

<https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v72i1.56514>

Una vida controlada por la corriente: comportamiento de reotaxis del langostino de río *Macrobrachium tenellum* (Decapoda: Palaemonidae)

Omar Alejandro Peña-Almaraz^{1,2};  <https://orcid.org/0000-0003-3223-6598>

Hilda Elena Castillo-Jiménez³;  <https://orcid.org/0009-0004-5544-6592>

Manuel Alejandro Vargas-Ceballos^{1,5};  <https://orcid.org/0000-0002-3999-3965>

Daniel Badillo-Zapata^{1,4};  <https://orcid.org/0000-0003-0522-1163>

Olimpia Chong-Carrillo^{1,5};  <https://orcid.org/0000-0002-5366-5650>

Fernando Vega-Villasante^{1*};  <https://orcid.org/0000-0003-4208-265X>

1. Laboratorio de Calidad de Agua y Acuicultura Experimental. Centro Universitario de la Costa. Universidad de Guadalajara. Puerto Vallarta, Jalisco, México; omaralejandropal@gmail.com, m.alejandrovargas.ceballos@gmail.com, danielbad00@hotmail.com, olimpiachcarrillo@gmail.com, fernandovega.villasante@gmail.com (*Correspondencia)
2. Programa de doctorado BEMARENA. Centro Universitario de la Costa. Universidad de Guadalajara. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
3. Licenciatura en Biología. Centro Universitario de la Costa. Universidad de Guadalajara. Puerto Vallarta, Jalisco, México. hildaenacastillo@gmail.com
4. Investigadores por México. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México.
5. Estancias Posdoctorales por México. CONAHCYT, México.

Recibido 07-IX-2023. Corregido 06-V-2024. Aceptado 28-VI-2024.

ABSTRACT

A life controlled by the current: rheotaxis behavior of the river prawn *Macrobrachium tenellum* (Decapoda: Palaemonidae)

Introduction: The currents of streams and rivers are natural signals that influence the migrations in the life cycle of amphidromous shrimp.

Objective: To evaluate the rheotaxis behavior in juveniles and adults of *Macrobrachium tenellum*, in relation to their response capacity to different water currents speeds in a closed-loop experimental system.

Methods: A PVC pipe system was used, with a tub for water recirculation and a backwater placed in the middle of the system. Water flows of 10-30 cm/s were tested to establish the experimental conditions. Rheotaxis behavior without backwater (SR) and with backwater (CR) was evaluated; three water flows were tested: FI, 14 cm/s; FII, 18.7 cm/s; and FIII, 22.1 cm/s, and a control FC flow, 0 cm/s, with 40 juveniles, 40 females and 40 males per flow. Three main behaviors were identified: positive rheotaxis, negative rheotaxis, and no reaction.

Results: For both SR and CR, water flows stimulate positive rheotaxis and the behavioral response is different depending on the speed of the water flow and whether they are juveniles, females, or males. In CR there was a greater response of the prawns to continue swimming against the current when they entered the pool. At a straight angle, the constant flow of water greater than 23.2 cm/s makes it difficult for this species to swim against the current.



Conclusions: The positive rheotaxis response was the most prevalent in juveniles, females, and males of *M. tenellum*.

Key words: amphidromy; migration; caridean; upstream; palemonid.

RESUMEN

Introducción: Las corrientes de arroyos y ríos son señales naturales que influyen las migraciones en el ciclo de vida de langostinos anfídomos.

Objetivo: Evaluar el comportamiento de reotaxis en juveniles y adultos de *Macrobrachium tenellum*, con relación a su capacidad de respuesta a diferentes velocidades de flujos de corriente de agua en un sistema experimental de circuito cerrado.

Métodos: Se utilizó un sistema de tubos PVC, con una tina para la recirculación del agua y un remanso colocado a la mitad del sistema. Se probaron flujos de agua de 10-30 cm/s para establecer las condiciones experimentales. Se evaluó el comportamiento de reotaxis sin remanso (SR) y con el remanso (CR); se probaron tres flujos de agua: FI, 14 cm/s; FII, 18.7 cm/s; y FIII, 22.1 cm/s, y un flujo control FC, 0 cm/s, con 40 juveniles, 40 hembras y 40 machos por flujo. Se identificaron tres comportamientos principales: reotaxis positiva, reotaxis negativa y sin reacción.

Resultados: Tanto para SR como CR los flujos de agua estimulan mayormente la reotaxis positiva y la respuesta de comportamiento es diferente según la velocidad del flujo de agua y si son juveniles, hembras o machos. En CR hubo una mayor respuesta de los langostinos a seguir nadando en contra de la corriente cuando estos ingresaban al remanso. En un ángulo recto, el flujo de agua constante superior a 23.2 cm/s dificulta el nado contra corriente de esta especie.

Conclusiones: La respuesta de reotaxis positiva fue la que mayor predominó en juveniles, hembras y machos de *M. tenellum*.

Palabras clave: anfídomía; migración; carideo; río arriba; palemonido.

INTRODUCCIÓN

La anfídomía se define como un ciclo de vida diádromo, en el cual organismos acuáticos, realizan migraciones cíclicas entre ambientes dulceacuícolas y marinos/estuarinos o viceversa, con distintos fines biológicos (McDowall, 2007), como el reclutamiento o reproducción, entre otros. Este tipo de organismos son altamente atraídos o estimulados por el flujo de las corrientes de agua, que perciben como señales naturales que los impulsan a activar su instinto de reotropismo o reotaxis positiva, es decir, nadar contra la corriente (Badillo-Zapata et al., 2021). Este comportamiento puede considerarse como una adaptación para detectar las corrientes que conducen hacia los ambientes fluviales (Fitzsimmons et al., 2002; Kikkert et al., 2009), y es especialmente relevante para la migración río arriba de post-larvas y juveniles de peces (Benbow et al., 2002; Smith & Smith, 1998) y crustáceos (Benbow et al., 2002, Benbow 2004; Benstead et al., 1999).

En el caso de los crustáceos, la mayoría de las especies anfídomas están concentradas en los langostinos de las familias Atyidae y Palaemonidae en las regiones tropicales del planeta (De Grave et al., 2015; Magalhães et al., 2016), esta última con el género *Macrobrachium* como principal representante (Bauer, 2011a), cuyo ciclo reproductivo y de reclutamiento está estrechamente relacionado e influenciado por las fluctuaciones de los caudales (Bauer & Delahoussaye, 2008; Kikkert et al., 2009). Este género presenta dos tipos de comportamiento reproductivo, el primero de ellos, donde las hembras ovígeras migran río abajo desde los ambientes fluviales hasta los ambientes estuarinos para el desove, desarrollo larval y posterior retorno de los juveniles río arriba (Bauer & Delahoussaye, 2008; John, 2009; Olivier et al., 2013; Rome et al., 2009), y segundo, donde las hembras no migran, desovan en ambientes fluviales y las larvas recién eclosionadas se desplazan río abajo a favor de la corriente para su desarrollo larval en el ambiente estuarino

y posterior retorno de los juveniles río arriba (March et al., 1998; Phone et al., 2005; Prasad & Kanaujia, 2006). Los juveniles migratorios se agrupan y usan las corrientes de los cauces como señales direccionales en sus migraciones río arriba (Olivier et al., 2013), a este comportamiento se le conoce como reclutamiento y se ha reportado en el continente americano en: *M. grandimanus*, *M. lar* (Benbow et al., 2002), *M. ohione* (Bauer & Delahoussaye, 2008; Olivier et al., 2013) y en *M. tenellum* (Rodríguez-Uribe et al., 2014).

