Imunologia & Doenças Infecciosas e Parasitárias

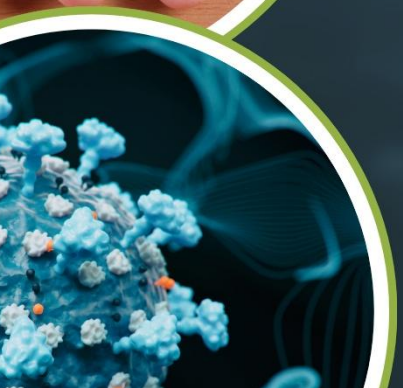
EDIÇÃO X

Capítulo 5

ESTRATEGIAS ALTERNATIVAS PARA EL CONTROL DE MALARIA AVIAR CAUSADA POR *PLASMODIUM RELICTUM*







BONILLA PERUGACHI ANDERSON DAVID[1]
CALDERÓN ESPARZA JONATHAN ANDRES[1]
TOAPPANTA PABÓN KERLY MABEL[1]

1. Estudiante – Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Central del Ecuador.

Palabras clave: *Plasmodium relictum; Estrategias Alternativas; Malaria Aviar.*

DOI 10.59290/0372030213

EDITORA PASTEUR

INTRODUCCIÓN

La malaria aviar es una enfermedad causada por más de 50 especies de parásitos pertenecientes al género *Plasmodium*, que se caracteriza por infectar diversos tejidos y células sanguíneas de las aves, además de poseer una amplia distribución (MIRANDA PAEZ *et al*., 2022). En particular, *Plasmodium relictum* es una de las especies más patógenas; afecta a más de 300 especies de aves y se extiende por todo el mundo, con excepción de la Antártida. En la actualidad está catalogada como una de las 100 peores especies invasoras a nivel mundial, siendo su principal vector los mosquitos del género *Culex* (MARTÍNEZ- DE LA PUENTE *et al*., 2021).

A diferencia de las aves continentales, la malaria aviar introducida en ecosistemas insulares como Hawái, las islas Galápagos y otros archipiélagos es una amenaza para las aves que no han sido expuestas previamente al parásito (LAPOINTE *et al*., 2012). Un claro ejemplo de su impacto es el caso de Hawái, donde especies endémicas de mieleros se han extinguido y son constantemente amenazados desde la introducción de *P. relictum* (linaje GRW4), junto con otros factores como la introducción previa de vectores *Culex*, el cambio climático, la actividad antropogénica y otras infecciones como la viruela aviar (MARTÍNEZ- DE LA PUENTE *et al*., 2021; NAVINE *et al*., 2023). El declive de estas poblaciones endémicas es un reto para la conservación, ya que representa una pérdida irreversible de biodiversidad única y, en consecuencia, de sus funciones ecológicas que desempeñaban en los ecosistemas.

El mecanismo más utilizado para reducir la transmisión de malaria aviar es el uso de productos químicos como los insecticidas para el control de vectores transmisores de la enfermedad. No obstante, algunas poblaciones de vectores han desarrollado una resistencia a estos productos, reduciendo su eficacia. Por otro lado, su uso genera contaminación en el medio ambiente (MIRANDA PAEZ *et al*., 2022). Una alternativa es la utilización de fármacos antimaláricos en aves infectadas, sin embargo, existe limitaciones en su uso porque son administrados de manera individual, de tal manera que en una población de aves no es una alternativa conveniente.

Por lo tanto, el estudio de *Plasmodium relictum* adquiere uma alta relevância como uno de los patógenos que afecta significativamente a la población de aves. El objetivo de este estudio fue conocer y analizar estrategias alternativas que sean eficaces, con el fin de contribuir en el control de la malaria aviar.

Características generales

Plasmodium relictum es un parásito protozoário perteneciente al género *Plasmodium*. A pesar de que los individuos se observen similares fenotípicamente, se han identificado cinco principales linajes genéticos (SGS1, GRW11, GRW4, LZFUS01, PHCOL01) basados en las variaciones del gen citocromo b mitocondrial. Los linajes SGS1 Y GRW4 son generalistas, es decir que tienen una mayor capacidad para infectar a una gran gama de especies y ordenes de aves, según los registros de la base de datos MalAvi (AŽELYTĖ *et al.*, 2022). Entre ellos, el linaje GRW4 es el de mayor relevancia en salud y conservación, debido a su distribución y alta patogenicidad en aves no adaptadas (MARTÍNEZ- DE LA PUENTE *et al*., 2021).

