UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Biología

Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biologicas

Niveles de H/L y morfometría de células sanguíneas en especies de Passerellidae y Parulidae (Aves) en el centro-occidente de México

Tesis que presenta:

Biól. Yanet Villaseñor Cortez

Como requisito para obtener el grado de

Maestra en Ciencias Biológicas

Director: Dr. José Fernando Villaseñor Gómez

Codirector: Dr. Javier Salgado Ortiz

Morelia, Michoacán, mayo 2026

Dedicatoria

A mi esposo,

por caminar a mi lado y sostenerme con ternura en los días más exigentes de este proceso, y por acompañarme en las jornadas más largas. Gracias por tu cuidado constante, por tu paciencia infinita y tu comprensión; por cuidarme con amor cuando más lo necesité, y por recordarme la importancia de descansar y alimentarme. Tu presencia y tu manera de sostenerme emocionalmente en los momentos de mayor desgaste fueron un refugio invaluable. Gracias también por celebrar cada paso con gestos llenos de ternura, que fueron luz en este camino. Este logro también lleva tu nombre; es profundamente tuyo.

A mi madre,

por ser mi fuerza constante: por aplaudirme, animarme, acompañarme y celebrar conmigo cada avance. Gracias por tus porras, por inspirarme a seguir adelante y por no soltar mi mano en ningún momento. Este logro también es tuyo.

A mi padre,

por tu apoyo firme y generoso, por abrirme puertas y hacer posibles nuevas oportunidades académicas, y por cada llamada en la que, me recordabas que estabas pendiente de mí. Tu confianza silenciosa ha sido un pilar fundamental en este recorrido.

Con todo mi amor y gratitud

Agradeciemientos

Al SECIHTI, por el apoyo económico brindado durante la realización de este posgrado.
A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, de la cual soy egresada, por la formación académica que ha sustentado este logro.

Al Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas (PIMCB) y a su coordinación; en especial a Patricia Liliana Cerritos Barriga, por su disposición y apoyo constante.

A mi comité sinodal, por sus observaciones, su guía académica y el tiempo dedicado a fortalecer este trabajo.

Al Dr. José Fernando Villaseñor Gómez, director de tesis, por su acompañamiento continuo, su confianza y sus palabras de aliento, por escucharme y por ser una guía académica y humana fundamental en este trayecto.

Al Dr. Javier Salgado Ortiz, coasesor, por impulsarme y por fortalecer mi criterio científico y mi resiliencia personal. Las lecciones derivadas de este proceso contribuyeron de manera significativa a mi crecimiento profesional y humano.

Al Dr. Tiberio César Monterrubio Rico, por su acompañamiento respetuoso y oportuno, así como por sus comentarios claros y orientadores.

A la Dra. Esperanza Meléndez Herrera, por su compromiso y sus observaciones siempre pertinentes, que enriquecieron la calidad del trabajo. Agradezco también la generosidad de abrirme las puertas de su laboratorio y facilitar equipo y el apoyo técnico de la Dra. Ma. Antonia Herrera Vargas durante el proceso de tinción de muestras.

Al Dr. Leonardo Chapa Vargas, por su generosidad durante mi estancia en el IPICYT (San Luis Potosí), por su paciencia en la enseñanza de los análisis estadísticos. Valoro especialmente su calidad humana, su escucha atenta y la solidez que sus recomendaciones aportaron al desarrollo de este proyecto.

Al IIES-UNAM, en especial al Dr. Jorge Ernesto Schondube Friedewold y al Dr. Rodrigo Pacheco, por la oportunidad de colaborar en sus proyectos, su confianza y la formación en el uso de herramientas estadísticas en R, que fortalecieron el enfoque y las capacidades analíticas de esta investigación.

Al Laboratorio de Ornitología y a todas las personas que colaboraron en la colecta de muestras sanguíneas, por el trabajo de campo y el apoyo logístico que hicieron posible este proyecto.

A Panchito y Lety, que tantas veces me recibieron con un abrazo y me devolvieron el ánimo, muchas gracias por acompañarme en este proceso.

A las aves, por revelarme quién soy y darme voz en el conocimiento.

A mí misma y a mi cuerpo, por no rendirse y sostener este camino hasta el final.

ÍNDICE

Contenido

RESUMEN GENERAL ix
GENERAL SUMMARY x
INTRODUCCIÓN GENERAL 1
Literatura citada 4
CAPÍTULO I: NIVELES DE H/L EN ESPECIES DE AVES DE LAS FAMILIAS PASSERELLIDAE Y PARULIDAE Y SU RELACIÓN CON ATRIBUTOS INTRÍNSECOS Y AMBIENTALES 9
Resumen 9
Introducción 11
Hipótesis 22
Predicciones 22
Objetivos 23
Materiales y métodos 23
Área de estudio 24
Trabajo de campo y procesado de muestras 27
Análisis de datos 31
Resultados 35
Discusión 46
Conclusiones 55
Anexos 58
Literatura citada 60
CAPÍTULO II: VARIACIÓN MORFOMÉTRICA DE CÉLULAS SANGUÍNEAS EN ESPECIES DE AVES DE LAS FAMILIAS PASSERELLIDAE Y PARULIDAE 79
Resumen 79
Abstract 80
Introducción 81
Hipótesis y predicciones **95**
Objetivos 97
Métodos 97
Análisis estadístico 100

Resultados 103
Discusión 141
Perspectivas y/o recomendaciones 149
Conclusiones 150
Anexos 152
Literatura citada 154
Consideraciones finales 167
Apéndice General 169

INDICE DE CUADROS:

Cuadro 1.1. Número de muestras de las especies de aves analizadas, sitios de muestreo, familia y estatus de residencia..... 35

Cuadro 1.2. Valores de los perfiles leucocitarios de las especies muestreadas en Tlalpujahua y Morelia, Michoacán (promedios, errores estándar y rangos (entre paréntesis) por especie..... 36

Cuadro 1.3. Comparación de modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) que explican la variación en diversas variables de respuesta en seis especies de aves de las familias Passerrellidae y Parulidae, de distintos tipos de hábitat (Sitio) (urbano/suburbano y bosque remanente) y variables intrínsecas (edad y sexo) en el centro de México..... 38

Cuadro 2.1: Valores de ovalidad de las células sanguíneas en especies de Passerellidae y Parulidae (promedios por individuo ± error estándar y rangos mínimos–máximo entre paréntesis) 104

Cuadro 2.2: Valores de volumen de las células sanguíneas en especies de Passerellidae y Parulidae (promedios por individuo ± error estándar y rangos mínimos–máximo entre paréntesis) 107

Cuadro 2.3: Resumen de los modelos lineales generalizados mixtos (GLMMs) más parsimoniosos y mejor soportados para explicar la variación en la ovalidad celular en función de distintos conjuntos de variables fijas [para cada tipo celular, el cuadro incluye el modelo con mayor soporte estadístico (ΔAICc = <2] dentro de cada conjunto de variables fijas evaluadas)..... 126

Cuadro 2.4: Modelos lineales generalizados mixtos (GLMMs) mejor soportados para explicar la variación en el volumen celular en función de distintos conjuntos de variables fijas [para cada tipo celular, el cuadro incluye el modelo con mayor soporte estadístico (ΔAICc = <2)] dentro de cada conjunto de variables fijas evaluadas.... 128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Efecto estimado de la proporción H/L con relación a la taxonomía y estatus de residencia de seis especies de aves de las familias Passerrellidae y Parulidae 37

Figura 1.2. Relación de la masa (índice de masa escalado, IME) sobre la proporción H/L en aves de las familias Passerrellidae y Parulidae en sitios suburbanos y bosque remante en el centro de México 39

Figura 1.3. Variación del Índice H/L de tres especies de la Familia Parulidae: *Basileuterus rufifrons* (Ba.ru), *Leiotlhypis celata* (Le.ce) y *Setophaga coronata* (Se.co) en sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México 40

Figura 1.4. Variación del Índice H/L de tres especies de la Familia Parulidae: a) *Setophaga coronata*, b) *Basileuterus rufifrons* y c) *Leiotlhypis celata* en sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México 41

Figura 1.5. Relación entre la condición corporal (índice de masa escalada, IME) y el Índice H/L en tres especies de la familia Parulidae; *Basileuterus rufifrons* (Ba.ru, línea roja), *Leiotlhypis celata* (Le.ce, línea verde) y *Setophaga coronata* (Se.co, línea azul)..... 42

Figura 1.6. Relación del Índice H/Ly sexo en la especie *Leiothlypis celata*, de sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México 44

Figura 1.7. Relación del Índice H/L y edad en la especie *Leiothlypis celata*, de sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México 45

Figura 1.8. Relación del Índice H/L en la interacción de sexo y edad en la especie *Leiothlypis celata*, de sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México 45

Figura 2.1. Variación individual de la ovalidad de eritrocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar) 108

Figura 2.2. Variación individual de la ovalidad del núcleo de eritrocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar) 109

Figura 2.3. Variación individual de la ovalidad de heterófilos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar) 110

Figura 2.4. Variación individual de la ovalidad de linfocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar) 111

Figura 2.5. Variación individual de la ovalidad de basófilos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). 112

Figura 2.6. Variación individual de la ovalidad de eosinófilos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar) .... 113.

Figura 2.7. Variación individual de la ovalidad de monocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar) 114

Figura 2.8. Variación individual de la ovalidad de trombocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar) 115

Figura 2.9. Variación individual del volumen de eritrocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México 117

Figura 2.10. Variación individual del volumen del núcleo de eritrocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México ..... 118.

Figura 2.11. Variación individual del volumen de heterófilos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México. 119

Figura 2.12. Variación individual del volumen de linfocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México 120

Figura 2.13. Variación individual del volumen de basófilos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México 121

Figura 2.14. Variación individual del volumen de eosinófilos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México 122

Figura 2.15. Variación individual del volumen de monocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México 123

Figura 2.16. Variación individual del volumen de trombocitios en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México 124

Figura 2.17. Relación entre condición corporal (índice de masa escaldo, IME) y el volumen celular de los eritrocitos en aves de las familias Passerellidae y Parulidae por estatus de residencia (migratorio y residente)..... 129

Figura 2.18. Efecto de factores categóricos sobre el volumen de eritrocitos en aves: (A) Comparación del volumen celular entre las familias Parulidae y Passerellidae. (B) Comparación del volumen celular entre individuos migratorios y residentes 130

Figura 2.19. Volumen eritrocitario en especies de la familia Parulidae en función del sitio de muestreo (Morelia y Tlalpujahua). 132

Figura 2.20. Relación entre el índice de masa corporal (IME) y el volumen eritrocitario en Parulidae..... 132

Figura 2.21. Volumen promedio de los heterófilos en aves migratorias y residentes según el mejor modelo mixto (VOLUMEN ~ RESIDENCIA) 133

Figura 2.22. Volumen promedio de los heterófilos (Promedio± IC del 95%) en tres especies de Parulidae (*Basileuterus rufifrons* (Ba.ru), *Leiothlypis celata* (Le.ce) y *Setophaga coronata* (Se.co) en dos sitios de muestreo (Morelia y Tlalpujahua) 134

Figura 2.23. Relación entre el volumen celular de los heterófilos y el índice de masa escalada (IME) según el modelo m5 (VOLUMEN ~ IME + ESPECIE)..... 135

Figura 2.24. Valores del volumen (en micras cúbicas) de los trombocitos en función de la familia, con base en estimaciones del mejor modelo lineal mixto con la familia como principal predictor de volumen trombocitario 136

Figura 2.25. Relación entre el índice de masa escalado (IME) y el volumen de los trombocitos..... 137

Figura 2.26: Relación entre el índice de masa escalado (IME) y el volumen de los trombocitos en especies de Parulidae..... 138

Figura 2.27: Volumen de trombocitos estimado por el mejor modelo lineal mixto en función del sitio y la especie (familia Parulidae)..... 139

Figura 2.28. Volumen estimado de los trombocitos (± IC95%) en *Leiothlypis celata* en función de la edad (A = adulto, J = juvenil), estimado a partir del modelo lineal mixto mejor soportado..... 140

RESUMEN GENERAL

Las aves constituyen el grupo de vertebrados terrestres más diverso del planeta y desempeñan funciones ecológicas esenciales que sostienen múltiples bienes y servicios ambientales. Sin embargo, diversos factores asociados con la actividad humana, como la transformación de hábitats, contaminación, introducción de especies invasoras, cacería y tráfico ilegal, han provocado un deterioro acelerado de sus poblaciones, afectando su salud y generando implicaciones directas para la biodiversidad y la salud pública. En este contexto, las aves silvestres adquieren relevancia como como bioindicadores del estado ambiental y como reservorios de patógenos zoonóticos, ya que su condición fisiológica y su exposición a enfermedades reflejan las presiones ecológicas de su entorno. En este sentido, el enfoque de "salud" debe considerarse como integrador, ya que involucra la salud humana, animal y ambiental, y subraya la necesidad de monitorear la respuesta inmunitaria de los organismos ante factores ambientales. Los estudios hematológicos representan una herramienta fundamental para evaluar el estado de salud en aves silvestres, pues permiten analizar la composición y morfología de células sanguíneas como eritrocitos, leucocitos y trombocitos, indicadores sensibles a cambios fisiológicos y ambientales. En particular, el perfil leucocitario y la proporción Heterófilo/Linfocito (H/L) y el estudio de la morfología se han consolidado como marcadores confiables en casos de estrés crónico en vertebrados, que resulta de alteraciones celulares inducidas por hormonas del estrés. No obstante, existe un déficit de información hematológica y morfológica para especies silvestres, especialmente en aves Passerinas, lo cual limita la comprensión de sus adaptaciones fisiológicas frente a condiciones ambientales variables. En este marco, el presente estudio evalúa la variación del índice H/L en aves residentes y migratorias de las familias Passerellidae y Parulidae, así como examina la variación morfológica intra e interespecífica de células sanguíneas en individuos que habitan dos ambientes con características ecológicas contrastantes.

PALABRAS CLAVE: bioindicadores, hematologia, leucocitos, leucograma, passeriformes

GENERAL SUMMARY

Birds constitute the most diverse group of terrestrial vertebrates on the planet and perform essential ecological functions that sustain multiple environmental goods and services. However, various factors associated with human activity, such as habitat transformation, pollution, introduction of invasive species, hunting, and illegal trafficking, have caused an accelerated deterioration of their populations, affecting their health and generating direct implications for biodiversity and public health. In this context, wild birds acquire relevance as bioindicators of environmental status and as reservoirs of zoonotic pathogens, since their physiological condition and exposure to diseases reflect the ecological pressures of their environment. In thus sense, the "health" approach should be considered as integrative, since it involves human, animal and environmental health, and underscores the need to monitor the immune response of organisms to environmental factors. Hematological studies represent a fundamental tool to evaluate the health status of wild birds, since they allow the analysis of the composition and morphology of blood cells such as erythrocytes, leukocytes and thrombocytes, indicators that are sensitive to physiological and environmental changes. In particular, the leukocyte profile and the heterophile/lymphocyte ratio (H/L), as well as the study of their cell morphology have been consolidated as reliable markers in cases of chronic stress in vertebrates, which results from cellular alterations induced by stress hormones. However, there is a deficit of hematological and morphological information for wild species, especially in Passerine birds, which limits the understanding of their physiological adaptations to variable environmental conditions. In this framework, the present study evaluates the variation of the H/L ratio in resident and migratory birds within Passerellidae and Parulidae families, as well as examines the intra- and interspecific morphological variation of blood cells in individuals inhabiting two environments with contrasting ecological characteristics.

KEYWORDS: bioindicators, hematology, leukocytes, leukogram, passeriformes

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las aves son el grupo de vertebrados terrestres más rico en especies, con 11,145 especies a nivel mundial (Cornell Ornithology Lab 2025). Esta diversidad brinda una amplia variedad de bienes y servicios de los que la humanidad depende, por las funciones o procesos ecosistémicos que existen a partir de ella (Ávila-Foucat, 2002; Tejeda-Cruz y Sutherland, 2005; Rangel-Salazar et al., 2008). Es por esto que la pérdida acelerada de especies en los últimos años es un problema crucial para la humanidad (Uhart y López de Casenave, 2011**;** Rangel-Salazar et al., 2013). Dicha pérdida es un fenómeno global resultante de varios factores, citándose como principales la transformación ambiental (avance de la frontera agrícola-ganadera y urbana, contaminación, introducción de especies exóticas invasoras), la cacería y el tráfico de especies, mascotismo, la falta de conciencia ambiental y la carencia de coordinación de esfuerzos de conservación de distintas instituciones gubernamentales y privadas (Uhart et al., 2008; Uhart y López de Casenave, 2011; Rangel-Salazar et al. 2013), con un número creciente de víctimas asociadas a estas prácticas (González-Acuña et al 2019).

Estos factores impactan directamente la salud de las aves, por lo que son importantes el estudio y el uso de herramientas que permitan conocer su estado. La "Salud" es un concepto integrado y unificador que busca equilibrar y optimizar de forma sostenible la salud de personas, animales, plantas y ecosistemas (FAO, 2022). Un aspecto poco estudiado que es relevante y necesario, es la respuesta del sistema inmunitario, no solo para las aves, sino para cualquier especie afectada, incluyendo la especie humana (Repetto, 2006), ya que la salud de personas, animales domésticos y silvestres, plantas es importante en el mantenimiento de las interacciones ecológicas en los ecosistemas, relaciones que mantienen estrechamente vinculados a los seres vives en una relación de interdependencia.

Las enfermedades zoonóticas constituyen una de las principales amenazas para la salud pública global, ya que representan más del 75% de todas las enfermedades humanas emergentes (Taylor et al., 2001). En las últimas décadas, el incremento de patógenos emergentes, como la gripe aviar, el virus del Nilo Occidental y otros virus recientemente identificados, ha intensificado la necesidad de establecer planes de contingencia y medidas de control efectivas (Kaiser, 2010). Dentro de este contexto, las aves silvestres han cobrado

particular relevancia, ya que muchas especies actúan como reservorios o portadoras de virus y bacterias con potencial zoonótico (Jones y James-Reynolds, 2008). La comprensión de las interacciones entre aves, patógenos, vectores zoonóticos y el entorno urbano resulta crucial, dado que diversos factores ambientales pueden favorecer la transmisión de enfermedades. Entre estos destacan el aumento en las tasas de contacto entre huéspedes, la susceptibilidad a la infección, contaminación y estrés, que puede comprometer el sistema inmune, además de favorecer poblaciones de vectores y la persistencia ambiental de patógenos (Bradley y Altizer, 2007).

El monitoreo de la salud de las aves silvestres permite atender múltiples objetivos prioritarios. En primer lugar, contribuye a la prevención de enfermedades zoonóticas, mediante la detección temprana de brotes, lo que puede evitar epidemias o pandemias y proteger la salud pública (Hamer et al., 2012). En segundo lugar, las aves funcionan como indicadores del estado del medio ambiente: su disminución o deterioro en salud puede ser reflejo de contaminación, pérdida de hábitat u otros problemas ecosistémicos (Ruiz-García, 2017). Además, pueden advertir sobre desequilibrios ecológicos antes de que estos afecten directamente al ser humano (Benskin et al., 2009; D'Amico, 2011; Dolka et al., 2014). En tercer lugar, la vigilancia sanitaria en aves silvestres contribuye a la protección de los recursos naturales, ya que muchas actividades humanas (como la agricultura, la pesca y el turismo) dependen de la integridad de los ecosistemas (Rangel-Salazar et al., 2008). Las aves enfermas pueden afectar funciones clave como la polinización, el control natural de plagas y las dinámicas tróficas (Martínez-Salinas et al., 2022; Gaston, 2022). En cuarto lugar, el estudio de enfermedades en aves silvestres impulsa avances científicos y tecnológicos en áreas como la medicina veterinaria y humana, así como en la ecología de enfermedades epidémicas (Esposito et al., 2024; Averbeck, 1992). Finalmente, evaluar la salud de estas especies es esencial para la conservación de la biodiversidad, ya que permite implementar estrategias para la protección de especies en riesgo y preservar su diversidad genética (Evans y Sheldon, 2008). Asimismo, contribuye a evitar desequilibrios ecológicos que podrían afectar a otras especies, incluyendo al ser humano (Şekercioğlu et al., 2004).

En este contexto los estudios hematológicos son fundamentales ya que comprenden el estudio de la sangre y todos sus elementos: glóbulos rojos (eritrocitos), glóbulos blancos (leucocitos), plaquetas (trombocitos) y plasma (Carvajal-Villacres, 2021). La sangre actúa

como medio de transporte para nutrientes, oxígeno, productos metabólicos, células inmunes, hormonas, etc., y sus funciones desempeñan un mecanismo de homeostasis, por lo que refleja el estado de salud y la condición integral de los individuos (Hanauska-Bro y Duftyj, 1996).

El estudio de las células sanguíneas es de gran importancia tanto en medicina humana como veterinaria, siendo herramientas diagnósticas para detectar patologías, estrés y alteraciones tisulares, y proporcionan información valiosa sobre el bienestar y las adaptaciones fisiológicas de distintas especies, orientando su manejo, tratamiento y permite una valoración indirecta del estado del hábitat. Esta información resulta especialmente útil para evaluar el impacto ecológico del entorno en animales silvestres, aunque la investigación en este campo aún es limitada (Alvarado et al., 2008; Carvajal-Villacres, 2021).

La evaluación celular y el estudio de la dinámica de las poblaciones celulares que la componen es una parte importante en la hematología, sobre todo en especies exóticas y silvestres. Esta evaluación se realiza mediante un extendido de sangre teñida que permite identificar las diferentes células sanguíneas (Arancibia-Calcagno, 2023). Debido al pequeño tamaño de muestra que requiere, “Una sola gota de sangre provee valiosa información en la evaluación del “paciente” (Campbell, 2015). Estas muestras brindan información valiosa resultante de conteos relativos de diferentes leucocitos (heterófilos, basófilos, eosinófilos, linfocitos y monocitos) en el torrente sanguíneo, al cual se denomina “perfil leucocitario”. Se ha utilizado en estudios ecológicos para evaluar la función inmunológica y el estrés fisiológico (estímulos negativos que dan inicio a respuestas fisiológicas y conductuales) (Mazerolle y Hobson, 2002; Quillfeldt et al., 2008).

La respuesta fisiológica al estrés en vertebrados implica tres componentes principales: la respuesta hormonal, la respuesta inmune y la respuesta intracelular (Carlo, 2013). Como parte de la respuesta inmune, las células leucocitarias sufren alteraciones numéricas que pueden estar directamente relacionadas con cambios en los niveles de hormonas derivadas como respuesta al estrés (Dhabhar et al., 1995). La evidencia derivó en el uso de la proporción Heterófilos/Linfocitos (Índice H/L) como un índice indicador de estrés (Davis et al., 2008), que ha sido utilizado para identificar diferentes eventos y/o cambios fisiológicos; el índice

H/L ha sido bien estudiado en diversas situaciones y en muchos casos exhibe cambios evidentes relacionados con el estado fisiológico de los organismos.

Por otro lado, se sabe muy poco sobre la morfología y variabilidad de las células sanguíneas. Se entiende por morfología, la homogeneidad, tamaño, forma, color, bordes, opacidad y textura de las células (Biology Online, 2022). En esta investigación, únicamente se analizó la variación del tamaño celular. La mayoría de la información sobre morfología sanguínea proviene de estudios realizados en aves domésticas (Copete-Sierra, 2013); sin embargo, en el caso de las aves silvestres, los estudios específicos son escasos (Ruiz y Torrez, 2016). Esto ha limitado la comprensión de la variación morfológica de los componentes sanguíneos en especies que enfrentan condiciones ambientales cambiantes (Clark, et al., 2009). Además, muchas especies presentan adaptaciones únicas, lo que hace necesario desarrollar estudios detallados y específico de las células sanguíneas.

Por todo lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: 1) determinar y analizar niveles de estrés fisiológico mediante índice H/L como indicador, en aves residentes y migratorias de las familias Passerellidae y Parulidae, y 2), determinar la variación morfológica de células sanguíneas en y entre especies pertenecientes a ambas familias, en individuos habitantes de dos sitios con diferentes características ambientales. Cada uno de estos objetivos se desarrollan en capítulos particulares independientes.

Literatura citada

Alvarado, M. C., Arriaga-Alvarado, C., Rincón, R., Fernández, G., Aguilar Lara, J., Villasmil-Ontiveros, Y., ... y Henríquez, A. (2008). Valores hematológicos de psitácidos de los géneros *Ara* y *Amazona* cautivos en zoológicos de Venezuela. *Revista Científica*, *18*(6), 469-661.

Arancibia-Calcagno, C. P. (2023). Descripción y registro visual de la morfología de células sanguíneas de Águilas Mora (*Geranoaetus melanoleucus*) en proceso de rehabilitación [Tesis de licenciatura]. Departamento de Patología Animal, Facultad de Medicina, Universidad de Chile.

Averbeck, C. (1992). Haematology and blood chemistry of healthy and clinically abnormal Great black-backed gulls (*Larus marinus*) and herring gulls (*Larus argentatus*). *Avian Pathology* 21(2), 215-223. https://doi.org/10.1080/03079459208418837

Ávila-Foucat, V. S. (2002). Community-based ecotourism management moving towards sustainability, in Ventanilla, Oaxaca, Mexico. *Ocean and Coastal Management* 45: 511-529.

Benskin, C. M. H., Wilson, K., Jones, K., y Hartley, I.R. (2009). Patógenos bacterianos en aves silvestres: una revisión de la frecuencia y los efectos de la infección. Biol. Rev. Camb. Philos. Soc. 84, 349-373.

Biology Online. (2022). Cell morphology. En: Biology Online Dictionary. Recuperado de 28 de junio de 2025, https://www.biologyonline.com/dictionary/cell-morphology

Bradley, C. A., y Altizer, S. (2007). Urbanization and the ecology of wildlife diseases. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(2), 95–102. https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.11.001

Campbell, T. 2015. Evaluation of the blood film. Elsevier Inc. Vet Clin Exot Anim.18(1), 117-135

Carlo, M.A. (2013). Evaluating the effects of capture and handling time on plasma corticosterone and heterophil/lymphocyte ratios in the Tufted titmouse (*Baeolophus bicolor*). Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. University of Mary Washington Fredericksburg. Virginia, EUA.

Carvajal-Villacres, L. E. (2021). Determinación de un perfil hemático en loros cabeciazul (*Pionus menstruus*) de la familia Psittacidae del zoológico "El Arca" del Tena. [Tesis de licenciatura]. Facultad de Ciencias Agropecuarias Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador Repositorio Institucional UTA. https://repositorio.uta.edu.ec/items/483dec30-541c-4970-bfd0-cc9425a56d21

Clark, P., Boardman, W. y Raidal, S. (2009). Atlas of clinical avian hematology. John Wiley & Sons.

Copete-Sierra, M. (2013). Aspectos Generales de la Evaluación Hematológica en Fauna silvestre y no Convencional. Memorias de la Conferencia Interna en Medicina y Aprovechamiento de Fauna Silvestre, Exótica y no Convencional 9(1), 17-55.

Cornell Ornithology Lab (2025). Birds of the World. https://birdsoftheworld.org/bow/home Consultado el 23 de junio de 2025.

D'Amico, V.L. (2011). Conteos leucocitarios en el playero rojizo (*Calidris canutus rufa*) en Patagonia, Argentina. *Hornero* 26(2), 73-77.

Davis, A.K., Maney, D.L., y Maerz, J.C. (2008). The use of leukocyte profiles to measure stress in vertebrates: A review for ecologists. *Functional Ecology* 22(5), 760-772. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01467.x

Dhabhar, F.S., Miller, A.H., McEwen, B.S. y Spencer, R.L. (1995). Effects of stress on immune cell distribution. Dynamics and hormonal mechanisms. *The Journal of Immunology* 154(10), 5511-5527.

Dolka, B., Włodarczyk, R., Żbikowski, A., Dolka, I., Szeleszczuk, P. y Kluciński, W. (2014). Hematological parameters in relation to age, sex and biochemical values for mute swans (*Cygnus olor*). *Veterinary Research Communications* 38(2), 93-100. https://doi.org/10.1007/s11259-014-9589-y

Esposito, E., Scarpellini, R., Celli, G., Marliani, G., Zaghini, A., Mondo, E., ... y Piva, S. (2024). Wild birds as potential bioindicators of environmental antimicrobial resistance: A preliminary investigation. *Research in Veterinary Science*, *180*, 105424.

Evans, S. R., y Sheldon, B. C. (2008). Interspecific patterns of genetic diversity in birds: correlations with extinction risk. *Conservation Biology*, *22*(4), 1016-1025.

FAO, UNEP, WHO y WOAH. (2022). One Health Joint Plan of Action (2022–2026). Working together for the health of humans, animals, plants and the environment. Rome. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc2289en doi: https://doi.org/10.4060/cc2289en

Gaston, K. J. (2022). Birds and ecosystem services. *Current Biology*, *32*(20), R1163-R1166.

González-Acuña, D., Mercado, A., Valdés, M., Rojas, F., Najle, M., Gallegos, P. y Barrientos, C. (2019). Historial de las aves atendidas durante los últimos 16 años en el centro de rehabilitación de fauna silvestre de la Universidad de Concepción, sur de Chile. *Rev. Chil. Ornitol*, 25, 62-73.

Hamer, S. A., Lehrer, E. y Magle, S. B. (2012). Wild birds as sentinels for multiple zoonotic pathogens along an urban to rural gradient in greater Chicago, Illinois. *Zoonoses and Public Health, 59*(5), 355-364.

Hanauska-Bro, U. y Duftyj, W. (1996). Blood chemistry, cytology, and body condition in adult northern goshawks (*Accipiter gentilis*). Journal of Raptor Research, 37(4), 299–306.

Jones, D.N. y James-Reynolds, S. (2008). Alimentación de aves en nuestras ciudades: una oportunidad de investigación global. *J. Avian Biol*. 39, 265-271.

Kaiser, P. (2010) Advances in avian immunology—prospects for disease control: a review. *Avian Pathology* 39(5):309-324.

Martínez-Salinas, A., Chain-Guadarrama, A., Aristizábal, N., Vilchez-Mendoza, S., Cerda, R., y Ricketts, T. H. (2022). Interacting pest control and pollination services in coffee systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *119*(15), e2119959119.

Mazerolle, D.F. y Hobson, K.A. (2002). Physiological ramifications of habitat selection in territorial male ovenbirds: Consequences of landscape fragmentation. *Oecologia* 130(3), 356-363. https://doi.org/10.1007/s00442-001-0818-z

Quillfeldt, P., Ruiz, G., Rivera, M.A. y Masello, J.F. (2008). Variability in leucocyte profiles in Thin-billed prions *Pachyptila belcheri*. Comparative Biochemistry and *Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology* 150(1), 26-31. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2008.02.021

Rangel-Salazar, J. L., Enríquez, P. L., Altamirano, M. A., Macías-Caballero, C., Castillejos, E., Domínguez, P., ... y Vidal, R. M. (2013). Amenazas a la avifauna. CONABIO (ed) *Amenazas a la Biodiversidad*, 1, 365-369.

Rangel-Salazar, J. L., K. Martin, P. Marshall, y R. W. Elner. (2008). Habitat variation, nest-site selection and parental behavior influences on breeding success of the Ruddy-capped Nightingale Thrush (*Catharus frantzii*) in Chiapas, Mexico. Auk 125: 358-367.

Repetto, G. (2006). Influenza humana y aviaria: pasado, presente y futuro. *Revista Chilena de Pediatría*, 77(1), 12-19.

Ruiz, G., y Torrez, C. (2016). Valores hematológicos, química sérica y descripción de células sanguíneas del cóndor andino (*Vultur gryphus*) cautivos en el Zoológico Vesty Pakos, de La Paz, Bolivia. *CON CIENCIA*, 4(1).

Ruiz-García, M. (2017). Prevalencia y parasitemia por parásitos haemosporidios (Apicomplexa) en aves en una zona con presencia de actividad agrícola. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis Potosí, México.

Şekercioğlu, Ç. H., Daily, G. C., y Ehrlich, P. R. (2004). Ecosystem consequences of bird declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(52), 18042-18047.

Taylor, L.H., Latham, S.M. y Woolhouse, M.E. (2001). Factores de riesgo para la aparición de enfermedades humanas. Philos. Trans. R. Soc. *Lond. B. Biol. Sci*. 356, 983–989.

Tejeda-Cruz, C. y Sutherland, W.J. (2005). Cloud forest bird responses to unusually severe storm damage. *Biotropica* 37: 88-95

Uhart M, Karesh, W. y Smith, K. (2008). Lecciones aprendidas de la influenza aviar. *El Hornero* 23:61–66.

Uhart, M., Díaz, L. A. y López de Casenave, J. (2011). Salud y conservación de aves silvestres. El Hornero, 26(1), 1-4.

CAPÍTULO I: NIVELES DE H/L EN ESPECIES DE AVES DE LAS FAMILIAS PASSERELLIDAE Y PARULIDAE Y SU RELACIÓN CON ATRIBUTOS INTRÍNSECOS Y AMBIENTALES

Resumen

Los conteos leucocitarios son una herramienta esencial para evaluar el estado fisiológico de los organismos. El índice heterófilo/linfocito (H/L), desarrollado originalmente en aves de corral, se utiliza en aves silvestres y otros vertebrados como indicador de estrés crónico e inmunosupresión: bajo estrés prolongado, los heterófilos aumentan y los linfocitos disminuyen. En este estudio se analizaron los valores de H/L en 95 individuos de seis especies de las familias Passerellidae y Parulidae. Se consideraron variables ambientales (hábitat: bosque remanente vs. zona urbana-suburbana), taxonómicas (familia), de historia de vida (estatus migratorio o residente) y atributos individuales o intrínsecos (sexo y edad). Los principales resultados fueron que el índice H/L fue significativamente mayor en individuos de la familia Parulidae que en los de Passerellidae; las aves residentes presentaron valores de H/L más altos que las migratorias; los individuos capturados en bosque remanente mostraron niveles de H/L más elevados que los del ambiente urbano-suburbano, lo que sugiere mayor estrés fisiológico en hábitats boscosos. Además, se observaron diferencias entre especies dentro de los Parulidae: *Basileuterus rufifrons* mostró mayor H/L en el sitio urbano perturbado, *Setophaga coronata* presentó mayor estrés en el bosque remanente, y *Leiothlypis celata* no mostró diferencias por sitio ni por grupo de edad, pero sí por sexo: los machos adultos tuvieron valores más altos. Estos resultados indican que, además de las condiciones del hábitat, factores intrínsecos como la taxonomía y el sexo modulan la expresión del H/L en aves silvestres. El uso combinado del índice H/L con otros indicadores puede ofrecer una evaluación más completa del bienestar y la salud en diversos contextos ecológicos.

Palabras clave: Atributos intrínsecos, estatus de residencia, hábitat, índice H/L.

H/L levels in bird species of the families Passerellidae and Parulidae and their relationship with intrinsic and environmental attributes

Abstract

White blood cell counts are an essential tool for assessing the physiological state of organisms. The heterophile/lymphocyte ratio (H/L), originally developed in poultry, is used in wild birds and other vertebrates as an indicator of chronic stress and immunosuppression: under prolonged stress, heterophiles increase and lymphocytes decrease. In this study, H/L values were analyzed in 95 individuals of six species of the Passerellidae and Parulidae families. Environmental variables (habitat: remnant forest vs. urban-suburban area), taxonomic (family), life history (migratory or resident status) and individual or intrinsic attributes (sex and age) were considered. The main results were that the H/L index was significantly higher in individuals of the Parulidae family than in those of Passerellidae; resident birds had higher H/L values than migratory birds; individuals captured in remnant forest showed higher H/L levels than those in the urban-suburban environment, suggesting greater physiological stress in forested habitats. In addition, differences between species were observed within the Parulidae: *Basileuterus rufifrons* showed higher H/L in the disturbed urban site, *Setophaga coronata* presented greater stress in the remaining forest, and *Leiothlypis celata* did not show differences by site or age group, but by sex: adult males had higher values. These results indicate that, in addition to habitat conditions, intrinsic factors such as taxonomy and sex modulate the expression of H/L levels in wild birds. The combined use of the H/L index with other indicators can provide a more comprehensive assessment of comprehensive assessment of well-being and health in various ecological contexts.

Keywords: Intrinsic attributes, residency status, habitat, H/L ratio.

Introducción

Los estudios hematológicos en aves silvestres se han establecido como una herramienta útil para dictaminar o descartar enfermedades, al igual que para dar seguimiento a la respuesta fisiológica de los individuos frente a una enfermedad (Pérez-Hinojosa, 2018). Los parámetros hematológicos (tanto de eritrocitos como de leucocitos) permiten realizar una interpretación sobre el estado de salud de los individuos, su fisiología y capacidad de adaptación (Ceja-Madrigal, 2017).

Los leucocitos son células nucleadas que se relacionan con la defensa del organismo ante agresiones de diversos agentes biológicos (virus, bacterias y hongos), la proliferación anormal de células y el reconocimiento de agentes extraños; en número, son mucho menos abundantes que los eritrocitos (Ramírez, 2006; Male et al., 2021). El conteo de células leucocitarias proporciona información útil para evaluar la salud de los individuos, ya que su abundancia relativa refleja el estado del sistema inmune del individuo (Bobby-Fokidis et al., 2008). Este capítulo se enfoca en los leucocitos circulantes en sangre, formando parte del sistema inmunitario y actúando tanto en el sistema arteriovenoso, como en el sistema linfático (Abbas et al., 2014).