Entre las especies mejor adaptadas, se encuentra el langostino de río *Macrobrachium tenellum*, el cual habita tanto en estuarios, ríos y arroyos, como en lagunas costeras, y tolera amplios rangos de salinidad, de 0 a 35 ups (Vega-Villasante et al., 2011), pH de 6.7 a 8.9, temperatura de 17.3 a 33.7 °C (Hernández et al., 2007) y concentración de oxígeno disuelto mayor a 4.0 mg L⁻¹ (Espinosa-Chaurand et al., 2011; Ponce-Palafox et al., 2002). En México, el periodo reproductivo de esta especie abarca desde mayo hasta octubre, con un pico reproductivo entre los meses de mayo y julio (López-Urriarte et al., 2020). El desarrollo larval ocurre en aguas estuarinas (Vargas-Ceballos et al., 2018) hasta alcanzar el estadio juvenil, donde de manera colectiva, comienzan con una migración masiva río arriba. Los juveniles de *M. tenellum* muestran atracción a escalar pendientes y son atraídos por el flujo de la corriente (Peña-Almaraz et al., 2021; Rodríguez-Uribe et al., 2014), y prefieren realizar sus migraciones en el atardecer, donde la luz es baja, cercana a la oscuridad y horarios nocturnos (Rodríguez-Uribe et al., 2014). En el caso de las poblaciones provenientes de lagunas costeras, los individuos deben encontrar la corriente principal que les permita realizar su migración río arriba (Bauer, 2011b).

Las alteraciones antropogénicas en los cuerpos de agua, como son las barreras físicas, contaminación industrial y urbana, y modificación de los cauces, pueden obstaculizar la migración de especies como *M. tenellum* y por consiguiente impedir un correcto flujo en su ciclo de vida. Las construcciones humanas, el

desvío de agua para subsanar diversos fines, principalmente la agricultura extensiva, y el encauzamiento de los ríos, provocan la pérdida de hábitats para muchas especies anfídomas (De Grave et al., 2015; March et al., 2003; Velásquez et al., 2022; Velásquez et al., 2023). La presencia de presas de diferentes tamaños es considerada como la perturbación humana más drástica y significativa que ocasiona el bloqueo de las rutas migratorias en los hábitats de los camarones anfídomos (March et al., 2003; Bauer, 2011b), diversos estudios han abordado el efecto de las estructuras de control de los flujos de ríos y otros impactos humanos en las migraciones de juveniles (Benstead et al., 1999; Benstead et al., 2000; Fievet, 2000; Pompeu et al., 2006). Estos estudios demostraron que las interrupciones en las corrientes del río desorientan a los juveniles, lo que alarga el tiempo de su migración y la energía invertida.

En el caso particular de *M. tenellum*, existen escasos estudios que evalúen la capacidad de respuesta frente a barreras físicas en el cauce del río y/o alteraciones de la dinámica hidrológica (Peña-Almaraz et al., 2021; Rodríguez-Uribe et al., 2014). En este contexto, estudios bajo condiciones experimentales de laboratorio (Peña-Almaraz et al., 2021) nos entregan una aproximación cuantitativa que permite mejorar la comprensión sobre el comportamiento de estos organismos frente a perturbaciones físicas en sus rutas migratorias en ambientes fluviales. Tomando en cuenta su ciclo de vida, los diferentes estadios y sexos de *M. tenellum* presentarán distintos comportamientos de reotaxis ante diversos flujos de agua. Para dilucidar lo anterior, se evaluó el comportamiento de la reotaxis y la capacidad de respuesta en individuos juveniles y adultos de *M. tenellum*, bajo diferentes velocidades de flujos de corriente de agua en un sistema experimental de circuito cerrado. La información generada es básica para la generación de propuestas de diseños de infraestructura hidráulica que se ajuste al ciclo de vida de estos organismos, y de este modo mitigar los impactos sobre las poblaciones de *M. tenellum* en su hábitat natural.



MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de individuos: Los individuos de *M. tenellum* se obtuvieron del estanque artificial del Centro Universitario de la Costa, de la Universidad de Guadalajara, en el municipio de Puerto Vallarta, Jalisco (20°42'15.7" N & 105°13'18.3" W), México. Se capturaron individuos juveniles y adultos con un equipo de pesca eléctrica (SAMUS 725MP), la captura se realizó desde la orilla, en zonas lénticas con vegetación acuática y sustratos rocosos. Posteriormente, se transportaron al Laboratorio de Calidad de Agua y Acuicultura Experimental (LACUIC), donde se disgregaron por sexo y talla, y se aclimataron durante una semana (hasta el momento de realizar los experimentos) en tanques de agua de 200 L con aireación constante, limpieza y recambios del 30 % del agua cada dos días. Se alimentaron una vez al día al 5 % de la biomasa total.

Preparación del sistema experimental: El sistema implementado para los bioensayos fue una modificación del utilizado por Badillo-Zapata et al. (2021), para la evaluación del comportamiento de reotaxis en el pez *Dormitator latifrons*. Dicho sistema consiste en un circuito cerrado hecho de PVC, con dos tubos de 6 pulgadas (15.24 cm) de 6 m de largo y cuatro codos de 6 pulgadas (15.24 cm), seccionado en tres divisiones (D1, D2 y D3) de 180 cm cada una, con una tina para la captación del agua, una bomba sumergible (Bekett® modelo Dp 1800) para la recirculación del flujo y un controlador de velocidad. Las modificaciones consistieron en la colocación de una malla de tela de color verde a lo largo de todo el fondo, con el fin de que los individuos pudieran sujetarse, y se agregaron dos codos de 45° (6 pulgadas) de PVC seccionados a la mitad, unidos a un tubo recto de 100 cm, con dos compuertas removibles de PVC, con el propósito de crear un remanso con tres secciones (RE: entrada; RM: parte media; RS: salida) en D2 del sistema (Fig. 1) y evaluar el comportamiento de reotaxis con flujo continuo sin remanso (SR) y con remanso (CR).

En la primera fase se llevó a cabo la preparación e instalación del sistema para hacer evaluaciones preliminares con relación a los flujos de agua propuestos para las pruebas. Los flujos se establecieron con un flotador para pesca (South Bend®) registrando los centímetros que recorre durante un segundo (cm/s) desde el punto inicial del flujo de agua en el sistema (D3).