Importancia epidemiologica

Si bien la malaria aviar puede provocar signos clínicos graves e incluso la mortalidad en aves que no han sido expuestas previamente al

parásito, ciertas especies y poblaciones presentan una relativa resistencia y tolerancia a la enfermedad. En estas aves existe una infección crónica y se caracterizan por la presencia de uma parasitemia persistente, convirtiéndose en reservorios importantes para la transmisión de la enfermedad (VALKIŪNAS *et al*., 2018).

En el caso de Hawái, la enfermedad causada por *Plasmodiun relictum* (linaje GRW4), se estima que llego a principios del siglo XX, encontrándose con su vector competente ya establecido, el mosquito doméstico *Culex quinquefasciatus* que fue introducido aproximadamente en 1826. Las invasiones de estas especies provoco la extirpación de las poblaciones nativas de aves, reestructurando por completo sus comunidades y funciones (HARVEY-SAMUEL *et al*., 2021; MCCLURE *et al*., 2020).

Hay evidencia de que los mieleros Haváianos son altamente susceptible a la enfermedad, siendo 12 especies catalogadas en peligro de extinción o amenazadas. Estos sobrevivieron como poblaciones pequeñas y fragmentadas que se encuentran refugiadas en áreas con una mayor altitud, donde las bajas temperaturas influían en el desarrollo del mosquito. Sin embargo, el calentamiento global permite que los mosquitos vectores amplíen su rango altitudinal e invadan los últimos refugios de bosque montano. Ante esta situación es importante tomar acciones inmediatas que permitan reducir las poblaciones de *Culex quinquefasciatus* para evitar la perdida de avifauna en esta zona (HARVEY-SAMUEL *et al*., 2021).

ESTRATEGIAS TRADICIONALES PARA CONTROL Y LIMITACIONES

Control químico y limitaciones

Las herramientas químicas incluyen el uso de insecticidas de amplio espectro, como piretroides, organofosforados y carbamatos, aplicados en programas de control de mosquitos *Culex,* específicamente la abundancia de hembras adultas portadoras del parásito (WHO, 2017). Sin embargo, aunque estas sustancias demostraron efectividad inicial en la reducción de vectores, existen problemas de operatividad y sostenibilidad que han limitado su impacto a largo plazo. Por ejemplo, en programas tradicionales de control de malaria humana, el uso masivo de insecticidas a través de redes impregnadas o rociado residual ha favorecido la reducción de vectores, pero estos enfoques requieren alta cobertura ambiental y reiteradas aplicaciones que no siempre son factibles en ambientes silvestres donde habitan aves (WOAH, 2021).

Un problema crítico observado con el uso intensivo de insecticidas es el desarrollo de resistencia. Esta implica que las poblaciones de vectores continúen sobreviviendo a dosis que anteriormente eran letales, lo que facilita la persistencia de la transmisión de *Plasmodium relictum* en sistemas naturales. La adaptación de mosquitos a insecticidas complica la gestión de vectores en espacios abiertos, especialmente en entornos donde el uso de insecticidas es limitado o no está regulado (WHO, 2017).

Asimismo, el uso intensivo acarrea efectos adversos sobre organismos no objetivo, afectando insectos benéficos como polinizadores y depredadores de mosquitos. Los residuos de estos químicos pueden persistir em sistemas acuáticos y suelos, generando contaminación ambiental y riesgos para fauna silvestre, aves y potencialmente humanos. En entornos naturales como humedales y bosques, donde se reproducen vectores de malaria aviar, el impacto colateral puede alterar las cadenas tróficas y contribuir a la pérdida de biodiversidad, lo cual contradice los objetivos de conservación y salud animal. Este problema ha impulsado la necesidad de alternativas menos contaminantes y más

específicas que reduzcan estos efectos negativos sin comprometer la eficacia de control (MIRANDA PAEZ *et al*., 2022).