Al conteo o números relativos de los diferentes tipos de leucocitos en el torrente sanguíneo se le conoce como "perfil leucocitario" (o diferencial de leucocitos) y se ha utilizado en estudios ecológicos para evaluar la función inmunológica y el estrés fisiológico en aves silvestres (Alejandre- Espinoza, 2019; Davis et al., 2004; Ewenson et al., 2001; Masello et al., 2009; Mazerolle y Hobson, 2002). Debido a cambios hormonales favorecidos por el estrés, las células leucocitarias sufren alteraciones numéricas, directamente relacionados con los cambios hormonales (Dhabhar et al., 1995). En general, se ha sugerido que los perfiles leucocitarios pueden ser utilizados en los diferentes grupos taxonómicos de vertebrados para medir y hasta predecir el efecto de condiciones ambientales que potencialmente afectan a los individuos en su condición física como consecuencia de niveles elevados de estrés (Davis et al., 2008).

El término "estrés" ha resultado difícil de definir, dado que a lo largo de la historia se le han dado diferentes interpretaciones. Dhabhar y McEwen (1997) lo definen como una serie de reacciones fisiológicas que se inician con la acción de un estímulo nocivo, el cual

propicia una liberación continua de hormonas en el cerebro, y que posteriormente se traduce en la activación de ciertos sistemas fisiológicos en el organismo. Por otra parte, Moberg y Mench (2000) lo describen como una respuesta biológica ante una amenaza o algún factor que modifique la homeostasis del individuo. El estrés, por lo tanto, involucra los estímulos negativos a los que un individuo está expuesto y da inicio a respuestas fisiológicas y conductuales que le permite afrontarlos; la estimulación frecuente a estos afrontamientos continuos puede resultar en enfermedades. Los estímulos nocivos a los que se hace referencia pueden ser múltiples, e incluyen factores de cambios en el ambiente, competencia, dominio social, interacciones sociales o individuales y enfermedades, entre otros (Mejía-Castillo 2011; Romero 2004).

El "estrés ambiental" es el proceso mediante el cual una o varias situaciones clasificadas como amenazas potenciales asociadas al ambiente ponen en peligro la integridad física de un organismo (Mejía-Castillo 2011); pueden incluir manifestaciones tales como el miedo, ansiedad, enojo, etc., reacciones que se ven reflejadas a nivel fisiológico (estrés fisiológico) y que pueden ser medidas por medio de indicadores de desempeño fisiológico que involucran hormonas (i,e. Cockrem y Silverin, 2002; Silverin et al., 1997; Wilson y Follett, 1975) e indicadores hematológicos (i.e. Artacho et al., 2007; Dolka et al., 2014; Lemus-Ramírez 2016., Ruiz et al., 2002).

Se han descrito dos tipos de estrés, el agudo y el crónico. El primero es aquel que se presenta de forma intensa y es de corta duración (pueden ser de minutos a horas), cuya respuesta fisiológica desaparece en el corto plazo y es considerada adaptativa, ya que dirige la energía del organismo a las funciones que maximizan su sobrevivencia y pospone las que no son necesarias en el momento. Por otra parte, el estrés crónico puede no ser tan intenso, pero persiste por un tiempo prolongado de forma indefinida, como puede ser el derivado de la exposición a factores ambientales o sociales asociados a cambios antropogénicos, como la contaminación y la perturbación del hábitat (Arriero et al., 2008; Busch y Hayward, 2009; Herring et al., 2011). Dependiendo del tipo del estímulo, la periodicidad, la intensidad y la respuesta a nivel individual puede ser ventajoso o no (Lemyre y Tessier, 2003; Selye, 1973); por un lado, asegura la activación de estrategias para fomentar la supervivencia de los individuos, y por otro, trae consecuencias negativas que pudieran provocar inmunodepresión a largo plazo, patologías y depresión del sistema inmune,

favoreciendo así un incremento en la susceptibilidad a enfermedades (Dhabhar y McEwen, 1997; McEwen, 2004; Munck et al., 1984). Para hacer frente a estos cambios, el organismo debe responder de manera constante al estímulo o factor de estrés, manteniendo las respuestas fisiológicas, tales como niveles hormonales y cambios derivados de los mismos, como las proporciones de leucocitos en sangre (Dhabhar, 2002; Dhabhar y McEwen, 1997; Romero, 2004; Vleck et al., 2000; Von Holst, 1998). Si el factor estresante no desaparece y los niveles hormonales (glucocorticoides) permanecen elevados por más de algunos días, se inducen una variedad de efectos, obligando al organismo a presentar una respuesta fisiológica constante que tiene como principal objetivo tratar de alcanzar nuevamente la estabilidad fisiológica del organismo (homeostasis) (Davis, 2005; McEwen, 2000; Sapolsky, 1992).

La presencia constante de niveles elevados de glucocorticoides se refleja en el número de leucocitos circulantes. En este sentido, la presencia constante de corticosterona (glucocorticosteroide presente en las aves), genera un aumento en el número de heterófilos (heterofilia), lo que disminuye la proporción relativa de linfocitos (linfopenia), células encargadas principalmente de hacer frente a agentes patógenos (Gross y Siegel, 1983); los efectos pueden ser inmunodepresión, desgaste de tejidos y pérdida de peso corporal (Siegel, 1980). Vleck et al. (2000) reportan que cuando un animal se encuentra ante la exposición crónica de glucocorticoides, la producción de linfocitos se verá reprimida, mientras que los heterófilos circundantes se verán incrementados (Harmon, 1998; Davis et al., 2008; Latimer y Bienzle, 2010). Cabe señalar que la reducción del número de linfocitos circulantes en respuesta al estrés, no se debe en sí a la destrucción a gran escala de las células, sino a la redistribución de las mismas a otras regiones del cuerpo debido al efecto de las hormonas glucocorticoides. En respuesta a estas hormonas, los linfocitos se adhieren a las células endoteliales que recubren las paredes de los vasos sanguíneos e inmediatamente son trasladadas desde el torrente sanguíneo hacia otros tejidos donde son requeridos, como los nódulos linfáticos, el bazo, la médula ósea y la piel (Dhabhar, 2002). De esta forma, se espera que muestras sanguíneas de organismos expuestos a estrés crónico, presenten un número de heterófilos incrementado y un número de linfocitos disminuido, siendo la relación H/L la media del total de heterófilos entre la media del total de linfocitos (Tejeda-Perea et al., 1997; Harmon, 1998; Mitchell y Johns, 2008). La proporción H/L se considera

un índice de estrés fisiológico que ha sido de los más utilizados (D'Amico, 2011; Davis et al., 2008; Dolka et al., 2014; Ruiz et al., 2002).

El uso del H/L como indicador tiene muchas ventajas ya que no requiere un muestreo de sangre necesariamente rápido y las proporciones celulares no aumentan significativamente dentro del periodo de captura y manipulación de un organismo (Davis, 2005) lo que hace que la relación H/L sea independiente de los sesgos inducidos por el observador y conveniente para evaluar el estrés ambiental (Gross y Siegel, 1983; Davis et al., 2008; Masello et al., 2009). Además, se trata de un procedimiento relativamente económico (Davis et al., 2008; Maxwell, 1993), ya que no requiere de equipo costoso, es fácil recolectar, preparar y conservar muestras en campo, requiriendo solo portaobjetos, tinción y microscopio (Owen y Moore, 2006). Por otra parte, la muestra de sangre requerida para un frotis de sangre es muy pequeña (de 5 a 10 µL [Davis y Maerz, 2008b]), por lo que en teoría se pueden estudiar animales pequeños con volúmenes de sangre mínimos (Washburn et al., 2002).

La aplicación de una metodología estandarizada entre investigadores permite que este indicador sea una herramienta confiable para monitorear el estado de salud de muchos vertebrados (Menéndez-Blázquez, et al. 2021). El único requerimiento para la determinación de los valores del índice H/L es la identificación correcta de los cinco tipos de leucocitos básicos en todas las especies: linfocitos, neutrófilos o heterófilos, eosinófilos, basófilos y monocitos, que a veces puede ser difícil cuando no se tiene la experiencia (Hawkey y Dennett, 1989).

Los perfiles de leucocitos pueden predecir en un individuo rendimiento y viabilidad futuros; por ejemplo, en aves, las proporciones altas de H/L se han asociado con susceptibilidad a la infección (Al-Murrani et al., 2002; O'Dell, 2014), tasas de crecimiento lentas (Moreno et al., 2002) y supervivencia a la próxima temporada reproductiva (Lobato et al., 2005; Kilgas et al., 2006). Estas asociaciones hacen que las proporciones H/L sean valiosas para predecir problemas futuros tanto en individuos como en poblaciones (Davis y Maerz, 2008a).

Particularmente en aves, el índice H/L ha sido útil en estudios fisiológicos y ecológicos, para detectar y evaluar distintos tipos de estrés y estados fisiológicos y se ha

aplicado en una amplia gama de contextos, permitiendo inferencias relevantes tanto en condiciones experimentales como en escenarios naturales. Entre sus principales aplicaciones, se encuentra la detección de estrés causado por ayunos prolongados, deshidratación, lesiones, exposición a toxinas y temperaturas extremas (Gross y Siegel, 1983; Ots et al., 1998; Martínez-Quintanilla et al., 2017; Jiménez-Chávez, 2022). También ha sido útil para identificar la presencia de enfermedades y condiciones patológicas (Averbeck, 1992; Canales-del-Castillo et al., 2018), así como para evaluar el estrés fisiológico en relación con factores ambientales (D'Amico, 2011; Dolka et al., 2014; Ruiz et al., 2002).

También se ha utilizado como un indicador indirecto de la inmunocompetencia en aves silvestres, especialmente cuando los individuos están sometidos a estrés crónico (Bortolotti et al., 2002; Figuerola et al., 1999), así como para relacionar el nivel de estrés con la calidad del territorio que ocupan (Mazerolle y Hobson, 2002). Adicionalmente, se ha empleado para estudiar el esfuerzo reproductivo y su relación con la inmunidad (Norris y Evans, 2000), así como para analizar los efectos del estrés ambiental sobre la condición física y desempeño fisiológico de aves en distintos hábitats (Villaseñor-Gómez, 2006; Álvarez-Mena, 2010; Leal-Ávila, 2010; Vega-Huerta, 2012; Lemus-Ramírez, 2016).

Otros usos incluyen el análisis de respuestas individuales ante alteraciones ambientales y climáticas (Al-Murrani et al., 1997; Romero, 2004), efectos de privación de recursos y confinamiento (De Jong et al., 2002; Herrera-Haro et al., 2017), y estrés físico (Collette et al., 2000; Ilmonen et al., 2003). Asimismo, se ha propuesto como una herramienta útil en biología de la conservación, al aportar información sobre las posibles causas de fluctuaciones poblacionales (Ceja-Madrigal, 2017).

Finalmente, el índice H/L también ha sido empleado en estudios relacionados con la condición corporal (Jakubas et al., 2015; Masello et al., 2009), comparaciones taxonómicas intra e interespecíficas (Banbura et al., 2013; Clark, 2015; Ruiz-García, 2017; Oseguera-Reyes et al., 2019; Sánchez-Torres et al., 2021), procesos migratorios (Buehler et al., 2010; D'Amico, 2011; Oberkircher y Pagano, 2018; Mijares-Villarreal et al., 2021), y la influencia de factores intrínsecos como edad y sexo (Norte et al., 2009; Parejo y Silva, 2009; Álvarez-Mena, 2010; Ceja-Madrigal, 2017; López-Guillén, 2022).

En síntesis, el índice H/L constituye una medida indirecta pero confiable del estado fisiológico de los organismos, especialmente útil en estudios ecológicos, etológicos y de conservación. Su valor reside en la capacidad de reflejar, de manera no invasiva y con bajo costo, la respuesta del sistema inmune ante diversas condiciones ambientales y fisiológicas, haciendo de él una herramienta clave en la investigación de la salud y adaptación de poblaciones silvestres.

Con base en lo anterior, esta investigación buscó aplicar el índice H/L para evaluar posibles variaciones fisiológicas asociadas a factores biológicos y ecológicos específicos, como la edad, el sexo, la condición migratoria (o estatus migratorio) y efecto filogenético (a través de la comparación entre dos familias, Passerellidae y Parulidae), así como la comparación entre individuos de dos hábitats distintos. A continuación, se describen en detalle las variables consideradas.

Migración

La migración, como un evento cíclico demandante de energía, impone exigencias relevantes a los individuos, ya sea por las modificaciones del control hormonal en el proceso, así como por la forma como se usan las fuentes de energía involucradas. Ejemplos de algunos trabajos enfocados en estos efectos son los siguientes.

En cuanto al estado fisiológico del Playero rojizo (*Calidris canutus rufa),* en su migración de larga distancia, se encontró que los valores de H/L fueron significativamente mayores en los sitios de invernación más sureños, después del largo y extenuante viaje migratorio (D'Amico, 2011). Estos resultados coinciden con los de Buehler et al. (2010), quienes encontraron en individuos de la misma especie, que el índice H/L fue más elevado en individuos que se encontraban recuperando los niveles protéicos después de la migración, en comparación con individuos acumulando reservas de energía para el vuelo subsiguiente.

Otras especies, como el Maullador gris (*Dumetella carolinensis*) y el Gorrión cantor (*Melospiza melodia*) han mostrado el mismo patrón; individuos capturados en una estación de anillamiento en la costa sur del lago Ontario en Canadá, durante tres periodos consecutivos (migración de primavera, período reproductivo de verano y migración de otoño) en 2014, fueron estudiados para analizar las modificaciones en niveles de estrés

relacionados con los diferentes estadios del ciclo anual; los resultados mostraron proporciones H/L más elevadas durante la primavera en comparación con los valores encontrados durante el verano (Oberkircher y Pagano 2018).

En tres especies migratorias de zorsales (*Catharus ustulatus, C. fuscescens* e *Hylocichla mustelina*) también se encontró que los individuos en procesos migratorios tuvieron proporciones más altas de H/L en comparación con las aves durante su temporada de reproducción (Owen y Moore, 2006).

Mijares-Villarreal et al. (2021) determinaron el índice H/L en periodos reproductivos y de migración en el Colorín sietecolores (*Passerina ciris*); compararon poblaciones reproductivas de Coahuila y poblaciones migratorias en Sonora y encontraron que el índice H/L fue significativamente mayor en el sitio de migración en Sonora, concluyendo que el aumento de estrés fisiológico (H/L) puede deberse al efecto de la migración y al proceso de muda que se lleva a cabo en el sitio de descanso, ejerciendo un costo energético al organismo. Esto sugiere que las aves en sus procesos migratorios están sujetas a un elevado estrés energético (Owen y Moore, 2006).

Hábitat

Se ha demostrado que el hábitat es un factor determinante en la existencia de diferencias en la expresión del índice H/L. En este sentido, Villaseñor-Gómez (2006), realizó un análisis en cinco especies de aves (*Cardinalis cardinalis, Melospiza melodia, M. lincolnii, Pipilo chlorurus* y *Zonotrichia leucophrys*) durante el invierno en Sonora, comparando sitios relativamente conservados y sitios altamente perturbados en zonas ribereñas; encontró que los valores más altos de H/L se presentaron en sitios perturbados, en comparación con los sitios conservados y de forma más evidente en especies migratorias. Martínez-Tapia (2010) determinó el índice H/L para *Melospiza lincolnii* en hábitats ribereños conservados y sitios perturbados en Sonora durante el periodo de invernada, y encontró que en sitios perturbados la diferencia era significativamente mayor. Posteriormente, Vega-Huerta (2012) determinó el índice H/L en poblaciones de la misma especie entre Sonora y Michoacán dentro de su rango de distribución invernal, y encontró que el índice H/L no presentó diferencias significativas entre las dos áreas.

Lemus-Ramírez (2016) trabajó con nueve especies de aves (*Atlapetes pileatus, Catharus occidentalis, Empidonax occidentalis, Hylocharis leucotis, Junco phaeonotus, Leiothlypis celata, Pheucticus melanocephalus, Regulus calendula* y *Turdus migratorius*) con el propósito de determinar posibles efectos remanentes de la industria minera en comunidades de aves de bosque templado en la Mina dos estrellas en Tlalpujahua, Michoacán. Comparó individuos de sitios en los que históricamente se realizaron procesos de manejo de separación de metales de importancia minera y otros de sitios sin esta actividad y encontró en la mayoría de las especies un aumento de índice H/L en zonas de minería (excepto por *Leiothlypis celata*, especie migratoria que no presentó diferencias significativas).

Ceja-Madrigal (2017) evaluó el índice H/L en el cernícalo americano (*Falco sparverius*) dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán, comparando individuos en dos tipos de agroecosistemas: uno conformado por pastizales y cultivos de sorgo y maíz bajo (agricultura de riego), y otro caracterizado por potreros, encinares, campos pecuarios y matorral subtropical (campo mixto). Los resultados mostraron un índice H/L significativamente más elevado en los individuos del campo mixto en comparación con aquellos del sistema agrícola de riego.

Alejandre-Espinoza (2019) comparó los valores del índice H/L en *Leiothlypis celata y L. ruficapilla,* especies migratorias en distintas localidades de invernación en México (Sonora, Parque estatal Cerro del Punhuato y Tlalpujahua, en Michoacán), y encontró que los individuos en Sonora presentaron valores significativamente más altos del índice H/L.

Zaldivar-Ortega et al. (2019) analizaron si el tipo de hábitat y su grado de sucesión vegetal influían en los parámetros hematológicos de seis familias del orden Passeriformes, analizando individuos en vegetación secundaria y madura de selva mediana caducifolia, así como en matorral desértico micrófilo dominado por *Prosopis*. En este caso, no se encontraron diferencias significativas en la relación H/L entre especies, tipos de vegetación, ni etapas sucesionales.

Sexo

Se ha demostrado que el sexo de los individuos es importante en la expresión leucocitaria y las proporciones H/L. Comparaciones entre individuos de diferentes sexos en algunas especies han mostrado valores mayores en hembras, como en el carbonero común (*Parus major*) (Norte et al., 2009), cernícalo común (*Falco tinnunculus*) (Parejo y Silva, 2009), cigüeña pintada (*Mycteria leucocephala)* (Aengwanich et al., 2002; Salakij et al., 2003), *c*ernícalo americano (*Falco sparverius*) (Ceja-Madrigal,2017) y gallo doméstico (*Gallus gallus domesticus*) (Prahsanth et al., 2012). Sin embargo, otros estudios no encontraron diferencias significativas entre sexos, como los realizados con pollos de engorda (Campo y Dávila.,2002), el loro hablador chaqueño (*Amazona aestiva xanthopteryx*) (Sciabarrasi et al., 2019), aves domésticas y patos silvestres (*Gallus gallus, Meleagris gallopavo, Cairina moschata, Anas platyrhynchos, Anser anser, Gallus gallus domesticus*) (Sánchez-Torres et al., 2021), y aves silvestres como el papamoscas saucero (*Empidonax traillii extimus*) (Owen y Moore., 2005), gorriones cantores (*Melospiza melodia*) (Losdat et al., 2016), carbonero común (*Parus major*) (Hauptmanova et al., 2002), ganso nival (*Chen caerulescens*) (Martinez-Quintanilla, 2017), verdugo americano (*Lanius ludovicianus*) (Álvarez-Mena, 2010), chipe corona naranja (*Leiothlypis celata*), chipe cabeza gris (*L. ruficapilla*) (Alejandre-Espinoza, 2019) y colibrí orejas blancas (*Basilinna leucotis*) (López-Guillén, 2022). Esta respuesta parece ser adaptativa y los efectos de diversos factores sinérgicos, pueden ocasionar una diferencia en los valores hematológicos entre sexos, entre los que las exigencias del periodo reproductivo y cuidado parental destacan como un factor de variabilidad importante.

Por otro lado, Pfaff et al. (2007) mencionan que aquellos individuos dominantes en la estructura social de poblaciones de gorriones cantores (*Melospiza melodia*) también presentaron índices H/L más elevados.

Edad

Los resultados de varios estudios han mostrado que la composición leucocitaria (número y proporción) cambia también de acuerdo con la edad y etapa de desarrollo del individuo. Por ejemplo, Moreno et al. (2002) reportaron valores altos de H/L en polluelos del Papamoscas

cerrojillo (*Ficedula hypoleuca*), lo que se asoció con un crecimiento reducido en juveniles. En contraste, en las cotorras *Amazona leucocephala y Aratinga euops* (Soto-Piñeiro et al., 2009) y los colibríes *Calypte anna y Archilochus alexandri* (Safra et al., 2018), se reporta que las diferencias en los recuentos de leucocitos fueron significativas y se relacionaron con la edad; los valores mayores se presentaron en adultos, en comparación con los de polluelos y juveniles. Casos que se suman a este patrón son los del Carbonero (*Parus major*) (Norte et al., 2009), el Mérgulo atlántico (*Alle alle*) (Jakubas et al., 2015), Gorriones cantores (*Melospiza melodia*) (Losdat et al., 2016) y el Cernícalo (*Falco tinnunculus*) (Parejo y Silva, 2009), con valores de H/L mayores en adultos que en polluelos y juveniles. Otros dos estudios que refuerzan esos resultados son el de Álvarez-Mena (2010), quien determinó el índice H/L en una población residente del verdugo americano (*Lanius ludovicianus*) y reportó diferencias en grupos de edad (mayor en los adultos), y el trabajo de López-Guillén (2022) quien encuentra este patrón en la especie de colibrí *Basilinna leucotis*. Sin embargo, Masello (2009), no encontró cambios en los valores de H/L con la edad en Loros barranqueros (*Cyanoliseus patagonus*).

Por otro lado, Martínez-Tapia (2010) determinó el índice H/L en poblaciones invernantes del Gorrión de Lincoln (*Melospiza lincolnii*) y reportó que los juveniles presentaron valores más altos de H/L en comparación con los adultos.

Condición corporal

La condición corporal también ha demostrado tener una relación con el índice H/L. Jakubas et al. (2015) encontraron que en polluelos del mérgulo atlántico (*Alle alle*) la relación H/L fue menor al incrementar su masa y mejorar la condición corporal, patrón similar al encontrado por Hauptmanova (2002) en el Carbonero común (*Parus major*). Por el contrario, Masello et al. (2009) encontraron que los polluelos de loros barranqueros (*Cyanoliseus patagonus*) con mejor condición corporal aumentaron el número de heterófilos teniendo como resultado una correlación positiva entre la condición corporal y la proporción H/L.

Comparaciones interespecíficas

Algunos trabajos se han enfocado en la comparación entre grupos de especies, en los que se ha documentado la variabilidad filogenética en la expresión de valores de H/L. Sánchez-Torres et al. (2021) realizó una comparación entre especies y familias diferentes (*Gallus gallus, Meleagris gallopavo* (Phasianidae), *Cairina moschata, Anas platyrhynchos, Anser anser*) (Anatidae), y encontró diferencias entre ellas; los valores relativos de heterófilos se encontraron más elevados y los linfocitos disminuidos en *Cairina moschata, Anas platyrhynchos* y *Anser anser* (Anatidae), en comparación con *Gallus gallus*, y *Meleagris gallopavo* (Phasianidae), grupos que pertenecen a diferentes familias de aves.

Por otra parte, Banbura et al., (2013) examinó la variación del índice H/L en polluelos de dos páridos, el herrerillo común (*Cyanistes caeruleus*) y el carbonero común (*Parus major),* encontrando que los polluelos de carbonero común presentaron en promedio H/L más altos que los polluelos de herrerillo común, lo que sugiere la existencia de una diferencia en la sensibilidad ecológica de estas especies.

Oseguera-Reyes et al. (2019), generaron valores de referencia del perfil leucocitario de cinco especies de aves silvestres endémicas del occidente de México (*Campylorhynchus gularis, Basileuterus rufifrons, Melozone kieneri, Atlapetes pileatus*, e *Icterus bullocki*); encontraron diferencias significativas en las proporciones de heterófilos en *Basileuterus rufifrons* y alta variación en el índice H/L para *Melozone kienerii*.

López-Guillén (2022) analizó la variación del índice H/L a lo largo del año, entre cinco especies de colibríes (*Saucerottia beryllina, Colibri thalassinus, Eugenes fulgens, Basilinna leucotis, y Lampornis clemenciae)* de la Mina Dos Estrellas, en Tlalpujahua; los valores más altos se presentaron en *Eugenes fulgens* y *Colibri thalassinus*, seguidos de *Basilinna leucotis*, *Lampornis clemenciae*, y por último *Saucerottia beryllina* con el valor más bajo.

En un contexto más general, Ruiz- García (2017), reporta los valores del índice H/L en aves de tres familias (Fringillidae, Cardinalidae y Columbidae) del municipio de Villa Juárez, San Luis Potosí: encontró que las aves de la familia Columbidae presentaron un índice H/L muy alto o severo, mientras que las especies de Fringillidae y Cardinalidae presentaron niveles de H/L menores.

Sin embargo, hay estudios que no muestran esta diferencia. Tal es el caso del índice H/L de dos especies de Parúlidos migratorios del género *Leiothlypis* (*L. celata y L. ruficapilla*) de diferentes localidades geográficas de invernación en México; entre ellas no hubo diferencias significativas en el índice H/L (Alejandre-Espinoza, 2019).

Hipótesis

- H1. Habrá diferencias en el perfil leucocitario y el índice H/L dentro y entre especies de las familias Passerellidae y Parulidae
- H2. Las especies migratorias presentarán mayores niveles de H/L con respecto a residentes dentro de la misma familia taxonómica.
- H3. Habrá diferencias del índice H/L entre los dos sitios, siendo más bajo el que está influenciado por la urbanización.
- H4. Los perfiles leucocitarios serán distintos entre clases de sexo y edad, los niveles de H/L serán mayores en machos adultos con respecto a las hembras. Además, indistintamente de la especie y su afinidad taxonómica, los individuos que tengan una menor condición corporal presentarán H/L más elevado.

Predicciones

1. Dado que la filogenia, comportamiento, adaptaciones e historia de vida de las especies de aves de las familias Passerellidae y Parulidae son diferentes, habrá diferencias en la expresión del índice H/L entre las especies y familias analizadas.

2. La migración es un proceso que provoca mayores exigencias energéticas y estrés, que es además aumentado por el proceso de competencia interespecífica con especies residentes en los territorios de invernación, por lo que el H/L será más elevado en las aves migratorias.

3. Puesto que el entorno ambiental influye en el índice H/L y se ha demostrado que la urbanización puede ofrecer ciertos beneficios inmediatos a aves migratorias en tránsito sobre todo para especies generalistas como las que en este estudio destacan, se espera encontrar diferencias en los niveles de este índice en individuos que habitan sitios con perturbación ambiental urbana.

4. Las interacciones por competencia intra e interespecíficas por recursos ocurren en un escenario de dominancia y sumisión, por lo que los niveles de H/L estarán asociados a clases de sexo y edad, así como con respecto a la condición corporal de los individuos; por lo tanto, machos adultos y con una menos condición corporal estarán más estresados y tendrán una condición corporal menor.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la variación del índice heterófilo-linfocito (H/L) y el perfil leucocitario en aves de las familias Passerellidae y Parulidae en función de su taxonomía, condición migratoria, el tipo de hábitat (bosque remanente y parque urbano/semiurbano), sexo, edad y condición corporal, con el fin de identificar patrones fisiológicos asociados al estrés en contextos ecológicos y evolutivos diferenciados.

Objetivos particulares

- Determinar los perfiles leucocitarios de cada especie de las familias Passerellidae y Parulidae
- Comparar los valores del índice H/L entre las especies de las familias Passerellidae y Parulidae y estatus migratorio.
- Evaluar las diferencias en la expresión del H/L en especies en dos condiciones de hábitat (un bosque y un área influenciada por la urbanización)
- Determinar la variación del índice H/L con respecto a grupos de edad y sexo
- Evaluar si existe relación entre la condición corporal (índice de masa escalado) de los individuos estudiados y el índice H/L.

Materiales y métodos

Familias y especies focales del estudio

Se eligieron seis especies de dos familias de aves, tres especies de la familia Passerellidae (*Junco phaeonotus, Atlapetes pileatus* y *Melospiza lincolnii*) y tres de la familia Parulidae (*Basileuterus rufifrons, Leiothlypis celata* y *Setophaga coronata*). De las especies de Passerellidae, dos son residentes y una migratoria, son granívoras u omnívoras, mientras que las especies de Parulidae son visitantes de invierno (a excepción de *B. rufifrons)* y de dieta principalmente insectívora.

Estatus de residencia

Las especies residentes - presentes durante todo el ciclo anual en un área (Howell y Webb 1995) enfrentan potencialmente los efectos de la modificación de su hábitat (Navarro y Benítez 1993; García-Trejo y Navarro 2004), lo cual las ubica como un grupo indicador de alteración o cambios en los ecosistemas y de uso para el diseño de estrategias de conservación de ambientes (Wendt, 1995, en Sosa, 2003).

Las especies migratorias o visitantes de invierno – que realizan viajes estacionales ocupan diferentes áreas durante su reproducción e invernación (Bayly, 2018). Su ciclo anual consta en términos generales de cuatro partes: 1) se reproducen en primavera y verano al norte de los trópicos; 2) migran hacia los trópicos durante el otoño; 3) establecen territorios de invernación; y 4) migran hacia el norte a sus territorios de reproducción a finales del invierno y principios de primavera (La Sorte et al., 2016, Pacheco-Muñoz et al., 2022b). Las aves migratorias requieren de una preparación de reservas energéticas antes de su migración, reconstituir su condición corporal después de su migración en otoño (Holmes, 2007), requieren de hábitats de buena calidad para sobrevivir su período de invernada y prepararse nuevamente para su migración de primavera hacia el norte (Albert et al., 2020).

Área de estudio

Localidad 1

Sitio uno: bosque remanente

El presente trabajo se llevó a cabo en la localidad Mina Dos Estrellas en Tlalpujahua, Michoacán de Ocampo (19°46′N 100°12′O), en el Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua, que

se ubica en la división fisiográfica del Eje Neovolcánico de México, cuyos bastos yacimientos de oro y plata en el cerro Somera, permitieron la extracción durante cinco siglos (XVI-XX), posicionándolo como uno de los más importantes entre los siglos XVIII y XIX (Corona-Chávez y Uribe-Salas 2009, Corona-Chávez et al. 2010). Tiene una altura promedio de 2600 msnm, al noreste del estado de Michoacán y noroeste del Estado de México (Salas 2005). Comprende la región hidrológica Lerma-Santiago y la Cuenca Río Lerma-Toluca, donde se localiza la Subcuenca Tlalpujahua que tiene como corriente principal al Río Lerma (Nieto-Monroy 2007; CONAGUA 2024). El área de estudio colinda al norte con los municipios de Maravatío y Contepec; al este con el municipio de Contepec y el Estado de México; al sur con el Estado de México y el municipio de Senguio; al oeste con los municipios de Senguio y Maravatío. Los municipios colindantes con el Estado de México corresponden a Temascalcingo y El Oro de Hidalgo (INEGI 2024).

Esta región presenta un clima de templado subhúmedo a semifrío con lluvias en verano, con un grado de humedad alto; su precipitación anual va entre los 800 y 1,100 mm y la temperatura media va desde los 10°C hasta los 18°. La vegetación está conformada por bosque secundario de encino (*Quercus crassifolia*, *Q. crassipes, Q. frutex, Q. laurina y Q. rugosa*), bosque de oyamel (*Abies religiosa*), bosque de Cedro (*Cupressus lusitanica*), bosque de pino (*Pinus pseudostrobus, P. leiophylla, P. patula*), bosque de pino-encino (*Pinus - Quercus*), bosque de Juníperos (*Juniperus deppeana*) y la presencia de eucaliptos introducidos (*Eucalyptus globulus*) (Piñón-Becerril, 2007). Sus suelos dominantes corresponden a Andosoles (46.2%), Luvisoles (32.0%), presentando además Leptosoles (18.4%), Vertisoles (1.6%) y Planosoles (0.2%) (INEGI, 2009).

Localidad 2

Sitio uno: parque semiurbano

El Parque Estatal Cerro Punhuato, se ubica al oriente de la Ciudad de Morelia, Michoacán, el cerro Punhuato es la quinta elevación del municipio de Morelia (Pérez-Cossío 1995), siendo el de mayor elevación en el área de Morelia, con un rango altitudinal que va de los 1980 a los 2310 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Gómez-Romero et al. 2008; INEGI 1985). Se encuentra aproximadamente a 7 km del centro de Morelia y abarca una superficie total de 118.86 hectáreas, originalmente decretada con 78.86 ha y ampliada posteriormente

con 40 ha adicionales (Gómez-Romero et al. 2008). La fecha oficial de decreto fue el 26 de enero de 2005, con reforma el 15 de febrero de 2008. Sus coordenadas geográficas están entre los 19° 41’ y 19° 42’ N y 101° 07’ y 101° 09’ O (Gómez-Romero et al. 2008). El acceso se da por la carretera federal núm. 15 (Morelia–México). El clima de la región es templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de entre 17.5°C y 18.6°C, y una precipitación anual entre 760 y 800 mm (García 1981; Encino-Ruiz et al. 2013; Gómez-Romero et al. 2008). Según la clasificación de Köppen modificada por García (1988), la fórmula climática es C (wo) (w) b (i) g.

Geológicamente, la zona forma parte del Eje Neovolcánico Transversal, con presencia de derrames y productos piroclásticos de composición andesítica, así como depósitos de arenas, cenizas basálticas y rocas neolíticas (INEGI 1985). Su cubierta vegetal está representada por cuatro tipos de vegetación:

1. Bosque de encino (*Quercus obtusata, Q. castanea, Q. desertícola, Q. glaucoides*)
2. Bosque de galería (con especies de *Salix, Taxodium, Fraxinus*)
3. Matorral subtropical (*Bursera cuneata, B. bipinnata, Cedrela dugesii, Albizia plurijuga, Ceiba aesculifolia, Casimiroa edulis,* y *Opuntia spp.*, entre otras)

También presenta especies introducidas, especialmente *Eucalyptus camaldulensis*, con alturas que varían de 3 a 18 m, además de *Schinus molle, Cupressus lindleyi, Casuarina equisetifolia*, y árboles frutales como *Persea americana* (aguacate) y *Prunus infoci* (durazno) (Ayuntamiento de Morelia, 2025).

Sitio dos: parque urbano

El Parque Zoológico Benito Juárez, ubicado al sur de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, dentro del valle de Guayangareo se localiza aproximadamente en las coordenadas 19°41′ N y 101°11′ O, a una altitud cercana a 1 900–1 950 msnm, y forma parte del sistema de áreas verdes urbanas del municipio (Parque Zoológico Benito Juárez, s. f.; INEGI, 2017). El Parque Zoológico Benito Juárez ocupa una superficie aproximada de 25 ha y constituye uno de los principales espacios recreativos y de conservación ex situ del estado de Michoacán. El área presenta una combinación de infraestructura urbana, áreas arboladas, cuerpos de agua artificiales y zonas ajardinadas, lo que genera una heterogeneidad

ambiental característica de los ecosistemas urbanos complejos (Parque Zoológico Benito Juárez, s. f; Gobierno del Estado de Michoacán. s. f).

El clima de Morelia corresponde al tipo templado subhúmedo con lluvias en verano (Cwb), según la clasificación climática modificada de Köppen. La temperatura media anual es de aproximadamente 16–17 °C, y la precipitación media anual oscila alrededor de 750–800 mm, concentrándose principalmente entre los meses de junio y septiembre (García, 2004; Climate-Data.org, s. f.). Estas condiciones favorecen el establecimiento de vegetación arbórea y arbustiva típica de ambientes templados, particularmente especies de coníferas y latifoliadas utilizadas tanto en reforestación urbana como en paisajismo.

Desde el punto de vista de la ecología urbana y forestal, el parque funciona como un parche de vegetación dentro de una matriz urbana, proporcionando microhábitats, cobertura arbórea y recursos para fauna silvestre, especialmente aves, reptiles y pequeños mamíferos. Este tipo de áreas verdes urbanas desempeñan un papel importante en la conservación de la biodiversidad local, la regulación microclimática y la provisión de servicios ecosistémicos dentro de las ciudades (Chace y Walsh, 2006; McDonnell y Hahs, 2015).

En el contexto del presente estudio, el Parque Zoológico Benito Juárez ofreció condiciones adecuadas para evaluar procesos biológicos y ecológicos asociados a ambientes urbanos, al presentar una combinación de factores antrópicos y naturales representativos de áreas forestales urbanas del centro de México.

Trabajo de campo y procesado de muestras

A partir del mes de junio de 2024 se obtuvieron muestras hematológicas cada dos meses en el sitio de Tlapujahua, mientras que para el área de Morelia se muestreo entre enero y febrero de 2025. Además, se utilizaron muestras de frotis sanguíneos ya existentes, obtenidas como resultado de trabajos de investigación previos desde 2014 a 2024 en la misma zona de estudio, para su revisión y análisis.