Las pruebas preliminares se realizaron con un total de 30 juveniles, 30 hembras y 30 machos, con un individuo a la vez. Se probaron diferentes flujos de agua (de 10 a 30 cm/s). Los experimentos preliminares se corrieron en seis días no consecutivos, en periodos del día con distinta luminosidad (mañana y tarde), cuando la luz era lo suficientemente débil pero los organismos eran visibles, ya que distintas fuentes señalan que *M. tenellum* es más activo con poca luz (Peña-Almaraz et al., 2021; Rodríguez-Uribe et al., 2014). Se utilizó un Luxómetro digital (AMPROBE® LM631A) para medir la luminosidad cada media hora. Conforme avanzaron las pruebas, se ajustó la duración de observación por individuo a un minuto. Se realizaron 15 observaciones por día y se registraron las observaciones más sobresalientes. Los resultados obtenidos con los primeros flujos mostraron que a partir de 23.2 cm/s el flujo era demasiado fuerte para los organismos, lo que causaba que estos no tuvieran la oportunidad de nadar en contra de la corriente, por ende, se decidió probar flujos más bajos en los experimentos principales. Se identificaron tres comportamientos principales: reotaxis positiva (nado contracorriente), reotaxis negativa (nado a favor de la corriente) o sin reacción (cuando el langostino permaneció estático en el mismo sitio).

Experimentos principales: Los experimentos se realizaron dentro de las instalaciones del LACUIC, durante los meses de junio a septiembre del año 2022. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con un factor, el flujo de agua, con tres niveles: flujo I (FI), 14 cm/s; flujo II (FII), 18.7 cm/s; y flujo III (FIII) 22.1 cm/s y se añadió un flujo control (FC),

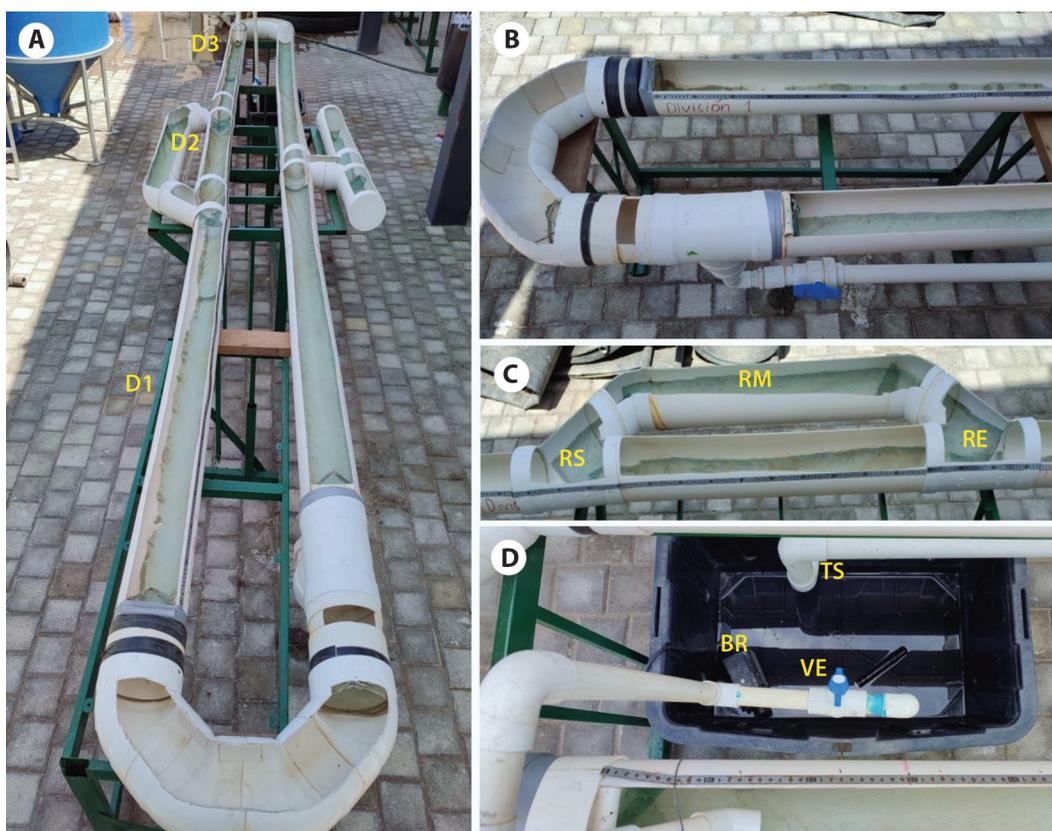


Fig. 1. Sistema experimental utilizado para evaluar la respuesta de reotaxis del langostino *Macrobrachium tenellum*. **A.** Sistema de circuito cerrado hecho de tubería de PVC en forma de ovalo; D1, D2, D3: divisiones de 180 cm. **B.** Sección correspondiente a D1, con la válvula de regulación de salida de flujo al final de la curvatura. **C.** Sección correspondiente a D2, donde se instaló la estructura de remanso; RE: entrada al remanso desde el origen del flujo; RM: parte media del remanso; RS: salida del remanso desde el origen del flujo. **D.** Tina de captación y recirculación del flujo con sistema de *by pass*; TS: tubo de salida de flujo; BR: bomba de recirculación conectada al tubo de entrada de flujo; VE: Válvula reguladora de la corriente de agua dentro del sistema. / **Fig. 1.** Experimental system used to evaluate the rheotaxis response of the shrimp *Macrobrachium tenellum*. **A.** Closed-loop system made of oval-shaped PVC pipe; D1, D2, D3: 180 cm divisions. **B.** Section corresponding to D1, with the outflow regulation valve at the end of the bend. **C.** Section corresponding to D2, where the backwater structure was installed; RE: backwater inlet from the flow origin; RM: middle part of the backwater; RS: backwater outlet from the flow origin. **D.** Flow collection and recirculation basin with by-pass system; TS: flow outlet pipe; BR: recirculation pump connected to the flow inlet pipe; VE: valve regulating the water flow within the system.

0 cm/s con la finalidad de evaluar si el comportamiento sin flujo era estocástico. Se realizaron cuatro replicas por flujo, con diez individuos por replica, dando un total de 40 juveniles, 40 hembras y 40 machos por cada flujo evaluado. Los experimentos se desarrollaron de manera individual (con un organismo a la vez), se realizaron 20 observaciones por día (dos replicas), en un horario de 7:30 a 9:30 am, con luz natural (dentro del laboratorio) y cada media hora se

midió la intensidad de esta con un luxómetro digital (AMPROBE® LM631A).

El procedimiento para cada observación fue el siguiente: se niveló el sistema experimental y se llenó, al 50 % de su capacidad, con agua declarada. Se estableció el flujo y se mantuvo el sistema activo durante una hora para su estabilización. Posteriormente, se registraron la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto del agua en el sistema. Se capturó al azar un langostino



Fig. 2. Macho adulto de *Macrobrachium tenellum* en el interior del sistema experimental de circuito cerrado. / **Fig. 2.** Adult male of *Macrobrachium tenellum* inside the closed-loop experimental system.

del stock principal y se registró su talla con un vernier (mm). Para el caso de los juveniles, solamente se utilizaron organismos entre 15 y 25 mm. Una vez hecho esto, el langostino fue colocado de manera transversal, en el centro de D2 y se observó durante un minuto el comportamiento presentado (Fig. 2); el observador se ubicó a una distancia de 2 m del sistema, para no ser percibido como una amenaza. Se registró, como respuesta, el comportamiento que el langostino realizó durante el mayor tiempo en este minuto: nado en contra de la corriente, nado a favor de la corriente o sin reacción.