Tratamientos farmacológicos en aves

Se han utilizado antimaláricos clásicos como atovaquona/proguanil para tratar infecciones de *P. relictum* en aves (por ejemplo, en búhos nivosos con resultados positivos en la eliminación de parasitemia) indicando que estos fármacos pueden ser efectivos a nivel individual. Sin embargo, su aplicación es generalmente práctica únicamente en individuos específicos o en aves en cautiverio, no siendo viable como estrategia poblacional para especies silvestres debido a la dificultad logística y al costo asociado con la administración de estos fármacos a poblaciones enteras de aves (PUGLIESE *et al.,* 2023)

Las limitaciones prácticas incluyen la necesidad de diagnóstico previo, administración repetida y atención clínica, lo que hace que estos procedimientos sean difíciles de implementar en poblaciones naturales y especialmente costosos en términos de tiempo y recursos. Además, aunque efectivos en casos aislados, estos tratamentos no abordan la fuente de transmisión (vectores) y por tanto no previenen la reinfección.

MÉTODO

Para analizar las estrategias alternativas del control de malaria aviar causada por Plasmodium relictum, se llevó a cabo una revisión bibliográfica sistemática y selectiva. La recopilación de información se realizó en las bases de datos científicas PubMed y Google Scholar. La estrategia de búsqueda combinó palabras clave en inglés como "*Plasmodium relictum*", "*biological control*", "*Wolbachia*", "*vector control*", "*alternative strategies*", "*Culex* control" and "*Sterile Insect Technique*". Los criterios de inclusión priorizaron artículos científicos en ingles de los últimos 12 años, relacionados al control biológico, el manejo ambiental y las estrategias genéticas aplicada al control de mosquitos vectores. Por otro lado, los criterios de exclusión se aplicaron a artículos que no presentaban información relevante para el presente estudio o solo enfocados a la descripción del parásito. La información recopilada fue analizada, destacando las ventajas, limitaciones y posibles aplicaciones de las estrategias alternativas propuestas

RESULTADOS

En la literatura se pudieron encontrar diversas estrategias alternativas que permiten un control más sostenible de la transmisión de la malaria aviar (**Tabla 5.1**).

Control biológico

Constituye una de las estrategias alternativas más prometedoras para el control de la transmisión de malaria, es una maniobra que está enfocada principalmente en buscar la reducción de poblaciones de mosquitos vectores y se basa en la introducción o aprovechamiento de antagonistas naturales que afectan principalmente las fases larvarias de *Culex*. Esta estrategia se considera una de las menos perjudiciales para el medio ambiente, ya que busca establecer un equilibrio ecológico y reducir significativamente el uso de pesticidas e insecticidas químicos. Los organismos utilizados en el control biológico pueden clasificarse en microorganismos, como bacterias y virus, y macroorganismos, entre los cuales encontramos a peces larvívoros, algas y otros depredadores naturales.

Control bacteriano

Es una de las propuestas más estudiadas dentro del control biológico, debido a su eficacia y especificidad. Diversas bacterias entomopatógenas como *Xenorhabdus spp, Photorhabdus* y *Bacillus thuringiensis israelensis*, han sido evaluadas para el control de larvas de mosquitos, siendo el último uno de los más relevantes y utilizados. El mecanismo de acción de *Bacillus thuringiensis israelenses* se basa en la producción de diversas toxinas, principalmente proteínas Cry y Cyt, las cuales son ingeridas por las larvas de mosquitos. Dichas toxinas, se activarán por proteasas digestivas una vez que se encuentren en el intestino del insecto. Aquí se unirán a receptores específicos de las células epiteliales, lo que provocará la formación de poros en las membranas celulares, dañando el epitelio intestinal, permitiendo la invasión de bacterias intestinales, causando una septicemia y muerte de la larva. El uso de este bioinsecticida há demostrado ser eficaz en la reducción de las poblaciones de *Culex*, lo cual disminuye el riesgo de transmisión de malaria y otras enfermedades (AL-TEMEMAY *et al*., 2025).

Otro de los bioinsecticidas de origen microbiano es el spinosad, el cual es un compuesto derivado de la fermentación del actinomiceto Saccharopolyspora spinosa. Este agente posee actividad larvicida contra diversas especies de mosquitos, siendo un producto utilizado en algunos países y en otros todavía se encuentra en proceso de evaluación y registro. No obstante, al igual que ocurre con otros agentes de control biológico bacteriano, su aplicación presenta algunas limitaciones. Entre ellas, su actividad relativamente corta en el ambiente, lo que conlleva a requerir de aplicaciones repetidas para mantener una eficacia sostenida en el tiempo. Por esta razón, dicha estrategia se suele combinar con otras medidas de control ambiental y ecológica (BELLINI *et al*., 2014).