Captura

La captura de aves se realizó mediante redes de niebla (3.0 x 12.0 m, ancho y largo) colocadas desde el amanecer y hasta las 12:00 hrs en sitios estratégicos para garantizar las capturas. De los ejemplares capturados se tomaron los siguientes datos: 1) nombre de la especie, 2) edad, 3) sexo, 4) código de sexo, 5) protuberancia cloacal, 6) parche de incubación, 7) grasa, 8) muda corporal, 9) muda de vuelo, 10) desgaste de vuelo, 11) tamaño del ala, 12) tarso, 13) pico, 14) peso (Ralph et al. 1996). Estas variables morfométricas fueron asociadas y de apoyo para calcular condición corporal.

Obtención de muestras

La obtención de muestras de sangre se realizó mediante punción de la vena branquial (Espín et al., 2014), y posteriormente con la ayuda de un tubo capilar con heparina se colocó la muestra de sangre en un portaobjetos en posición horizontal. Con la ayuda de otro portaobjetos en un ángulo de aproximadamente 45° se extendió para hacer el frotis. Se realizaron al menos dos frotis de cada individuo, los cuales se rotularon y dejaron secar a temperatura ambiente.

Tinción y recuperación de muestras

Las muestras se tiñeron con el propósito de observar las células y poder identificarlas, para lo que se usó colorante May-Grumwald y Wright-Giemsa bufferados previamente filtrados. La tinción duró 10 minutos en cajas de tinción y se enjuagaron posteriormente con agua corriente para quitar el exceso de colorante; se dejaron secar a temperatura ambiente para su posterior análisis (Ots *et al.* 1998, Canfield 1998). Con su análisis se describió el perfil leucocitario y se determinaron las proporciones de H/L. Para el caso de recuperación de muestras de inventario laboratorio, se hicieron alrededor de 17 pruebas con el apoyo de Dra Ma. Antonia Herrera Vargas, del Laboratorio de Ecofisiología Animal del Instituto de Investugación sobre Recursos Naturales (INERENA), de la UMSNH. Usamos diferentes protocolos, colorantes, buffers de diferentes concentraciones, lavados con agua corriente y diferentes tiempos, xileno, ácido clorhídrico y alcohol al 96 °. Finalmente, la técnica que mejor funciono fue la siguiente:

1. Enjuagar con agua corriente hasta quitar la mayor cantidad de colorante.

2. Sumergir la muestra un segundo en una solución de alcohol al 96° con una gota de Ácido clorhídrico.
3. Enjuagar en agua corriente cinco segundos.
4. Colocar las muestras en colorante May-Grumwald (previamente filtrado) durante 5-7 min.
5. Enjugar dos segundos.
6. Colocarlas en colorante Wright-Giemsa durante 10 min.
7. Enjuagar en agua corriente hasta quitar el exceso de colorante
8. Dejar secar al aire.
9. Observar al microscopio

Selección de muestras y diseño de análisis

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, se analizaron en total 95 muestras sanguíneas correspondientes a individuos pertenecientes a las familias *Passerellidae* y *Parulidae*. Estas muestras se distribuyeron de la siguiente manera, según cada objetivo específico:

1. Determinación de perfiles leucocitarios entre especies de las familias Passerellidae y Parulidae, se utilizaron las 95 muestras correspondientes a 95 individuos para su análisis.
2. Determinación de diferencias en el índice H/L entre especies de las familias Passerellidae y Parulidae. Se incluyeron las 95 muestras completas, de las cuales 30 correspondieron a especies de Parulidae y 35 a Passerellidae, permitiendo así una comparación directa entre ambas familias taxonómicas.
3. Análisis de variación del índice H/L en función del estatus migratorio. Para el estatus migratorio, se utilizaron las 95 muestras, clasificadas en 50 individuos migratorios y 45 residentes.
4. Evaluación de diferencias del índice H/L entre dos tipos de hábitat (bosque remanente vs. Parque semiurbano). Para este objetivo se utilizaron 60 muestras pertenecientes exclusivamente a individuos de tres especies migratorias del género Parulidae (*Basileuterus rufifrons*, *Leiothlypis celata* y *Setophaga coronata*). Se

analizaron 10 individuos por especie y por sitio, abarcando dos localidades contrastantes: Tlalpujahua (bosque remanente) y Morelia (Parque semiurbano).

5. Análisis de variación del índice H/L en función edad y sexo. Para el análisis por edad, se trabajó con una submuestra de 20 individuos de *Leiothlypis celata,* diferenciados en 9 adultos y 11 juveniles, El análisis por sexo se realizó con 13 individuos de *Leiothlypis celata,* de los cuales 5 fueron machos y 8 hembras.
6. Evaluación de la relación entre condición corporal e índice H/L. Este análisis se llevó a cabo con las 95 muestras.

Conteo diferencial de leucocitos

Para el conteo de células aviares, no es posible el uso de contadores automatizados, por lo que se requirió la evaluación supervisada de la morfología celular para la identificación de leucocitos. De todas las especies se obtuvo el conteo diferencial de células, el cual se realizó con la ayuda de un microscopio ZEIGEN VIRTUE-N, con el objetivo de 100x y aceite de inmersión, y un contador (Kitlab COUNTER). Se contaron 100 células blancas (con una repetición) de cada frotis, como lo sugiere Martínez-Quintanilla et al. (2017) con el objetivo de obtener la proporción de H/L.

Índice de condición

Los índices de condición corporal se han utilizado para evaluar la calidad del hábitat, identificar poblaciones estresadas, determinar los efectos de las perturbaciones, etc. (Milenkaya *et al.* 2013). En este trabajo se determinó la condición corporal utilizando el IME (Índice masa escalado) o SMI (Scaled Mass Index, por sus siglas en inglés), el cual permite estimar la condición corporal con base en el principio de escalamiento (scaling), otorgándole un mayor poder de predicción del tamaño relativo de las reservas energéticas y las correspondientes medidas de longitud corporal de los individuos, en comparación con los métodos tradicionalmente utilizados (Peig y Green 2009, 2010). El IME se basa en un modelo de regresión estandarizada del eje mayor (SMA), el cual toma la distancia perpendicular entre las observaciones y la línea de valores esperados, de acuerdo a la ecuación propuesta por Peig y Green (2009):

$$_{IME} = M_i\,[L0/Li]\,Bsma$$

Donde:

IME = valor del IME esperado

M_i = medida del logaritmo de la masa corporal de cada Individuo

Li = medida de longitud corporal de cada individuo

L0 = promedio de la medida de longitud alar

SMA = (Standardized Major Axis) es una forma de ajustar una recta cuando las dos variables tienen error es valor de la regresión estandarizada del eje mayor

bSMA = pendiente de la regresión basada en el SMA

Para el cálculo del IME, primero se calculó el promedio de la longitud alar de todos los individuos (L0) y se calculó el valor del SMA con los valores estandarizados del peso y longitud alar, utilizando el programa estadístico R y la librería "smatr" con el siguiente script:

"coef(smatr::sma(peso ~ medida_tamaño, data = setl)) #estimado
summary(smatr::sma(peso ~ medida_tamaño, data = setl)) #resumen de todo el modelo"

Finalmente, los valores se sustituyeron en la fórmula de Peig y Green (2009) para cada individuo. Los datos generados de la ecuación se utilizaron como la medida de condición corporal para cada individuo. (índice de condición corporal determinada por peso/ala) y el índice H/L (Moreno-Palacios, et al. 2018).

Análisis de datos

Se creó la base de datos y para depurarla se usó el paquete Reference Value Advisor (macroinstrucciones para Excel) (Geffré, et al. 2011), con el fin de eliminar valores atípicos (outliers) y definir lo que se ha considerado los valores de H/L "normales" para la población estudiada.

Perfiles leucocitarios

Para determinar los perfiles leucocitarios de cada especie de las familias Passerellidae y Parulidae se realizaron análisis de varianza entre cada especie y cada tipo de leucocito (heterófilos, linfocitos, basófilos, eosinófilos, monocitos).

Análisis general del índice H/L - Estatus de residencia y Familia

Se utilizó un modelo lineal mixto gaussiano, considerando que el índice H/L es una variable continua cuya distribución se aproxima a la normal. Para evaluar la variación del índice H/L en Estatus de residencia y Familia en aves silvestres, se usó el paquete lme4 en R versión 4.x, empleando como variable respuesta H/L.

Las variables explicativas incluyeron:

- Índice de Masa Escalado (IME) (covariable numérica);
- Familia taxonómica (Parulidae vs Passerellidae); y
- Estatus de residencia (Residente vs Migratorio) (variable categórica).

Dado que las muestras provinieron de dos localidades con condiciones ambientales distintas (Morelia y Tlalpujahua), se incorporó Sitio como un efecto aleatorio [(1|SITIO)] para controlar la variabilidad estructural asociada al sitio de muestreo y evitar pseudorreplicación espacial.

Se ajustaron una serie de ocho modelos candidatos que incorporaron todas las combinaciones posibles de las variables fijas (incluyendo un modelo nulo), siguiendo una aproximación multimodelo (Anexo 1). Los modelos se compararon mediante el Criterio de Información de Akaike corregido (AICc) utilizando el paquete MuMIn (MuMIn, 2025). Se seleccionó el modelo con el menor valor de AICc como el modelo más parsimonioso, considerando como modelos con soporte estadístico adicional aquellos con $\Delta AICc < 2$. (Anexo 2) (Burnham y Anderson, 2002).

Posteriormente, del mejor modelo se obtuvieron las estimaciones de los efectos fijos, varianzas aleatorias y coeficientes de determinación marginal y condicional (R^2m y R^2c) mediante la función *r.squaredGLMM* (MuMIn, 2025). Para la visualización de los

efectos predichos se empleó el paquete ggeffects (Lüdecke, 2018), generando gráficas de regresión y de barras con error estandar, que ilustran la relación entre H/L y cada predictor, así como las diferencias entre categorías de residencia y familia. Este procedimiento permitió identificar los factores ecológicos y fisiológicos que explican con mayor fuerza la variación del índice H/L en la comunidad de aves estudiada, así como comparar su magnitud relativa mediante el enfoque multimodelo.

H/L – Sitio

Para evaluar la variación del índice H/L de acuedo con el sitio en las especies de la familia Parulidae (*Basileuterus rufifrons, Leiothlypis celata y Setophaga coronata*), se realizó un análisis estadístico en el entorno R (2025, versión 4.x). Primero, se filtraron los datos correspondientes a las especies de interés y se verificó la estructura de las variables categóricas y numéricas. Debido al tamaño muestral y la estructura del conjunto de datos se utilizó un modelo lineal mixto gaussiano, con diferentes combinaciones de predictores fijos:

- Índice de Masa Escalado (IME)
- Sitio de muestreo (Morelia, Tlalpujahua)
- Especie

Se ajustaron ocho modelos candidatos con todas las combinaciones posibles de estas variables fijas. La selección del modelo más parsimonioso se realizó mediante el criterio de información de Akaike corregido para muestras pequeñas (AICc), utilizando la función model.sel del paquete MuMIn (Bartón, 2025) (Anexo 1.1.) Los modelos se compararon con base en el ΔAICc y el peso de Akaike (AICc weight), considerando como modelos con soporte estadístico aquellos con $\Delta AICc \leq 2$. (Burnham y Anderson, 2002).

El mejor modelo (o modelos con soporte equivalente) fue(ron) posteriormente analizado(s) mediante un modelo lineal ordinario (LM) para obtener estimaciones de efectos, intervalos de confianza y significancia estadística. La calidad del ajuste se evaluó con R^2 y el error residual (Anexo 1.2.)

Finalmente, para representar las diferencias del índice H/L entre sitios dentro de cada especie, se generaron tres gráficas independientes, una por cada taxón. Para ello, se calculó el promedio (media) de H/L y su error estándar (EE) por especie y sitio. Estos valores se graficaron mediante barras de media ± EE, empleando la librería ggplot2 (Wickham, 2016). La gráfica muestra la comparación entre Morelia y Tlalpujahua para cada especie de Parulidae, visualizando las tendencias observadas en el modelo estadístico. Para finalizar se hicieron análisis de varianza y estadística descriptiva de los modelos mejor representado y pruebas de Tukey para determinar dónde se encontraban esas diferencias (en caso de que existieran).

H/L- Sexo y edad

Para evaluar la interacción del índice H/L con el sexo y la edad, se analizaron datos de la especie *Leyotlypis celata*; Se utilizó un modelo lineal mixto gaussiano, utilizando el paquete lme4 en R (Bates, et al., 2015). Se empleó como variable respuesta H/L.

Las variables explicativas incluyeron:

- Sexo (variable categorica)
- Edad (variable categórica)
- IME (variable numérica).

Se ajustaron ocho modelos candidatos que incorporaron todas las combinaciones posibles de las variables fijas (incluyendo un modelo nulo), siguiendo una aproximación multimodelo (Anexo 1). Los modelos se compararon mediante el Criterio de Información de Akaike corregido (AICc) utilizando el paquete MuMIn ((MuMIn, 2025) Se seleccionó el modelo con el menor valor de AICc como el modelo más parsimonioso, considerando como modelos con soporte estadístico adicional aquellos con $\Delta AICc < 2$. (Burnham y Anderson, 2002) (Anexo 2).

Posteriormente, del mejor modelo se obtuvieron las estimaciones de los efectos fijos, varianzas aleatorias y coeficientes de determinación marginal y condicional (R^2m y R^2c) mediante la función *r.squared GLMM* (MuMIn, 2025). Para la visualización de los efectos predichos se empleó el paquete ggeffects (Lüdecke, 2018)., generando gráficas de

barras con intervalos de confianza al 95%, que ilustran la relación entre H/L y cada predictor, así como las diferencias entre categorías de residencia y familia.

Resultados

El total de frotis que se analizaron para todas las especies focales fue de 95, en los que se contaron un total de 19,000 células leucocitarias) (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Número de muestras de las especies de aves analizadas, sitios de muestreo, familia y estatus de residencia.

Especies	N	Sitios	Familia	Estatus de residencia
Setophaga coronata	20	Tlalpujahua/Morelia	Parulidae	Migratorio
Basileuterus rufifrons	20	Tlalpujahua/Morelia	Parulidae	Residente
Leiothlypis celata	20	Tlalpujahua/Morelia	Parulidae	Migratorio
Junco phaeonotus	15	Tlapujahua	Passerellidae	Residente
Melospiza lincolnii	10	Morelia	Passerellidae	Migratorio
Atlapetes pileatus	10	Tlalpujahua	Passerellidae	Residente
Total	95			

Perfiles leucocitarios

A través de estadística descriptiva y ANOVA de una vía se encontró que en general los perfiles leucocitarios de las diferentes especies difieren. Los cinco tipos de células (heterófilos, linfocitos, eosinófilos, basófilos y monocitos) presentaron diferencias significativas en sus proporciones entre algunas de las especies ($p = <0.05$) (Cuadro 1.2).

H/L familia y estatus de residencia e IME

La selección de modelos basada en el Criterio de Información de Akaike corregido (AICc) indicó que el modelo con mayor soporte estadístico para explicar la variación en el índice

Cuadro 1.2. Valores de los perfiles leucocitarios de las especies muestreadas en Tlalpujahua y Morelia, Michoacán (promedios, errores estándar y rangos (entre paréntesis) por especie. Las letras mayúsculas al lado del paréntesis son resultado del análisis posthoc de Tukey que indica donde se dieron las diferencias significativas entre los grupos celulares.

LEUCOCITOS	***Setophaga coronata***	***Basileuterus rufifrons***	***Leiothlypis celata***	***Junco phaeonotus***	***Melospiza lincolnii***	***Atlapetes pileatus***	**F**	**P**
Heterófilo	31.73±2.60 (9-50) A	25.14 ± 2.75 (10-51) ABC	27.05±2.53 (7-50) AB	28.90 ±2.92 (9-51) AB	13.31±3.78 (3-28) C	15.88 ± 3.78 (4-33) BC	4.77	0.0007
Linfocito	23.57±2.50 (5-56) B	9.20 ± 2.64 (2-18) C	24.47±2.44 (5-44) B	16.10 ± 2.81 (4-30) BC	42.83±3.63 (24-62) A	27.11±3.64 (13-40) B	12.8	<.0001
Eosinófilo	7.05 ± 1.15 (0-21) BC	9.67±1.22 (2-21) AB	4.20±1.12 (0-12) C	12.86±1.30 (5-28) A	2.44±1.68 (0-7) C	1.77±1.68 (0-5) C	9.62	<.0001
Basófilo	34.10±2.95 (13-52) C	53.91±3.11 (20-81) A	38.05 ±2.87 (14-66) BC	38.36±3.32 (16-67) BC	33.55±4.28 (20-48) BC	50.27±4.28 (41-61) AB	6.39	<.0001
Monocito	3.52 ± 0.95 (0-8) AB	2.05±1.00 (0-6) B	6.22±0.92 (0-33) A	3.76±1.07 (0-7) AB	7.55±1.38 (2-10) A	4.94±1.38 (0-15) AB	3.16	0.0116
N	20	20	20	15	10	10		

H/L fue aquel que incluyó estatus de residencia y familia taxonómica como predictores (modelo 6; ΔAICc = 0; AICc = 341.5; w = 0.543) (Fig. 1.1). El segundo mejor modelo es el 7, que añadió la condición corporal (IME), obtuvo un soporte relativamente similar (ΔAICc = 0.72; AICc = 342.2; w = 0.379), pero no superó al modelo más parsimonioso. Todos los demás modelos mostraron ΔAICc > 3.9, por lo que se consideraron sustancialmente de menor poder explicativo (Cuadro 1.3).

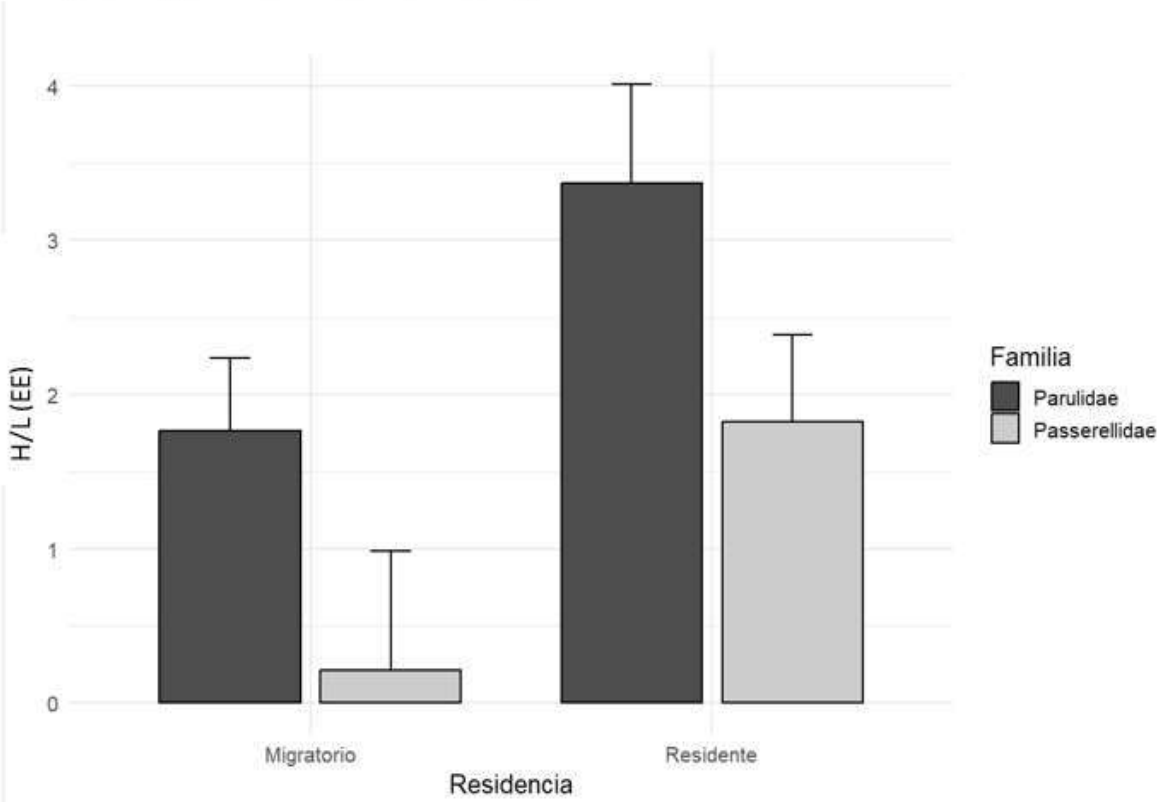


Figura 1.1. Efecto estimado de la proporción H/L con relación a la taxonomía y estatus de residencia de seis especies de aves de las familias Passerellidae y Parulidae. Las especies residentes y la familia Parulidae muestran mayores niveles de H/L. Las barras de error representan errores estándar.

Cuadro 1.3. Comparación de modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) que explican la variación en diversas variables de respuesta en seis especies de aves de las familias Passerrellidae y Parulidae, de distintos tipos de hábitat (Sitio) (urbano/suburbano y bosque remanente) y variables intrínsecas (edad y sexo) en el centro de México.

VARIABLES IND	Modelo que mejor explica la variación	n	k	AICc	ΔAIC	*wi*
Estatus de Residencia, Familia e IME	**m6=HL ~ RESIDENCIA + FAMILIA**	95	5	**341.500**	**0**	**0.543**
	m7=HL ~ IME + RESIDENCIA + FAMILIA	95	6	**342.2**	**0.72**	**0.379**
	m4=HL ~ IME + RESIDENCIA	95	5	345.4	3.94	0.076
	m2=HL ~ RESIDENCIA	95	4	354.7	13.24	0.001
	m3=HL ~ FAMILIA	95	4	355.4	13.89	0.001
	m5=HL ~ IME+ FAMILIA	95	5	356.1	14.58	0.000
	m2=HL ~ IME	95	5	357.7	16.23	0.000
	m0=HL ~ 1	95	3	359.4	17.86	0.000
Sitio, Especie e IME	**m3=HL ~ ESPECIE**	60	4	**218.1**	**0**	**0.505**
	m6=HL ~ SITIO + ESPECIE	60	5	**219.7**	**1.68**	**0.218**
	m5=HL ~ IME + ESPECIE	60	5	**219.9**	**1.86**	**0.199**
	m7=HL ~ IME + SITIO + ESPECIE	60	6	221.9	3.86	0.073
	m0=HL ~ 1	60	2	229.1	11.04	0.002
	m2=HL ~ SITIO	60	3	230.3	12.27	0.001
	m1=HL ~ IME	60	3	230.9	12.88	0.001
	m4=HL ~ IME + SITIO	60	4	232	13.94	0.000
Sexo, Edad e IME	**m4=HL ~ Sexo * Edad**	20	5	**33**	**0**	**0.356**
	m1=HL ~ Sexo	20	3	**33.3**	**0.26**	**0.313**
	m3=HL ~ Sexo + Edad	20	4	**34.3**	**1.27**	**0.188**
	m2=HL ~ Edad	20	3	35.8	2.78	0.089
	m7=HL ~IME	20	2	36.8	3.78	0.054
	m0= HL ~ 1	20	2	36.8	3.78	0.047
	m5= Edad + IME	20	4	37.1	4.07	0.41
	m6=HL ~ SEXO * EDAD + IME	20	5	39.7	6.72	0.011

Abreviaturas: k = número de parámetros, AICc = Criterio de Información de Akaike corregido para tamaños de muestra pequeños, ΔAIC = diferencias de Akaike, w_i = pesos de Akaike. HL = índice Heterófilos Linfocito, 1 = modelo nulo.

El modelo mixto seleccionado (H/L ~ residencia + familia), mostró efectos significativos tanto del estatus de residencia como taxonómicos; los individuos pertenecientes a la familia Passerellidae mostraron valores de H/L menores [$p < 0.001$] (media=1.430±0.265, n=33, gl=32,) en comparación con el grupo de especies de la familia Parulidae (media=2.279 ± 0.243, n= 56, gl=55). Con relación al estatus de residencia, los individuos residentes presentaron valores de H/L significativamente mayores [$p < 0.001$] (media=2.47±0.294, n= 43, gl=42) en comparación con los individuos migratorios (media=1.49 ±0.212, n=46, gl=45) (Fig. 1.1).

Con respeto al segundo mejor (modelo modelo 7), que incluye al IME, podemos observar que existe una relación negativa; con una mejor condición corporal la tendencia es la disminución del valor H/L (Fig. 1.2).

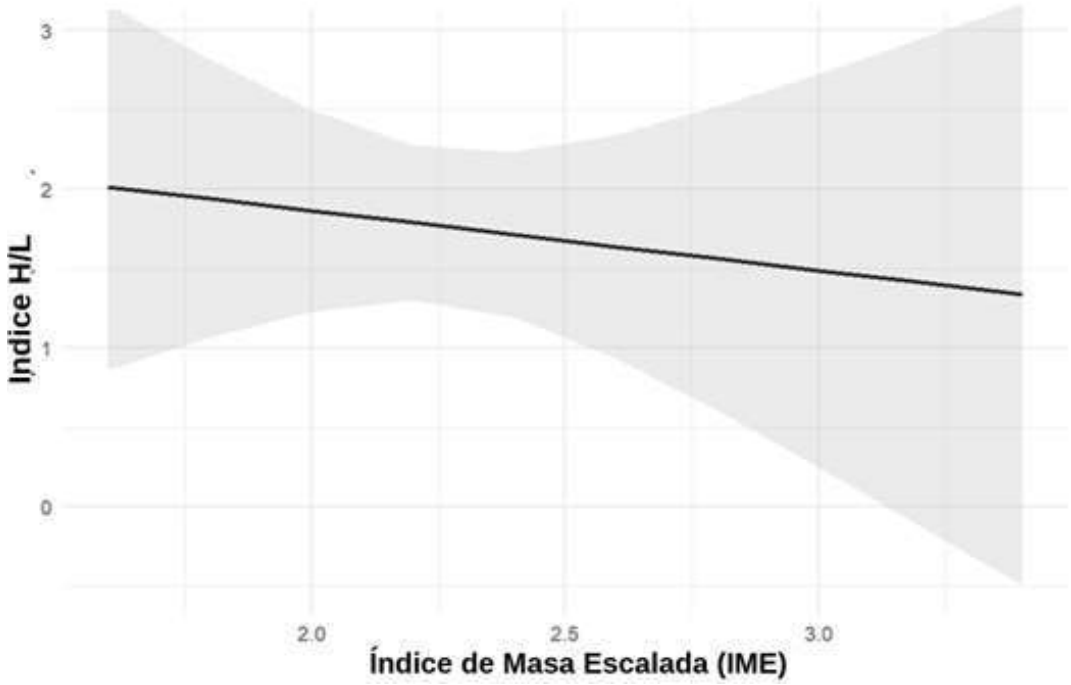


Figura 1.2. Relación de la masa (índice de masa escalado, IME) sobre la proporción H/L en aves de las familias Passerrellidae y Parulidae en sitios suburbanos y bosque remante en el centro de México. El tamaño de muestra fue de 95 individuos (Cuadro 1.1). El área sombreada gris representa los limites inferior y superior.

H/L sitio

La selección de modelos basada en el Criterio de Información de Akaike corregido (AICc) indicó que el modelo con mayor soporte estadístico para explicar la variación del índice H/L dentro de la familia Parulidae fue el que incluyó únicamente el efecto de especie (modelo m3; AICc = 218.1; w = 0.505; Fig 1.3). Los siguientes dos modelos en el ordenamiento (m6 y m5), incorporaron además el sitio (Fig. 1.4) e IME (Fig. 1.5), mostrando, sin embargo, un soporte moderado (ΔAICc = 1.68 y 1.86, respectivamente), pero no superaron al modelo más parsimonioso. Todos los modelos restantes presentaron ΔAICc mayores a 3.8, lo que indica un soporte sustancialmente menor (Cuadro 1.3).

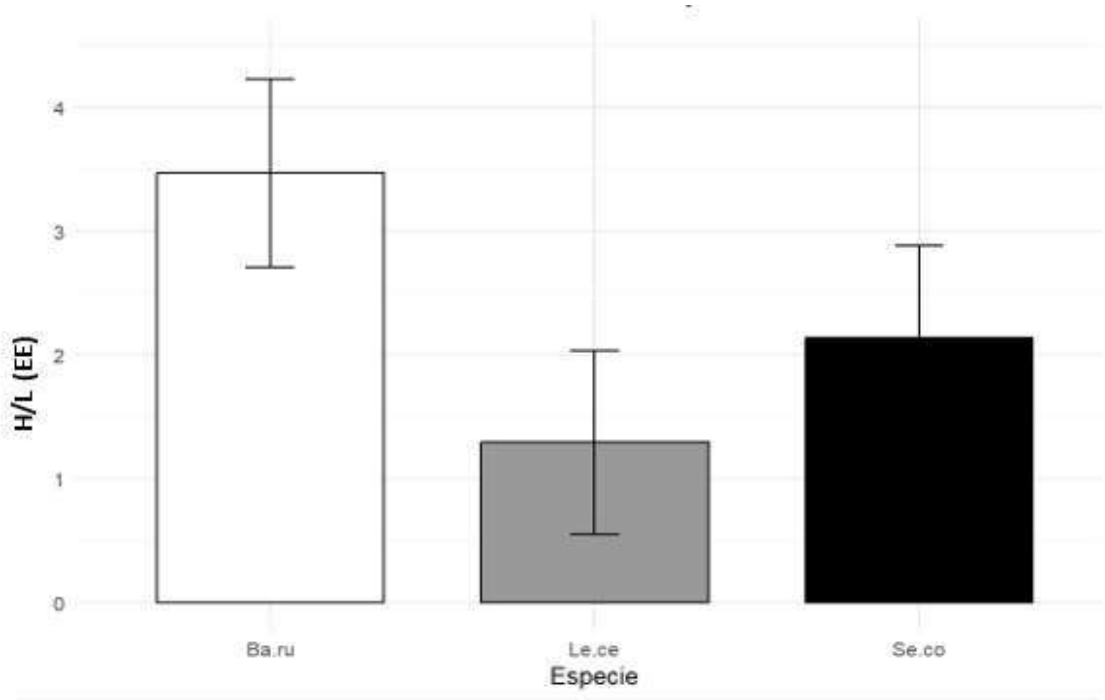
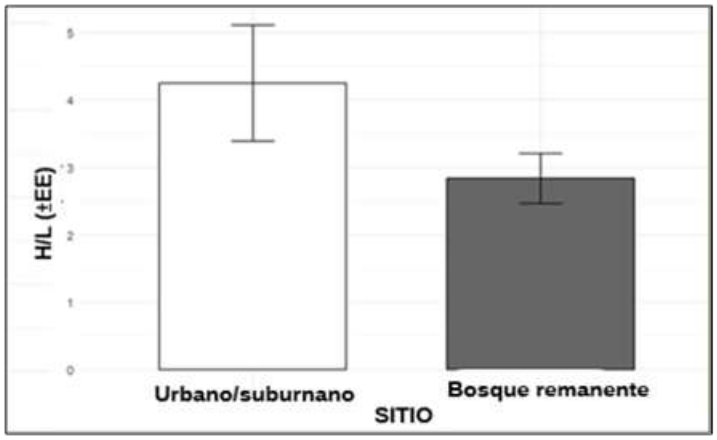
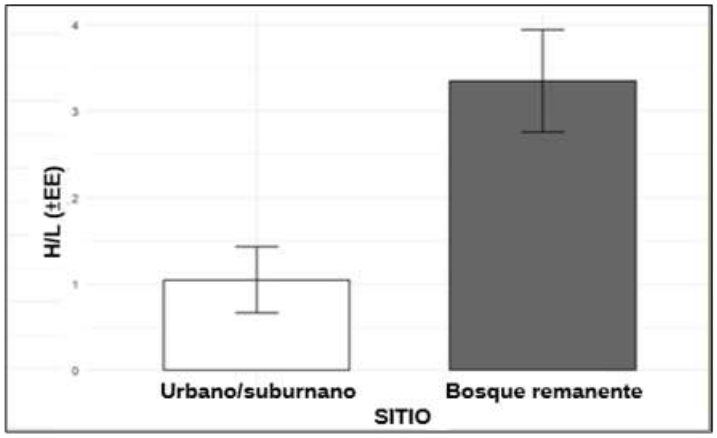


Figura 1.3. Variación del Índice H/L de tres especies de la Familia Parulidae: *Basileuterus rufifrons* (Ba.ru), *Leiotlhypis celata* (Le.ce) y *Setophaga coronata* (Se.co) en sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México. El tamaño de muestra para la familia fue de 60 individuos (Cuadro 1.1). Las barras de error representan errores estándar.

a) ***Basileuterus rufifrons***



b) ***Setophaga coronata***



c) ***Leiothlypis celata***

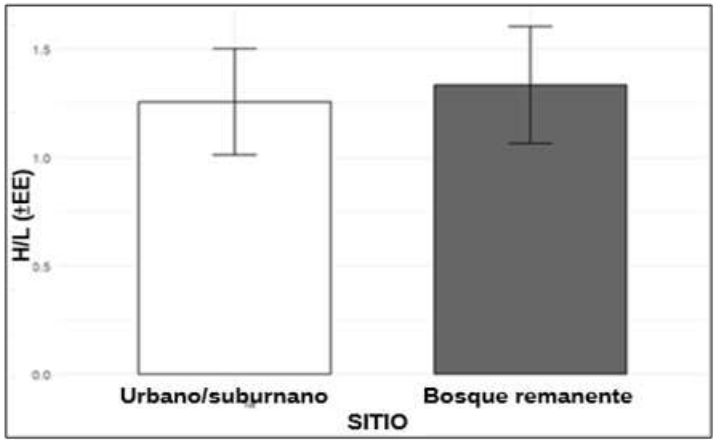


Figura 1.4. Variación del Índice H/L de tres especies de la Familia Parulidae: a) *Setophaga coronata*, b) *Basileuterus rufifrons* y c) *Leiotlhypis celata* en sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México. El tamaño de muestra para la familia fue de 60 individuos (20 de cada especie y 10 de cada sitio) (ver Cuadro 1.1). Las barras de error representan errores estándar.

Figura 1.5. Relación entre la condición corporal (índice de masa escalada, IME) y el Índice H/L en las tres especies de la familia Parulidae; *Basileuterus rufifrons* (Ba.ru, línea roja), *Leiotlhypis celata* (Le.ce, línea verde) y *Setophaga coronata* (Se.co, línea azul), con sus límites inferior y superior en sombras representadas por el mismo color.

El modelo lineal ajustado (HL ~ especie) reveló diferencias significativas en el índice H/L entre las especies incluidas en el análisis [$p < 0.001$], donde *Basileuterus rufifrons* fue la especie con un indice H/L mayor (media =3.47±0.454, n=18, gl=17) y *Leiothlypis celata* presentó valores significativamente menores de H/L (media= 1.29±0.177, n= 19, gl= 18), mientras que *Setophaga coronata* también mostró valores reducidos de H/L (media=2.14± 0.432; n=19, gl=18; Fig. 1.6). Estas diferencias indican una variación interespecífica marcada en la respuesta fisiológica asociada al índice H/L dentro de la familia Parulidae. El error estándar residual del modelo fue 1.611 y el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.243$), indica que la relación explicó aproximadamente 24.3 % de la variación total observada.

Con respecto al modelo 6 (m6) (Cuadro 1.3) que mostró ser el segundo más importante, encontramos que el índice H/L en *Setophaga coronata*, fue significativamente mayor en Tlalpujahua (3.35 ± 0.60 EE; n = 9) que en Morelia (1.05 ± 0.39 EE; n = 10). La

prueba t confirmó diferencias significativas entre sitios (t = −3.25, gl = 13.93, p = 0.0058). En *Basileuterus rufifrons*, los valores promedio de H/L fueron mayores en Morelia (media=4.25 ± 0.86 EE; n = 8) que en Tlalpujahua (media = 2.84 ± 0.37 EE; n = 10). No obstante, esta diferencia no fue estadísticamente significativa (t = 1.51; gl = 9.59; p = 0.164), indicando una alta variabilidad intraespecífica entre individuos (Fig. 1.4). Para *Leiothlypis celata,* los valores de H/L fueron similares entre localidades, con una media de 1.26 ± 0.25 EE en Morelia (n = 10) y de 1.33 ± 0.27 EE en Tlalpujahua (n = 9). La prueba estadística confirmó la ausencia de diferencias significativas entre sitios (t = –0.21; gl = 16.6; p = 0.835), sugiriendo una respuesta fisiológica homogénea de la especie frente a las condiciones locales evaluadas.

En cuanto al modelo 5 que incluye al IME, el análisis de la relación entre el índice de masa escalada (IME) y el índice heterófilos/linfocitos (H/L) mostró una tendencia negativa consistente en las tres especies evaluadas (*Basileuterus rufifrons, Leiothlypis celata y Setophaga coronata*), indicando que valores más altos de condición corporal se asociaron con menores niveles de estrés fisiológico. En todas las especies, el índice H/L disminuyó progresivamente conforme aumentó el IME, aunque con diferencias en la magnitud de la respuesta entre especies (Fig. 1.5).

