

Aplicación de análisis estadísticos multivariados, modelos complementarios, y bioinformáticos para evaluar el rol de depredadores acuáticos en el control de vectores

Victoria Atencio¹, Carla Fernández¹, Digna Rodríguez², Anyi Tuñón³, Dan Martínez³, Hermes Santos³, Mileyka Santos³, Rolando Torres³, Lorenzo Cáceres^{3,6}, Claudia Pérez⁴, Anayansi Valderrama^{3,6}, Luis F. De León⁵, Anakena M. Castillo^{3,6*}

¹Escuela de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Ciudad de Panamá, Apartado 3366, Panamá 4, Panamá, Universidad de Panamá

²Programa Centroamericano de Maestría en Entomología, Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Universidad de Panamá, República de Panamá

³Departamento de Investigación en Entomología Médica, Instituto Conmemorativo Gorgas de Estudios de la Salud (ICGES), Ciudad de Panamá 0816-02593, Panamá

⁴Departamento de Genética y Biología Molecular, Facultad de Ciencias Naturales y Tecnología, Universidad de Panamá, Ciudad de Panamá 3366, Panamá

⁵Departamento de Biología, Universidad de Massachusetts Boston, Boston, MA, EE. UU.

⁶Sistema Nacional de Investigación (SNI), Secretaria Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SENACYT) Ciudad de Panamá 0816-02852, Panamá

*Autor de correspondencia

acastillo@gorgas.gob.pa

Palabras claves: Análisis bioinformáticos, depredadores acuáticos, enemigos naturales, larvas de mosquitos, métodos estadísticos multivariados, vectores de enfermedades.

La identificación de mecanismos naturales de control de mosquitos vectores es fundamental para el diseño de estrategias sostenibles frente a la creciente resistencia a insecticidas y larvicidas, así como ante sus efectos negativos en el ambiente y la salud humana. Con este propósito, en el presente estudio evaluamos el papel de los depredadores acuáticos como enemigos naturales de las larvas de mosquitos mediante la integración de herramientas de campo y de laboratorio, métodos estadísticos multivariados, modelos complementarios y análisis bioinformáticos. Entre 2024 y 2025 se muestrearon más de 25 cuerpos de agua en distintos sitios de Panamá, abarcando un amplio gradiente ambiental. En cada cuerpo de agua se colectaron entre tres y cinco transectos, dependiendo de su tamaño, con el propósito de coleccionar larvas de mosquitos y otros organismos acuáticos, incluidos sus potenciales depredadores. En cada sitio se registraron parámetros fisicoquímicos, características del hábitat, y la composición de las comunidades acuáticas. Estos datos se analizaron mediante métodos multivariados (p. ej., PCA y CCA), así como mediante análisis estadísticos complementarios, incluyendo

regresiones logísticas, correlaciones, análisis de varianza, y pruebas tanto paramétricas como no paramétricas. Para evaluar las interacciones depredador–presa, se llevaron a cabo experimentos de mesocosmos tanto en campo como en laboratorio, con el fin de analizar el efecto de los depredadores acuáticos sobre el fitness (p. ej., supervivencia) de las larvas de mosquitos, empleando modelos complementarios para su análisis. Paralelamente, se extrajeron los tractos digestivos de diversos insectos depredadores, se aisló el ADN y se implementó un flujo de trabajo basado en secuenciación de nueva generación (Next Generation Sequencing). Las secuencias resultantes fueron analizadas con herramientas como Metaworks y MBRAVE, las cuales permitieron procesar y depurar los datos genéticos, corroborando eventos de depredación mediante la identificación de Barcode Index Numbers (BINs), identificadores numéricos asignados a secuencias de código de barras de ADN. Los resultados preliminares muestran una coocurrencia frecuente entre las larvas de mosquitos y sus depredadores, siendo *Culex* sp. el género más abundante y ecológicamente plástico ($R = 0.27$, $p = 0.011$), mientras que *Anopheles* sp. presentó una tendencia negativa débil y no significativa ($R = 0.022$, $p = 0.84$); no obstante, estos patrones podrían variar conforme se amplíe la base de datos para los análisis. La abundancia de depredadores tuvo un efecto significativo sobre la presencia de larvas de mosquitos, mientras que variables ambientales como la profundidad, el tipo de hábitat, y la conductividad influyeron en los patrones espaciales y en la distribución de los distintos géneros de larvas y depredadores acuáticos. De manera consistente, los experimentos de mesocosmos demostraron que la supervivencia de larvas de *Culex* sp., *Anopheles albimanus*, y *Aedes aegypti* disminuye significativamente en presencia de insectos depredadores, con variaciones dependientes del género del depredador. Finalmente, los análisis bioinformáticos confirmaron la presencia de BINs del género *Culex* sp. en los tractos digestivos de los depredadores acuáticos. En conjunto, estos resultados destacan la importancia ecológica de los depredadores acuáticos y subrayan su potencial como componentes clave en futuras estrategias de biocontrol para la gestión de vectores en ecosistemas neotropicales. Asimismo, evidencian el valor del uso de métodos matemáticos aplicados a las ciencias como herramientas esenciales para comprender, sustentar, y fortalecer este tipo de investigaciones.