Control viral

Diversos virus entomopatógenos como densovirus, iridovirus, virus de la poliedrosis citoplasmática y baculovírus han sido ampliamente estudiados debido a su potencial como plaguicidas biológicos seguros. La alta especificidad de estos virus hacia sus hospedadores objetivo reduce significativamente el riesgo de efectos adversos sobre organismos no objetivo, lo que constituye una ventaja frente a insecticidas químicos convencionales. En estudios experimentales se ha propuesto el uso de estrategias como la selección de variantes genotípicas, la coinfección y la cooclusión intraespecífica con el fin de incrementar la eficacia de las preparaciones virales contra mosquitos. La aplicación del biocontrole viral aún se encuentra en fases de investigación y desarrollo, por lo que su uso a gran escala requiere estudios adicionales que evalúen su viabilidad operativa y ambiental (AL-TEMEMAY *et al*., 2025).

Control fúngico

Entre los agentes más utilizados se encuentra *Beauveria bassiana* y *Trichoderma harzianum*, los cuales han demostrado actividad contra diversas especies de insectos, incluyendo mosquitos del género *Culex*. Por lo general, el proceso de infección fúngica comienza con la adhesión de las esporas en la cutícula del insecto, seguida de su germinación y penetración mediante la acción de enzimas hidrolíticas. Una vez en el interior del hospedador, los hongos proliferan y producen metabolitos tóxicos que alteran la homeostasis del insecto y desencadenan una respuesta inmune que conduce finalmente a su muerte.

Debido a su modo de acción y especificidad, los hongos entomopatógenos representan una alternativa prometedora dentro de los programas de manejo de vectores, aunque su aplicación a gran escala aún requiere de evaluaciones adicionales acerca de su impacto en el medio

ambiente y su eficacia en condiciones de campo (AL-TEMEMAY *et al*., 2025).

Control con algas

Diversos estudios han demostrado que ciertos extractos de algas presentan actividad larvicida contra especies del género *Culex*, ocasionando alteraciones en la membrana intestinal, interviniendo en los procesos de alimentación y generando afectaciones fisiológicas que pueden incluir daños a nivel neurológico. La eficacia larvicida varía en función del tipo de alga y del extracto utilizado, observándose una mayor actividad en extractos provenientes de algas rojas (Rhodophyta) y verdes (Chlorophyta). No obstante, el uso de extractos de alga requiere una evaluación cuidadosa, ya que ciertas sustancias bioactivas podrían generar efectos adversos sobre organismos no objetivo. Por ello, su aplicación debe considerarse dentro de un enfoque controlado y complementario a otras estrategias de manejo vectorial.

Control basado en extractos vegetales

Los extractos derivados de plantas también han sido ampliamente estudiados como biocontroladores de vectores. Diversos estudios han demostrado que extractos de especies como *Teucrium polium, Peganum harmala, Thymus vulgaris* y *Physalis angulata* presentan efectos adversos sobre diversas especies de mosquitos, incluyendo *Culex pipiens*. Estos compuestos vegetales generan alteraciones a nivel del epitelio intestinal de las larvas, afectando la integridad de las microvellosidades, lo que ocasiona problemas en el proceso de digestión y absorción de nutrientes (AL-TEMEMAY *et al*., 2025).

Control basado en peces larvívoros y copépodos

El uso de depredadores acuáticos constituye una estrategia complementaria dentro del control biológico de mosquitos. Entre las especies de peces larvívoros más utilizadas se encuentran *Danio rerio, Danio malabaricus* y *Aplocheilus panchax*, las cuales han demostrado una elevada capacidad para reducir poblaciones larvarias de mosquitos en ambientes acuáticos. Sin embargo, es de suma importancia considerar que la introducción de estas especies requiere una evaluación previa de su impacto sobre el equilibrio de los ecosistemas locales (AL-TEMEMAY *et al*., 2025).

Los copépodos como *Macrocyclops albidus*, son depredadores autóctonos los cuales han sido ampliamente utilizados debido a su facilidad de crianza e introducción en contenedores artificiales. Estos organismos se alimentan activamente de larvas de mosquitos y han demostrado una reducción significativa de la densidad larvaria. Sin embargo, su eficacia puede variar según la especie del mosquito, siendo altamente efectivos contra *Aedes* spp. y moderadamente eficaces frente a especies del género *Culex* (BELLINI *et al*., 2014).