H/L sexo, edad

La única especie para la que se contó con muestras suficientes para analizar las relaciones por clases de sexo y edad fue *Leiothlypis celata*. Con base en esta, la selección de modelos mediante el Criterio de Información de Akaike corregido (AICc) indicó que el modelo con mayor soporte estadístico para explicar la variación del índice H/L, fue el que incluyó los efectos de sexo, edad y su interacción (modelo m4; AICc = 33.0; ΔAICc = 0 w = 0.356). El segundo mejor modelo (m1), que incluyó únicamente el efecto de sexo, presentó un soporte similar (AICc = 33.0; ΔAICc = 0.26; w = 0.313), aunque el modelo con interacción permaneció como la alternativa más parsimoniosa. Los modelos restantes mostraron ΔAICc mayores a 1.27, por lo que se consideraron menos competitivos (Cuadro 1.3).

En el análisis por sexo, los machos registraron valores significativamente mayores del índice H/L (1.64 ± 0.32 EE, n = 8) en comparación con las hembras (0.74 ± 0.16 EE,

n=5) (Fig. 1.6). La prueba t confirmó que esta diferencia fue estadísticamente significativa (t = 2.54, gl = 10.00, p = 0.029), indicando una variación del estrés fisiológico asociada con sexo de los individuos en esta especie.

En cuanto a la edad, los juveniles presentaron un valor promedio de H/L de 0.88 ± 0.17 EE (n = 8), mientras que los adultos mostraron valores más elevados, con una media de 1.96 ± 0.42 EE (n = 5) (Fig. 1.7). La comparación mediante la prueba t de indicó una tendencia marginal, aunque no alcanzó el umbral convencional de significancia estadística (t = −2.41, gl = 5.37, p = 0.057).

El modelo final reveló efectos significativos del sexo y de la interacción sexo × edad sobre el índice H/L (n= 9, gl= 3, F = 8.22, p = 0.006) (Fig. 1.8). Específicamente, los machos adultos presentaron los valores de H/L más elevados, mientras que los machos juveniles tendieron a mostrar valores reducidos, similares a los observados en hembras de ambas edades.

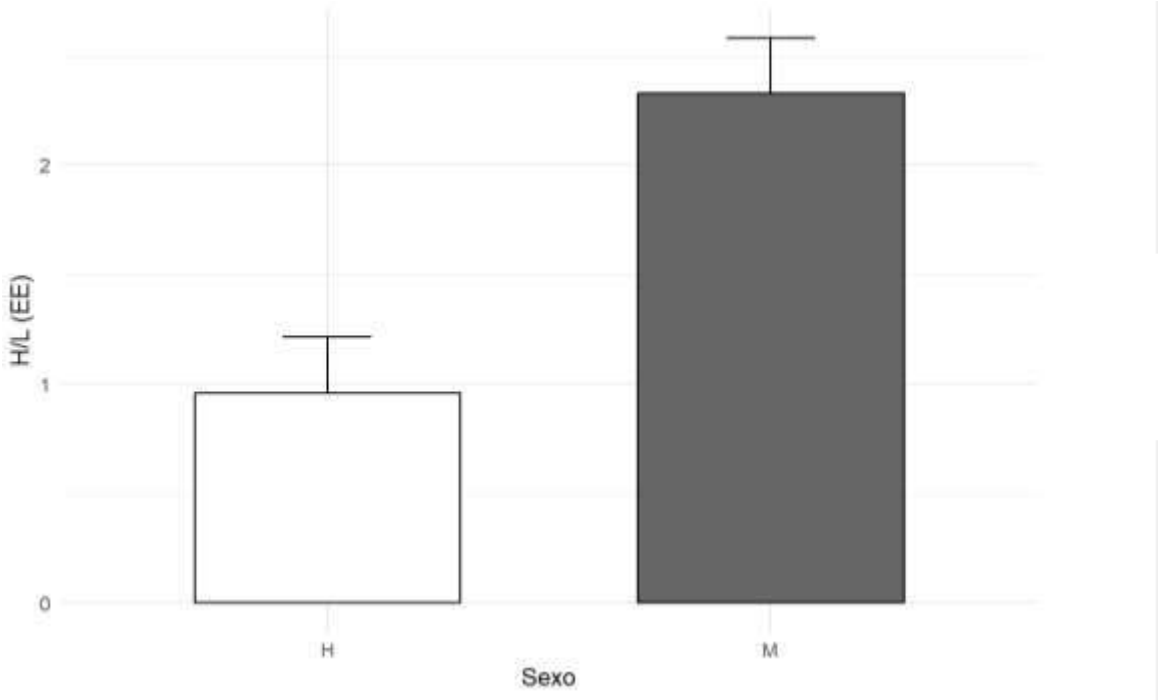


Figura 1.6. Relación del Índice H/L y sexo en la especie *Leiothlypis celata,* de sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México. El tamaño de muestra para la especie fue de 18 individuos (10 hembras y 8 machos) Las abreviaturas corresponden a Hembras (H) y machos (M)

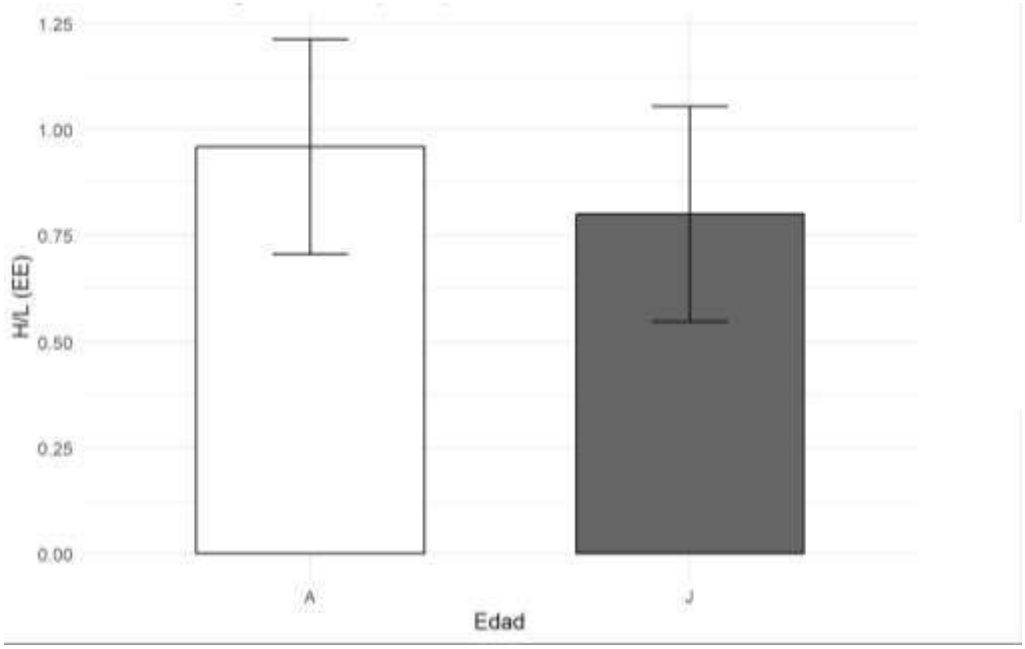


Figura 1.7. Relación del Índice H/L y Edad en la especie *Leiothlypis celata*, de sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México. El tamaño de muestra para la especie fue de 20 individuos (9 adultos y 11 juveniles) Las abreviaturas corresponden a adulto (A) y juvenil (J).

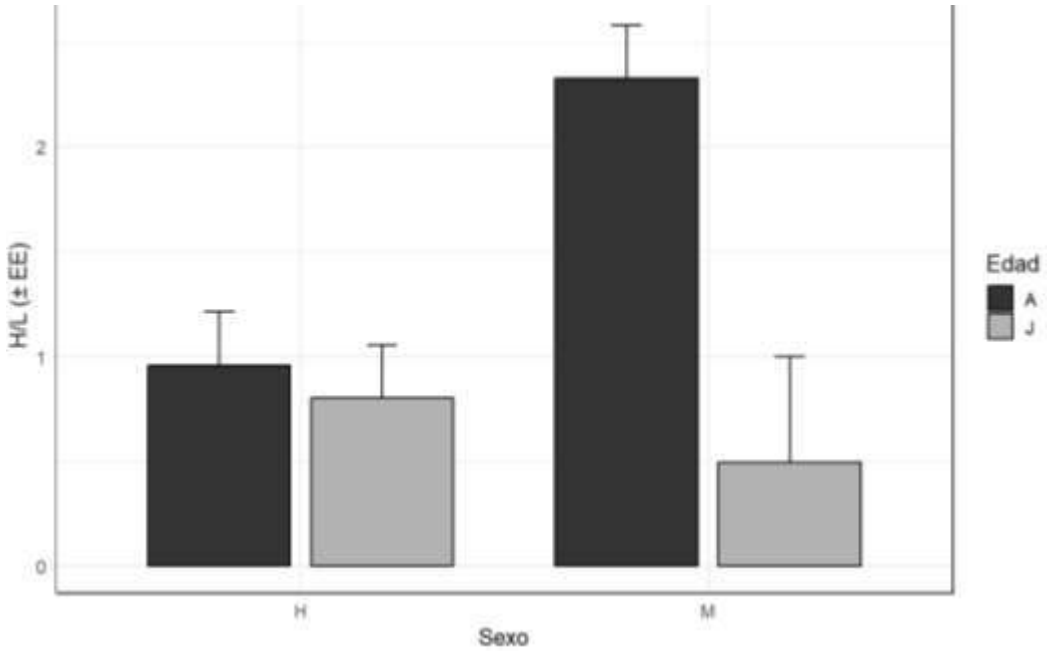


Figura 1.8. Relación del Índice H/L en la interacción de sexo y edad en la especie *Leiothlypis celata*, de sitios suburbanos y Bosque remante en el centro de México. El tamaño de muestra para el sexo fue de 18 individuos (10 hembras y 8 machos) mientras que de edad fueron 9 adultos y 11 juveniles.

Discusión

Perfiles leucocitarios

La estadística descriptiva y el análisis de varianza entre las especies mostraron la existencia de diferencias significativas entre las especies ($p < 0.05$), para los cinco tipos de leucocitos (heterófilos, linfocitos, eosinófilos, basófilos y monocitos), lo que sugiere una alta variabilidad interespecífica en las poblaciones leucocitarias. Esta variación puede estar influenciada por factores múltiples, incluyendo ecológicos, fisiológicos o incluso filogenéticos (Carbó-Ramírez y Zuria 2025; Minias, 2015; Ots et al., 1998). El análisis del perfil leucocitario de estas seis especies de las familias Parulidae y Passerellidae reveló patrones atípicos respecto a lo reportado en la literatura ornitológica. Tradicionalmente, en aves silvestres se observa que los heterófilos y linfocitos son los leucocitos más abundantes en circulación periférica, siendo considerados los componentes centrales del sistema inmunitario innato y adaptativo, respectivamente (Campbell, 1995; Davis et al., 2008; Vega-Huerta, 2012; López-Guillén, 2022; Villaseñor-Cortez, 2022). Sin embargo, en este estudio, se encontró que los basófilos fueron la población leucocitaria más abundante en la mayoría de las especies analizadas, lo cual representa un patrón novedoso. La elevada proporción de basófilos observada de forma consistente, es un hallazgo particularmente notable. De hecho, Falcone et al. (2001), Sullivan y Locksley (2009) y Karasuyama et al. (2011) reportan que hasta donde se conoce, son el tipo más raro de granulocitos presentes en el torrente sanguíneo (representando 0.5-1% de los leucocitos). Su función no se ha podido establecer con claridad por su rareza, así como por la falta de estudios (Rupley, 1997), pero están asociados principalmente con respuestas inflamatorias, hipersensibilidad y procesos alérgicos, además de tener un rol en la modulación de la respuesta inmune humoral, y con inmunidad protectora contra patógenos (particularmente en la defensa contra ectoparásitos y endoparásitos) (Karasuyama et al. 2009; Vinkler et al. 2010). No obstante, estudios recientes han comenzado a explorar también su posible vínculo con condiciones de estrés ambiental o inmunológico crónico (Grasman et al., 2000), aunque la evidencia aún es limitada. Para explorar esta posibilidad, se examinó la relación entre el porcentaje de basófilos y el índice heterófilo-linfocito (H/L), ampliamente reconocido como un biomarcador confiable de estrés fisiológico en aves (Gross y Siegel, 1983; Davis

et al., 2008). La correlación de Spearman reveló una tendencia positiva débil (r = 0.175) y no significativa (p = 0.1008), lo cual sugiere que, si bien podría existir una relación entre la elevación de basófilos y el estrés, no fue estadísticamente comprobable con este conjunto de datos. Sin embargo, López-Guillén (2022) encontró una correlación positiva entre basófilos y los valores del índice H/L en cuatro de cinco especies de colibríes que estudió, lo que concuerda con esta idea. Por otro lado, Carbó-Ramírez y Zuria (2025) reportan que en la tortolita cola larga y el gorrión doméstico registraron porcentajes más altos de basófilos en un área conservada con respecto a otra área mas infuenciada por la urbanización. Esta tendencia, es interesante desde un punto de vista biológico y merece ser explorada con un mayor tamaño de muestra o en estudios longitudinales que incluyan condiciones ambientales controladas.

Tomando en cuenta lo que se conoce hasta ahora, una posible explicación para la abundancia de basófilos podría estar relacionada con factores ambientales locales, como exposición a parásitos, contaminantes, o alérgenos presentes en los hábitats estudiados, los cuales pueden activar respuestas inmunológicas específicas no directamente reflejadas en el índice H/L. Alternativamente, también podría deberse a una variación natural entre especies o incluso a factores estacionales y reproductivos, los cuales no fueron controlados completamente en este estudio, pero que se sabe que influyen sobre la hematología aviar (Ots et al., 1998; Buehler et al., 2008).

En conjunto, estos resultados destacan la importancia de considerar todos los tipos celulares en la interpretación de perfiles hematológicos y no limitarse únicamente al índice H/L. La presencia dominante de basófilos altos en este estudio, ofrece una oportunidad para repensar la sensibilidad de los leucocitos menos estudiados como indicadores inmunológicos y su posible valor como biomarcadores alternativos o complementarios de estrés ambiental o inmunológico en aves silvestres.

H/L - familias

El análisis comparativo del índice H/L entre las familias Parulidae y Passerellidae reveló diferencias estadísticamente significativas, con valores más elevados en los Parulidae (media = 2.43) que en los Passerellidae (media = 1.39). Este resultado sugiere que las

especies de Parulidae presentaron mayores niveles de estrés fisiológico durante el periodo de muestreo. Una posible explicación de estas diferencias podría encontrarse en las particularidades ecológicas y comportamentales de cada familia. Los Parulidae (chipes) incluyen varias especies migratorias y con hábitos altamente activos en el dosel, lo que implica mayores demandas energéticas y posiblemente mayor exposición a perturbaciones ambientales, especialmente durante el invierno en hábitats alterados (Wingfield et al., 1997; Nebel et al., 2013). Estas condiciones pueden inducir una activación más frecuente o prolongada del eje HPA, elevando los niveles de glucocorticoides y, consecuentemente, del índice H/L (Romero y Wingfield, 2016). En contraste, los Passerellidae (gorriones) suelen mostrar comportamientos más generalistas, dietas variadas y mayor tolerancia a ambientes perturbados, lo cual podría manifestarse en un menor estrés ambiental (Bonier, 2012; Partecke et al., 2006).

Estos resultados coinciden con los hallazgos de Villaseñor-Gómez (2022), quien realizó un metaanálisis sobre la variabilidad del índice H/L en aves silvestres mexicanas donde se establecieron intervalos máximos de referencia "normales" para cada grupo taxonómico, encontrando que los valores máximos de referencia en Parulidae pueden superar 3.7 a nivel familiar y 5 a nivel específico, lo cual sitúa los valores obtenidos en este estudio dentro del rango esperado para dicha familia. En contraste, los valores medios obtenidos para Passerellidae se ubican por debajo de ese umbral, lo que respalda la interpretación de una menor carga de estrés fisiológico relativa en este grupo.

El uso de valores de referencia como los propuestos por Villaseñor-Gómez (2022) permite contextualizar de mejor manera los datos de campo y fortalece el valor comparativo del índice H/L como herramienta de monitoreo ecológico. Estos resultados subrayan la importancia de considerar la taxonomía como un factor determinante en las respuestas fisiológicas al estrés, y refuerzan la necesidad de estudios que integren ecología, comportamiento y fisiología comparada, para entender mejor la vulnerabilidad de distintas especies o grupos ante cambios ambientales. Ruiz- García (2017), reporta los valores del índice H/L en aves de tres familias (Fringillidae, Cardinalidae y Columbidae) y encontró que las aves de la familia Columbidae presentaron estrés muy alto o severo (índice H/L elevado), mientras que las especies de Fringillidae y Cardinalidae presentaron niveles de

estrés más bajo (índice H/L más bajo); las causas fueron desconocidas y destacó que se necesitan más estudios para comprender estos mecanismos y cómo se relacionan.

H/L status migratorio

En la comparación de índice H/L entre especies de diferente status migratorio (migratorias y residentes), se encontró una tendencia a diferir entre especies de distinta condición migratoria. En este estudio, las especies residentes presentaron valores promedio más altos de H/L en comparación con las migratorias, lo que sugiere que podrían estar expuestas a mayores niveles de estrés fisiológico ($p < 0.001$); el patrón es biológicamente relevante.

Diversos estudios han documentado que las aves residentes están expuestas de forma continua a presiones ambientales locales, como la actividad humana, la contaminación, la fragmentación del hábitat y las enfermedades endémicas y al permanecer de forma continua en un hábitat, están sujetas a presiones ambientales locales más prolongadas, como la competencia intraespecífica por recursos, exposición sostenida a perturbaciones antropogénicas o condiciones climáticas adversas y el comportamiento territorial (Partecke et al., 2006; Cyr y Romero, 2007), lo que puede inducir estrés crónico, una condición que se refleja directamente en el aumento del índice H/L (Davis et al., 2008). A diferencia de las migratorias que se mantienen temporalmente en una región, las residentes no tienen la opción de evadir estos factores durante el ciclo anual. Las aves migratorias si bien enfrentan desafíos energéticos importantes durante sus desplazamientos, pueden evitar ambientes estresantes al ocupar hábitats más favorables en distintas estaciones, aspectos de adecuación que biológicamente las pueden hacer más adaptables (Wingfield et al., 1997; Holberton et al., 2007).

La tendencia observada podría también estar relacionada con mecanismos fisiológicos adaptativos. Las aves migratorias suelen presentar una supresión del eje hipotalámico-Pituitaria -adrenal (HPA) durante la migración para minimizar los efectos inmunosupresores del cortisol y mantener funciones esenciales como la orientación y la termorregulación (Sapolsky et al., 2000; Landys et al., 2006); modulan su sistema inmune para evitar respuestas excesivas durante los periodos migratorios, lo cual previene un gasto energético elevado que podría interferir con el vuelo prolongado (Buehler et al., 2010;

Owen y Moore, 2006). Esta modulación puede resultar en niveles más bajos del índice H/L, incluso si han estado expuestas a eventos de estrés agudo durante la migración. Este mecanismo podría explicar sus menores niveles de H/L en comparación con las residentes.

Por otro lado, la época del muestreo también influye; ya que las aves residentes fueron muestreadas durante la temporada reproductiva y podrían haber estado sometidas a estrés fisiológico adicional derivado de la defensa del territorio o el cuidado parental, lo que incrementa la proporción H/L (Gross y Siegel, 1983; Müller et al., 2011). Finalmente, una mayor carga parasitaria local en aves residentes podría contribuir a una activación más del sistema inmune, reflejada (Lobato et al., 2005).

Si bien se requieren estudios con un mayor tamaño de muestra y control de variables ecológicas adicionales (por ejemplo, temporada de toma de muestra, dieta, carga parasitaria), nuestros resultados sugieren una posible diferencia funcional en la respuesta al estrés entre aves migratorias y residentes, con implicaciones relevantes para su ecología y conservación.

H/L Sitio

Los resultados obtenidos muestran que el índice H/L varía entre localidades de muestreo y entre especies, lo que sugiere una interacción compleja entre factores ambientales y características específicas de cada especie.

En *Setophaga coronata*, el índice H/L fue significativamente mayor en bosque remanente (Tlalpujahua) que en un ambiente urbano/suburbano (Morelia), lo que sugiere un nivel más elevado de estrés fisiológico en la primera localidad. Tlalpujahua es un área históricamente afectada por actividad minera, lo cual puede haber dejado residuos persistentes de metales pesados en el suelo y el agua (Espinosa-Reyes et al., 2010; Martínez-Haro et al., 2011; Lemus-Ramirez, 2016). Diversos estudios han demostrado que la exposición crónica a contaminantes metálicos puede alterar la homeostasis inmune y endocrina en aves silvestres, incrementando el índice H/L como respuesta al estrés ambiental (Rainio y Eeva, 2010; Grunst et al., 2018). Aunque Morelia es un sitio influenciado por la urbanización, sus condiciones pueden ofrecer ciertos beneficios

inmediatos a aves migratorias en tránsito, como refugios temporales o mayor disponibilidad de alimento en parques, comederos artificiales, o menor presión de depredadores (Seewagen y Slayton, 2008; Pacheco-Muñoz et al, 2022b) especialmente para especies generalistas como *Setophaga coronata*, que han demostrado cierta plasticidad en el uso del hábitat (Bonier et al., 2007; Pacheco-Muñoz et al ,2022a). Esto puede reducir temporalmente el estrés fisiológico y, por tanto, los niveles de corticosterona, lo que se traduce en un menor índice H/L.

En contraste, *Basileuterus rufifrons* mostró una tendencia opuesta: valores más altos del índice H/L en Morelia que, en Tlalpujahua, aunque no se observaron diferencias significativas. A pesar de que el muestreo en un parque urbano, con perturbaciones tales como ruido, presencia humana, fragmentación del hábitat y exposición a contaminantes atmosféricos, pueden generar estrés fisiológico crónico en aves (Partecke et al., 2006; Isaksson, 2015). Al ser B*asileuterus rufifrons* un chipe residente, está contantemente expuesto a estos efectos a diferencia de los individuos de Tlalpujahua. Sin embargo, la variabilidad individual y los posibles efectos de la habituación podrían haber contribuido a la ausencia de diferencias significativas.

Finalmente, en *Leiothlypis celata* no se observaron diferencias significativas entre localidades, lo que podría indicar una mayor tolerancia ambiental o una menor sensibilidad de esta especie a los factores de estrés locales. Este hallazgo concuerda con estudios que han reportado diferencias interespecíficas en la susceptibilidad al estrés ambiental, influenciadas por la ecología, historia natural y estrategias de vida de cada especie (Wingfield, 2003; Romero y Wingfield, 2016). El estudio de Lemus-Ramirez, (2016) tampoco encontró diferencias en esa especie entre un sitio contaminado y otro no contaminados en Tlalpujahua. En otro estudio en donde se compararon dos sitios hurbanos (uno conservado y otro mas perturbado) no hubo diferencias significativas del índice H/L entre el área urbana y el área conservada en individuos de tortolita cola larga, el saltapared cola larga, el gorrión doméstico, el pinzón mexicano y el rascador viejita, todos bastante adaptados a zonas urbanas (Carbó-Ramírez y Zuria, 2025). Estos resultados sugieren que *L. celata* podría tolerar o adaptarse bien tanto al medio urbano como al natural, mostrando una homeostasis inmunológica relativamente estable, una tolerancia fisiológica

generalizada en esta especie, posiblemente relacionada con su plasticidad ecológica y la inmunomodulación asociada a la migración (Buehler et al., 2010). Esto sería respaldado por un estudio de Bonier et al., (2007) quien probó la hipótesis de que los organismos ampliamente adaptados son más capaces de tolerar la urbanización y que aves urbanas tuvieron una tolerancia ambiental notablemente más amplia que sus congéneres rurales.

En conjunto, estos resultados resaltan la importancia de considerar tanto la historia ambiental del sitio como las características ecológicas de las especies al evaluar índices de estrés en aves silvestres. Además, sugieren el valor del índice H/L como herramienta sensible para detectar condiciones de estrés ambiental, relevantes para el monitoreo ecológico y la conservación

H/L Sexo y edad

El análisis del índice H/L en *Leiothlypis celata* reveló una diferencia significativa entre sexos, con valores más elevados en machos que en hembras, lo cual sugiere una mayor carga de estrés fisiológico en machos durante el periodo de muestreo. Este patrón coincide con evidencia previa que vincula ciertas conductas típicamente masculinas—como la vocalización, la defensa del espacio y otras actividades competitivas—con un incremento en los requerimientos energéticos y en la activación del eje HPA, resultando en un aumento de glucocorticoides y, por ende, del índice H/L (Wingfield et al., 1990; Romero y Wingfield, 2016). Asimismo, se ha documentado que los machos pueden experimentar mayor exposición a estresores ambientales y sociales, especialmente en contextos reproductivos o en escenarios de elevada competencia intraespecífica (Silverin, 1998; Deviche y Davies, 2014).

Sin embargo, estos mecanismos no suelen manifestarse con la misma intensidad en los sitios de invernación (como es el caso del presente estudio), donde las aves no se encuentran inmersas en actividades reproductivas ni en defensa activa de territorios. Este hecho sugiere que otros factores podrían estar modulando la respuesta fisiológica observada en los machos. Desde una perspectiva inmunológica, se ha propuesto que niveles elevados de testosterona pueden inducir inmunosupresión, favoreciendo un aumento en la proporción

de heterófilos circulantes frente a patógenos o condiciones de estrés sostenido, lo que contribuiría a elevar el índice H/L en machos respecto a hembras (Folstad y Karter, 1992).

La selección de modelos indicó que la variación del índice H/L en *Leiothlypis celata* se explicó principalmente por el efecto del sexo y por la interacción sexo × edad; este resultado revela que las diferencias fisiológicas entre sexos no son uniformes a lo largo de las clases de edad y que la respuesta hematológica se modula de manera diferencial en juveniles y adultos. La edad por sí sola no mostró un efecto significativo en el índice H/L. Este hallazgo coincide con lo reportado por Masello (2009), quien tampoco encontró variación en este biomarcador entre clases de edad en aves silvestres. No obstante, el efecto significativo de la interacción sexo × edad revela que la edad modula la respuesta fisiológica de los machos, pero no necesariamente la de las hembras. Específicamente, los machos adultos fueron el grupo con los valores de H/L más altos, lo que sugiere que la combinación de madurez fisiológica, presiones competitivas y posibles costos inmunológicos asociados a la producción hormonal puede acentuar su susceptibilidad al estrés.

Por el contrario, los machos juveniles mostraron valores de H/L considerablemente menores y similares a los de las hembras, lo que podría reflejar su menor involucramiento en actividades competitivas o territoriales durante la época no reproductiva. Dado que el muestreo se realizó en sitios de invernación, donde las aves no están sometidas a los fuertes costos derivados de la reproducción o la defensa activa de territorios, estos resultados sugieren que factores intrínsecos —más que presiones ecológicas directas— podrían estar determinando las diferencias detectadas entre clases de sexo y edad. Hay algunos estudios que sugieren que los juveniles no tienen aún un desarrollo inmunológico completo (Sapolsky et al., 2000; Buehler et al., 2008),

En conjunto, estos resultados enfatizan la relevancia de considerar variables individuales, como el sexo y su interacción con la edad, al interpretar biomarcadores hematológicos de estrés en poblaciones silvestres. No obstante, el tamaño reducido de la muestra limita la capacidad de generalización, por lo que futuros estudios con mayor

número de individuos y mediciones repetidas permitirán validar y refinar estos patrones fisiológicos.

H/L Condición corporal

La relación entre el índice H/L y la condición corporal, evaluada mediante el índice de masa escalado (IME), mostró una correlación negativa, lo que indica que en casos de una mejor condición corporal el estrés fisiológico puede ser menor en los individuos de las familias *Passerellidae* y *Parulidae* durante el periodo de estudio; el aumento en el estrés fisiológico se traduce en una reducción del estado de condición corporal debido a la movilización de reservas energéticas (Sapolsky et al., 2000; Romero, 2004) y esta relación puede estar modulada por múltiples factores ecológicos y fisiológicos. Estudios previos han documentado asociaciones entre estrés y masa corporal en aves silvestres, sugiriendo que la variabilidad individual, la etapa del ciclo de vida, la dieta, y el acceso a recursos pueden influir en la expresión de dicha relación (Bókony et al., 2009; Milenkaya et al., 2013).

Diversos estudios han encontrado esta misma relación negativa. Por ejemplo, Lindström et al. (2005) y Scheuerlein et al. (2001) demostraron que aves en mejor condición física mantienen niveles más bajos de indicadores fisiológicos de estrés, incluidos los heterófilos y la proporción H/L. De manera similar, Kilgas et al. (2006) documentaron que aves con reservas corporales elevadas muestran respuestas inmunes más robustas y menores indicadores de estrés.

En aves migratorias, como varias de las especies de Parulidae analizadas en este estudio, esta relación es particularmente relevante: individuos con mejor condición energética suelen estar menos estresados y pueden invertir más recursos en inmunocompetencia y reparación tisular (Owen y Moore., 2006; Buehler et al., 2008) Además, el índice H/L refleja predominantemente el estrés crónico que podrían afectar la masa corporal de forma más inmediata (Davis et al., 2008).

H/L entre especies

Cada uno de los factores anteriores influyen en las diferencias encontradas entre especies. El análisis del índice H/L entre especies reveló variaciones significativas. *Basileuterus rufifrons* presentó los valores más altos de H/L, significativamente superiores a los de *Setophaga coronata* y *Leiotlhypis celata,* resultados que indican que, aunque el índice H/L es útil como indicador general de estrés, su interpretación debe estar contextualizada a nivel específico. Las diferencias interespecíficas observadas probablemente reflejan la interacción de múltiples factores ecológicos y fisiológicos. Por ejemplo, la historia natural, la tolerancia al disturbio, las estrategias migratorias y reproductivas, así como el comportamiento territorial, pueden influir en la activación del eje HPA el cual regula la respuesta al estrés (Wingfield et al., 1997; Romero y Wingfield, 2016). Especies como *Basileuterus rufifrons*, que habitan en zonas perturbadas y presentan comportamientos activos de forrajeo en el sotobosque, pueden estar más expuestas a factores estresantes crónicos, mientras que especies como *Setophaga coronata* y *Leiotlhypis celata*, más generalistas y adaptables, podrían mostrar mayor resiliencia fisiológica (Bonier, 2012; Isaksson, 2015).

Conclusiones

- Los resultados obtenidos en este estudio revelan una complejidad significativa en la respuesta hematológica de las aves silvestres frente a factores ambientales, ecológicos y biológicos. Los perfiles leucocitarios evidenciaron variaciones sustanciales entre especies, lo que confirma la utilidad del H/L como biomarcador sensible de estrés fisiológico, aunque también subraya la necesidad de interpretarlo dentro del contexto específico de cada especie.
- El hallazgo de una alta proporción de basófilos en múltiples especies desafía las generalidades clásicas de la hematología aviar y sugiere la posibilidad de procesos inmunológicos distintos, posiblemente asociados a factores ambientales o parasitarios locales, que no se reflejan directamente en el índice H/L. Este patrón emergente merece una investigación más profunda.

- Los resultados evidencian diferencias fisiológicas relevantes entre las familias Parulidae y Passerellidae, con valores significativamente más altos de H/L en Parulidae, posiblemente relacionada con su comportamiento activo y su sensibilidad a ambientes perturbados. Esta variación coincide con diferencias ecológicas y comportamentales previamente documentadas, así como con los valores de referencia establecidos para ambas familias. En conjunto, los hallazgos refuerzan que la identidad taxonómica constituye un determinante clave en la respuesta al estrés en aves silvestres y subrayan la importancia de integrar enfoques comparativos para comprender la vulnerabilidad diferencial de las especies ante cambios ambientales.
- Los resultados sugieren que las especies residentes tienden a presentar un índice H/L más elevado que las migratorias, lo que indica una posible exposición diferencial a presiones ambientales crónicas asociadas a la permanencia anual en un mismo hábitat, el patrón es biológicamente consistente con mecanismos fisiológicos y ecológicos documentados para ambas estrategias de vida. Estos hallazgos apuntan a que el estatus migratorio podría influir en la carga de estrés de las aves, destacando la necesidad de estudios con mayor resolución temporal y muestreos más amplios para confirmar estas tendencias y comprender sus implicaciones en la ecología y conservación de las poblaciones aviares.
- Asimismo, se observaron diferencias importantes entre especies y localidades, particularmente en *Setophaga coronata* y *Basileuterus rufifrons*, lo que destaca la influencia del historial ambiental local —como contaminación por metales pesados o urbanización— sobre los niveles de estrés. *Setophaga coronata* mostró mayor estrés en el sitio históricamente contaminado, mientras que *Basileuterus rufifrons* presentó tendencia a niveles más altos en el entorno urbano. Por su parte, *Leiothlypis celata* mantuvo valores estables entre localidades, lo que sugiere una tolerancia ambiental más amplia. En conjunto, estos resultados corroboran la utilidad del índice H/L como un biomarcador sensible para evaluar el estrés ambiental en aves silvestres y subrayan la necesidad de considerar la historia natural y la ecología de cada especie al interpretar variaciones fisiológicas en contextos de conservación.

- La diferenciación por sexo en *Leiothlypis celata*, con machos mostrando mayores valores de H/L, refuerza la importancia de los factores individuales, como el comportamiento territorial o las hormonas sexuales, en la modulación de la respuesta fisiológica.
- La edad por si sola no parece ser tan importante, pero al analizar la relación de edad con sexo, la edad se vuelve relevante. Machos adultos muestran evidencia de mayor nivel de H/L que machos juveniles y hembras, los cuales probablemente se encuentran bajo menos presión ambiental.
- Los resultados sugieren que el IME es un indicador importante del estado fisiológico de las especies estudiadas, y que su relación con el índice H/L refleja patrones ampliamente descritos en aves silvestres: una mejor condición corporal confiere estabilidad fisiológica y reduce la respuesta hematológica al estrés.
- En conjunto, este trabajo proporciona evidencia de que la interpretación de biomarcadores hematológicos en aves silvestres debe considerar el contexto ecológico, taxonómico y biológico de cada especie. Además, subraya la importancia de establecer valores de referencia específicos como los propuestos por Villaseñor-Gómez (2022) para mejorar la precisión en la evaluación del estrés en poblaciones naturales. Los resultados aquí presentados refuerzan el valor del índice H/L y del perfil leucocitario completo como herramientas útiles para el monitoreo de salud ambiental y fisiológica en aves, con importantes implicaciones para la ecología de la conservación.

Anexos

Anexo 1.1. Modelos candidatos (GLM/GLMM) para explicar la variación del índice H/L en función de predictores biológicos y ambientales

Variables	Descripción de Modelos
Estatus de Residencia, Familia e IME	m0 =HL ~ 1 m1= HL ~ IME m2= HL ~ RESIDENCIA m3= HL ~ FAMILIA m4= HL ~ IME + RESIDENCIA m5= HL ~ IME + FAMILIA m6= HL ~ RESIDENCIA + FAMILIA m7= HL ~ IME + RESIDENCIA + FAMILIA
Sitio, Especie e IME	m0= HL ~ 1 m1= HL ~ IME m2= HL ~ SITIO m3= HL ~ ESPECIE m4= HL ~ IME + SITIO m5= HL ~ IME + ESPECIE m6= HL ~ SITIO + ESPECIE m7= HL ~ IME + SITIO + ESPECIE
Sexo, Edad e IME	m0= HL ~ 1 m1 = HL ~ SEXO m2 = HL ~ EDAD m3 = SEXO + EDAD m4 = HL ~ SEXO * EDAD m5 <- HL ~ SEXO + IME m6 <- HL ~ SEXO * EDAD + IME m7 <- HL ~ IME

Nota: Se presentan los modelos candidatos evaluados para identificar los predictores con mayor soporte empírico en la explicación del índice heterófilos/linfocitos (H/L). Los modelos se agruparon por hipótesis: (1) estatus de residencia, familia e IME; (2) sitio (LUGAR), especie e IME; y (3) sexo, edad e IME. En todos los conjuntos, m0 corresponde al modelo nulo y los demás modelos incluyen combinaciones aditivas de predictores; el término SEXO × EDAD representa una interacción. La selección del modelo se realizó con base en AICc (y, cuando aplica, pesos de Akaike), considerando como mejor modelo el de menor AICc.