En el caso de los experimentos CR, la velocidad del flujo de agua en D2 y D1 del sistema fue modificada por dicho remanso artificial, como resultado de esto, la velocidad de flujo después de RE fue de 8.3, 15 y 17 cm/s para FI, FII y FIII respectivamente y de 10.5, 18.7 y 21.4 cm/s después de RS. Por otro lado, la velocidad del flujo de agua en RM fue de 2.7, 9 y 10 cm/s para FI, FII y FIII, respectivamente. El procedimiento fue el mismo que en las primeras pruebas, solo cambió la posición inicial del langostino, que fue colocado después de RS, en la intersección de D1 y D2. En estas pruebas,

adicional al registro del comportamiento de los langostinos, se registró la entrada al remanso y reacción de estos en el remanso.

Análisis estadísticos: Se probó la normalidad y homocedasticidad de los datos mediante las pruebas de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0.05$) y Levene ($\alpha = 0.05$), respectivamente. Los datos cumplieron los supuestos de normalidad ($P > 0.05$) y homogeneidad de la varianza ($P > 0.05$). Para determinar si los diferentes flujos provocan respuestas de comportamiento distintas en los juveniles, hembras y machos, se analizaron los promedios de los conteos mediante pruebas ANOVA de una vía ($\alpha = 0.05$). En el caso de diferencias se aplicaron pruebas *a posteriori* de Tukey ($\alpha = 0.05$) para esclarecer dichas diferencias. Los datos se analizaron con el software estadístico SigmaPlot (14.5).

RESULTADOS

Condiciones experimentales: Para los experimentos SR y CR, la longitud promedio de los juveniles fue de 19.8 ± 3.8 mm, las hembras de 53.5 ± 5.9 mm y los machos de 67.4 ± 9.0 mm, la intensidad de luz varió de 0.1 luxes (muy cercana a la oscuridad total) a los 14.5 luxes (menor que la intensidad de luz del amanecer); la temperatura promedio fue de 26.7 ± 0.6 °C, el pH promedio de 6.6 ± 0.7 y el oxígeno disuelto promedio de 7.1 ± 0.2 mg/mL, estas variables ambientales permanecieron sin variaciones considerables a lo largo de las pruebas. Durante las 48 horas posteriores a las pruebas, no se registró mortalidad asociada al sistema experimental o por otras razones relacionadas con el manejo de los langostinos.

Experimentos en el sistema de circuito cerrado con flujo continuo SR: Los resultados del flujo control (FC) en el sistema SR, muestran que no existieron diferencias significativas ($P > 0.05$) en los promedios de los conteos de los comportamientos evaluados en juveniles, machos y hembras cuando no existe un flujo de agua (Fig. 3A), lo que nos indica que en este caso su comportamiento es estocástico. Los

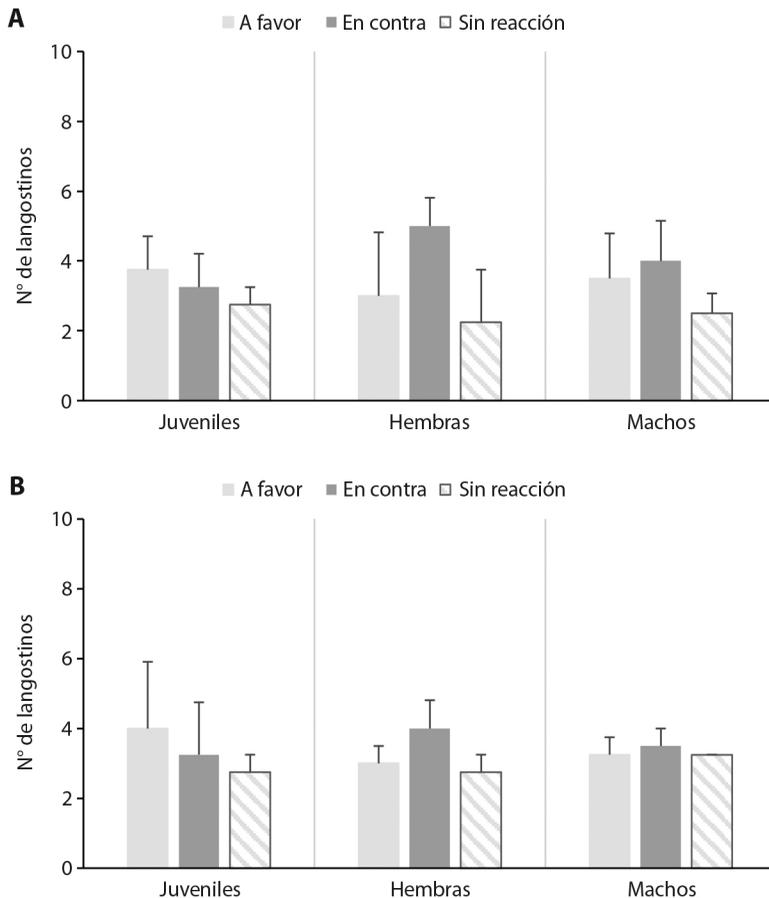


Fig. 3. Promedio de juveniles, hembras y machos de *Macrobrachium tenellum* registrados para cada respuesta de comportamiento en el flujo control (FC = 0 cm/s). **A.** En el sistema de flujo sin remanso (SR). **B.** En el sistema con remanso (CR); (N = 40) ($P > 0.05$). Las barras de error indican la desviación estándar. / **Fig. 3.** Average of juveniles, females and males of *Macrobrachium tenellum* recorded for each behavioral response in the control flow (FC = 0 cm/s). **A.** In the flow system without backwater (SR). **B.** In the system with backwater (CR); (N = 40) ($P > 0.05$). Error bars indicate standard deviation.

resultados de los experimentos en el sistema SR, nos indican que el flujo de agua estimula mayormente la reotaxis positiva, y el comportamiento es diferente según la velocidad del flujo de agua, si son juveniles, hembras o machos (Fig. 4). Los juveniles mostraron un comportamiento similar en FI, FII y FIII, y el comportamiento que predominó en todos los casos fue el nado en contra de la corriente ($P < 0.05$). En el caso de las hembras, el tratamiento FI no mostró diferencias entre los promedios, pero FII y FIII si mostraron diferencias en cada comportamiento, ambos flujos presentaron un

promedio mayor en el nado en contra de la corriente ($P < 0.05$), seguido del nado a favor y, por último, sin reacción al flujo. En el caso de los machos, todos los flujos presentaron el mismo patrón: el comportamiento de nado en contra de la corriente fue el que predominó ($P < 0.05$), y no existieron diferencias significativas entre la cantidad promedio de organismos que nadaron a favor y sin reacción ($P > 0.05$).