Manejo ambiental y ecológico

Representa una de las alternativas más sostenibles para el control de mosquitos vectores. Esta estrategia mantiene un balance positivo entre costo y beneficio, ya que se basa en la implementación de medidas relativamente simples que pueden generar un impacto significativo en la reducción de poblaciones de mosquitos. No obstante, antes de la implementación de estas actividades, resulta fundamental realizar estudios de campo previos, los cuales nos permitan identificar los sitios potenciales de reproducción del vector. Una vez localizados estos puntos, se pueden aplicar las medidas que están enfocadas principalmente en la reducción de la disponibilidad de habitas larvarios utilizadas por los mosquitos del género *Culex*. Las medidas aplicadas consisten en actividades sencillas, como la eliminación adecuada de contenedores

artificiales, limpieza de basureros y canaletas de lluvia en zonas urbanas, manejo apropiado de aguas estancadas y el uso de trampas para atraer y capturar mosquitos, siendo esencial primero evaluar el impacto que tendrá sobre otros insectos no objetivo. Adicionalmente, la implementación de campañas educativas dirigidas a comunidades rurales, agricultores y ganaderos, puede contribuir de manera significativa al control de malaria aviar y otras enfermedades transmitidas por vectores, promoviendo la adopción de prácticas preventivas y sostenibles a largo plazo (BELLINI *et al*., 2014).

Control génico

Es una de las propuestas más modernas para el control de enfermedades transmitidas por mosquitos mediante la manipulación reproductiva y conversión genética masculina. Uno de los enfoques más destacados es el uso de la bactéria *Wolbachia*, que actúa a través de dos mecanismos principales, En primer lugar, la incompatibilidad citoplasmática permite reducir la población de mosquitos al impedir que los machos infectados con fallos reproductivos generen descendencia viable con hembras no infectadas. En segundo lugar, el bloqueo de patógenos dentro del mosquito disminuye su capacidad de trasmitir, a pesar de que la población no se reduzca drásticamente. No obstante, aunque es una propuesta prometedora, su aplicación a largo plazo requiere estudiar las interacciones ecológicas que surgen tras su introducción. Por otro lado, la Técnica del Insecto Estéril se basa en la liberación de machos esterilizados mediante radiación, los cuales al aparearse con hembras no tendrán descendencia, lo que permite una supresión de la población de mosquitos. Ambas estrategias ofrecen alternativas prometedoras y más sostenibles en comparación con los métodos tradicionales (BOUYES, 2024).

Cuadro 5.1 Estrategias de control de la malaria aviar causada por *Plasmodium relictum*

Estrategia de control	Ventajas	Limitaciones y desventajas	Contribución
Control químico	Reducción rápida de la densidad vectorial; efectividad inicial comprobada; fácil aplicación operativa	Resistencia en *Culex* spp.; impacto sobre insectos no objetivo; contaminación ambiental; riesgos para aves y humanos	Medida complementaria de corto plazo
Tratamiento farmacológico	Disminución de parasitemia; Mejora clínica y supervivencia individual	No interrumpe la transmisión; alto costo; uso individual; reinfección	Apoyo en programas de conservación
Control biológico	Alta especificidad; menor impacto ambiental; reducción larvaria	Eficacia variable; aplicaciones repetidas	Alternativa sostenible
Manejo ambiental y ecológico	Bajo costo; alta sostenibilidad; reducción de criaderos	Monitoreo constante; resultados graduales	Base del enfoque integrado
Control génico	Alta especificidad; reducción sostenida de transmisión	Costos elevados; evaluación ecológica prolongada	Estrategia prometedora a largo plazo

Fuente: Elaboración propia a partir de AL-TEMEMAY *et al*., 2025.

DISCUSIÓN

La malaria aviar causada por *Plasmodium relictum* representa un desafío complejo para la sanidad y conservación de las aves, especialmente en ecosistemas insulares y poblaciones no adaptadas. A lo largo del tiempo, las estrategias tradicionales de control, basadas principal-

mente en el control químico del vector y el tratamiento farmacológico de aves infectadas, han demostrado una efectividad inicial en la reducción de la transmisión. No obstante, la evidencia científica actual indica que estas estrategias presentan limitaciones significativas cuando se evalúan desde una perspectiva ecológica, epidemiológica y de sostenibilidad a largo plazo. El uso intensivo de insecticidas ha favorecido la aparición de resistencia en poblaciones de mosquitos del género *Culex*, reduciendo progresivamente su eficacia y comprometiendo los programas de control vectorial, además de generar impactos ambientales adversos sobre organismos no objetivo y ecosistemas sensibles.