Anexo 1.2. Selección de modelos (AICc) y pesos de Akaike para el índice H/L: subconjunto de modelos competitivos (ΔAICc < 2)

VARIABLES IND	Modelo que mejor explica la variacion	*DESCRIPCION MODELO*		Estimate	Std. Error	gl	t value	Pr(>|t|)
Estatus de Residencia, Familia e IME	**m6=HL ~ RESIDENCIA + FAMILIA**	**M6**	(Intercept)	1.762	0.2389	92	7.374	9.57e-11 ***
			Residente	1.6074	0.3645	92	4.41	2.98e-05 ***
			Passerellidae	-1.55	0.3771	92	-4.11	9.01e-05 ***
	m7=HL ~ IME + RESIDENCIA + FAMILIA	m7	(Intercept)	2.6152	1.7985	92	1.454	0.1496
			IME	-0.3761	0.7857	92	-0.479	0.633
			Residente	1.6393	0.3722	92	4.405	3.07e-05 **
			Passerellidae	-1.3234	0.6062	92	-2.183	0.0318 *
Sitio, Especie e IME	**m3=HL ~ ESPECIE**	**m3**	(Intercept)	3.4668	0.3798	58	9.128	1.85e-12 ***
			Le.ce	-2.1726	0.53	58	-4.099	0.000143 ***
			Se.co	-1.3292	0.53	58	-2.508	0.015247 *
	m6=HL ~ LUGAR + ESPECIE	m6	(Intercept)	3.2677	0.4506	58	7.252	1.96e-09 ***
			Tlapujahua	0.3584	0.4332	58	0.827	0.41188
			Le.ce	-2.1432	0.5328	58	-4.023	0.000187 ***
			Se.co	-1.2998	0.5328	58	-2.44	0.018146 *
	m5=HL ~ IME + ESPECIE	**m5**	(Intercept)	5.5143	2.8636	58	1.926	0.059627
			IME	-0.8832	1.2243	58	-0.721	0.473873
			Le.ce	-2.3536	0.5886	58	-3.999	0.000202 ***
			Se.co	-1.2063	0.559	58	-2.158	0.035562 *
Sexo y Edad		m4	(Intercept)	0.9588	0.2533	18	3.785	0.00432 **
			Machos	1.3681	0.3583	18	3.819	0.00410 **
			Juveniles	**-0.1589**	0.3583	18	-0.443	0.66795
	m4=HL ~ Sexo * Edad		SexoM:EdadJ	-1.6739	0.6703	18	-2.497	0.03401 *
		m1	(Intercept)	0.8794	0.2395	18	3.672	0.00368 **
	m1=HL ~ Sexo		SexoM	1.081	0.3862	18	2.799	0.01731 *
		m3	(Intercept)	1.1979	0.2895	18	4.138	0.00202 **
	m3=HL ~ Sexo + Edad		SexoM	0.8898	0.3738	18	2.381	0.03857 *
			EdadJ	-0.6371	0.3738	18	-1.705	0.11909

Nota: Se muestran únicamente los modelos competitivos (ΔAICc < 2) dentro de cada conjunto de predictores evaluado. Se presentan las estimaciones de los efectos fijos (Estimate), su error estándar (EE), los grados de libertad (gl), el estadístico t y el valor de p (Pr(>|t|)). Valores positivos de los efectos fijos indican aumento y negativos disminución de la variable respuesta. Las categorías de referencia: RESIDENCIA = Migratorio y FAMILIA = Parulidae.

Literatura citada

Abbas, A. K., Lichtman, A. H. y Pillai, S. (2024). Inmunología básica: funciones y trastornos del sistema inmunitario. Elsevier Health Sciences.

Aengwanich, W., Tanomtong, A., Pattanarungson, R. y Simaraks, S. (2002). Blood cell characteristic, hematological and serum biochemistry values of Painted stork (*Mycteria leucocephala*). *Journal of Science and Technology* 24, 473-479.

Albert, S., Wolfe, J. D., Kellerman, J., Sherry, T., Stutchbury, B. J. M., Bayly, N. J., y Ruiz-Sánchez, A. (2020). Habitat ecology of Nearctic–Neotropical migratory landbirds on the nonbreeding grounds. Condor 122:duaa055. doi:10.1093/condor/duaa055

Alejandre-Espinoza, U. (2019). Perfil leucocitario, prevalencia y abundancia de hemoparasitos en *Leiothlypis celata* y *L. ruficapilla* (Aves: Parulidae) en diferentes localidades geográficas de invernación en México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. 32 pp.

Al-Murrani, W.K., Al-Rawi, I.K. y Raof, N.M. (2002) Genetic resistance to *Salmonella typhimurium* in two lines of chickens selected as resistant and sensitive on the basis of heterophil/lymphocyte ratio. *British Poultry Science* 43, 501–507.

Álvarez-Mena, I. (2010). Perfil hematológico y hemoparásitos de una población residente del Verdugo Americano (*Lanius ludovicianus*, Lannidae: Aves) en Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Arriero, E., Moreno, J., Merino, S. y Martínez, J. (2008). Habitat effects on physiological stress response in nestling Blue Tits are mediated through parasitism. *Physiological and Biochemical Zoology*, 81(2), 195-203. https://doi.org/10.1086/524393

Artacho, P., Soto-Gamboa, M., Verdugo, C. y Nespolo, R.F. (2007). Using haematological parameters to infer the health and nutritional status of an endangered Black-necked swan population. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology* 147(4), 1060-1066. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2007.03.017

Averbeck, C. (1992). Haematology and blood chemistry of healthy and clinically abnormal Great black-backed gulls (*Larus marinus*) and herring gulls (*Larus argentatus*). *Avian Pathology* 21(2), 215-223. https://doi.org/10.1080/03079459208418837

Ayuntamiento de Morelia. (2025). Cerro del Punhuato. Medio Ambiente. https://www.morelia.gob.mx/cerro-el-punhuato/

Banbura, J., Skwarska, J., Banbura, M., Gladalski, M., Holysz, M., Kalinski, A., Markowski, M., Wawrzyniak, J. y Zielinski, P. (2013). Spatial and temporal variation in Heterophil-to Lymphocyte ratios of nestling passerine birds: comparison of Blue Tits and Great Tits. *PLoS ONE* 8,1-8.

Bartoń, K. (2025). model.sel: model selection table. MuMIn (version 1.48.11). Consultado en noviembre 2025. https://www.rdocumentation.org/packages/MuMIn/versions/1.48.11/topics/model.sel

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., y Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. Journal of Statistical Software, 67(1), 1–48.https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01

Bayly, N. J., Rosenberg, K. V., Easton, W. E., Gomez, C., Carlisle, J., Ewert, D. N., Drake, A., y Goodrich, L. (2018). Major stopover regions and migratory bottlenecks for Nearctic-Neotropical landbirds within the Neotropics: a review. *Bird Conservation International*, *28*(1), 1-26.

Bobby-Fokidis, H., Greiner, E.C. y Deviche, P. (2008). Interspecific variation in avian blood parasites and haematology associated with urbanization in a desert habitat. *Journal of Avian Biology* 39(3), 300-310. https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2008.04248.x

Bókony, V., Lendvai, Á. Z., Liker, A., Angelier, F., Wingfield, J. C., y Chastel, O. (2009). Stress response and the value of reproduction: are birds prudent parents? The American Naturalist, 173(5), 589–598.

Bonier, F. (2012). Hormones in the city: endocrine ecology of urban birds. Hormones and Behavior, 61(5), 763–772.https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2012.03.016

Bonier, F., Martin, P. R., y Wingfield, J. C. (2007). Urban birds have broader environmental tolerance. Biology Letters, 3(6), 670–673. https://doi.org/10.1098/rsbl.2007.0349

Bortolotti, G.R., Dawson, R.D. y Murza, G.L. (2002). Stress during feather development predicts fitness potential. *Journal of Animal Ecology* 71(2), 333-342. https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2002.00602.x

Buehler, D. M., Tieleman, B. I., y Piersma, T. (2008). Captive and free-living red knots *Calidris canutus* exhibit differences in their metabolic responses to temperature. Journal of Experimental Biology, 211(6), 1051–1058.

Buehler, D.M., Tieleman, B.I. y Piersma, T. (2010). Indices of immune function are lower in Red Knots (*Calidris canutus*) recovering protein than in those storing fat during stopover in Delaware Bay. *The Auk* 127(2), 394-401.

Burnham, K. P., y Anderson, D. R. (2002). *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach* (2nd ed.). Springer.

Busch, D.S. y Hayward, L.S. (2009). Stress in a conservation context: A discussion of glucocorticoid actions and how levels change with conservation-relevant variables. *Biological Conservation* 142(12), 2844-2853. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.08.013

Campbell, T.W. (1995). Avian Hematology and Cytology. Iowa State University Press. Ames, Iowa.

Campo, J. L., y Dávila, S. G. (2002). Influence of mating ratio and group size on indicators of fearfulness and stress of broiler chickens. Poultry Science, 81(8), 1099–1103.

Canales-del-Castillo, R., Pérez-Rangel, C., Ruvalcaba-Ortega, I., González-Rojas, J.I. y Guzmán-Velasco, A. (2018). Prevalencia parasitaria en el gorrión altiplanero (*Spizella wortheni*): especie endémica de México y en peligro de extinción. Huitzil 19(1), 79-84.

Canfield, P.J. (1998). Comparative cell morphology in peripherial blood film exotic and native animals. *Australian Veterinary Journal* 76:793-800.

Carbó-Ramírez, P., y Zuria, I. (2025). Leucocyte profile and H/L ratio of birds between contrasting urban green spaces with emphasis in five common resident urban birds in Mexico. Animal Biodiversity and Conservation, 48(1), e0006-e0006.

Ceja-Madrigal, A. (2017). Determinación de la presencia de compuestos potencialmente tóxicos y su relación con el desempeño fisiológico en el Cernícalo americano (*Falco sparverius*) en agroecosistemas del Bajío Michoacano. Tesis de Maestría. Facultad de

Biología. Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Chace, J. F., y Walsh, J. J. (2006). Urban effects on native avifauna: A review. *Landscape and Urban Planning, 74*(1), 46–69. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.08.007

Clark, P. (2015). Observed variation in the heterophil to lymphocyte ratio values of birds undergoing investigation of health status. *Comparative Clinical Pathology* 24(5), 1151-1157.

Climate-Data.org. (s. f.). *Clima Morelia (Michoacán)*. https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/michoacan-de-ocampo/morelia-3382/

Cockrem, J.F., y Silverin, B. (2002). Variation within and between Birds in Corticosterone Responses of Great Tits (*Parus major*). General and Comparative Endocrinology 125(2), 197-206. https://doi.org/10.1006/gcen.2001.7750

Collette, J.C., Millam, J.R., Klasing, K.C., y Wakenell, P.S. (2000). Neonatal handling of Amazon parrots alters the stress response and immune function. *Applied Animal Behaviour Science* 66(4), 335-349. https://doi.org/10.1016/S0168-1591(99)00098-2

CONAGUA. (2024). Tlalpujahua, Michoacán. Comisión Nacional del Agua. Consultado el 17 de diciembre de 2024. disponible en http://app.conagua.gob.mx/TituloRepda.aspx?Id=4MCH104110/12HOGE95%7C0%7C1%7CS.

Corona-Chávez, P. y Uribe-Salas, J.A. (2009). Atlas Cartográfico del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gobierno del Estado de Michoacán, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Morelia, Michoacán.

Corona-Chávez, P., Uribe-Salas, J. A., Razo-Perez, N., Martínez-Medina, M., Maldonado-Villanueva, R., Ramos-Arroyo, Y. R. y Robles-Camacho, J. (2010). The impact of mining in the regional ecosystem: The Mining District of El Oro and Tlalpujahua, México.De Re Metalica 15:21-34.

Cyr, N. E., y Romero, L. M. (2007). Chronic stress in free-living European starlings reduces corticosterone concentrations and reproductive success. *General and Comparative Endocrinology*, 151(1), 82–89.

D'Amico, V.L. (2011). Conteos leucocitarios en el playero rojizo (*Calidris canutus rufa*) en Patagonia, Argentina. *Hornero* 26(2), 73-77.

Davis, A.K. (2005). Effect of handling time and repeated sampling on avian white blood cell counts. *Journal of Field Ornithology* 76(4), 334-338. https://doi.org/10.1648/0273-8570-76.4.334

Davis, A.K. y Maerz, J.C. (2008a) Sex-related differences in hematological stress indices of breeding, paedomorphic mole salamanders. *Journal of Herpetology*, 42, 197–201.

Davis, A.K. y Maerz, J.C. (2008b) Comparison of hematological stress indicators in recently captured and captive paedomorphic mole salamanders, *Ambystoma talpoideum*. Copeia 2008, 613–617.

Davis, A.K., Cook, K.C., y Altizer, S. (2004). Leukocyte profiles in wild House finches with and without mycoplasmal conjunctivitis, a recently emerged bacterial disease. *EcoHealth* 1(4), 362-373. https://doi.org/10.1007/s10393-004-0134-2

Davis, A.K., Maney, D.L., y Maerz, J.C. (2008). The use of leukocyte profiles to measure stress in vertebrates: A review for ecologists. *Functional Ecology* 22(5), 760-772. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01467.x

De Jong, I.C., Voorst, S.V., Ehlhardt, D.A. y Blokhuis, H.J. (2002). Effects of restricted feeding on physiological stress parameters in growing broiler breeders. *British Poultry Science* 43(2), 157-168. https://doi.org/10.1080/00071660120121355

Deviche, P., y Davies, S. (2014). Reproductive phenology of urban birds: environmental cues and mechanisms. In Avian Urban Ecology (pp. 98–115). Oxford University Press.

Dhabhar, F.S. (2002). A hassle a day may keep the doctor away: stress and the augmentation of immune function. *Integrative and Comparative Biology* 42(3), 556-564. https://doi.org/10.1093/icb/42.3.556

Dhabhar, F.S. y McEwen, B.S. (1997). Acute stress enhances while chronic stress suppresses cell-mediated immunity in vivo: a potential role for leukocyte trafficking. *Brain, Behavior, and Immunity* 11(4), 286-306. https://doi.org/10.1006/brbi.1997.0508

Dhabhar, F.S., Miller, A.H., McEwen, B.S. y Spencer, R.L. (1995). Effects of stress on immune cell distribution. Dynamics and hormonal mechanisms. *The Journal of Immunology* 154(10), 5511-5527.

Dolka, B., Włodarczyk, R., Żbikowski, A., Dolka, I., Szeleszczuk, P. y Kluciński, W. (2014). Hematological parameters in relation to age, sex and biochemical values for mute swans (*Cygnus olor*). *Veterinary Research Communications* 38(2), 93-100. https://doi.org/10.1007/s11259-014-9589-y

Encino-Ruiz, L., Lindig-Cisneros, R.-, Gómez-Romero, M. y Blanco-García, A. (2013). Desempeño de tres especies arbóreas del bosque tropical caducifolio en un ensayo de restauración ecológica. *Botanical Science* 91(1): 107-114.

Espín, T., Martínez-López, E., León-Ortega, M., Calvo, J.F., y García-Fernandez, A.J. (2014). Factors that influence mercury concentrations in nestling Eagles Owls (*Bubo bubo*). *Sci.Total Environ* 470-471:1132-1139.

Espinosa-Reyes, G., Ilizaliturri-Hernández, C. A., González-Mille, D. J., Costilla-Salazar, R., Díaz-Barriga, F., y Mejía-Saavedra, J. J. (2010). Environmental exposure and risk assessment of heavy metals in a mining zone of San Luis Potosí, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment, 163*(1–4), 381–391. https://doi.org/10.1007/s10661-009-0943-1

Ewenson, E., Zann, R. y Flannery, G. (2001). Body condition and immune response in wild zebra finches: Effects of capture, confinement and captive-rearing. *Naturwissenschaften* 88(9), 391-394. https://doi.org/10.1007/s001140100250

Falcone, F. H., D. I. Pritchard y B. F. Gibbs. 2001. Do basophils play a role in immunity against parasites? *Trends in Parasitology* 17(3): 126-129.

Figuerola, J., Muñoz, E., Gutiérrez, R. y Ferrer, D. (1999). Blood parasites, leucocytes and plumage brightness in the Cirl Bunting, *Emberiza cirlus*: Male health and plumage brightness. *Functional Ecology* 13(5), 594-601. https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00354.x

Folstad, I., y Karter, A. J. (1992). Parasites, bright males, and the immunocompetence handicap. *The American Naturalist,* 139(3), 603–622. https://doi.org/10.1086/285346

García, E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana [Tesis o informe no publicado]. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana (3ª ed.). Offset Larios, México, D.F.

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM.

García-Trejo, E. A. y Navarro-Sigüenza, A. G. (2004). Patrones biogeográficos de la riqueza de especies y el endemismo de la avifauna en el oeste de México. Acta Zoológica Mexicana (n.s.) 20(2), 167-185.

Geffré, A., Concordet, D., Braun, J.P y Trumel C. (2011). Reference Value Advisor: a new freeware set of macroinstructions to calculate reference intervals with Microsoft Excel. Vet Clin Pathol. 40(1), 107-12. doi: 10.1111/j.1939-165X.2011.00287.x. Epub 2011 Feb 7. PMID: 21366659.

Gobierno del Estado de Michoacán. (s. f.). *Parque Zoológico Benito Juárez*. Secretaría de Turismo del Estado de Michoacán. https://zoomorelia.michoacan.gob.mx

Gómez-Romero, M., Blanco-García, A., Aureoles-Celso, E., Marín-Togo, M.C. y Lindig-Cisneros, R. (2008). Programa de manejo del Área Natural Protegida "Cerro Punhuato". Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente. Morelia, Michoacán, México. 98 pp.

Grasman, K. A., Fox, G. A., Scanlon, P. F., y Ludwig, J. P. (2000). Organochlorine-associated immunosuppression in prefledgling Caspian terns and herring gulls from the Great Lakes: an ecoepidemiological study. Environmental Health Perspectives, 108(9), 829–839.

Gross, W.B. y Siegel, H.S. (1983). Evaluation of the Heterophil/Lymphocyte Ratio as a Measure of Stress in Chickens. Avian Diseases 27(4), 972-979. https://doi.org/10.2307/1590198

Grunst, A., M. L. Grunst, B. Thys, T. Raap, N. Daem, R. Pinxten, y M. Eens. (2018). Variation in personality traits across a metal pollution gradient in a free-living

songbird. Science of the Total Environment, 630, 668–678. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.19

Harmon, B.G. (1998). Avian heterophils in inflammation and disease resistance. Poultry Science 77:972-977.

Hauptmanova, K., Literak, I. y Bartova, E. (2002). Haematology and leucocytozoonosis of great tits (*Parus major* L.) during winter. *Acta Veterinaria Brno* 71(2), 199-204.

Hawkey, C.M. y Dennett, T.M. (1989). Atlas de Hematología Veterinaria Comparada. Grass. Capítulo 2, Granulocitos normales y anormales. Barcelona. España.

Herrera-Haro, J.G., Ruiz-Sesma, B., Ortega-Cerrilla, M., Cuca-García, J.M., Campo-Chavarrí, J.L., Rojas-Martínez, R.I. y Lemus-Flores, C. (2017). Evaluación de indicadores de bienestar animal en guajolote mixto autóctono (*M. gallopavo*) en confinamiento y libertad en Villaflores Chiapas, México. *Agrociencia 51*(8), 833-847.

Herring, G., Cook, M.I., Gawlik, D.E. y Call, E.M. (2011). Food availability is expressed through physiological stress indicators in nestling white ibis: A food supplementation experiment. *Functional Ecology* 25(3), 682-690. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01792.x

Holberton, R. L., Boswell, T., Hunter, M. J., y Wingfield, J. C. (2007). Temporal and spatial variation in stress response and its relationship to migration in the Northern wheatear (*Oenanthe oenanthe*). *Journal of Ornithology*, 148(2), 313–319.

Holmes, R. T. (2007). Understanding population change in migratory songbirds: long-term and experimental studies of Neotropical migrants in breeding and wintering areas: population change in migratory songbirds. Ibis 149, 2–13. doi: 10.1111/j.1474-919X.2007.00685.x

Howell, S.N.G. y Webb, S. (1995). A Guide to the Birds of Mexico and Northern Central America. Oxford University Press, New York, 851 pp.

Ilmonen, P., Hasselquist, D., Langefors, A. y Wiehn, J. (2003). Stress, immunocompetence and leukocyte profiles of Pied flycatchers in relation to brood size manipulation. *Oecologia* 136(1), 148-154. https://doi.org/10.1007/s00442-003-1243-2

INEGI (2009). Tlalpujahua, Michoacán de Ocampo. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Consultado el de junio de 20. Disponible

en:http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/16/16093.pdf

INEGI (1985). Carta geológica de Morelia E14-6, escala 1:250,000 [Mapa]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463913009.pdf [Consulta: 11 de junio de 2025]

INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx

INEGI (2024). Tlalpujahua, Michoacán de Ocampo. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consultado el 17 de diciembre de 2024. Disponible en http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/16/16093.pdf

Isaksson, C. (2015). Urbanization, oxidative stress and inflammation: a question of evolving, acclimatizing or coping with urban environmental stress. *Functional Ecology*, 29(7), 913–923.

Jakubas, D., Wojczulanis-Jakubas, J. y Kośmicka, A. (2015). Factors affecting leucocyte profiles in the little auk, a small Arctic seabird. *Journal of Ornithology* 156(1), 101-111.

Jiménez-Chávez, A.S. (2022). Genotoxicidad en el gorrión chapulinero (*Ammodramus savannarum*) y el gorrión de baird (*Centronyx bairdii*), en Cuchillas de la Zarca, Durango. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Durango.

Karasuyama, H., Mukai, K., Tsujimura y K Obata. (2009). Newly-discovered roles for basophils: a neglected minority gains new respect. Nature Reviews Immunology 9(1): 9-13.

Karasuyama, H., T. Wada, S. Yoshikawa y K. Obata. (2011). Emerging roles of basophils in protective immunity against parasites. Trends in Immunology 32(3): 125-130.

Kilgas, P., Tilgar, V. y Mand, R. (2006) Hematological health state indices predict local survival in a small passerine bird, the great tit (*Parus major*). *Physiological and Biochemical Zoology* 79, 565–572.

La Sorte, F. A., Fink, D., Hochachka, W. M., y Kelling, S. (2016). Convergence of broad-scale migration strategies in terrestrial birds. Proc. R. Soc. B: Biol. Sci. 283:20152588. doi: 10.1098/rspb.2015.2588

Landys, M. M., Ramenofsky, M., y Wingfield, J. C. (2006). Actions of glucocorticoids at a seasonal baseline as compared to stress-related levels in the regulation of periodic life processes. *General and Comparative Endocrinology*, 148(2), 132–149.

Latimer, K.S. y Bienzle, D. (2010). Determination and interpretation of the avian leukogram. Pp. 158-357. En: Veterinary Hematology. D. J. Weiss y K. J. Wardrop (Eds.). Wiley-Blackwell, Iowa, USA.

Leal-Ávila, A. (2010). Hemoparásitos, perfiles leucocitarios y presencia de metales pesados en la Mascarita Transvolcánica *Geothlypis speciosa* (Aves: Parulidae) en los lagos de Cuitzeo y Pátzcuaro (Michoacán) y Ciénegas del Lerma (Estado de México). Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Lemus-Ramírez, K.I. (2016). Efecto remanente de la industria minera en comunidades de aves del bosque templado del Estado de Michoacán, México. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Lemyre, L., y Tessier, R. (2003). Measuring psychological stress. Concept, model and measurement instrument in primary care research. *Can Fam Physician* 49, 1159-1160.

Lindström, J., Visser, G. H., Daan, S., Everts, H., y Mirjam, R. (2005). Stress responses and condition in wild birds. *Proceedings of the Royal Society B*, 272, 1959–1964.

Lobato, E., Moreno, J., Merino, S., Sanz, J.J., y Arriero, E. (2005). Haematological variables are good predictors of recruitment in nestling pied flycatchers (*Ficedula hypoleuca*). *Ecoscience*, 12(1), 27-34. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01035.x

López-Guillén, C. (2022). Índices fisiológicos y hemoparásitos en colibríes de bosque de altura de Tlalpujahua, Michoacan, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán

Losdat, S., Arcese, P., Sampson, L., Villar, N., y Reid, J.M. (2016). Additive genetic variance and effects of inbreeding, sex and age on heterophil to lymphocyte ratio in song sparrows. *Functional Ecology* 30(7), 1185-1195.

Lüdecke D (2018). ggeffects: Tidy Data Frames of Marginal Effects from Regression Models. Journal of Open Source Software, 3(26), 772. doi: 10.21105/joss.00772

Male, D., Peebles, R.S. Jr., y Male, V. (2021). Inmunología. 9na edición. *Elsevier*.

Martínez-Haro, M., Taggart, M. A., y Green, A. J. (2011). Risk assessment of lead poisoning in waterbirds in Spain: Exposure, effects and management implications. *Environment International*, 37(1), 62–70.

Martínez-Quintanilla, M.C., Torres-Bugarín, O., Martínez-Guerrero, J.H., Delgado-León, T.G., Salas Pacheco, J.M. y Pereda-Solís, M.E. (2017). Relación Heterófilo/Linfocito, frecuencia espontánea de eritrocitos micronucleados y prolongaciones nucleares en el ganso nevado (*Chen caerulescens*): una propuesta como posible biomonitor de estrés y genotóxicos ambientales. *Huitzil* 18(1): 102-111.

Martínez-Tapia, C. (2010). Estrés ambiental y parasitismo en aves de ambientes riparios del noroeste de México: su influencia en los perfiles leucociticos del gorrión de Lincoln (*Melospiza lincolnii*). Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Masello, J.F., Choconi, R.G., Helmer, M., Kremberg, T., Lubjuhn, T., y Quillfeldt, P. (2009). Do leucocytes reflect condition in nestling burrowing parrots *Cyanoliseus patagonus* in the wild? *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology* 152(2), 176-181. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2008.09.018

Maxwell, M.H. (1993). Avian blood leukocyte responses to stress. World's Poultry Science Journal 49(1), 34–43.

Mazerolle, D.F. y Hobson, K.A. (2002). Physiological ramifications of habitat selection in territorial male ovenbirds: consequences of landscape fragmentation. *Oecologia* 130(3), 356-363. https://doi.org/10.1007/s00442-001-0818-z

McDonnell, M. J., & Hahs, A. K. (2015). Adaptation and adaptedness of organisms to urban environments. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 46*, 261–280. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054258

McEwen, B.S. (2000). Allostasis and allostatic load: implications for neuropsychopharmacology. *Neuropsychopharmacology* 22(2), 108-124. https://doi.org/10.1016/S0893-133X(99)00129-3

McEwen, B.S. (2004). Protection and damage from acute and chronic stress: allostasis and allostatic overload and relevance to the pathophysiology of psychiatric disorders. *Annals of the New York Academy of Sciences,* 1032(1), 1-7. https://doi.org/10.1196/annals.1314.001

Mejía-Castillo, A.de J. (2011). Estrés ambiental e impacto de los factores ambientales en la escuela. *Pampedia* (Xalapa, Ver.), 7, 3-18.

Menéndez-Blázquez, J., Soto, F., Negrete, J., Colominas-Ciuró, R., Marín-Sierra, A., Ricca, M. y Barbosa, A. (2021). Leukocyte counts in blood smears of Antarctic seals and penguins: a new less time-consuming method. *Polar Biology* 44(11), 2195-2198.

Mijares-Villarreal, L.D., Canales, C.R., Ham-Dueñas, J.G. y Ruvalcaba, O.I. (2021). Variación en el estatus de infección, diversidad genética de hemosporidios y condición fisiológica en el colorín sietecolores (*Passerina ciris*), en distintas etapas de su ciclo anual. En: Libro de resúmenes XVIII Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México (CECAM XVIII). Pachuca, Hidalgo. https://mexorn.org/index.php/huitzil/article/view/718/759

Milenkaya, O., Weinstein, N., Legge, S., y Walters, J.R. (2013). Variation in body condition indices of crimson finches by sex, breeding stage, age, time of day, and year. Conserv Physiol. 2013 Jul 16;1(1): cot020. doi: 10.1093/conphys/cot020. PMID: 27293604; PMCID: PMC4806621.

Minias, P. (2015). The use of haemoglobin concentrations to assess physiological condition in birds: a review. *Conservation physiology*, 3(1), cov007.

Mitchell, E.B. y Johns, J. (2008). Avian hematology and related disorders. *Vet Clin Exot Anim* 11, 501-522.

Moberg, G.P. y Mench, J.A. (Eds.). (2000). The biology of animal stress: Basic principles and implications for animal welfare. CABI Pub.

Moreno, J., S. Merino, J. Martinez, J.J. Sanz y E. Arriero. (2002). Heterophil/lymphocyte ratios and heat-shock protein levels are related to growth in birds. Ecoscience 9: 434–439

Moreno-Palacios, M. C., Sánchez-Guzmán, J. N., y Losada-Prado, S. (2018). Análisis de la condición corporal de aves Passeriformes en zonas secas del norte del Alto Valle del Magdalena, Colombia. Caldasia, 40(1), 1–17. https://doi.org/10.15446/caldasia.v40n1.60284

Müller, C., Jenni-Eiermann, S., y Jenni, L. (2011). Effects of a short cold spell on the immune function of a small passerine bird. Oecologia, 167(1), 211–219. https://doi.org/10.1007/s00442-011-1963-3

MuMIn (2025). r.squaredGLMM: Pseudo-R-squared for Generalized Mixed-Effect models (version 1.48.11). Consultado el 25 de noviembre de 2025. https://www.rdocumentation.org/packages/MuMIn/versions/1.48.11/topics/r.squaredGLMM

Munck, A., Guyre, P.M. y Holbrook, N.J. (1984). Physiological functions of glucocorticoids in stress and their relation to pharmacological actions. *Endocrine Reviews* 5(1), 25-44. https://doi.org/10.1210/edrv-5-1-25

Navarro, A. G. y Benítez, H. 1993. Riqueza y endemismo de las aves de México. *Revista Ciencias, Número Especial* 7:45-54.167-1 85.

Nebel, S., Mills, A., McCracken, J. D., y Taylor, P. D. (2013). Declines of aerial insectivores in North America follow a geographic gradient. *Avian Conservation and Ecology*, 5(2), 1. http://dx.doi.org/10.5751/ACE-00391-050201

Nieto-Monroy, A. P. (2007). Variabilidad espacial y temporal de la hidrogeoquímica de arroyos del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua**.** Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Guanajuato.

Norris, K. y Evans, M.R. (2000). Ecological immunology: Life history trade-offs and immune defense in birds. *Behavioral Ecology* 11(1), 19-26. https://doi.org/10.1093/beheco/11.1.19

Norte, A.C., Ramos, J.A., Sousa, J.P. y Sheldon, B.C. (2009). Variation of adult great tit *Parus major* body condition and blood parameters in relation to sex, age, year and season. *Journal of Ornithology* 150(3), 651-660.

Oberkircher, M.C., y Pagano, S.S. (2018). Seasonal variation in chronic stress and energetic condition in Gray Catbirds (*Dumetella carolinensis*) and Song Sparrows (*Melospiza melodia*). The Auk: *Ornithological Advances* 135(1), 83-90.

O'Dell, D.A., Carlo, M.A., Kimmitt, A., Bikowski, E., Morris, K.R., y Dolby, A. (2014). A comparison of techniques measuring stress in birds. *Virginia Journal of Science* 65(3), 133-149.

Oseguera-Reyes, M., Salgado-Ortiz, J. y Villaseñor-Gómez, J.F. (2019). Perfiles leucocíticos de cinco especies de aves endémicas del occidente de México. En: Libro de resúmenes XVII Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México (CECAM XVII). Mérida, Yucatán.

Ots, I., MurumÄgi, A., y HÕrak, P. (1998). Haematological health state indices of reproducing Great Tits: Methodology and sources of natural variation. *Functional Ecology* 12(4), 700-707. https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1998.00219.x

Owen, J. C., y Moore, F. R. (2005). Seasonal differences in immunological condition of three species of thrushes during spring migration. The Condor, 107(4), 826–833. https://doi.org/10.1650/0010-5422(2005)107[0826:SDIICO]2.0.CO;2

Owen, J.C. y F.R. Moore. (2006). Seasonal differences in immunological condition of three species of thrushes. Condor 108: 389–398.

Pacheco-Muñoz, R., Aguilar-Gómez, M. Á., y Schondube, J. E. (2022a). Overwintering in a megacity: Urban green areas and migratory birds in Mexico City. Urban Forestry & Urban Greening, 73, 127614.

Pacheco-Muñoz, R., Ceja-Madrigal, A., Pérez-Negrón, E., Ortiz-Asbun, A. K., y Schondube, J. E. (2022b). Wintering town: individual quality of migratory warblers using green urban areas in a neotropical city. Frontiers in Ecology and Evolution, 9, 779507.

Parejo, D., y Silva, N. (2009). Immunity and fitness in a wild population of Eurasian kestrels *Falco tinnunculus*. *Naturwissenschaften* 96(10), 1193-1202. doi: 10.1007/s00114-009-0584-z

Parque Zoológico Benito Juárez. (s. f.). *Historia, ubicación y características generales del Zoológico de Morelia*. https://www.zonaturistica.com/que-hacer-en/michoacan/morelia/parque-zoologico-benito-juarez

Partecke, J., Schwabl, I., y Gwinner, E. (2006). Stress and the city: Urbanization and its effects on the stress physiology in European blackbirds. *Ecology*, 87(8), 1945–1952.

Peig, J. y Green, A. J. (2010). The paradigm of body condition: a critical reappraisal of current methods based on mass and length. *Functional Ecology*, 24(6), 1323-1332.

Peig, J. y Green, A. J. (2009). New perspectives for estimating body condition from mass/length data: the scaled mass index as an alternative method. *Oikos*, 118, 1883–1891.

Pérez-Cossío, V. 1995. Análisis comparativo de la abundancia y distribución vertical de la avifauna residente en matorral subtropical y plantación de eucalipto del Cerro Punhuato, Michoacán, México**.** Tesis de licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 78 pp.

Pérez-Hinojosa, A.A. (2018). Evaluación hematológica de psitácidos que entran a cuarentena en el zoológico de Guayllabamba como apoyo a su evaluación clínica. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad de Las Américas, Quito, Ecuador. http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/8862

Pfaff, J.A., Zanette, L., MacDougall-Shackleton, S.A. y MacDougall-Shackleton, E.A. (2007). Song repertoire size varies with HVC volume and is indicative of male quality in song sparrows (*Melospiza melodia*). Proceedings of the Royal Society B 274: 2035–2040.

Piñón-Becerril, J. B. A. P. (2007). Posibilidad de aprovechamiento de *Pinus pinea* en Tlalpujahua, Mich. Méx. (Tesis de licenciatura). Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.

Prahsanth, B., Kumar, V.G., Narasimhamurthy, H.N., y Nandi, S. (2012). Blood haematological and biochemical parameters in domestic birds (*Gallus gallus domesticus*) with respect to strain, age and sex. *Indian Journal of Poultry Science* 47(3), 340-344.

R (2025). The R Project for Statistical Computing (versión 4.x). The R Foundation for Statistical Computing c/o Institute for Statistics and Mathematics. Consultado en Enero, 2025. https://www.r-project.org/

Rainio, M., y Eeva, T. (2010). Metal-related oxidative stress in birds. Environmental Pollution, 158(7), 2359–2370.

Ralph, C. J., G. R. Geupel, P. Pyle, T. E. Martin, D. F. DeSante y B. Milá. (1996). Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-159. Albany, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 46 p, 159.

Ramírez, L. (2006). Los leucocitos en mamíferos domésticos. *Mundo Pecuario* 2(2), 37-39.

Romero, L. M. (2004). Physiological stress in ecology: Lessons from biomedical research. *Trends in Ecology and Evolution* 19(5), 249-255. https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.03.008

Romero, L. M., y Wingfield, J. C. (2016). Tempests, Poxes, Predators, and People: Stress in Wild Animals and How They Cope. Oxford University Press.

Ruiz, G., Rosenmann, M., Novoa, F.F. y Sabat, P. (2002). Hematological parameters and stress index in rufous-collared sparrows dwelling in urban environments. *The Condor* 104, 162166.

Ruiz-García, M. (2017). Prevalencia y parasitemia por parásitos haemosporidios (Apicomplexa) en aves en una zona con presencia de actividad agrícola. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis Potosí, México.

Rupley, A.E. (1997). Manual of Avian Practice. W.B. Saunders Company, Philadelphia PA

Safra, N., Christopher, M.M., Ernest, H.B., Bandivadekar, R., y Tell, L.A. (2018). Leukocyte reference intervals for free-ranging hummingbirds in Northern California, USA. *Journal of Wildlife Diseases* 54(3), 607-611.

Salakij, C., Salakij, J., Narkkong, N.A., Pitakkingthong, D., y Poothong, S. (2003). Hematology, morphology, cytochemistry and ultrastructure of blood cells in painted stork (*Mycteria leucocephala*). *Agriculture and Natural Resources* 37(4), 506-513.

Salas, J.A.U. 2005. Los minerales de El Oro y Tlalpujahua en el concierto internacional de los siglos XIX y XX. Economía y Sociedad, 10(15): 169-184.

Sánchez-Torres, L., Arredondo-Castro, M., Orozco-Benítez, G., Gutiérrez-Arenas, D., Carrillo-Beltrán, J., Lepe-Aguilar, R., y Avila-Ramos, F. (2021). Variables hematológicas en aves deportivas, ganso común, pato doméstico, pato azteca, guajolote y pollo de engorda. *Abanico Agroforestal* 3: 1-10.

Sapolsky, R. M., Romero, L. M., y Munck, A. U. (2000). How do glucocorticoids influence stress responses? Integrating permissive, suppressive, stimulatory, and preparative actions. *Endocrine Reviews,* 21(1), 55–89.

Sapolsky, R.M. (1992). Stress, the aging brain, and the mechanisms of neuron death (Pp. 287-324). En: J.B. Becker, S.M. Breedlove, D. Crews y M.M. McCarthy (Eds.). *Behavioral Endocrinology*. Massachusetts Institute of Technology Press. Nueva York, EUA.

Scheuerlein, A., Van't Hof, T., y Gwinner, E. (2001). Immune function and condition in wild passerines. *Proceedings of the Royal Society* B, 268, 2545–2551.

Sciabarrasi, A., Ruíz, M. y Siroski, P. (2019). Primer registro de los parámetros hematológicos de pichones de Loro Hablador Chaqueño (*Amazona aestiva xanthopteryx*) silvestres, en Argentina. *Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal* 2(3), 94-107.