Experimentos en el sistema de circuito cerrado con flujo continuo CR: Para el FC en el sistema CR, los resultados muestran que no

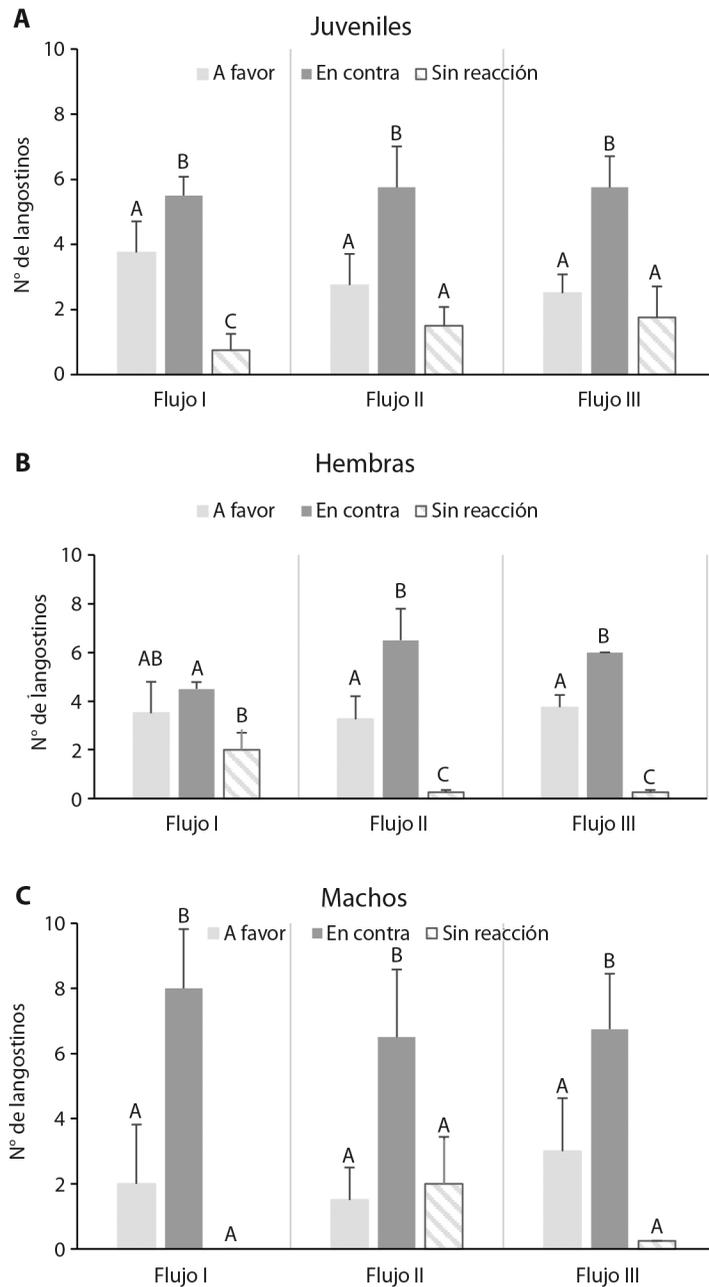


Fig. 4. Promedio de **A.** juveniles, **B.** hembras, y **C.** machos, de *Macrobrachium tenellum* registrados para cada respuesta de comportamiento en el flujo I (FI = 14.0 cm/s), flujo II (FII = 18.7 cm/s) y flujo III (FIII = 22.1 cm/s) en los experimentos realizados en el sistema de flujo sin remanso (SR) (N = 40). Las letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) en las respuestas de comportamiento por cada flujo. Las barras de error indican la desviación estándar. / **Fig. 4.** Average of **A.** juveniles, **B.** females and **C.** males, of *Macrobrachium tenellum* recorded for each behavioral response at flow I (FI = 14.0 cm/s), flow II (FII = 18.7 cm/s) and flow III (FIII = 22.1 cm/s) in experiments conducted in the flow system without backwater (SR) (N = 40). Distinct capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in behavioral responses for each flow. Error bars indicate standard deviation.

existieron diferencias significativas ($P > 0.05$) en los promedios de los comportamientos evaluados en juveniles hembras y machos (Fig. 3B), al igual que en el sistema SR. Los resultados de las observaciones con los diferentes flujos en el sistema CR nos muestran que en este caso también existe un estímulo de reotaxis en juveniles, hembras y machos, y el comportamiento es diferente (Fig. 5). Los langostinos que ingresaron al remanso permanecieron en él un promedio de 10 segundos y la mayoría continuó nadando en contra de la corriente; la cantidad de ingresos que presentó este comportamiento fue notoriamente mayor al nado a favor y sin reacción (Tabla 1). El comportamiento de los juveniles fue diferente al que se presentó en el sistema SR, ya que en FIII no existieron diferencias entre el nado en contra y a favor ($P > 0.05$). Es importante señalar que, en este flujo, existió una mayor frecuencia de langostinos que ingresaron al remanso, comparado con los langostinos que ingresaron en FI y FII. Las hembras mostraron diferencias significativas ($P < 0.05$) en el comportamiento en FI; en este caso el más usual fue el nado en contra, seguido del nado a favor y por último sin reacción; en el FII y FIII, el comportamiento que predominó fue el nado en contra y no existieron diferencias significativas en los promedios a favor y sin reacción ($P > 0.05$). El número de hembras que ingresó al remanso fue similar para los distintos flujos. En el caso de los machos, los promedios

del comportamiento a favor y sin reacción fueron diferentes ($P < 0.05$) en FI. En FII y FIII los resultados muestran que hay diferencias ($P < 0.05$); el nado en contra fue el más usual, seguido del nado a favor y por último sin reacción. Respecto al número de machos que entró en el remanso, la respuesta fue diferente en FII y FI, con una cantidad mayor en FII y menor en FI.

DISCUSIÓN

Esta no es la primera vez que se propone un estudio experimental para evaluar el comportamiento migratorio y reotaxis en camarones dulceacuícolas. Kikkert et al. (2009) propusieron un sistema de PVC donde simulaban un arroyo artificial con tres canales de seis metros conectados, en el que demostraron que la velocidad de flujo está relacionada con la cantidad de juveniles de *Atya* spp. y *Xiphocaris elongata* que se desplazan en contra de la corriente. Por otra parte, Olivier et al. (2013) evaluaron un sistema experimental en juveniles de *M. ohione*, dicho sistema consistió en una rampa de 1.5 m de PVC, revestida con malla de tela, con ángulo de la rampa y flujo de agua ajustable. Estos autores, indican que conforme aumenta el flujo de agua, aumenta el número de organismos que escalan la rampa, independientemente de su inclinación. En el presente estudio, se demostró que existe una repuesta diferente en función con la velocidad del flujo en organismos juveniles y

Tabla 1

Total de langostinos que ingresaron al remanso por cada respuesta de comportamiento en los diferentes flujos en el sistema de circuito cerrado con flujo continuo y remanso (CR) (N = 40). / **Table 1.** Total of prawns that entered the backwater for each behavioral response in the different flows in the closed loop system with continuous flow with backwater (CR) (N = 40).