En contraste, los tratamientos farmacológicos antimaláricos han mostrado resultados positivos a nivel individual, permitiendo reducir la parasitemia y mejorar la supervivencia en aves en cautiverio o de alto valor de conservación. Sin embargo, su aplicación a nivel poblacional resulta inviable debido a limitaciones logísticas, costos elevados y la imposibilidad de interrumpir el ciclo de transmisión, ya que no actúan directamente sobre el vector. Estas desventajas evidencian que las estrategias tradicionales, aunque útiles en contextos específicos, no constituyen una solución integral para el control sostenible de la malaria aviar en ambientes naturales.

Ante estas limitaciones, las estrategias alternativas han cobrado creciente relevancia como herramientas complementarias que permitan un nuevo enfoque para el control sostenible de la malaria aviar. Los hallazgos de esta revisión revelan que estas estrategias mantienen distintos niveles de desarrollo y viabilidad en campo. El control biológico, mediante el uso de bacterias, hongos entomopatógenos y depredadores naturales, ofrece ventajas importantes, como una mayor especificidad hacia los estadios larvarios del vector y una reducción significativa del impacto ambiental. Entre ellos, *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti), se destaca como una de las estrategias más relevantes y aplicadas debido a su mecanismo de acción, demostrando su eficacia combinada con otras medidas (como redes impregnadas con insecticidas) en programas integrados, como los implementados en países africanos (TIA *et al.,* 2024). De igual forma, el manejo ambiental y ecológico se destaca como una de las alternativas más sostenibles y costo-efectivas, ya que actúa sobre los sitios de reproducción del vector y promueve la participación comunitaria; no obstante, su éxito depende de una correcta identificación de los criaderos y de la continuidad en las acciones implementadas. Juntas estas estrategias destacan como soluciones de primera línea más factibles para su empleo en zonas como Hawái, donde la urgencia exige acciones inmediatas con bajo riesgo ecológico.

Otras alternativas, aunque son prometedoras, aún se encuentran en fases de investigación y desarrollo, por lo que su uso a gran escala requiere estudios adicionales que evalúen su viabilidad operativa y ambiental. El control basado en extractos vegetales, algas o depredadores acuáticos, se debe evaluar antes de su aplicación porque pueden afectar organismos no objetivo y generar efectos no deseados en el ecosistema. De manera similar, el control génico como el uso de *Wolbachia*, representa una estrategia innovadora. La reciente exención de emergencia emitida por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para Hawái, permitió liberar machos de *Wolbachia* en áreas de conservación debido al aumento de temperatura generado por el cambio climático. Los mosquitos se reproducen y son un riesgo para las especies de aves en peligro de extinción, por lo que se espera que esta medida dis-

minuya las poblaciones de moquitos. Esto subraya su potencial, pero también se debe tomar en cuenta su carácter aún experimental y la necesidad de monitorear sus efectos a largo plazo en el ecosistema (EPA, 2023).

En conjunto, la comparación entre las diferentes estrategias demuestra que ninguna medida aislada es suficiente para controlar de manera efectiva la malaria aviar. Por ello, la adopción de un enfoque integrado, que combine estrategias tradicionales con alternativas biológicas, ambientales y genéticas, resulta fundamental para lograr un control sostenible de la transmisión, especialmente en escenarios de conservación de aves silvestres y frente a los efectos del cambio climático.

CONCLUSIÓN

El análisis de las estrategias tradicionales empleadas para el control de la malaria aviar causada por *Plasmodium relictum* demuestra que, si bien el control químico del vector y los tratamientos farmacológicos en aves han contribuido a reducir la transmisión y la gravedad clínica de la enfermedad en contextos específicos, estas medidas presentan limitaciones importantes que comprometen su eficacia y sostenibilidad a largo plazo. La aparición de resistencia a insecticidas en mosquitos del género *Culex*, junto con los impactos ambientales derivados del uso indiscriminado de compuestos químicos, reduce significativamente la efectividad del control vectorial y plantea riesgos ecológicos relevantes. Asimismo, los tratamientos antimaláricos, aunque efectivos a nivel individual, resultan impracticables como estrategia poblacional debido a restricciones logísticas, costos elevados y la falta de efecto preventivo frente a la reinfección en ambientes naturales. En este contexto, la evidencia científica respalda la necesidad de adoptar un enfoque integrado que combine estrategias tradicionales con alternativas innovadoras, tales como el control biológico del vector, la manipulación de la microbiota y el desarrollo de intervenciones inmunológicas dirigidas al mosquito, las cuales han demostrado un potencial significativo para reducir la transmisión de *P. relictum de* manera más específica y ambientalmente sostenible. La implementación de este enfoque integrado constituye una herramienta fundamental para el manejo efectivo de la malaria aviar, especialmente en escenarios de conservación de fauna silvestre y frente a los desafíos impuestos por el cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AL-TEMEMAY, N. Y. *et al.* Biological control strategies for Culex pipiens. Babcock University Medical Journal, v. 8, 2025. doi: 10.38029/babcockuniv.med.j..v8i1.811.