Seewagen, C. L., y Slayton, E. J. (2008). Mass changes of migratory landbirds during stopovers in a New York City park. *The Wilson Journal of Ornithology*, 120(2), 296–303. https://doi.org/10.1676/07-042.1

Selye, H. (1973). The Evolution of the Stress Concept: The originator of the concept traces its development from the discovery in 1936 of the alarm reaction to modern therapeutic applications of syntoxic and catatoxic hormones. *American Scientist* 61(6), 692-699.

Siegel, H.S. 1980. Physiological stress in birds. BioScience. *Oxford Journals* 30:529-534.

Silverin, B. (1998). Behavioural and hormonal responses of the pied flycatcher to environmental stressors. *Animal Behaviour*, 55(6), 1411–1420.

Silverin, B., Kikuchi, M. y Ishii, S. (1997). Seasonal Changes in Follicle-Stimulating Hormone in Free-Living Great Tits. *General and Comparative Endocrinology* 108(3), 366-373. https://doi.org/10.1006/gcen.1997.6980

Sosa, N. (2003). Las aves: riqueza, diversidad y patrones de distribución espacial. Las Enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México, DF, 257-276.

Soto-Piñeiro, C.J., Acosta-Guevara, I. y Cruz-López, E. (2009). Parámetros hematológicos de Cotorras (*Amazona leucocephala*) y Cateyes (*Aratinga euops*). REDVET. *Revista Electrónica de Veterinaria,* 10(7B), 1-10.

Sullivan, B. M. y R. M. Locksley. (2009). Basophils: a nonredundant contributor to host immunity. Immunity 30(1): 12-20.

Tejeda-Perea, A., Téllez-Isaías, G. y Galindo-Maldonado, F. (1997). Técnicas de medición de estrés en aves. *Vet. Mex*. 28, 345-351.

Vega-Huerta, L.M. (2012). Perfil hematológico y hemoparásitos del gorrión de Lincoln (*Melospiza lincolnii*) en dos áreas geográficas de invernación en México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Villaseñor-Cortez, Y. (2022). El índice Heterófilo/Linfocito (H/L), neutrófilo/linfocito (N/L): fundamentos y aplicaciones. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Villaseñor-Gómez, J.F. (2006). Habitat use and the effects of disturbance on wintering birds using riparian habitats in Sonora, Mexico. Tesis doctoral. Division of Biological Sciences. University of Montana, Missoula, USA.

Villaseñor-Gómez, J.F. (2022). Variabilidad del índice Heterófilo/Linfocito (H/L) de aves silvestres en condiciones naturales. En: libro de resúmenes XIX Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México (CECAM XIX). San Luis Potosi, Mexico. pp 46.

Vinkler, M., Schnitzer, J., Munclinger, P., Votypka, J. y Albrecht. T. (2010). Haematological health assessment in a passerine with extremely high proportion of basophils in peripheral blood. Journal of Ornithology 151(4): 841-849.

Vleck, C.M., Vertalino, N., Vleck, D., y Bucher, T.L. (2000). Stress, corticosterone, and heterophil to lymphocyte ratios in free-living Adélie penguins. *The Condor* 102(2), 392-400.

Von Holst, D. (1998). The concept of stress and its relevance for animal behavior. Pp. 1.131. En: A.P. Møller, M. Milinski, y P.J.B. Slater (Eds.), Advances in the Study of Behavior, Vol. 27. Academic Press.

Washburn, B.E., Morris, D.L., Millspaugh, J.J., Faaborg, J. y Schulz, J.H. (2002) Using a commercially available radioimmunoassay to quantify corticosterone in avian plasma. *The Condor* 104, 558-563.

Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag New York. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4

Wilson, F.E., y Follett, B.K. (1975). Corticosterone-induced gonadosuppression in photostimulated tree sparrows. *Life Sciences* 17(9) 1451-1456. https://doi.org/10.1016/0024-3205(75)90166-6

Wingfield, J. C. (2003). Control of behavioural strategies for capricious environments. Animal Behaviour, 66(5), 807–816.

Wingfield, J. C., Maney, D. L., Breuner, C. W., Jacobs, J. D., Lynn, S., Ramenofsky, M. y Richardson, R.D. (1997). Ecological bases of hormone–behavior interactions: the "emergency life history stage". American Zoologist, 37(6), 373–388.

Wingfield, J. C., Hegner, R. E., Dufty Jr, A. M., y Ball, G. F. (1990). The "challenge hypothesis": theoretical implications for patterns of testosterone secretion, mating systems, and breeding strategies. *The American Naturalist*, 136(6), 829–846.

Zaldivar-Ortega, P., Chapa, V. L., Santiago A, D., Riego, R. L. R y Labrada M. V. (2019). Parámetros hematológicos y prevalencia de hemosporidios aviares en bosques maduros y secundarios de dos comunidades vegetales. En: Libro de resúmenes XVII Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México (CECAM XVII). Mérida, Yucatán. pp 88-89. https://cecam2019.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/10/libro-de-resuc3acmenes-xvii-congreso-de-ornitologic3aca-2019-editado-final.pdf

CAPÍTULO II: VARIACIÓN MORFOMÉTRICA DE CÉLULAS SANGUÍNEAS EN ESPECIES DE AVES DE LAS FAMILIAS PASSERELLIDAE Y PARULIDAE

Resumen

Las aves silvestres enfrentan múltiples desafíos ambientales y antropogénicos que impactan directamente su salud, siendo fundamental comprender sus respuestas fisiológicas para la conservación y manejo de especies. Los estudios hematológicos, y en particular el análisis morfométrico de las células sanguíneas, ofrecen herramientas diagnósticas valiosas, pero poco exploradas en aves silvestres, especialmente en lo referente a la variabilidad de la forma y tamaño celular.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de variables intrínsecas (como condición corporal, sexo y edad) y extrínsecas (familia taxonómica, estatus de residencia y sitio de muestreo) sobre la morfometría (ovalidad y volumen) de eritrocitos, leucocitos y trombocitos en especies de las familias Passerellidae y Parulidae. Se caracterizó y comparó la morfología celular a nivel individual e interespecífico, cuantificando la contribución relativa de cada variable.

Los resultados muestran que la ovalidad celular es un rasgo estructural conservado, con baja variabilidad y escasa sensibilidad a factores ecológicos o fisiológicos. En contraste, el volumen celular se comporta como un rasgo funcional plástico, con alta variabilidad entre especies e individuos, y es sensible a la condición corporal, el estatus de residencia y el ambiente. En particular, los individuos con mejor condición y las especies migratorias presentan eritrocitos de menor tamaño, lo que sugiere una optimización del intercambio gaseoso bajo altas demandas aeróbicas. El volumen de los heterófilos fue mayor en aves migratorias, sugiriendo una mayor activación inmunitaria, mientras que el volumen trombocitario reflejó principalmente diferencias taxonómicas y variabilidad individual.

En conclusión, la morfometría celular, especialmente el volumen, es relevante para evaluar el estado de salud y adaptación de las aves silvestres, aportando nuevas oportunidades de explorar perspectivas en ecología y conservación de la avifauna.

Abstract

Wild birds face multiple environmental and anthropogenic challenges that directly impact their health, making it essential to understand their physiological responses for effective conservation and species management. Hematological studies, particularly the morphometric analysis of blood cells, provide valuable yet underexplored diagnostic tools in wild birds, especially regarding the variability in cell shape and size.

The objective of this study was to evaluate the effect of intrinsic variables (such as body condition, sex, and age) and extrinsic variables (taxonomic family, residency status, and sampling site) on the morphometry (ovalness and volume) of erythrocytes, leukocytes, and thrombocytes, in species of the families Passerellidae and Parulidae. Cell morphology was characterized and compared at both individual and interspecific levels, quantifying the relative contribution of each variable.

The results indicate that cell ovalness is a conserved structural trait, with low variability and limited sensitivity to ecological or physiological factors. In contrast, cell volume behaves as a plastic functional trait, exhibiting high variability among species and individuals, and is sensitive to body condition, residency status, and environmental context. Notably, individuals with better condition and migratory species, exhibited smaller erythrocytes, suggesting that optimization of gas exchange under high aerobic demands. Heterophil volume was greater in migratory birds, suggesting higher immune activation, while thrombocyte volume primarily reflected taxonomic differences and individual variability.

In conclusion, cell morphometry particularly cell volumen emerges as a relevant for assessing the health status and adaptation of wild birds, providing new opportunities to explore perspectives in avian ecology and conservation.

Introducción

Los organismos silvestres son sensibles y responden a factores antropogénicos y naturales de su entorno que impactan directamente su salud. El entendimiento de la respuesta a estos factores es primordial para evaluar su salud (lo cual se puede realizar mediante indicadores confiables, sencillos, rápidos y económicos), para determinar y si es posible reducir o erradicar sus efectos negativos (Martínez-Quintanilla et al., 2017). En este sentido, los estudios hematológicos posibilitan el conocimiento del estado de salud de los organismos, siendo esenciales como una herramienta de diagnóstico en diversas áreas de la medicina veterinaria, así como la evaluación del bienestar y el impacto ecológico del entorno en animales (Hanauska-Brown y Dufty, 1996; Alvarado et al., 2008; Carvajal-Villacres, 2021).

Estos estudios son escasos en especies de vertebrados silvestres y poco se sabe sobre las respuestas fisiológicas a diversas condiciones ambientales. No obstante, un tema aún más desconocido es lo relacionado con el estudio de la morfología de células sanguíneas (homogeneidad, tamaño, forma, estructura, color, bordes, opacidad y textura de las células) y sobre las funciones detalladas de los componentes celulares de la sangre (eritrocitos, leucocitos [heterófilos, linfocitos, basófilos, eosinófilos y monocitos] y plaquetas (trombocitos)), y del plasma de animales silvestres (Abbas, et al., 2024). Por lo tanto, profundizar en la hematología de vertebrados silvestres es necesario para ampliar el conocimiento sobre sus adaptaciones fisiológicas y contribuir a su conservación y manejo.

El estudio de la morfología celular sanguínea en aves ha sido históricamente impulsado por investigaciones centradas en especies domésticas, particularmente en contextos de producción avícola. En este sentido, gran parte del conocimiento hematológico en aves proviene de estudios orientados al diagnóstico temprano de enfermedades, evaluación del estado nutricional, respuesta a estrés por densidad poblacional y rendimiento productivo (Copete-Sierra, 2013; Gross y Siegel, 1983; Kannan y Mench, 1996; Moe et al., 2010). Desde un enfoque clínico, esta información ha sido valiosa para el manejo y tratamiento preventivo, así como para evaluar condiciones ambientales durante el desarrollo (Vargas et al., 2016), apoyar estrategias de rehabilitación (Arancibia-Calcagno, 2023), y establecer modelos biomédicos para el estudio de la inmunidad innata en vertebrados (Kolesnik et al., 2020).

Sin embargo, estos estudios no se han extendido con igual profundidad a las aves silvestres. Estas especies, a menudo difíciles de observar en condiciones naturales, no siempre presentan signos clínicos evidentes de enfermedad (Alvarado et al., 2008). Además, su pequeño tamaño representa un desafío metodológico, ya que limita el volumen de sangre disponible para análisis hematológicos convencionales (Clark et al., 2009). A pesar de ello, hoy en día se cuenta con técnicas que permiten realizar descripciones morfológicas completas con volúmenes mínimos de muestra, incluso a partir de una sola gota de sangre, lo que ha abierto nuevas posibilidades para estudios de campo.

La caracterización morfológica de las células sanguíneas no solo permite identificar patologías o estados fisiológicos alterados, sino que también proporciona información fundamental sobre el estado inmunológico de un individuo (Kaiser, 2007). La creciente popularidad de algunas aves silvestres como mascotas (Alvarado et al.,2008) y la conciencia de la amenaza zoonótica (como la gripe aviar), proporciona una nueva motivación para estudios hematológicos y la descripción morfológica de las células sanguíneas para control efectivo, en su caso (Kaiser, 2010). Estos estudios han servido como base para investigar temas de salud y medicina, relacionados con su evaluación clínica, factores fisiológicos y diagnóstico de patologías. Sin embargo, este conocimiento es incipiente y existe limitada información sobre las características morfológicas detalladas de las células sanguíneas.

La escasez de información representa una limitante para determinar patrones o diferencias entre especies, ya que al no haber bibliografía de referencia directa, se usan referencias de otras especies cercanas taxonómicamente o de otras regiones geográficas, y muchas veces se experimenta, compara y se trata de “ver que resulta de ello” (Bienzle, et al., 1997; Arancibia-Calcagno, 2023). Esto provoca un sesgo de interpretación, debido a la potencial variación entre especies, individuos, regímenes alimenticios, de manejo y situación de cautiverio o libertad (Fudge, 2000); incluso, entre especies cercanas del mismo género taxonómico pueden existir diferencias hematológicas (Alvarado et al., 2008) y como tal, podría haber también diferencias morfológicas. Además, la información básica y los valores de referencia que existen para especies domésticas, no son suficientes para tomar buenas decisiones en el ámbito, debido a la incertidumbre sobre la aplicabilidad del uso de

intervalos de referencia para todas las especies aviares no domésticas, por la diversidad de adaptaciones únicas, lo que hace necesario un estudio detallado y específico de sus células sanguíneas (Vargas, et al., 2016).

Se sabe que en animales enfermos pueden existir alteraciones morfológicas en los eritrocitos, en términos de su color (policromasia), tamaño (anisocitosis) y/o forma (poiquilocitosis), alteraciones que no deben confundirse con cambios morfológicos que pueden ocurrir en aves sanas. Por ejemplo, la anisocitosis es considerada como un cambio morfológico, ya que es posible que se presente de forma normal en la mayoría de las aves. Este aspecto es un ejemplo que establece la importancia de conocer las particularidades de cada especie para realizar una correcta interpretación de las alteraciones y cambios (Kaiser, 2007; Copete-Sierra, 2013).

Los estudios de morfología de células sanguíneas de aves silvestre están limitados a pocas especies de algunos órdenes; ejemplos son el caso de Falconiformes (Balasch et al., 1976; Arancibia-Calcagno, 2023), Galliformes (Sturkie y Griminger, 1986; Tadjalli et al., 2003), Struthioniformes (Moura-Fortes et al., 2009; Gallo et al., 2015), Anseriformes (Williams y Trainer, 1971; Martínez-Quintanilla et al., 2017; Bhattacherjee et al., 2018), Psittaciformes (Gaspar et al., 2021) y Passeriformes (Clark et al., 2009). Aunque, el mayor número de trabajos han sido realizados en Passeriformes (Arancibia-Calcagno, 2023), al ser este orden el más grande de las aves (41 familias y 528 especies) (iNatutalist, 2024), los estudios sobre morfología sanguínea son todavía poco representativos para el orden.

Otro punto importante es que estos estudios en su mayoría se han enfocado en homogeneidad, forma, color, bordes, opacidad y textura de las células, aspectos que parecen mantenerse constantes en las diferentes especies (Moura-Fortes et al., 2009; Gallo et al., 2015; Kolesnik, 2020). Pero, ¿qué sucede con la morfometría? La “forma” de las células y su “tamaño” son el objeto de su estudio cuantitativo, y de manera similar al enfoque de otros trabajos, se consideran aquí las medidas de ovalidad y volumen, como elementos de análisis tanto para la forma como para el tamaño. Algunos estudios afirman que el tamaño celular influye en funciones fisiológicas, adaptación ambiental y procesos evolutivos (Leiva et al., 2026), por lo que estas medidas recobran importancia e interés. Se entiende como “ovalidad” al grado en que una estructura se aproxima a una forma elíptica y

suele cuantificarse a partir de la relación entre el eje mayor y el eje menor de la célula, lo que permite evaluar la elongación o desviación respecto a una forma circular (Zelditch et al., 2012), y el "volumen" es la magnitud que cuantifica el espacio tridimensional ocupado por un cuerpo o estructura y se expresa en unidades cúbicas (Halliday et al, 2014).

Estos parámetros hematológicos básicos, aún no están descritos en muchas especies. Investigaciones previas de células sanguíneas en varios taxones animales han mostrado diferencias significativas en el tamaño de las células sanguíneas, aspecto que se explica a mayor detalle a continuación, para eritrocitos, leucocitos y trombocitos de manera independiente.

1. Eritrocitos

Los eritrocitos constituyen uno de los componentes celulares más importantes de la sangre en los vertebrados y desempeñan un papel fundamental en el transporte de oxígeno hacia los tejidos y en la eliminación de dióxido de carbono producto del metabolismo celular. En las aves, los eritrocitos maduros son células ovaladas, nucleadas y de mayor tamaño que las de los mamíferos, características que favorecen la eficiencia en el transporte de oxígeno y el intercambio gaseoso en el sistema respiratorio aviar; presentan una vida media relativamente corta (aproximadamente 28 a 45 días), lo que implica una renovación celular más rápida en comparación con la observada en mamíferos (Gálvez-Martínez et al., 2009).

Además de su función respiratoria, en vertebrados no mamíferos los eritrocitos nucleados pueden participar en procesos inmunológicos. Se ha demostrado que estas células poseen la capacidad de reconocer patógenos y activar respuestas inmunes, lo que sugiere un papel directo en la defensa del organismo frente a infecciones (Morera y MacKenzie, 2011).

Las características de los eritrocitos pueden variar significativamente entre especies como resultado de factores fisiológicos, ecológicos y evolutivos. En particular, la morfología y el tamaño de los eritrocitos constituyen indicadores funcionales de la adaptación fisiológica al entorno, ya que reflejan ajustes asociados a condiciones ambientales, a demandas metabólicas, respuestas adaptativas (estrategias ecológicas) y variación entre poblaciones. (Kizhina et al., 2020; Leiva et al., 2026). En este sentido, las

características eritrocitarias han sido utilizadas como indicadores de adaptación fisiológica frente a condiciones ambientales variables (Leiva et al., 2026).

Las métricas eritrocitarias han sido utilizadas como herramientas para evaluar el estado de salud y la condición fisiológica de vertebrados en ambientes naturales. Sin embargo, la interpretación de estos parámetros requiere considerar posibles factores de confusión, ya que múltiples variables biológicas y ambientales pueden influir simultáneamente en los rasgos hematológicos (Johnstone y Lill, 2015). Diversos estudios comparativos han demostrado que la variación en el tamaño y la forma de los eritrocitos está estrechamente vinculada con la ecología, la fisiología y la historia de vida de las especies. Por ejemplo, investigaciones en reptiles han mostrado que estos rasgos celulares pueden reflejar adaptaciones asociadas al transporte de oxígeno en distintos ambientes (Penman et al., 2022). En roedores, por ejemplo, el tamaño y la forma de eritrocitos se han relacionado con estrategias de historia de vida y con demandas energéticas de los organismos (Kizhina et al., 2020).

A pesar del creciente interés en cómo las características del entorno y la historia de vida modifican la morfometría de los eritrocitos, pocos estudios se han enfocado específicamente en la variación morfológica de los mismos (Soulsbury et al., 2022).

¿La forma sigue a la función?

La forma de los eritrocitos constituye un rasgo morfológico con implicaciones funcionales importantes en la fisiología de los vertebrados. En mamíferos, los eritrocitos maduros carecen de núcleo y presentan una forma de disco bicóncavo, lo que incrementa la relación superficie-volumen, favorece la deformabilidad celular y optimiza el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono durante el tránsito por capilares estrechos (Hawkey et al., 1991; Snyder & Sheafor, 1999). En contraste, en aves, reptiles, anfibios y peces los eritrocitos son nucleados y generalmente presentan formas ovaladas o elipsoidales; la presencia del núcleo reduce el espacio disponible para hemoglobina, pero permite mantener ciertas funciones celulares y metabólicas (Campbell y Reece, 2008), la forma elipsoidal característica de estas células sugiere que la morfometría eritrocitaria puede influir en la eficiencia del intercambio gaseoso y en la dinámica circulatoria (Leiva et al., 2026). En general, los eritrocitos alargados favorecen procesos más rápidos de oxigenación, al igual

que los procesos de captación y liberación de bióxido de carbono, y pueden desplazarse más fácilmente en los capilares musculares, lo que se asocia con mayores niveles de actividad aeróbica gracias a que presentan una mayor relación superficie-volumen y menores distancias de difusión (Holland y Forster 1966). Soulsbury et al. (2022) encontraron que las especies con mayores requerimientos aeróbicos, como las aves migratorias o que realizan vuelos a gran altitud, presentan eritrocitos más alargados, mientras que, en contraste, especies con mayor competencia sexual tienden a presentar eritrocitos más redondeados, posiblemente como reflejo del mayor número de eritrocitos jóvenes producidos por tasas elevadas de eritropoyesis inducidas por la elevación de hormonas masculinas.

Por otra parte, estudios en peces han demostrado que existen entre especies diferencias significativas en el largo y ancho de sus eritrocitos y sus núcleos, lo que ha permitido el uso de las características morfológicas y morfométricas de estas células como rasgos taxonómicos para distinguir grupos biológicos (Megarani, 2020).

Asimismo, investigaciones comparativas han documentado variación en la forma y tamaño de los eritrocitos asociada con factores ecológicos y evolutivos, incluyendo el estilo de vida, la altitud, la historia de vida y la filogenia de las especies (Hawkey et al., 1991; Minias, 2020). Estas variaciones reflejan un rasgo funcional relevante en la evolución de los vertebrados.

El tamaño si importa

Con el objetivo de reunir información comparativa sobre el tamaño celular en vertebrados, Gregory (2026) desarrolló la Animal Genome Size Database, una base que compila mediciones del tamaño de los eritrocitos obtenidas de numerosos estudios clásicos y contemporáneos (p. ej., Bartsch et al., 1937; Hartman y Lessler, 1963; Palomeque et al., 1980; Glomski y Pica, 2011). Este recurso integra información de múltiples grupos de vertebrados, incluyendo peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos, procedente de especies distribuidas en diversas regiones biogeográficas. La base de datos reúne y estandariza las mediciones reportadas en la literatura, permitiendo explorar patrones comparativos en el tamaño celular entre distintos linajes de vertebrados y facilitando el análisis de tendencias evolutivas en la morfología de los eritrocitos.

Diversos estudios han demostrado que la variación en el tamaño eritrocitario está estrechamente vinculada con las demandas metabólicas y la capacidad aeróbica de los organismos. En peces teleósteos, se ha observado que especies con mayor capacidad aeróbica presentan eritrocitos más pequeños, lo que favorece una mayor eficiencia en el intercambio gaseoso (Lay y Baldwin, 1999). De manera similar, en otros vertebrados, células más pequeñas incrementan la relación superficie-volumen y permiten procesos más rápidos de oxigenación y desoxigenación, favoreciendo actividades con alta demanda energética (Gregory et al., 2009; Laguë, 2017; Soulsbury et al., 2022). En contraste, eritrocitos de mayor tamaño pueden contener más hemoglobina y funcionar como reservorios de oxígeno, aunque con menor eficiencia de difusión (Hawkey et al., 1991a; Minias, 2015; Nasser et al., 2021).

El volumen eritrocitario se encuentra estrechamente asociado con la fisiología metabólica y puede ajustarse como respuesta a factores ambientales, tales como la disponibilidad de oxígeno o la temperatura corporal, lo que refleja la plasticidad del sistema eritropoyético frente a condiciones como la hipoxia o gradientes térmicos (Kizhina et al., 2020; Maekawa y Kato, 2015; Gillooly y Zenil-Ferguson, 2014; Leiva et al., 2026). El tamaño de los eritrocitos constituye un componente funcional importante de la adaptación fisiológica en diferentes grupos de vertebrados (Penman et al., 2012). Existe evidencia de que temperatura corporal (Gillooly y Zenil-Ferguson, 2014), el hábitat, la condición corporal, la filogenia, sexo y la edad, son factores que pueden modificar el tamaño de los eritrocitos.

Sin embargo, el sexo y la edad han sido escasamente consideradas en estudios comparativos, lo que resalta la necesidad de evaluaciones más integrales (Leiva et al., 2026).

En mamíferos, particularmente en humanos y otros modelos biomédicos, se ha observado que los machos suelen presentar eritrocitos con tamaños mayores y concentraciones más altas de hemoglobina en comparación con los de hembras, lo que se atribuye principalmente al efecto estimulador de los andrógenos sobre la eritropoyesis (Murphy, 2014). El mismo patron se reporta en reptiles, en algunas especies en los que los eritrocitos ligeramente mayores en machos, posiblemente asociados con diferencias

metabólicas o con demandas fisiológicas ligadas al comportamiento reproductivo (Arikan y Çiçek, 2014). En contraste, en peces teleósteos se han documentado variaciones sexuales en características eritrocitarias, en las que las hembras presentan eritrocitos de mayor tamaño durante etapas reproductivas, lo que podría relacionarse con cambios fisiológicos asociados al ciclo reproductivo y al metabolismo (Witeska, 2013). En conjunto, estos estudios sugieren que el sexo puede constituir una fuente de variación en la morfometría eritrocitaria en distintos grupos de vertebrados, probablemente mediada por diferencias hormonales, metabólicas y reproductivas entre machos y hembras.

En cuanto a la edad, estudios en anuros han demostrado que los juveniles presentan eritrocitos significativamente más pequeños que los adultos, lo que sugiere que el tamaño eritrocitario puede aumentar durante el desarrollo ontogenético y estar asociado con procesos fisiológicos y genómicos vinculados al crecimiento corporal (Grenat et al., 2009). En reptiles, también se ha documentado que la ontogenia puede influir en el tamaño de los eritrocitos; por ejemplo, un estudio comparativo entre cinco especies de geckos (Eublepharidae) encontró que en algunas el tamaño de los eritrocitos aumenta significativamente con el crecimiento corporal, registrándose incrementos de hasta 23 % entre crías y adultos, mientras que, en otras el tamaño eritrocitario permanece relativamente constante a lo largo del desarrollo (Starostová et al., 2013). En peces teleósteos, la edad también influye en la morfometría eritrocitaria; un estudio comparativo en diez especies encontró que los eritrocitos de adultos presentaron volúmenes celulares significativamente mayores que los de juveniles, junto con incrementos en superficie celular y volumen citoplasmático, lo que muestra que el tamaño de los eritrocitos aumenta a lo largo del desarrollo ontogenético (Lahnsteiner, 2021)

De manera similar, la condición corporal de los organismos también puede influir en la morfología eritrocitaria. En reptiles se ha observado una relación positiva entre el tamaño corporal y el tamaño de los eritrocitos (Penman et al., 2012), al igual que estudios comparativos en roedores que reportan la misma tendencia: individuos con mayor masa corporal tienden a presentar eritrocitos más grandes, sugiriendo que las adaptaciones fisiologicas pueden modificar su estructura (Kizhina et al., 2020).

Por otra parte, las condiciones ambientales también desempeñan un papel importante en la variación del tamaño eritrocitario. En anfibios andinos se ha documentado que el incremento altitudinal se asocia con eritrocitos más pequeños y con un mayor número de células sanguíneas, lo que sugiere ajustes fisiológicos destinados a optimizar el transporte de oxígeno bajo condiciones de hipoxia ambiental (Ruiz Valenzuela, 1986). De forma similar, los eritrocitos pueden modificarse en respuesta a factores ambientales como la disponibilidad de oxígeno o la temperatura, evidenciando una alta plasticidad del sistema eritrocitario frente a distintos desafíos ecológicos (Maekawa y Kato, 2015). En reptiles, se ha observado que especies con mayores demandas de suministro rápido de oxígeno —como aquellas que habitan a gran altitud o presentan alta actividad metabólica— tienden a poseer eritrocitos más pequeños y alargados, lo que favorece una difusión más eficiente de oxígeno (Penman et al., 2022). Asimismo, estudios comparativos en roedores han identificado diferencias en el tamaño eritrocitario entre especies asociadas a distintos tipos de hábitat, como ambientes terrestres, subterráneos o semiacuáticos, presentando eritrocitos más grandes los roedores asociados al hábitat subterráneo y semiacuático que los terrestres, lo que sugiere que las condiciones ecológicas pueden moldear la morfología de las células sanguíneas (Kizhina et al., 2020).

Finalmente, la variación en el tamaño de los eritrocitos también puede estar asociada con la filogenia y diferencias taxonómicas entre especies. Estudios comparativos han demostrado que la posición filogenética puede influir en la morfología eritrocitaria (Kizhina et al., 2020), y que existe variación interespecífica significativa en el tamaño de eritrocitos en diferentes grupos de reptiles (Atatür et al., 2001). Se ha documentado que este rasgo presenta una amplia plasticidad evolutiva en peces, con diferencias amplias en volumen celular entre especies (Leiva et al., 2026).

Aunque la relación entre migración y características eritrocitarias ha sido estudiada principalmente en aves, investigaciones en otros vertebrados sugieren que rasgos fisiológicos asociados con altas demandas aeróbicas pueden influir de manera similar en la morfología de los eritrocitos. En peces, especies con mayor capacidad de nado y metabolismo aeróbico presentan eritrocitos relativamente más pequeños, lo que favorecería un intercambio gaseoso más eficiente (Lay y Baldwin, 1999). De forma comparable,

análisis comparativos en reptiles han mostrado que especies con estilos de vida más activos tienden a presentar eritrocitos más pequeños, consistentes con mayores requerimientos metabólicos (Penman et al., 2022).

En conjunto, estas evidencias indican que la morfología eritrocitaria responde a una compleja interacción entre factores biológicos, ecológicos y evolutivos.

Tamaño de eritrocitos en aves

Hass (2020) reporta que el tamaño y la forma de los eritrocitos en aves constituyen parámetros hematológicos dinámicos y adaptativos, influenciados por factores tanto endógenos como ambientales. Se ha mencionado que su variación puede presentarse entre especies (como en rapaces, Samour et al. 2005; Kostelecka-Myrcha, 1997) y que el sexo de los individuos podría ser también un factor que determina el tamaño de algunas células sanguíneas (Janiga y Kufelová, 2017).

Diversos estudios han demostrado que variables como la edad, juegan un papel importante en la relación del tamaño y contenido de hemoglobina; estudios con diferentes especies de aves encontraron que durante el desarrollo postembrionario, en estadios tempranos los eritrocitos pueden ser grandes, pero con bajo contenido hemoglobínico (Kostelecka-Myrcha, 1997; Kostelecka-Myrcha y Jaroszewicz, 1999). Otros factores involucrados en esta variación pueden ser el estado hormonal (Puerta et al., 1995), la estación del año (Breuer et al., 1995) y situaciones de hipoxia (Maxwell et al., 1990) que también afectan significativamente la concentración de hemoglobina en sangre. Adicionalmente, el tamaño eritrocitario se ve alterado por factores externos como la contaminación ambiental. Se ha observado que la exposición al plomo induce una transformación morfológica hacia formas más redondas y pequeñas (Janiga y Haas, 2019). Asimismo, el tamaño celular varía geográficamente, como se ha documentado en *Prunella collaris* de poblaciones aisladas en Kirguistán, Bulgaria y Eslovaquia (Haas y Janiga, 2020). Por otra parte, las variaciones estacionales y etarias también afectan la morfología eritrocitaria (Barrett y Scheinberg, 1972; Janiga et al., 2017). Estas observaciones respaldan la necesidad de incluir variables como sexo, estación, altitud y ubicación geográfica al interpretar datos hematológicos en aves.

La migración influye en el tamaño de los eritrocitos y en aves migratorias el tamaño eritrocitario es particularmente relevante. Estas especies enfrentan demandas aeróbicas extremas durante vuelos prolongados, por lo que han desarrollado eritrocitos más pequeños, elongados y más numerosos, optimizando la captación y liberación de oxígeno sin incrementar en exceso la viscosidad sanguínea (Snyder, 1981; Soulsbury et al., 2021). Soulsbury y colaboradores (2022) analizaron 631 especies de aves y concluyeron que las aves migratorias de larga distancia poseen eritrocitos más pequeños y alargados, favoreciendo una oxigenación rápida.

Por otra parte, las especies con competencia sexual intensa presentan eritrocitos más pequeños y redondeados, posiblemente representados por eritrocitos jóvenes inducidos hormonalmente (Soulsbury et al., 2022) y las aves buceadoras muestran eritrocitos más grandes, funcionando como reservorios de oxígeno (Penman et al., 2022; Soulsbury et al., 2022). Se concluye que el tamaño y la forma de los eritrocitos en las aves dependen de la necesidad de suministrar oxígeno durante actividades que requieren un alto consumo energético.

Es posible que los cambios morfométricos respondan más a exigencias fisiológicas que tendencias filogenéticas. Canals et al. (2007) en un estudio con aves, mamíferos voladores (murciélagos) y mamíferos no voladores, encontró que el tamaño de los eritrocitos en aves y mamíferos está fuertemente influenciado por los requerimientos energéticos del vuelo, ya que las especies voladoras (tanto aves como murciélagos), presentan eritrocitos más pequeños en comparación con especies no voladoras. Sugieren que esta reducción en tamaño está asociada con una mayor eficiencia en la difusión de oxígeno, necesaria para actividades aeróbicas intensas como el vuelo. La correlación entre el tamaño eritrocitario y la capacidad de difusión pulmonar evidenció respuestas funcionales similares en especies no emparentadas, lo que indica que estos ajustes morfológicos pueden responder más a exigencias fisiológicas que al linaje evolutivo.

En el caso del ganso de cabeza barrada (*Anser indicus*), se han descrito adaptaciones fisiológicas que permiten vuelos sobre los 8,000 m de altitud, que incluyen ventilación pulmonar elevada, mayor capacidad pulmonar, capilarización muscular densa y,

crucialmente, una morfología eritrocitaria que facilita la oxigenación eficiente (León-Velarde et al., 1993; Canals et al., 2007)

Considerando que el análisis morfométrico de los eritrocitos en aves silvestres representa una herramienta valiosa para interpretar tanto su fisiología respiratoria como su estado de salud general, y que a pesar de la relevancia de este parámetro, los estudios disponibles hasta la fecha han sido realizados principalmente en aves domesticas o en condiciones controladas, con escaso enfoque en especies silvestres y sin un análisis integral de variables ecológicas clave como la migración, el tipo de hábitat, la condición corporal, el sexo o la edad, es claro que existe una notable brecha de conocimiento respecto a la variabilidad de eritroitos y la forma cómo estos factores influyen en la morfología eritrocitaria en contextos naturales.

En este contexto, el presente proyecto busca aportar evidencia novedosa mediante la caracterización del tamaño y forma de los eritrocitos en especies silvestres de las familias Passerellidae y Parulidae, evaluando su relación con variables biológicas y ecológicas como la migración, el estatus de residencia, el tipo de hábitat, la condición corporal, el sexo y la edad. Esta aproximación permitirá identificar patrones funcionales que mejoren nuestra comprensión de la fisiología adaptativa en aves silvestres y, al mismo tiempo, contribuir al desarrollo de indicadores útiles para la evaluación de su salud, desempeño ecológico y estrategias de conservación.

2. Trombocitos

Los trombocitos representan los equivalentes funcionales de las plaquetas en mamíferos, desempeñando un papel clave en los procesos de hemostasia e inmunidad (Claver, 2005). En especies aviares silvestres los estudios sobre el tamaño trombocitario es nulo. En mamíferos (como en cerdos), se ha demostrado que el volumen de las plaquetas (equivalente a trombocitos) pueden variar en función del grado de activación, la edad y el estado fisiológico general (Basrur et al., 1983). Las modificaciones morfológicas celulares reportadas han sido vinculadas a la dilatación del Sistema Canalicular Abierto (SCA), una red de invaginaciones membranosas que conecta el citoplasma celular con el exterior, facilitando la liberación de gránulos y la exposición de receptores de membrana durante la activación (Basrur et al., 1988; White, 1972; Nurden y Nurden, 2011). En humanos, este

proceso ha sido asociado a la evaluación del estado hemostático e inmune ante situaciones de estrés o infección (George, 2000). Si bien estas observaciones derivan principalmente de estudios en mamíferos, se ha demostrado la existencia del SCA o su equivalente, el sistema conectado a la superficie (SCS), también en otras clases de vertebrados, como en trombocitos de peces teleósteos (Daimon et al., 1979) y en aves domésticas, específicamente en pollos, donde se ha identificado mediante técnicas combinadas de microscopía electrónica y citoquímica tanto el SCS como el sistema tubular denso (DTS) (Daimon y Uchida, 1978; Ferdous y Scott 2023). No obstante, hasta la fecha no existen estudios específicos que evalúen cambios en el tamaño trombocitario en aves silvestres, ni su relación con variables ecológicas como la migración, condición corporal, edad o sexo, lo cual representa una línea de investigación pendiente con implicaciones importantes para la fisiología comparada.

3. Leucocitos

Los leucocitos son una herramienta fundamental para evaluar el estado de salud, la respuesta inmune y la adaptación ecológica de los organismos. A diferencia de los eritrocitos, en los que el tamaño celular está directamente relacionado con la capacidad de transporte de oxígeno, en los leucocitos el tamaño no representa directamente una ventaja funcional, sino que suele reflejar procesos fisiológicos como maduración celular, activación inmunitaria, inflamación o estrés (Maxwell y Robertson, 1998; Ribeiro et al., 2024). La variación en su tamaño no necesariamente implica un beneficio fisiológico directo. Estudios hechos en humanos demuestra que su funcionalidad está más relacionada con su proporción, activación y respuesta inmunitaria, que con su tamaño (Gordon y Taylor, 1992).