	Flujo	A favor (ingresos al remanso)	En contra (ingresos al remanso)	Sin reacción (ingresos al remanso)
Juveniles	FI	7	1	1
	FII	2	5	1
	FIII	6	11	3
Hembras	FI	4	9	0
	FII	3	11	0
	FIII	0	14	1
Machos	FI	2	7	0
	FII	1	7	2
	FIII	2	15	1

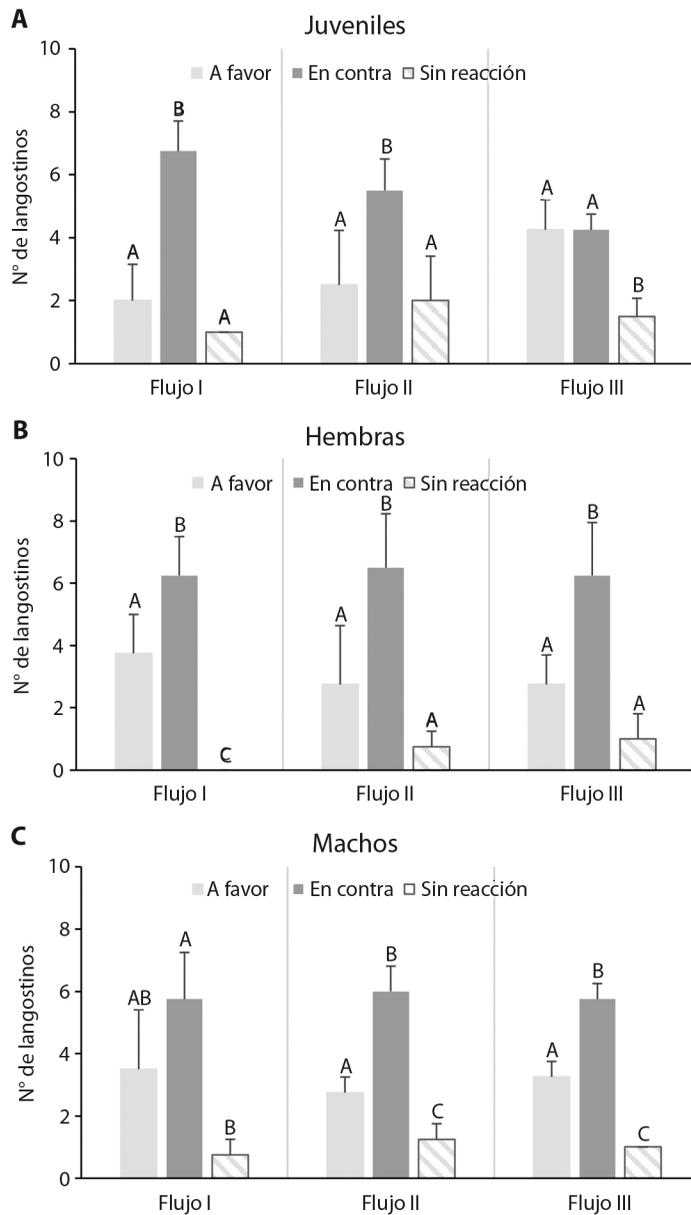


Fig. 5. Promedio de **A.** juveniles, **B.** hembras y **C.** machos, de *Macrobrachium tenellum* registrados para cada respuesta de comportamiento en el flujo I (FI = 14.0 cm/s), flujo II (FII = 18.7 cm/s) y flujo III (FIII = 22.1 cm/s) en los experimentos realizados en el sistema de flujo con remanso (CR) (N= 40). Las letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) en las respuestas de comportamiento por cada flujo. Las barras de error indican la desviación estándar. / **Fig. 5.** Average of **A.** juveniles, **B.** females and **C.** males, of *Macrobrachium tenellum* recorded for each behavioral response at flow I (FI = 14.0 cm/s), flow II (FII = 18.7 cm/s) and flow III (FIII = 22.1 cm/s) in experiments conducted in the backwater flow system (CR) (N = 40). Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in the behavioral responses for each flow. Error bars indicate standard deviation.

adultos de *M. tenellum*. Este es el segundo estudio que evalúa la respuesta de reotaxis de juveniles en relación con la migración en la misma especie. En el primer estudio (Peña-Almaraz et al., 2021), se evaluaron dos velocidades de flujos combinados con dos ángulos de inclinación y no se detectaron diferencias en la respuesta de comportamiento entre los flujos, pero sí cuando se consideraban los ángulos de inclinación.

En esta investigación, referente a la respuesta de los juveniles en el sistema CR, se puede apreciar una tendencia a que cuando el flujo aumenta, disminuye la cantidad de langostinos que presenta reotaxis positiva, hasta llegar a igualarse con la reotaxis negativa en FIII. En este caso, se sugiere que los juveniles usaron el remanso como un descanso en su nado en contra de la corriente y al sentirse en una zona segura decidieron permanecer en el mismo o regresar con el sentido del flujo. Al respecto, se ha observado en la naturaleza que los juveniles de *M. tenellum* y de *M. ohione* tienen la capacidad de rodear el curso principal del río para buscar aguas con flujos más lentos (Olivier et al., 2013; Rodríguez-Uribe et al., 2014). Incluso, se ha mencionado que pueden llegar a salir del cauce y desplazarse o escalar barreras, como en los casos de *M. lanchesteri* y *M. dienbienphusense* (Hongjamrassilp et al., 2021) para conectar con un flujo más lento río arriba.

En este estudio, las hembras de *M. tenellum* exhibieron principalmente una respuesta de nado contra corriente cuando se exponían a la mayoría de los flujos, cabe señalar que no se encontraban ovígeras ni con madurez ovárica; se sugiere que la respuesta de reotaxis en las hembras de esta especie se encuentra ligada a la madurez gonadal y al hecho de ser ovígeras o no. Estudios realizados por López-Urriarte et al. (2020) observaron que hembras ovígeras de *M. tenellum*, no se encuentran en sitios muy alejados de la desembocadura de los ríos (> 39 km) y encontraron una proporción mayor de hembras ovígeras, con embriones a punto de eclosionar cerca de la costa (< 300 m), lo que indica un movimiento migratorio corriente abajo ligado a la reproducción. Olivier & Bauer (2011), reportaron un comportamiento

similar en *M. ohione*. Sus observaciones indican que, en sitios río arriba, muchas hembras portaban embriones en una etapa temprana de desarrollo y tenían poco desarrollo ovárico y la proporción aumentaba conforme se acercaban a los estuarios. En contraste, también se ha reportado en *M. spinipes* y *M. acanthurus* que al parecer la condición ovárica y la condición de los embriones que portan las hembras no están relacionados con un comportamiento de migración río abajo (Bertini et al., 2013; Novak et al., 2015; Novak et al., 2016). En resumen, el comportamiento de reotaxis de las hembras de *M. tenellum* podría estar influenciado por la maduración ovárica y el desarrollo embrionario, es decir, mientras estas no tengan un ovario maduro ni embriones en el abdomen, su respuesta al estímulo de las corrientes de agua estaría mayormente inclinada al nado contra corriente, pero se requieren estudios más específicos para aseverar esta hipótesis.

Los experimentos demostraron que los machos, también reaccionan a los distintos flujos, con una respuesta de reotaxis positiva en su mayoría, sin embargo, en el FI del sistema CR la respuesta a favor y en contra fue similar. El hecho de que se presente reotaxis positiva, pero que las respuestas a favor y en contra sean similares en FI del sistema CR puede sugerir que el comportamiento territorial (o alguna variable más) propició una respuesta de reotaxis indistinta en este flujo. Al respecto, Barros-Alves et al. (2021) reportan que los machos de *Atya scabra*, presentan comportamientos territoriales y no demuestran conductas migratorias. De igual manera, Bertini et al. (2013) reportan que las poblaciones de *M. acanthurus* en lugares alejados de la costa (155 km) se encuentran dominadas por machos durante la mayor parte del año. Se sabe que los machos de *M. tenellum* presentan jerarquías y son territoriales (De los Santos-Romero et al., 2018; Vargas-Ceballos et al., 2021). Lo anterior sugiere que los machos, en la naturaleza, no migran distancias considerables una vez que se desarrollan por completo y llegan a los lugares donde se establecen, debido a su territorialidad, sin embargo, se



requieren estudios específicos para corroborar esta hipótesis.

