuch & T.A. Mo. 1998. Seasonal occurrence of *Lepeophtheirus salmonis* and *Caligus elongatus* (Copepoda: Caligidae) on sea trout (*Salmo trutta*), off southern Norway. *ICES J. Mar. Sci.*, 55: 163-175.
- Suárez-Morales, E., H. Camisotti & A. Martín. 2012. A new species of *Caligus* (Copepoda, Siphonostomatoida) from the plankton of the Caribbean coast of Venezuela with a key to species. *ZooKeys*, 201: 59-71.
- Subasinghe, R.P. 2005. Epidemiological approach to aquatic animal health management: opportunities and challenges for developing countries to increase aquatic production through aquaculture. *Prev. Vet. Med.*, 67: 117-124.
- Tveiten, H., P.A. Bjørn, H.K. Johnsen, B. Finstad & R.S. McKinley. 2010. Effects of the sea louse *Lepeophtheirus salmonis* on temporal changes in cortisol, sex steroids, growth and reproductive investment in Arctic charr *Salvelinus alpinus*. *J. Fish Biol.*, 76: 2318-2341.
- Venmathi-Maran, B.A. & S. Ohtsuka. 2008. Descriptions of caligiform copepods in plankton samples collected from East Asia: Accidental occurrences or a new mode of life? *Plank. Benth. Res.*, 3: 202-215.
- Venmathi-Maran, B.A., S.-Y. Oh, H.Y. Soh, H.J. Choi & J.G. Myoung. 2012. *Caligus sclerotinosus* (Copepoda: Caligidae), a serious pest of cultured red seabream *Pagrus major* (Sparidae) in Korea. *Vet. Parasitol.*, 188: 355-361.
- Venmathi-Maran, B.A., S.Y. Moon, S. Ohtsuka, S.-Y. Oh, H.Y. Soh, J.-G. Myoung, A. Iglkowska & G.A. Boxshall. 2013. The caligid life cycle: new evidence from *Lepeophtheirus elegans* reconciles the cycles of *Caligus* and *Lepeophtheirus* (Copepoda: Caligidae). *Parasite*, 20: 15.
- Wagner, G.N., M.D. Fast & S.C. Johnson. 2008. Physiology and immunology of *Lepeophtheirus salmonis* infections of salmonids. *Trends Parasitol.*, 24: 176-183.
- Walter, T.C. & G. Boxshall. 2014. World of copepods database. [<http://www.marinespecies.org/copepoda>]. Revisado: 25 Marzo 2015.
- Wang Z.-H., X.-P. Nie & W.-J. Yue. 2011. Toxicological effects of cypermethrin to marine phytoplankton in a co-culture system under laboratory conditions. *Ecotoxicology*, 20: 1258-1267.

*Received: 11 November 2015; Accepted: 14 June 2016*