A pesar del papel clave que desempeñan los leucocitos en la inmunidad, el estrés y la condición fisiológica de las aves, los estudios que abordan específicamente su morfometría (tamaño y forma celular) son notoriamente escasos, especialmente en aves silvestres. La mayoría del conocimiento sobre las variaciones en tamaño leucocitario proviene de mamíferos y otros vertebrados (Worthen et al. 1989; Schmid-Schönbein et al., 1981); en aves, los pocos estudios disponibles se centran casi exclusivamente en especies domésticas, como el gallo doméstico (*Gallus gallus domesticus*) (Maxwell y Robertson,

1998; Ribeiro et al., 2024). En especies de aves silvestres, no existe evidencia clara que describa cómo el tamaño de los leucocitos varía con respecto a factores ecológicos o fisiológicos, aunque se han documentado ampliamente cambios en sus proporciones relativas (Hawkey et al., 1991b; Owen y Moore, 2006; Davis et al., 2008). Hasta donde se pudo averiguar, solamente un estudio hace referencia al tamaño de los leucocitos con respecto al sexo: Salakij et al. (2003) no encontró diferencias en el diámetro de leucocitos *Mycteria leucocephala*; sin embargo, los basófilos y linfocitos fueron más grandes en machos que en hembras.

Estudios en vertebrados proponen que un mayor tamaño leucocitario podría estar asociado a un mayor contenido citoplasmático, facilitando la fagocitosis y la acumulación de gránulos antimicrobianos (Stacy et al., 2022), aunque también se ha sugerido que tamaños mayores a los normales pueden deberse a procesos patológicos como inflamación, estrés o infecciones severas (Maxwell, 1993; Ribeiro et al., 2024). En pollos de engorda, por ejemplo, se ha observado que los heterófilos aumentan de tamaño bajo estrés crónico y muestran morfologías anormales como vacuolización, basofilia citoplasmática e hiposegmentación nuclear (Shini et al., 2008; Campbell, 1995). En mamíferos, el aumento de tamaño de los leucocitos se asocia con posibles desventajas como mayor dificultad de movimiento a través de los capilares, ya que mayor tamaño celular no siempre implica mejor función (Worthen et al. 1989; Schmid-Schönbein et al.,1981).

A pesar de los avances en el estudio de la hematología comparada en vertebrados, la mayoría de las investigaciones se han centrado en parámetros sanguíneos tradicionales, como el hematocrito o el recuento celular, mientras que los patrones de variación en la morfometría de las células sanguíneas han sido menos explorados, particularmente en aves silvestres. En especial, aún existe información limitada sobre cómo el tamaño y la forma de eritrocitos, leucocitos y trombocitos pueden variar entre especies y responder a factores biológicos y ecológicos que influyen en las demandas fisiológicas de los individuos. Asimismo, pocos estudios han evaluado simultáneamente la influencia de variables intrínsecas y extrínsecas sobre estas características celulares en comunidades de aves. En este contexto, analizar la variación morfométrica de las células sanguíneas en diferentes especies y condiciones ecológicas puede aportar información relevante para comprender los

mecanismos ecofisiológicos asociados al transporte de oxígeno, la respuesta inmunitaria y el estado fisiológico en aves silvestres.

En conjunto, la morfometría de las células sanguíneas puede proporcionar información valiosa sobre el estado fisiológico de los organismos y su interacción con el ambiente. En aves, las características morfológicas de eritrocitos, leucocitos y trombocitos no solo reflejan procesos básicos como el transporte de oxígeno, la respuesta inmunitaria y la hemostasia, sino que también pueden variar en función de factores biológicos y ecológicos que influyen en las demandas fisiológicas de los individuos. En este contexto, el análisis de la variación en tamaño y forma de estas células con relación a variables intrínsecas (sexo, edad y condición corporal) y extrínsecas (familia taxonómica, estatus de residencia y sitio de muestreo) como el caso del presente estudio, permite explorar posibles patrones ecofisiológicos asociados a diferentes estrategias de vida y condiciones ambientales en aves silvestres. Este enfoque no solo permitirá interpretar con mayor precisión el estado de las aves en contextos ecológicos contrastantes, sino que también aportará nuevas herramientas diagnósticas para estudios de salud y conservación.

Hipótesis y predicciones

Hipótesis

- H1. La variación en la ovalidad y el volumen de las células sanguíneas en aves de las familias Passerellidae y Parulidae refleja diferencias en las demandas ecofisiológicas e historia de vida, por lo que se espera que existan diferencias morfométricas tanto entre especies como entre individuos asociadas a variables biológicas y ecológicas.
- H2. La morfometría eritrocitaria en aves silvestres varía en función de variables intrínsecas y extrínsecas, reflejando ajustes fisiológicos asociados a las demandas de transporte de oxígeno, por lo que se espera que especies o individuos con mayores requerimientos aeróbicos presenten eritrocitos de menor tamaño.
- H3. El volumen de los leucocitos en aves silvestres varía en función de factores intrínsecos y extrínsecos que influyen en la actividad inmunológica. Se espera que individuos expuestos a mayores desafíos fisiológicos o ambientales presenten

leucocitos de mayor tamaño, lo cual podría reflejar un mayor contenido citoplasmático asociado con procesos de defensa inmunitaria.

- H4. El volumen de los trombocitos puede variar en función del estado fisiológico y de los desafíos ambientales que enfrentan los individuos. Se espera que cambios en su tamaño reflejen variaciones en el grado de activación trombocitaria, que pudieran asociarse con procesos de hemostasia y respuesta inmunitaria ante situaciones de estrés o infección.

Predicciones

1. Factores ecológicos y taxonómicos

Se espera que tanto la ovalidad como el volumen de las células sanguíneas presente variaciones entre familias taxonómicas, especies e individuos, reflejando diferencias en historia evolutiva, estrategias de vida y condiciones ambientales.

2. Eritrocitos

Las especies o individuos con mayores demandas aeróbicas, particularmente aquellas migratorias o con mejor condición corporal, presentarán eritrocitos de menor volumen y mayor ovalidad, lo que favorecería una mayor eficiencia en el intercambio gaseoso. Por otra parte, especies que habitan a mayor altitud mostrarán eritrocitos de mayor tamaño en respuesta a menores concentraciones de oxígeno (similares a los casos de especies expuestas a hipoxia).

3. Leucocitos

Individuos expuestos a mayores desafíos fisiológicos o ambientales presentarán leucocitos de mayor tamaño, lo que podría reflejar una mayor activación del sistema inmunológico.

4. Trombocitos

El volumen de los trombocitos variará entre individuos y especies en función de su estado fisiológico y condiciones ambientales, de modo que cambios en su tamaño podrían reflejar variaciones en procesos de activación trombocitaria asociados con la hemostasia y la respuesta inmunitaria.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la existencia de diferencias en la ovalidad y el volumen de las células sanguíneas entre aves de las familias (Passerellidae y Parulidae), especies e individuos, y determinar en qué medida estas variaciones morfométricas se asocian al estatus de residencia (migratorio vs residente), el sitio (bosque de mayor altitud vs urbano de menor altitud), la condición corporal (índice de masa escalado), el sexo y la edad de los individuos.

Objetivos específicos

- Comparar las métricas (ovalidad y volumen) de las células sanguíneas entre las familias especies e individuos.
- Determinar la contribución e importancia de las variables intrínsecas y extrínsecas en el volumen de los eritrocitos, leucocitos y trombocitos.

Métodos

Células sanguíneas estudiadas

En el presente estudio se analizaron cinco tipos celulares sanguíneos presentes en aves silvestres, de los cuales tres corresponden a los leucocitos más abundantes (heterófilos, basófilos, y linfocitos), además de eritrocitos y trombocitos. Los leucocitos son células nucleadas del sistema inmunológico que participan en la defensa del organismo mediante mecanismos como la fagocitosis, la producción de anticuerpos y la modulación de la inflamación (Abbas et al., 2024; Murphy y Weaver, 2017). Los heterófilos, equivalentes aviares de los neutrófilos, son fagocíticos y representan la primera línea de defensa contra patógenos (Maxwell y Robertson, 1998); los basófilos intervienen en reacciones inflamatorias y de hipersensibilidad, aunque su función específica en aves aún no está del todo clara (Karasuyama et al., 2009; Claver y Quaglia, 2009). Por su parte, los linfocitos participan en la inmunidad adaptativa mediante la producción de anticuerpos y la destrucción de células infectadas (Campbell, 1995; Gálvez-Martínez et al., 2009). Los

eritrocitos son células nucleadas responsables del transporte de oxígeno, que también han mostrado participar en respuestas inmunes innatas (Hawkey y Samour, 1988; Passantino et al., 2007). Los trombocitos, análogos aviares de las plaquetas, cumplen funciones hemostáticas, fagocíticas y de señalización inmune (Claver, 2005; Fiorello et al., 2009). El estudio y análisis de estas células busca ofrecer un panorama integral de los componentes celulares de la sangre en aves de las familias Passerellidae y Parulidae.

Selección de muestras

Se seleccionaron frotis sanguíneos correspondientes a 56 individuos, de los cuales 40 corresponden a la Familia Parulidae y 16 a la familia Passerellidae. Su análisis incluyó:

- Determinación de diferencias en ovalidad y volumen de cada una de las celulas estudiadas entre las especies de las familias Passerellidae y Parulidae.
- Evaluación de diferencias en ovalidad y volumen de cada una de las celulas estudiadas entre dos tipos de hábitat (bosque remanente vs. Parque urbano/semiurbano); para este objetivo se utilizaron 40 muestras pertenecientes exclusivamente a individuos de tres especies de Parulidae (*Basileuterus rufifrons*, *Leiothlypis celata* y *Setophaga coronata*). Se analizaron cinco individuos de las especies *Basileuterus rufifrons* y *Setophaga coronata* por sitio, y para el caso de *Leiothlypis celata* se analizaron 10 individuos por sitio, abarcando dos localidades contrastantes: Tlalpujahua (bosque remanente) y Morelia (Parque urbano/semiurbano).
- Análisis de la variación en ovalidad y volumen de cada una de las celulas en función del estatus migratorio; se utilizaron las 56 muestras, clasificadas en 35 individuos migratorios y 21 residentes.
- Análisis de variación del ovalidad y volumen de cada una de las celulas en función edad y sexo; para el análisis por edad, se trabajó con una submuestra de 20 individuos de *Leiothlypis celata*, diferenciados en 9 adultos y 11 juveniles; el análisis por sexo se realizó con 13 individuos de la misma especie, de los cuales 5 fueron machos y 8 hembras.

- Evaluación de la relación entre condición corporal, ovalidad y volumen de cada una de las celulas que se llevó a cabo con el total de las 56 muestras.

Medición de células

En la revisión de las muestras se realizó la identificación, medida y caracterización de 4,273 células sanguíneas, con la ayuda de un microscopio ZEIGEN VIRTUE-N (objetivo de 100x y aceite de inmersión) y una cámara fotográfica (SWIFTCAM, Microscope digital camera SC1803R, 18 MP ½ "CEMOS SENSOR ULTRA-FINE COLOR ENGINE INSIDE) adaptada a un microscopio mediante el programa Swift Imaging 3.0. y ajustada para la medición de las células. Se midieron el largo y ancho de las células y se determinó su ovalidad (razón entre largo y ancho) de 10 células de cada tipo (heterófilos, linfocitos, basófilos, eocinofilos, monocitos, trombocitos y eritrocitos) por individuo.

Para el caso de los eritrocitos se tomaron las medidas de la célula completa y del núcleo para calcular el valor del citoplasma, de acuerdo con la fórmula propuesta por Peters (1983) y Hawkey y Dennett (1989).

1. Cálculo del volumen total del eritrocito (forma elipsoide)

$$V_{\text{eritrocito}} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\text{longitud}}{2}\right)\left(\frac{\text{ancho}}{2}\right)^2$$

2. Cálculo del volumen del núcleo (misma fórmula, con medidas nucleares)

$$V_{\text{núcleo}} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\text{longitud}_n}{2}\right)\left(\frac{\text{ancho}_n}{2}\right)^2$$

3. Determinación del volumen citoplasmático

$$V\text{citoplasma} = V\text{eritrocito} - V\text{nucleo}$$

Para el caso de los heterófilos, basófilos, linfocitos y trombocitos no se calculó el citoplasma y solo se usó la medida (largo y ancho) de la célula completa.

Análisis estadístico

Análisis descriptivo de la morfometría celular

Se analizaron métricas morfométricas de ovalidad y volumen en ocho tipos y componentes celulares: eritrocitos, núcleo del eritrocito, heterófilos, linfocitos, basófilos, eosinófilos, monocitos y trombocitos. El individuo se consideró como la unidad experimental, dado que se obtuvieron múltiples mediciones celulares por organismo. Para cada tipo celular y métrica se calcularon estadísticos descriptivos por especie y por familia, incluyendo media, error estándar y rango mínimo–máximo, con el fin de caracterizar la variabilidad morfométrica observada.

Análisis comparativo entre especies y familias

Para evaluar diferencias en la morfometría celular entre especies y entre familias (*Passerellidae* y *Parulidae*), se realizaron análisis de varianza de una vía (ANOVA) de forma independiente para cada tipo celular y para cada variable morfométrica (volumen u ovalidad). Se aplicaron dos enfoques analíticos: (i) comparación entre especies y (ii) comparación entre familias. En los casos en que los ANOVA resultaron significativos ($\alpha = 0.05$), se llevaron a cabo comparaciones múltiples post hoc mediante la prueba de Tukey (HSD) para identificar los grupos con diferencias estadísticas. Los supuestos de normalidad de los residuales y homogeneidad de varianzas se verificaron mediante las pruebas de Shapiro–Wilk y Bartlett, respectivamente. Los resultados se reportaron en cuadros que presentan la media ± error estándar y el rango mínimo–máximo, así como los estadísticos F y los valores de p asociados a cada análisis, indicando mediante letras superíndices los grupos estadísticamente diferenciados.

Variabilidad celular por individuo

Para evaluar la variabilidad intraespecífica del volumen celular a nivel individual, se realizaron análisis independientes por especie para cada tipo celular. El volumen celular fue analizado utilizando como unidad experimental al individuo, considerando múltiples mediciones celulares independientes. Cuando el ANOVA resultó significativo ($p < 0.05$), se realizaron comparaciones post hoc mediante la prueba de Tukey HSD, con el fin de identificar diferencias específicas entre individuos (Apendice 1). Los resultados se presentaron en gráficas de barras donde cada barra representa la media del volumen celular por individuo (± EE). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticamente homogéneos derivados del análisis post hoc de Tukey, mientras que el valor de p del ANOVA se muestra en cada panel para facilitar la interpretación de la variabilidad intraespecífica.

Análisis de correlación entre variables dependientes

Para este estudio se consideraron dos tipos de variables explicativas. Las variables intrínsecas corresponden a características propias de los individuos e incluyen sexo, edad y condición corporal. Las variables extrínsecas corresponden a factores ecológicos o taxonómicos y comprenden la familia taxonómica, el estatus de residencia (migratoria o residente) y el sitio de muestreo. Para determinar la contribución e importancia de cada una de ellas en la morfometría de las células sanguíneas de Passerellidae y Parulidae, inicialmente se realizó un análisis de correlación entre las variables largo, ancho, ovalidad y volumen para cada tipo celular (eritrocito, trombocito, heterófilos, basófilo y linfocito), para identificar y eliminar variables explicativas (o predictoras) con alta covarianza o multicolinealidad; la información de ovalidad y volumen fueron las variables explicativas más imporantes, por lo que se decidió trabajar exclusivamente con estas dos variables dependientes.

GLMs (Modelos lineales generalizado mixto gaussiano)

Para evaluar la contribución relativa de variables intrínsecas y extrínsecas sobre la morfometría de las células sanguíneas (ovalidad y volumen) en aves de las familias

Passerellidae y Parulidae, se ajustaron modelos lineales generalizados mixtos (GLMMs) con distribución gaussiana y función de enlace identidad en el programa R v. 4.x (R Core Team, 2024). El análisis se estructuró en tres conjuntos independientes de variables fijas, definidos según la disponibilidad de datos: (1) para el análisis taxonómico, se consideríó el índice de masa escalado (IME) y estatus de residencia, incluyendo todos los individuos (n = 56); los modelos ajustados fueron ocho; (2) para el análisis de sitio, se tomó en cuenta el IME y especie, restringiendo la información a los individuos de la familia Parulidae (n = 40); los modelos candidatos considerados fueron ocho; y (3) para el análisis de edad y sexo, únicamente se evaluó la especie *Leiothlypis celata* (n = 15); los modelos ajustados fueron cinco (Anexos 1 y 2).

Para cada conjunto se ajustaron modelos candidatos que incluyeron combinaciones simples y aditivas de las variables fijas, así como un modelo nulo, siguiendo un enfoque multimodelo. Los análisis se realizaron de manera independiente para cada tipo celular (eritrocitos, heterófilos, basófilos, linfocitos y trombocitos) y para cada variable de respuesta (ovalidad y volumen); en total se realizaron 278 análisis utilizando el paquete lme4 en R versión 4.x (R Core Team, 2024). La selección del mejor modelo se basó en el criterio de información de Akaike corregido para tamaños de muestra pequeños (AICc), considerando como modelos competitivos aquellos con $\Delta AICc \leq 2$; se reportaron los pesos de Akaike (wi) como medida de soporte relativo (Burnham y Anderson, 2002). A partir del modelo mejor soportado se obtuvieron las estimaciones de los efectos fijos, las varianzas de los efectos aleatorios y los coeficientes de determinación marginal y condicional (R^2m y R^2c), los cuales permiten cuantificar la proporción de varianza explicada por los efectos fijos y por el modelo completo, respectivamente (Nakagawa y Schielzeth, 2013). La visualización de los efectos predichos se realizó mediante el paquete ggeffects (Lüdecke, 2018; R Core Team, 2024), generando gráficas con intervalos de confianza al 95%.

Este procedimiento permitió identificar la importancia de los factores ecológicos y fisiológicos que mejor explican la variación de las variables de respuesta en la comunidad de aves estudiada, así como comparar su magnitud relativa mediante el enfoque multimodelo; sólo se graficaron los factores más relevantes.

Resultados

Ovalidad celular

La ovalidad de las células sanguíneas mostró variación significativa entre especies para varios tipos celulares. En particular, se detectaron diferencias interespecíficas en la ovalidad de los eritrocitos (ANOVA, $F = 3.07$, $p = 0.0235$), núcleo eritrocitario ($F = 6.6$, $p = 0.000297$), linfocitos ($F = 6.23$, $p = 0.000485$), monocitos ($F = 2.92$, $p = 0.0303$) y trombocitos ($F = 10.54$, $p < 0.001$). En contraste, no se observaron diferencias significativas intraespecíficas en la ovalidad de heterófilos, basófilos ni eosinófilos ($p > 0.05$) (Cuadro 2.1).

Entre las especies de la familia *Parulidae*, algunas presentaron valores de ovalidad significativamente mayores en el núcleo eritrocitario y linfocitos, mientras que las especies de *Passerellidae* mostraron mayor variabilidad en la ovalidad de monocitos y trombocitos (Cuadro 2.1).

A nivel de familia, no se detectaron diferencias significativas en la ovalidad para la mayoría de los tipos celulares ($p > 0.05$), con excepción de los linfocitos, en los que se observó una diferencia significativa ($F = 4.8$, $p = 0.0356$) (Cuadro 2.1)

Cuadro 2.1: Valores de ovalidad de las células sanguíneas en especies de Passerellidae y Parulidae (promedios por individuo ± error estándar y rangos mínimos–máximo entre paréntesis). Las diferencias significativas entre especies y familias se determinaron mediante ANOVA de una vía y pruebas post hoc de Tukey ($p < 0.05$).

	Eritrocito	Núcleo eritrocito	Heterófilo	Linfocito	Basófilo	Eosinófilo	Monocito	Trombocito
Parulidae	1.92±0.01 (1.73-2.06)	2.15±0.02 (1.97-2.37)	1.19±0.02 (0.94-2.53)	1.16±0.00 (1.08-1.55)	1.20±0.01 (0.78-1.92)	1.16±0.01 (1.05-1.32)	1.33 ±0.01 (1.52-1.2)	1.3±0.03 (1.14-1.69)
Basileuterus rufifrons	1.84±0.04 (1.73-2.01)	2.07±0.03 (2.00-2.19)	1.15±0.025 (1.00-1.99)	1.14±0.01 (1.00-1.43)	1.22±0.14 (0.92-1.92)	1.16±0.04 (1.07-1.32)	1.34±0.043 (1.44-1.24)	1.18±0.01 (1.14-1.23)
Leiothlypis celata	1.94±0.01 (1.84-2.01)	2.19±0.03 (1.97-2.37)	1.22±0.035 (0.94-2.53)	1.15±0.01 (1.00-1.55)	1.20±0.021 (0.78-1.86)	1.14±0.01 (1.05-1.26)	1.30±0.021 (1.39-1.20)	1.42±0.04 (1.27-1.69)
Setophaga coronata	1.98±0.06 (1.89-2.06)	2.17±0.02 (2.09-2.24)	1.18±0.024 (1.01-1.80)	1.19± 0.01 (1.00-1.49)	1.18±0.21 (1-1.59)	1.18±0.03 (1.09-1.28)	1.39±0.048 (1.52-1.29)	1.2±0.02 (1.14-1.26)
Passerellidae	1.88 ±0.02 (1.69-2.13)	2.22±0.08 (1.73-2.8)	1.18 ±0.027 (0.16-2.05)	1.22 ±0.30 (1.01-1.56)	1.22±0.018 (0.97-1.78)	1.22±0.04 (1.06-1.41)	1.43±0.0688 (1.81-1.04)	1.27±0.04 (1.06-1.62)
Melospiza lincolnii	1.89±0.00 (1.87-1.92)	2.53±0.11 (2.16-2.80)	1.26 ±0.049 (1.00-2.05)	1.19 ±0.01 (1.01-1.58)	1.18±0.018 (1-1.78)	1.28±0.121 (1.1-1.41)	1.38±0.07 (1.65-1.28)	1.49±0.06 (1.27-1.62)
Atlapetes pileatus	1.92±0.05 (1.83-2.13)	2.21±0.06 (2.05-2.40)	1.13±0.034 (1.00-1.49)	1.15±0.01 (1.01-1.55)	1.26±0.036 (1.01-1.71)	1.1±0.015 (1.06-1.15)	1.31±0.133 (1.81-1.04)	1.17±0.04 (1.06-1.32)
Junco phaeonotus	1.82±0.03 (1.69-+1.93)	1.97±0.10 (1.73-2.39)	1.14±0.033 (0.16-1.48)	1.33±0.06 (1.01-1.72)	1.21±0.33 (0.97-1.7)	1.22±0.03 (1.3-1.30)	1.64±0.109 (1.79-1.32)	1.16±0.03 (1.08-1.27)
COMPARATIVOS ESPECIE								
F	3.07	6.6	1.86	6.23	1.24	2.61	2.92	10.54
p	0.0235	0.000297	0.132	0.000485	0.316	0.0659	0.0303	0.00000774
COMPARATIVOS FAMILIA								
F	2.61	0.74	0.27	4.8	0.99	2.15	2.41	0.31
p	0.115	0.395	0.606	0.0356	0.328	0.152	0.13	0.581

Volumen celular

El volumen celular presentó diferencias significativas entre especies en la mayoría de los tipos celulares evaluados (Cuadro 2.2). Se encontraron diferencias interespecíficas en el volumen de eritrocitos ($F = 7.38$, $p < 0.001$), núcleo eritrocitario ($F = 26.61$, $p < 0.001$), citoplasma ($F = 6.78$, $p < 0.001$), heterófilos ($F = 4.33$, $p = 0.0046$), basófilos ($F = 4.89$, $p=0.0023$), eosinófilos ($F = 8.69$, $p < 0.001$) y monocitos ($F = 3.06$, $p = 0.025$). En contraste, el volumen de los linfocitos y trombocitos no mostró diferencias significativas entre especies ($p > 0.05$).

Las comparaciones post hoc revelaron que algunas especies de Parulidae presentaron volúmenes celulares mayores en eritrocitos, heterófilos y eosinófilos, mientras que en Passerellidae se observaron valores elevados y rangos amplios en el volumen de trombocitos y monocitos, indicando una mayor variabilidad intraespecífica (Cuadro 2.2).

A nivel de familia, únicamente el volumen de los trombocitos mostró diferencias significativas entre Parulidae y Passerellidae ($F = 6.3$, $p = 0.017$). Para el resto de los tipos celulares, no se detectaron diferencias significativas entre familias ($p > 0.05$) (Cuadro 2.2).

Variabilidad individual en la ovalidad celular

Se evaluó la variación intraespecífica en la ovalidad de distintos tipos celulares mediante ANOVA por especie y comparaciones post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$). En conjunto, se detectaron diferencias significativas entre individuos en varias especies; no obstante, el patrón fue dependiente del tipo celular (Figs 2.1 a 2.8).

En eritrocitos, la ovalidad difirió significativamente entre individuos en *Atlapetes pileatus* (ANOVA, $p = 0.000781$), *Junco phaeonotus* ($p = 0.00794$), *Leiothlypis celata* ($p = 0.000176$), *Setophaga coronata* ($p < 0.001$) y *Basileuterus rufifrons* ($p < 0.001$) (Fig. 2.1). En contraste, *Melospiza lincolnii* no mostró variación intraespecífica detectable ($p = 0.897$; Fig. 2.1). En las especies con ANOVA significativo, las comparaciones de Tukey separaron a los individuos en dos o más grupos estadísticos, lo que indica heterogeneidad intraespecífica en la ovalidad eritrocitaria (Fig. 2.1).

La ovalidad del núcleo de eritrocitos presentó variación intraespecífica significativa en las seis especies (Fig. 2.2): *Atlapetes pileatus* ($p = 0.022$), *Junco phaeonotus* ($p < 0.001$), *Melospiza lincolnii* ($p < 0.001$), *Leiothlypis celata* ($p < 0.001$), *Setophaga coronata* ($p = 0.00027$) y *Basileuterus rufifrons* ($p = 0.000478$). En todos los casos, la prueba de Tukey distinguió múltiples grupos entre individuos, lo que sugiere que la ovalidad nuclear fue un rasgo consistentemente variable a escala intraespecífica (Fig. 2.2).

En heterófilos, se observaron diferencias significativas entre individuos en *Atlapetes pileatus* ($p = 0.00978$), *Leiothlypis celata* ($p < 0.001$) y *Basileuterus rufifrons* ($p = 0.000275$) (Fig. 2.3), mientras que en *Junco phaeonotus* ($p = 0.0858$), *Melospiza lincolnii* ($p = 0.0792$) y *Setophaga coronata* ($p = 0.203$) no se detectaron diferencias intraespecíficas. En las especies con $p < 0.05$, Tukey evidenció agrupamientos diferenciados entre individuos (Fig. 2.3).

La ovalidad de linfocitos fue en general, consistente entre individuos (Fig. 2.4). No se registraron diferencias intraespecíficas significativas en *Atlapetes pileatus* ($p = 0.619$), *Junco phaeonotus* ($p = 0.116$), *Melospiza lincolnii* ($p = 0.573$), *Setophaga coronata* ($p = 0.198$) ni *Basileuterus rufifrons* ($p = 0.469$). En *Leiothlypis celata* se detectaron diferencias significativas ($p = 0.00563$), aunque de baja magnitud y concentradas en comparaciones puntuales. En conjunto, estos resultados indican que la ovalidad de linfocitos tiende a presentar menor variación intraespecífica que otros tipos celulares evaluados (Fig. 2.4).

En basófilos, la variación intraespecífica fue significativa únicamente en *Leiothlypis celata* ($p < 0.001$) y *Setophaga coronata* ($p = 0.0487$) (Fig. 2.5). En las demás especies no se detectaron diferencias entre individuos (*Atlapetes pileatus*, $p = 0.141$; *Junco phaeonotus*, $p = 0.0772$; *Melospiza lincolnii*, $p = 0.0626$; *Basileuterus rufifrons*, $p = 0.0931$). En *Setophaga coronata* el efecto fue cercano al umbral de significancia, mientras que en *Leiothlypis celata* la separación de grupos por Tukey fue más marcada (Fig. 2.5).

En eosinófilos, la ovalidad difirió entre individuos en *Melospiza lincolnii* ($p = 0.0259$), *Leiothlypis celata* ($p = 0.00206$) y *Basileuterus rufifrons* ($p < 0.001$) (Fig. 2.6). En *Atlapetes pileatus* no se detectaron diferencias ($p = 0.267$) y en *Junco phaeonotus* el efecto no fue significativo ($p = 0.0754$). En *Setophaga coronata* se observó una tendencia no significativa ($p = 0.0682$) (Fig. 2.6).

Cuadro 2.2: Valores de volumen de las células sanguíneas en especies de *Passerellidae* y *Parulidae* (promedios por individuo ± error estándar y rangos mínimos–máximo entre paréntesis). Las diferencias significativas entre especies y familias se determinaron mediante ANOVA de una vía y pruebas post hoc de Tukey ($p < 0.05$).

	Eritrocito	Núcleo eritrocito	Citoplasma	Heterófilo	Linfocito	Basófilo	Eosinófilo	Monocito	Trombocito
Parulidae	228 ± 6.99 (344–138)	18.3±0.57 (28-12)	209± 6.62 (317-126)	305 ± 18.9 (463-166)	156±9.77 (234-99)	106±5.23 (158-67)	240±16.3 (376-147)	243 ± 11.5 (380-172)	25.5±0.78 (33-17)
Basileuterus rufifrons	273 ± 16.0 (426-149)	22.1±0.71 (58-14)	251.0 ± 15.4 (398-129)	231.6 ± 29.9 (314-166)	136±9.95 (163-109)	94.3 ± 8.97 (113-68)	172±8.92 (200-147)	215 ± 17.7 (280-180)	28.1 ± 1.5 (33-25)
Leiothlypis celata	207 ± 6.63 (336-117)	16.2± 024 (29-8)	190.0 ± 6.43 (321-103)	347.6 ± 18.6 (461–247)	164±14.7 (234-103)	114 ± 8.01 (158-78)	299±16.8 (376-230)	257 ± 11.2 (319-201)	25.7±0.7 (29-22)
Setophaga coronata	222 ± 7.30 (308-143)	18.5± 0.4 (28-7)	203.0 ± 7.15 (284-124)	294.8 ± 44.9 (463-195)	162 ±24.6 (233-99)	103 ± 9.22 (129-73)	189±14 (237-153)	244 ± 36.7 (380-172)	22.4±1.73 (26-17)
Passerellidae	247 ± 9.36 (339–201)	19.1±1.05 (28-12)	228± 8.72 (318-186)	261 ± 21.1 (381-131)	140±8.15 (206-83)	155±12.4 (47-211)	245±36.5 (574-73)	212± 21 (413-97)	31.7±2.69 (61-21)
Melospiza lincolnii	229 ± 11.9 (311-106)	16.1 ± 0.42 (24-11)	213.0 ± 11.3 (287-95)	325.6 ± 26.8 (381-237)	144 ±14.5 (174-109)	114 ± 12.9 (145-70)	300±19.7 (343-250)	196 ± 18.8 (238-133)	32.8±7.35 (61-21)
Atlapetes pileatus	280 ± 17.6 (454-190)	21 ± 0.61 (35–13)	259.0 ± 17.2 (431-167)	259.7 ± 28.7 (312-172)	154 ±14.5 (206-125)	158 ± 22.1 (211- 93)	333±72.5 (574-172)	276 ± 37.2 (413-196)	34.2±3.63 (45-26)
Junco phaeonotus	234 ± 11.4 (431-138)	20±0.93 (46-9)	214.0 ± 9.46 (393-126)	196.1 ± 32.3 (310-131)	122±11.7 (155-83)	73.9 ± 7.85 (96-47)	101±20.8 (183-73)	152 ± 32.4 (228-97)	28.5±1.92 (32-21)
	COMPARATIVOS POR ESPECIE								
F	7.38	26.61	6.78	4.33	0.99	4.89	8.69	3.06	1.9
p	0.00003	p < 0.001	0.00007	0.0046	0.44	0.0023	0.0000399	0.025	0.126
	COMPARATIVOS POR FAMILIA								
F	2.31	0.57	2.37	2.48	1.45	0.54	0.02	1.92	6.3
p	0.134	0.454	0.129	0.125	0.237	0.468	0.891	0.176	0.017

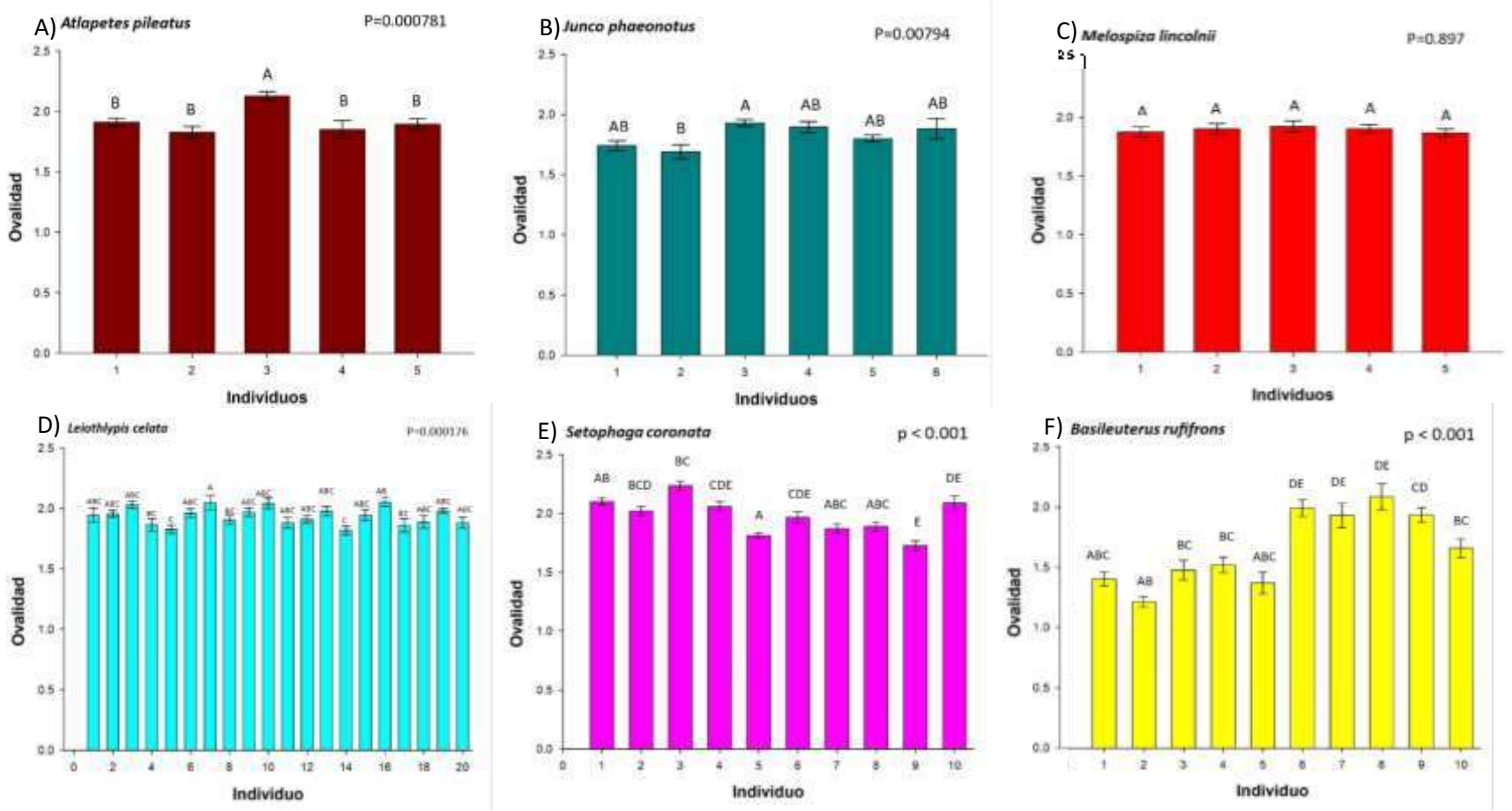


Figura 2.1. Variación individual de la ovalidad de **eritrocitos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticos obtenidos mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre individuos dentro de cada especie. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) intraespecífico.