Como consecuencia de las barreras físicas y la alteración de los hábitats por las estructuras de control de ríos se han observado reducciones en las poblaciones de especies migratorias, como es el caso de *M. ohione* (Olivier et al., 2013). La información sobre los mecanismos y funciones del comportamiento migratorio nos permite mejorar las estrategias de conservación y manejo de los camarones dulceacuícolas (Hongjamrassilp et al., 2021). Los resultados del presente estudio podrían contribuir a la conservación de estos langostinos, así como a la creación de mecanismos que coadyuven a un óptimo manejo pesquero o de producción acuícola en esta especie. Conocer los flujos de agua que cada especie puede tolerar en sus migraciones río arriba y los efectos que causan las obstrucciones y desvío de los flujos resulta de vital importancia para mantener la conectividad de las poblaciones, la salud ecosistémica y mantener el flujo de biomasa.

Finalmente, se concluye que la respuesta de reotaxis positiva fue la que mayor predominó, tanto para juveniles, como hembras y machos. En un ángulo recto, el flujo de agua constante superior a 23.2 cm/s dificulta el nado contra corriente de esta especie. El sistema utilizado resultó ser apto para la evaluación del comportamiento de reotaxis en *M. tenellum*, y haciendo las modificaciones pertinentes, se podría adaptar a otras especies de langostinos anfídromos.

Declaración de ética: los autores declaran que todos están de acuerdo con esta publicación y que han hecho aportes que justifican su autoría; que no hay conflicto de interés de ningún tipo; y que han cumplido con todos los requisitos y procedimientos éticos y legales pertinentes. Todas las fuentes de financiamiento se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

AGRADECIMIENTOS

OAPA, MAVC y OCC agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca doctoral otorgada para la realización de esta investigación y las becas postdoctorales que sirvieron de apoyo.

REFERENCIAS

- Badillo-Zapata, D., Castillo-Guzmán, G., Aréchiga-Palomeira, M. A., Vargas-Ceballos M. A., Chong-Carrillo, O., Espinoza-Magaña, A. F., Guerrero-Galván, S. R., & Vega-Villasante, F. (2021). Comportamiento de reotaxis de *Dormitator latifrons* (Richardson, 1844) bajo condiciones de laboratorio. *Revista Ciencia y Mar*, 24(73), 29–37.
- Barros-Alves, S. de P., Rodrigues-Alves, D. F., & Hirose, G. L. (2021). Population biology of the freshwater shrimp *Atya scabra* (Leach, 1816) (Crustacea: Decapoda) in São Francisco River, Brazil: evidence from a population at risk of extinction. *Nauplius*, 29, e2021009.
- Bauer, R. T., & Delahoussaye, J. (2008). Life history migrations of the amphidromous river shrimp *Macrobrachium ohione* from a continental large river system. *Journal of Crustacean Biology*, 28(4), 622–632.
- Bauer, R. T. (2011a). Amphidromy and migrations of freshwater shrimps. I. Costs, benefits, evolutionary origins, and an unusual case of amphidromy. In A. Asakura (Ed.), *New frontiers in crustacean biology* (pp. 145–156). Koninklijke Brill.
- Bauer, R. T. (2011b). Amphidromy and migrations of freshwater shrimps. II. Delivery of hatching larvae to the sea, return juvenile upstream migration, and human impacts. In A. Asakura (Ed.), *New frontiers in crustacean biology* (pp. 157–168). Koninklijke Brill.
- Benbow, M. E., Orzetti, L. L., McIntosh M. D., & Burky, A. J. (2002). A note on cascade climbing of migrating goby and shrimp postlarvae in two Maui streams. *Micronesica*, 34, 243–248.
- Benbow, M. E., Burky, A. J., & Way, C. M. (2004). The use of two modified Breder traps to quantitatively study amphidromous upstream migration. *Hydrobiologia*, 527, 139–151.
- Benstead, J. P., March, J. G., Pringle, C. M., & Scatena, F. N. (1999). Effects of low-head dam and water abstraction on migratory tropical stream biota. *Ecological Applications*, 9, 656–668.