AŽELYTĖ, J. *et al*. Anti-microbiota vaccine reduces avian malaria infection within mosquito vectors. Frontiers in Immunology, v. 13, 2022. doi: 10.3389/fimmu.2022.829465.

BELLINI, R. *et al.* A review of the vector management methods to prevent and control outbreaks of West Nile virus infection and the challenge for Europe. Parasites & Vectors, v. 7, 2014. doi: 10.1186/1756-3305-7-323.

BOUYER, J. Current status of the sterile insect technique for the suppression of mosquito populations on a global scale. Infectious Diseases of Poverty, v. 13, 2024. doi: 10.1186/s40249-024-01242-z.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. EPA approves emergency exemption for *Wolbachia* mosquitoes to protect endangered birds in Haváii. Environmental Protection Agency, 2023. Disponível em: https://www.epa.gov/pesticides/epa-approves-emergency-exemption-*Wolbachia*-mosquitoes-protect-endangered-birds-Haváii. Acesso em: 5 fev. 2026.

HARVEY-SAMUEL, T. *et al*. Culex quinquefasciatus: status as a threat to island avifauna and options for genetic control. CABI Agriculture and Bioscience, v. 2, 2021. doi: 10.1186/s43170-021-00030-1.

LAPOINTE, D. A. *et al*. Ecology and conservation biology of avian malaria. Annals of the New York Academy of Sciences, v. 1249, p. 211, 2012. doi: 10.1111/j.1749-6632.2011.06431.x.

MARTÍNEZ-DE LA PUENTE, J. *et al.* Plasmodium relictum. Trends in Parasitology, v. 37, p. 355, 2021. doi: 10.1016/j.pt.2020.06.004.

MCCLURE, K. M. *et al.* The role of native and introduced birds in transmission of avian malaria in Haváii. Ecology, v. 101, 2020. doi: 10.1002/ecy.3038.

MIRANDA PAEZ, A. *et al.* Management of avian malaria in populations of high conservation concern. Parasites & Vectors, v. 15, 2022. doi: 10.1186/s13071-022-05327-2.

NAVINE, A.K. *et al.* Microbiomes associated with avian malaria survival differ between susceptible Haváiian honeycreepers and sympatric malaria-resistant introduced birds. Molecular Ecology, v. 32, p. 6659, 2023. doi: 10.1111/mec.16743.

PUGLIESE, N. *et al.* A safe and effective atovaquone-proguanil therapeutic protocol for the treatment of avian malaria by Plasmodium relictum in snowy owl. (Bubo scandiacus). Animals, v. 13, 2023. doi: 10.3390/ani13223457.

TIA, J.-P. B. *et al.* Combined use of long-lasting insecticidal nets and Bacillus thuringiensis israelensis larviciding, a promising integrated approach against malaria transmission in northern Côte d'Ivoire. Malaria Journal, v. 23, 2024. doi: 10.1186/s12936-024-04953-8.

VALKIŪNAS, G. *et al.* Characterization of Plasmodium relictum, a cosmopolitan agent of avian malaria. Malaria Journal, v. 17, 2018. doi: 10.1186/s12936-018-2325-2.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. Guidelines for malaria. Genebra, 2017. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/guidelines-for-malaria. Acesso em: 5 fev. 2026.

WORLD ORGANIZATION FOR ANIMAL HEALTH - WOAH. Arthropod vector control in animal health. Revues scientifiques et techniques de l'Organisation mondiale de la santé animale, v. 40, 2021. Disponível em: https://www.woah.org/. Acesso em: 5 fev. 2026.