- Benstead, J. P., March, J. G., & Pringle, C. M. (2000). Estuarine larval development and upstream post-larval migration of freshwater shrimps in two tropical rivers of Puerto Rico. *Biotropica*, 32, 545–548.
- Bertini, G., Baeza, J. A., & Perez, E. (2013). A test of large-scale reproductive migration in females of the amphidromous shrimp *Macrobrachium acanthurus* (Caridea: Palaemonidae) from south-eastern Brazil. *Marine and Freshwater Research*, 65(1), 81–93.
- De Grave, S., Smith, K. G., Adeler, N. A., Allen, D. J., Alvarez, F., Anker, A., Cai, Y., Carrizo, S. F., Klotz, W., Mantelatto, F. L., Page, T. J., Shy, J. Y., Villalobos, J. L., & Wowor, D. (2015). Dead shrimp blues: A global assessment of extinction risk in freshwater shrimps (Crustacea: Decapoda: Caridea). *PLoS ONE*, 10, 1–14.
- De los Santos-Romero, R. B., García-Guerrero, M. U., Alpuche-Osorno, J. J., & Cortes-Jacinto, E. (2018). The effect of alpha males and shelter type on growth and survival of the longarm prawn *Macrobrachium tenellum* (Smith, 1871). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 46(3), 551–557.
- Espinosa-Chaurand, L. D., Vargas-Ceballos, M. A., Guzmán-Arroyo, M., Nolasco-Soria, H., Carrillo-Farnés, O., Chong-Carrillo, O., & Vega-Villasante, F. (2011). Biología y cultivo de *Macrobrachium tenellum*: estado del arte. *Hidrobiológica*, 21(2), 98–117.
- Fievet, E. (2000). Passage facilities for diadromous freshwater shrimps (Decapoda: Caridea) in the Bananier River, Guadeloupe, West Indies. *Regulated Rivers Research and Management*, 16, 101–112.
- Fitzsimmons, J. M., Parham, J. E., & Nishimoto, R. T. (2002). Similarities in behavioral ecology of amphidromous and catadromous fishes on the oceanic islands of Hawaii and Guam. *Environmental Biology of Fishes*, 65, 123–129.
- Hernández, L., Murugan, G., Ruiz-Campos, G., & Maeda-Martínez, A. (2007). Freshwater shrimp of the genus *Macrobrachium* (Decapoda: Palaemonidae) from the Baja California Peninsula, México. *Journal of Crustacean Biology*, 27 (2), 351–369.
- Hongjamrassilp, W., Maiphrom, W., & Blumstein, D. T. (2021). Why do shrimps leave the water? Mechanisms and functions of parading behaviour in freshwater shrimps. *Journal of Zoology*, 313(2), 87–98.
- John, E. (2009). Physico-chemical studies of river Pumba and distribution of prawn, *Macrobrachium rosenbergii*. *Journal of Environmental Biology*, 30, 709–712.
- Kikkert, D. A., Crowl, T. A., & Covich, A. P. (2009). Upstream migration of amphidromous shrimps in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico: temporal patterns and environmental cues. *Journal of the North American Benthological Society*, 28, 233–246.
- López-Uriarte, E., Vega-Villasante, F., Wehrtmann, I. S., Cortés-Jacinto, E., García-Guerrero, M. U., Badillo-Zapata, D., Chong-Carrillo, O., & Vargas-Ceballos, M. A. (2020). Reproductive biology of the freshwater shrimp *Macrobrachium tenellum* (Smith, 1871) (Decapoda: Caridea: Palaemonidae) in Mexico. *Journal of Crustacean Biology*, 40(6), 746–755.
- Magalhães, C., Campos, M. R., Collins, P. A., & Mantelatto, F. L. (2016). Diversity, distribution and conservation of freshwater crabs and shrimps in South America. In T. Kawai, N. Cumberlidge (Eds.), *A Global Overview of the Conservation of Freshwater Decapod Crustaceans* (pp. 303–322). Cham, Springer International Publishing.
- March, J., Benstead, G. J. P., Pringle, C. M., & Scatena, F. N. (1998). Migratory drift of larval freshwater shrimps in two tropical streams, Puerto Rico. *Freshwater Biology*, 40, 261–273.
- March, J. G., Benstead J. P., Pringle, C. M. & Scatena, F. N. (2003). Damming tropical island streams: problems, solutions, and alternatives. *Bioscience*, 53, 1069–1078.
- Mcdowall, R. M. (2007). On amphidromy, a distinct form of diadromy in aquatic organisms. *Fish & Fisheries*, 8, 1–13.
- Novak, P. A., Douglas, M. M., Garcia, E. A., Bayliss, P., & Pusey, B. J. (2015). A life-history account of *Macrobrachium spinipes* (Schenkel, 1902) (Cherabin) in a large tropical Australian river. *Freshwater Science*, 34, 620–633.
- Novak, P.A., Garcia, E. A., Pusey, B. J., & Douglas, M. M. (2016). Importance of the natural flow regime to an amphidromous shrimp: a case study. *Marine and Freshwater Research*, 68(5), 909–921.
- Olivier, T. J., & Bauer, R. T. (2011). Female downstream-hatching migration of the river shrimp *Macrobrachium ohione* in the lower Mississippi River and the Atchafalaya River. *The American Midland Naturalist*, 166(2), 379–393.
- Olivier, T. J., Handy, K. Q., & Bauer, R. T. (2013). Effects of river control structures on the juvenile migration of *Macrobrachium ohione*. *Freshwater Biology*, 58, 1603–1613.
- Peña-Almaraz, O. A., Badillo-Zapata, D., Vargas-Ceballos, M. A., Chong-Carrillo, O., Palma-Cancino, D. J., Espinosa-Magaña, A. F., & Vega-Villasante, F. (2021). Evaluation of the rheotaxis behavior of juveniles of the prawn *Macrobrachium tenellum* Smith, 1871 (Decapoda: Palaemonidae) under laboratory conditions. *Nauplius*, 29, e2021036.
- Phone, H., Suzuki, H., & Ohtomi, J. (2005). Reproductive biology of the freshwater palaemonid prawn, *Macrobrachium lanchesteri* (De man, 1911) from Myanmar. *Crustaceana*, 78, 201–213.



- Pompeu, P. D., Vieira, F., & Martinez, M. B. (2006). Use of Santa Clara Power Plant fish life by Palaemonidae shrimps, Mucuri River basin, Mina Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia*, 23, 293–297.
- Ponce-Palafox, J. T., Arana-Magallon, F. C., Cabanillas-Beltrán, H., & Esparza, H. (2002). Bases biológicas y técnicas para el cultivo de los camarones de agua dulce nativos del Pacífico americano *Macrobrachium tenellum* (Smith, 1871) y *M. americanum* (Bate, 1968). *I Congreso Iberoamericano Virtual de Acuicultura*, 534–554.
- Prasad, S., & Kanaujia, D. R. (2006). Availability and breeding behaviour of ganga river prawn *Macrobrachium gangeticum* (Bate) and *Macrobrachium malcolmsonii* (HM Edwards). *Asian Fisheries Science*, 19, 377–388.
- Rodríguez-Uribe, M. C., Vega-Villasante, F., Guzmán-Arroyo, M., & Espinosa-Chaurand, L. D. (2014). Efectos de una barrera antrópica sobre la migración río arriba del langostino anfídromo *Macrobrachium tenellum* (Smith 1871) (Decapoda: Palaemonidae) en la costa del Pacífico mexicano. *Gayana*, 78(1), 1–9.
- Rome, N., Conner, S. L., & Bauer, R. T. (2009). Delivery of hatching larvae to estuaries by an amphidromous river shrimp: tests of hypotheses based on larval moulting and distribution. *Freshwater Biology*, 54, 1924–1932.
- Smith, R. J. F., & Smith, M. J. (1998). Rapid acquisition of directional preferences by migratory juveniles of two amphidromous Hawaiian gobies, *Awaous guamensis* and *Sicyopterus stimpsoni*. *Environmental Biology of Fishes*, 53, 275–282.
- Vargas-Ceballos, M. A., Vega-Villasante, F., García-Guerrero, M. U., Chong-Carrillo, O., Badillo-Zapata, D., López-Urriarte, E., & Wehrtmann, I. S. (2018). Salinity effect on embryonic development and survival of the first zoeal stage of *Macrobrachium tenellum* (Smith, 1871) (Crustacea, Palaemonidae). *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 13(4), 273–281.
- Vargas-Ceballos, M. A., Guerrero-Galván, S. R., Ponce-Palafox, J. T., López-Huerta, J., Cortés-Jacinto, E., Badillo-Zapata, D., & Vega-Villasante, F. (2021). The different morphotypes in males of the freshwater prawn *Macrobrachium tenellum* (Smith, 1871) (Decapoda: Caridea: Palaemonidae) in Mexico. *Journal of Crustacean Biology*, 41(3), 1–8.
- Vega-Villasante, F., Galaviz-Parada, J. D., Guzmán-Arroyo, M., Flores-Zepeda, C. A., & Espinosa-Chaurand, L. D. (2011). Efecto de diferentes salinidades sobre el crecimiento y supervivencia de juveniles del langostino de río *Macrobrachium tenellum* Smith, 1871. *Zootecnia Tropical*, 29(4), 467–473.
- Velásquez, C., Alanís, Y., Torres-Avilés, D., Wilson, A. E., & Cárcamo, F. (2022). Camarones, camarones y escasez hídrica: desafíos para la sostenibilidad pesquera de *Cryphiops caementarius* en la cuenca semiárida del río Choapa, Chile (2019-2021). *Marine and Fisheries Sciences*, 35(2), 237–254.
- Velásquez, C., Alanís, Y., Morales, M. C., & Cárcamo, F. (2023). Recomendaciones socioecológicas para el manejo del camarón de río *Cryphiops caementarius* frente a encauzamientos fluviales en el norte semiárido de Chile. *Idesia (Arica)*, 41(2), 115–121.