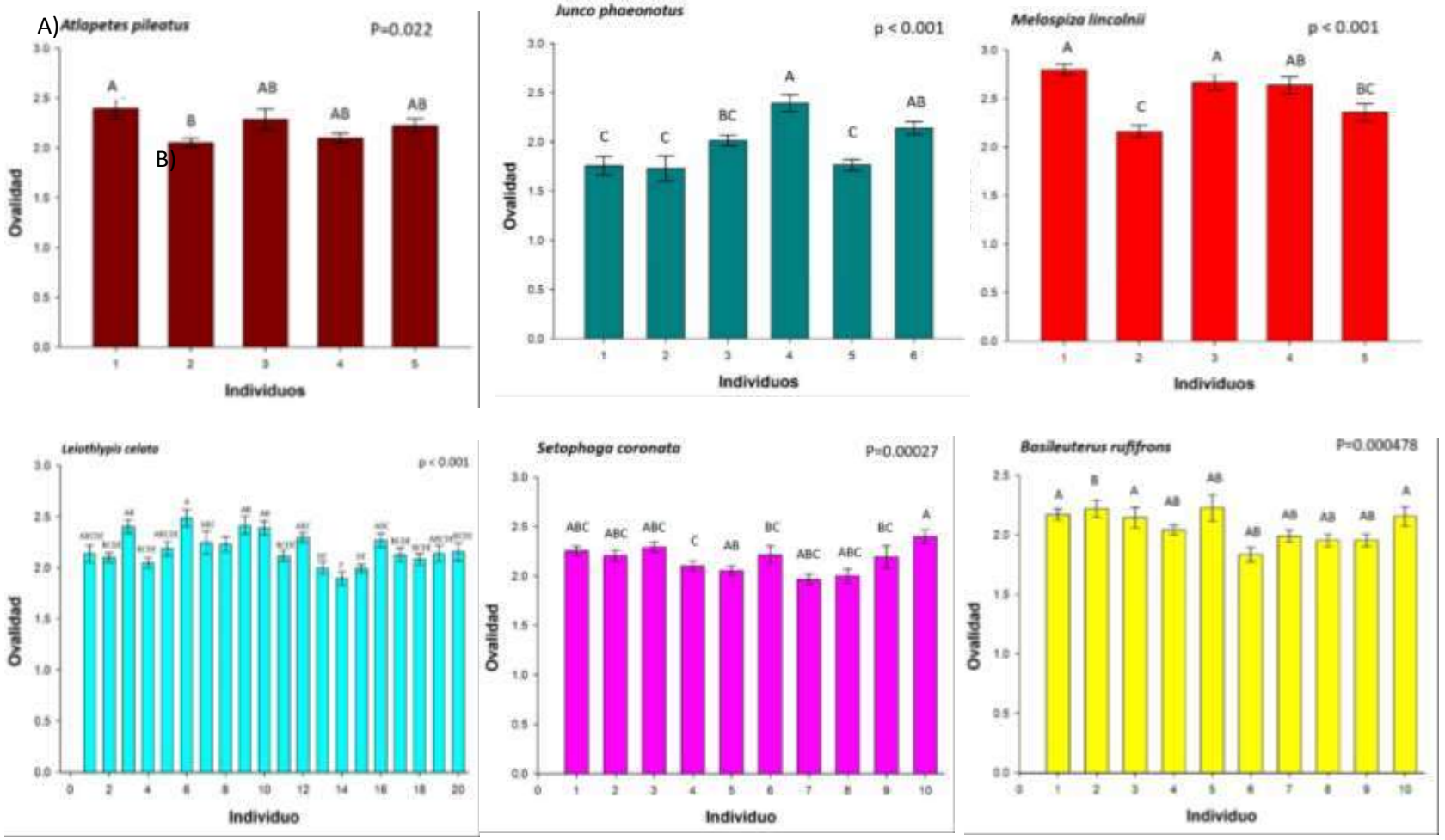


Figura 2.2. Variación individual de la ovalidad del **núcleo** de eritrocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticos obtenidos mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre individuos dentro de cada especie. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) intraespecífico.

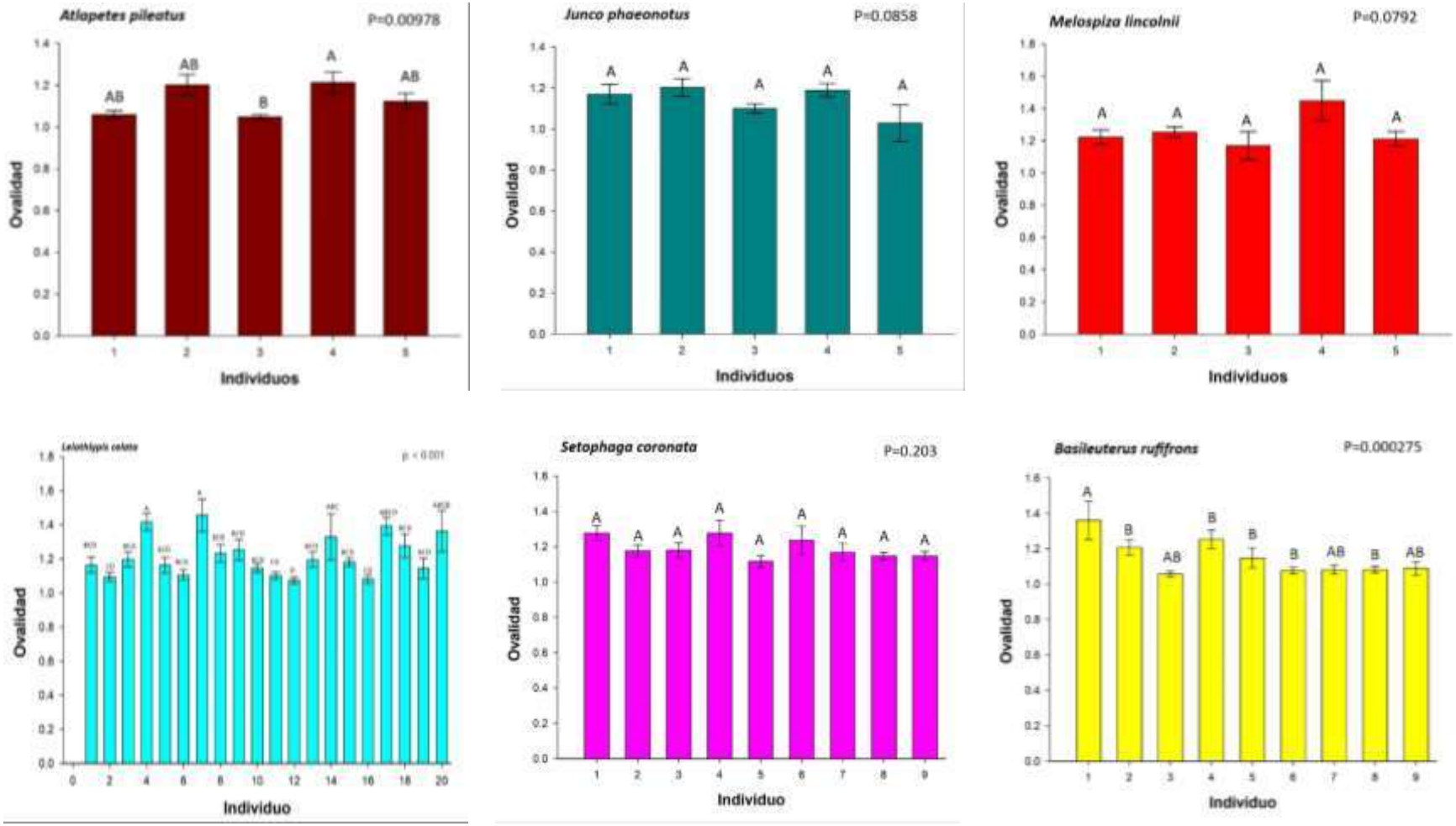


Figura 2.3. Variación individual de la ovalidad de **heterófilos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticos obtenidos mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre individuos dentro de cada especie. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) intraespecífico.

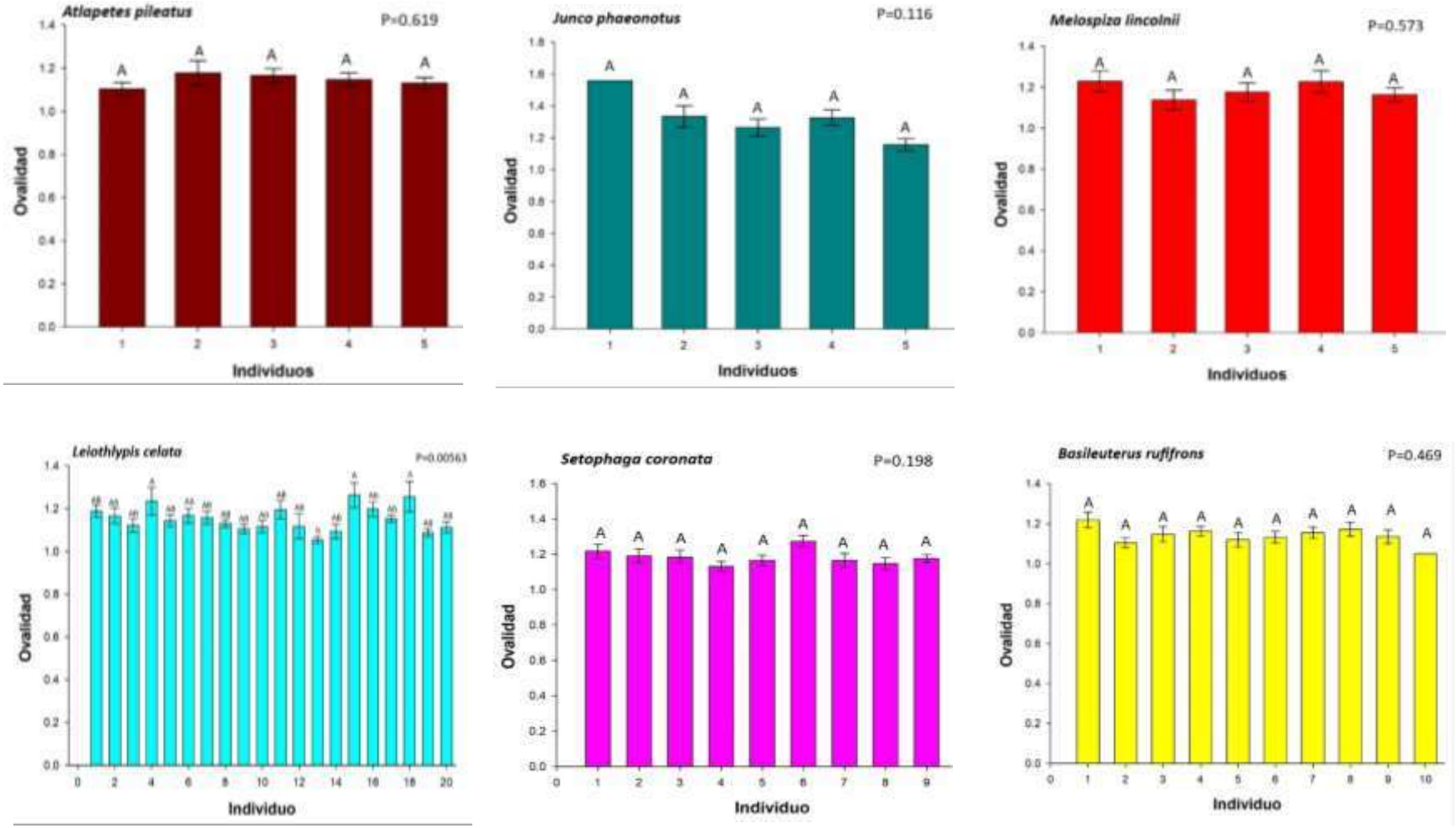


Figura 2.4. Variación individual de la ovalidad de **linfocitos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticos obtenidos mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre individuos dentro de cada especie. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) intraespecífico.

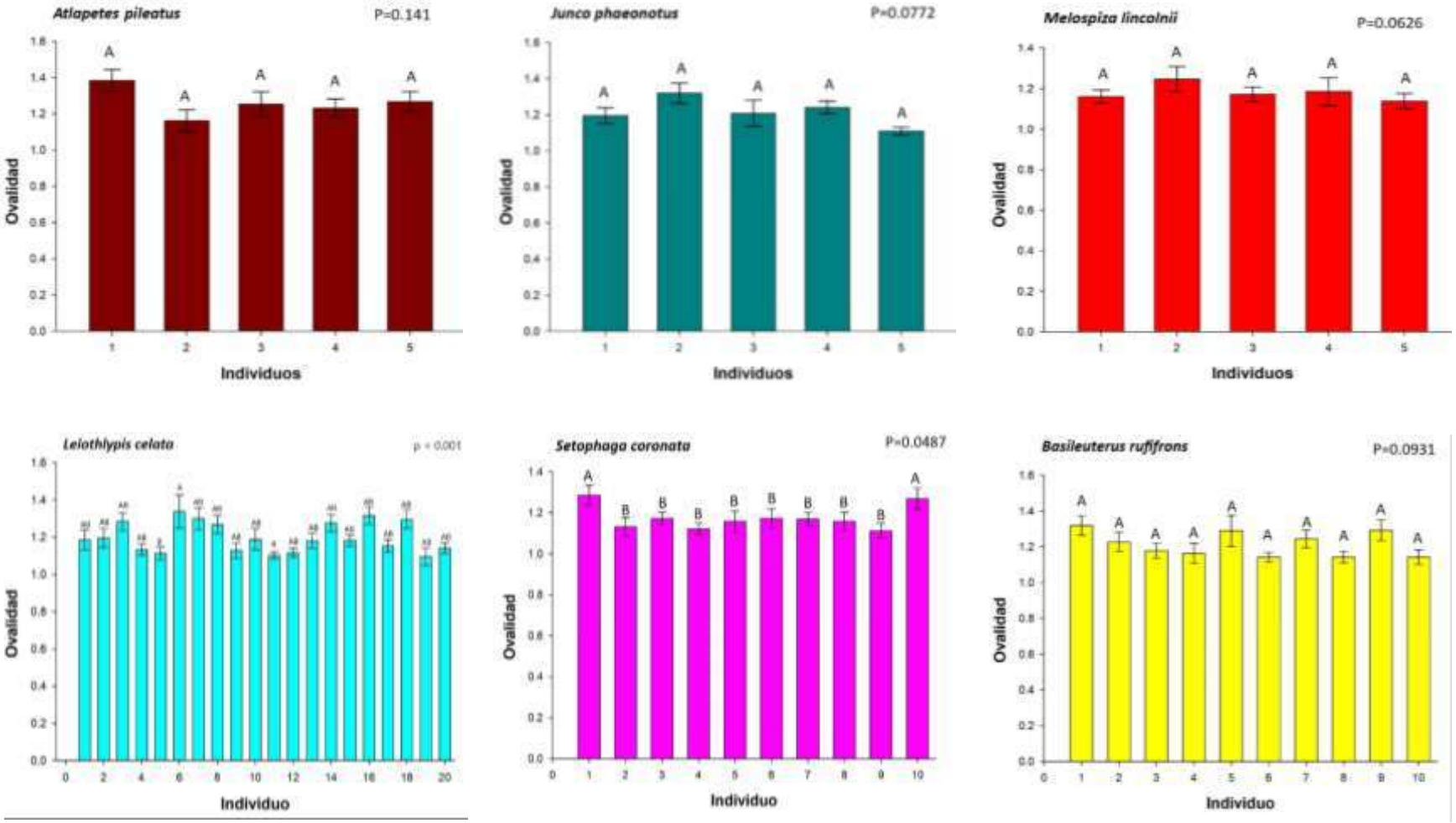


Figura 2.5. Variación individual de la ovalidad de **basófilos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticos obtenidos mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre individuos dentro de cada especie. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) intraespecífico.

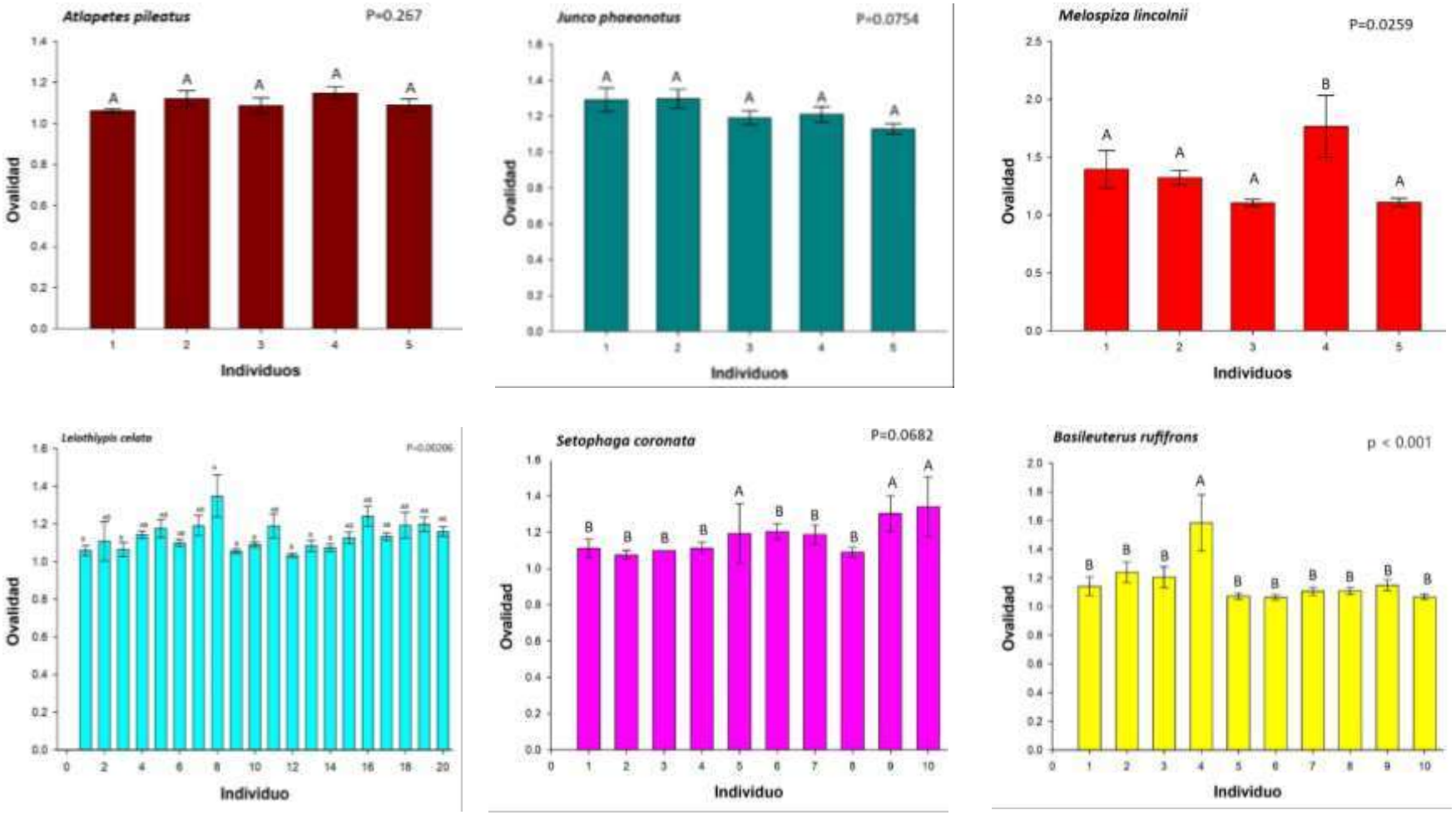


Figura 2.6. Variación individual de la ovalidad de **eosinófilos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticos obtenido mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre individuos dentro de cada especie. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) intraespecífico.

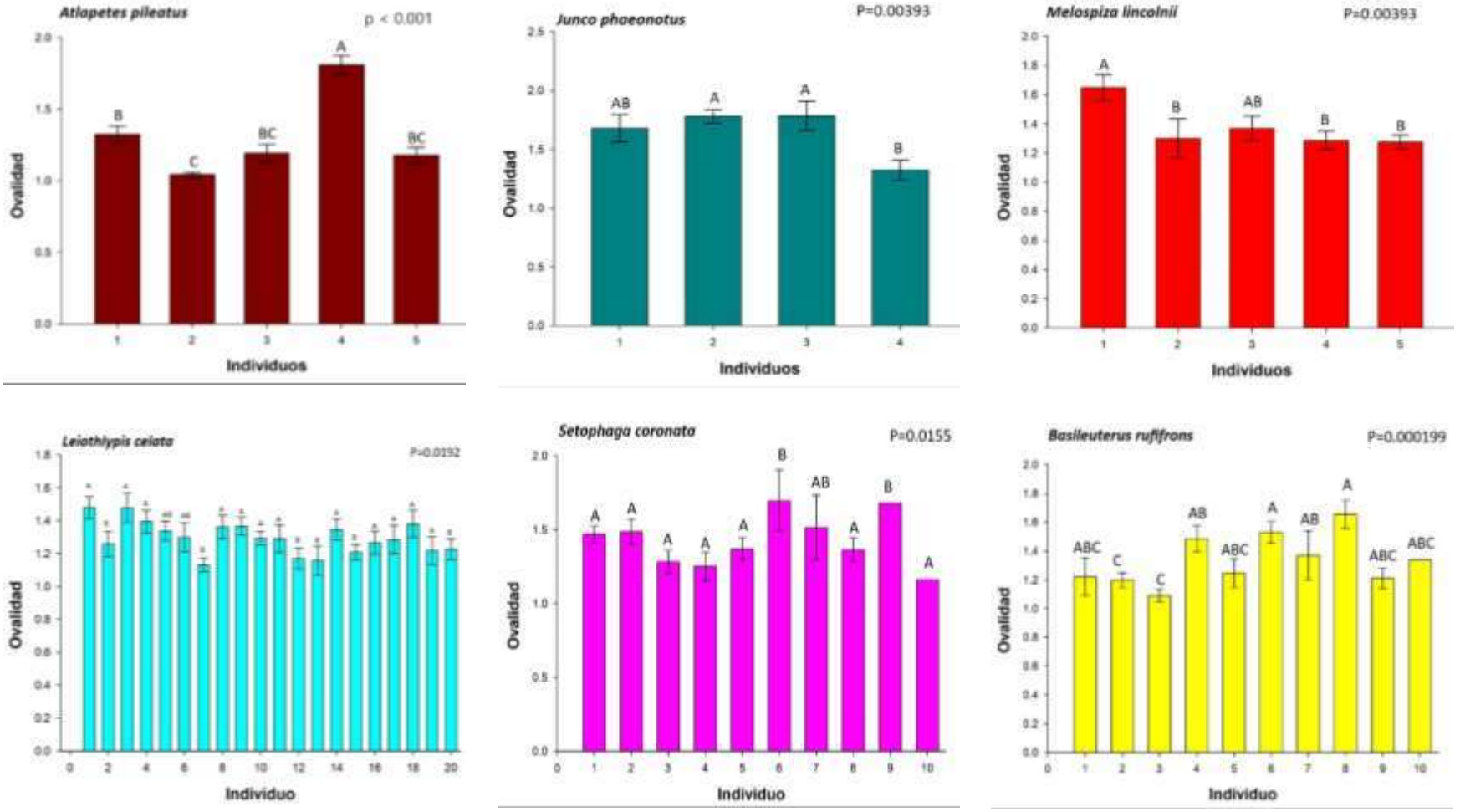


Figura 2.7. Variación individual de la ovalidad de **monocitos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticos obtenidos mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre individuos dentro de cada especie. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) intraespecífico.

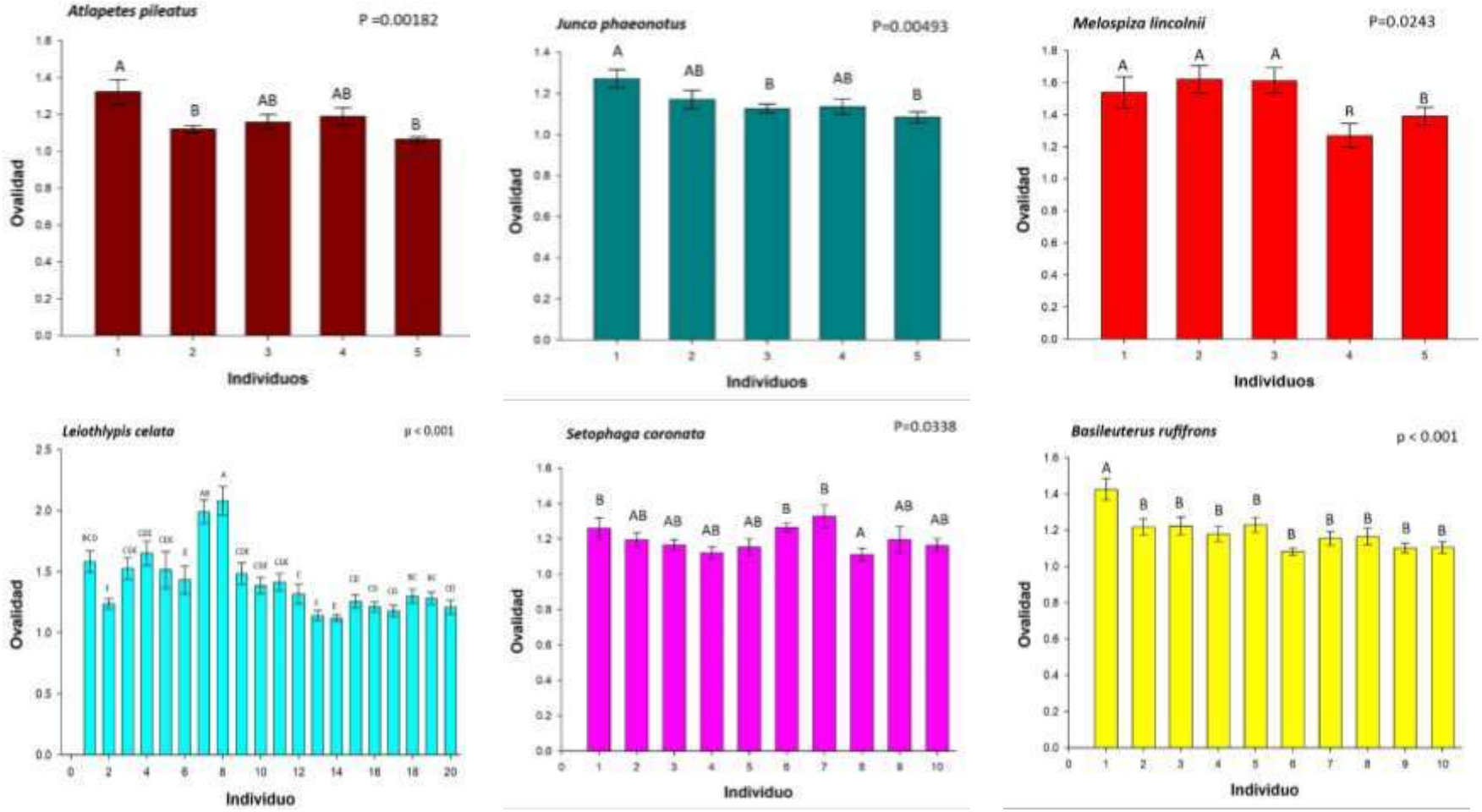


Figura 2.8. Variación individual de la ovalidad de **trombocitos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México (media ± error estándar). Las letras sobre las barras indican los grupos estadísticos obtenidos mediante la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre individuos dentro de cada especie. Los valores de p corresponden al análisis de varianza (ANOVA) intraespecífico.

En monocitos, se registraron diferencias significativas entre individuos en todas las especies (Fig. 2.7): *Atlapetes pileatus* ($p < 0.001$), *Junco phaeonotus* ($p = 0.00393$), *Melospiza lincolnii* ($p = 0.00393$), *Leiothlypis celata* ($p = 0.0192$), *Setophaga coronata* ($p = 0.0155$) y *Basileuterus rufifrons* ($p = 0.000199$). La prueba de Tukey separó a los individuos en dos o más grupos en cada especie, lo que evidencia variación intraespecífica consistente en la ovalidad de monocitos (Fig. 2.7).

Finalmente, la ovalidad de trombocitos presentó variación intraespecífica significativa en las seis especies: *Atlapetes pileatus* ($p = 0.00182$), *Junco phaeonotus* ($p = 0.00493$), *Melospiza lincolnii* ($p = 0.0243$), *Leiothlypis celata* ($p < 0.001$), *Setophaga coronata* ($p = 0.0338$) y *Basileuterus rufifrons* ($p < 0.001$) (Fig. 2.8); en todos los casos, Tukey indicó diferencias entre individuos dentro de cada especie. En conjunto, estos resultados sugieren que la ovalidad trombocitaria presenta variación intraespecífica frecuente en las especies analizadas, similar a la observada para la ovalidad del núcleo eritrocitario (Fig. 2.2) y más marcada que la registrada para linfocitos (Fig. 2.4).

Variabilidad individual del volumen celular

Se evaluó la variación intraespecífica en el volumen celular mediante ANOVA por especie y comparaciones post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$), observándose un patrón general de heterogeneidad individual que dependió del tipo celular (Figs. 2.9 a 2.16).

El volumen de eritrocitos (Fig. 2.9) y el volumen del núcleo de eritrocitos (Fig. 2.10) mostraron diferencias significativas entre individuos en las seis especies evaluadas: *Atlapetes pileatus* (eritrocitos: $p < 0.001$; núcleo: $p = 0.00207$), *Junco phaeonotus* ($p = 0.000241$; $p < 0.001$), *Melospiza lincolnii* ($p = 0.000312$; $p = 0.00207$), *Leiothlypis celata* ($p < 0.001$; $p < 0.001$), *Setophaga coronata* ($p < 0.001$; $p = 0.000571$) y *Basileuterus rufifrons* ($p < 0.001$; $p = 0.000225$); en todos los casos, Tukey distinguió dos o más grupos estadísticos, evidenciando heterogeneidad intraespecífica consistente (Figs. 2.9 y 2.10).

El volumen de heterófilos también difirió significativamente entre individuos en todas las especies: *A. pileatus* ($p = 0.0493$), *J. phaeonotus* ($p = 0.000123$), *M. lincolnii* ($p = 0.000412$), *L. celata* ($p < 0.001$), *S. coronata* ($p < 0.001$) y *B. rufifrons* ($p = 0.00382$) (Fig. 2.11).

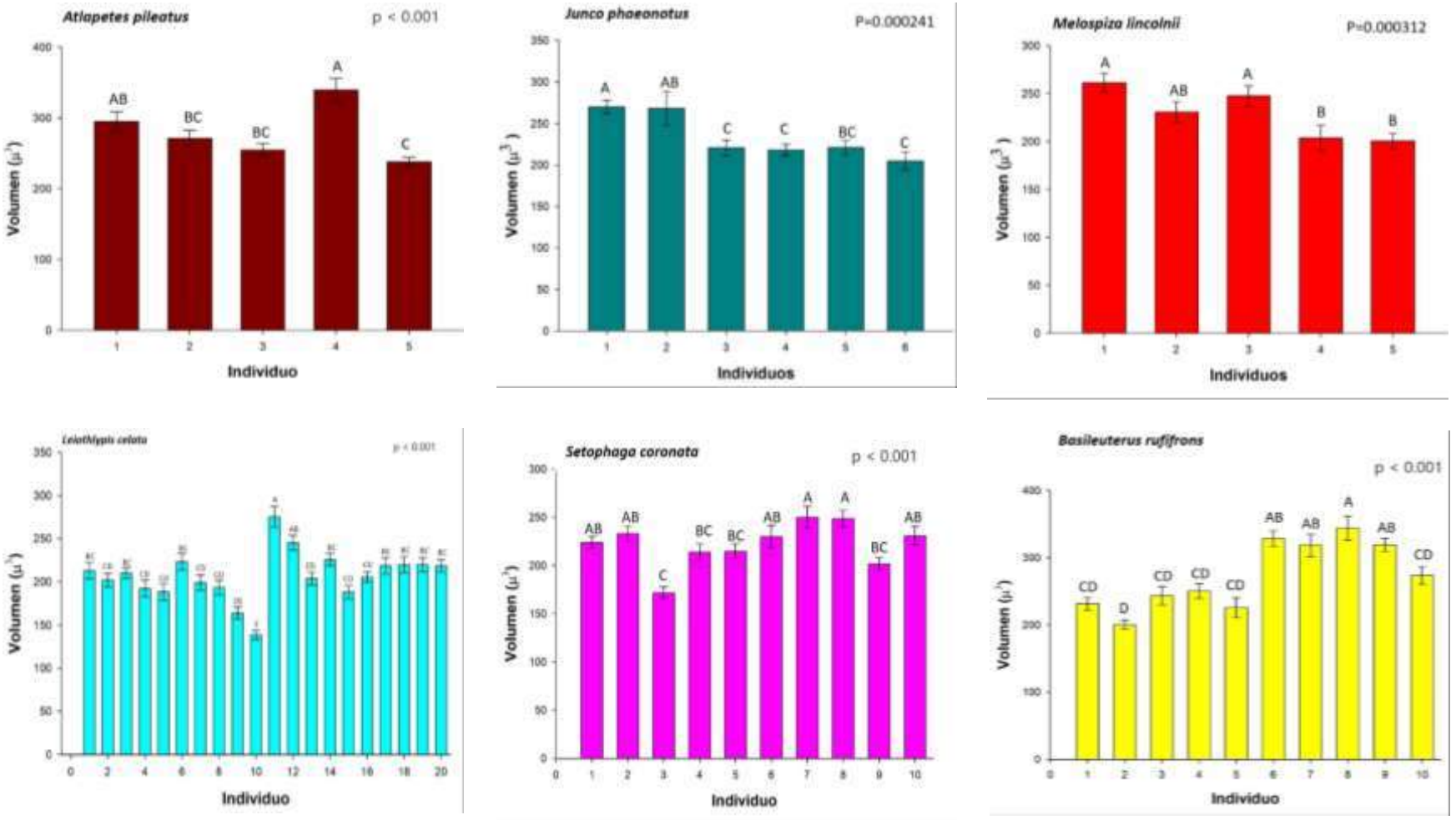


Figura 2.9. Variación individual del volumen de **eritrocitos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México.

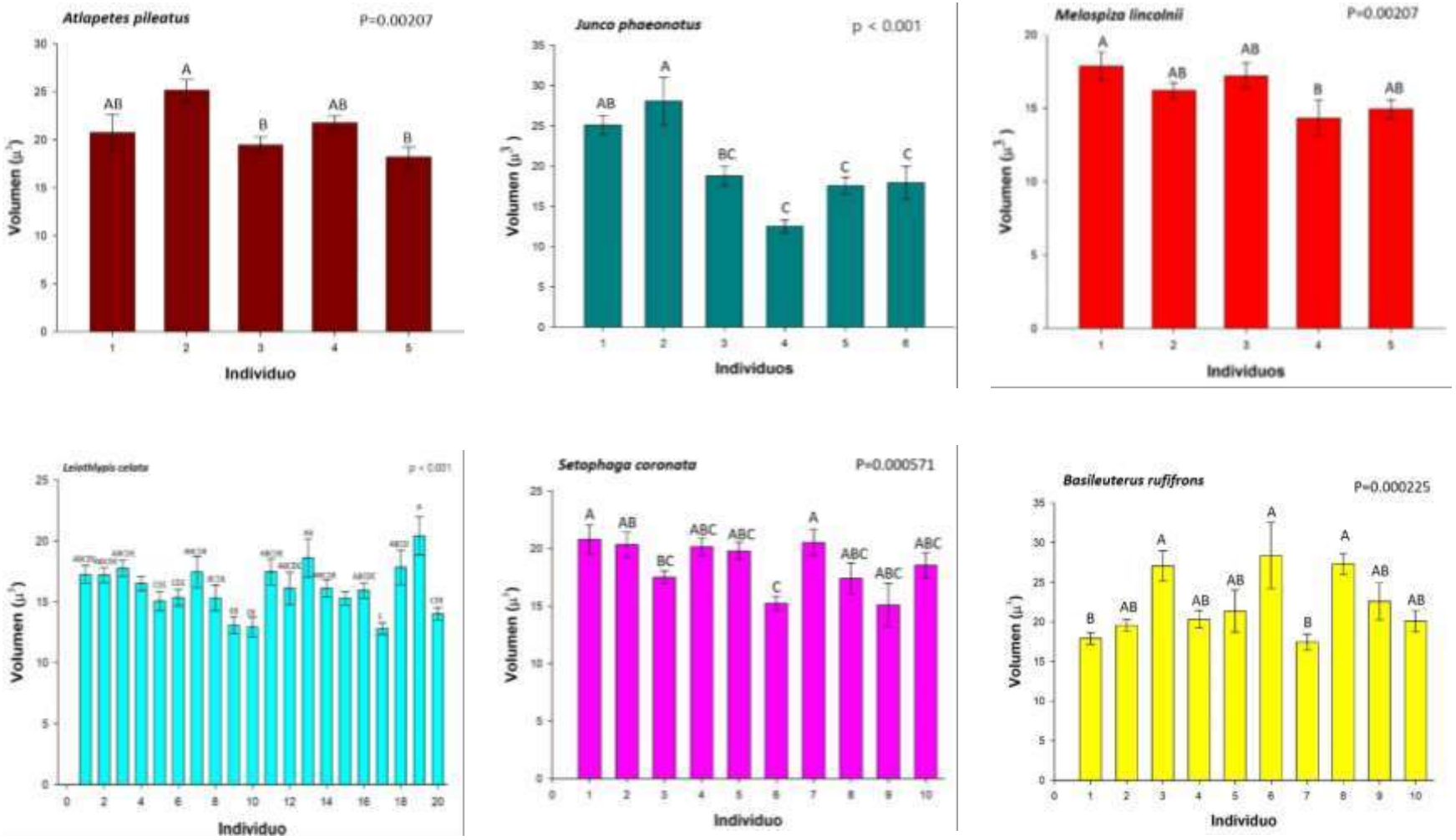


Figura 2.10. Variación individual del volumen del **núcleo** de eritrocitos en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México

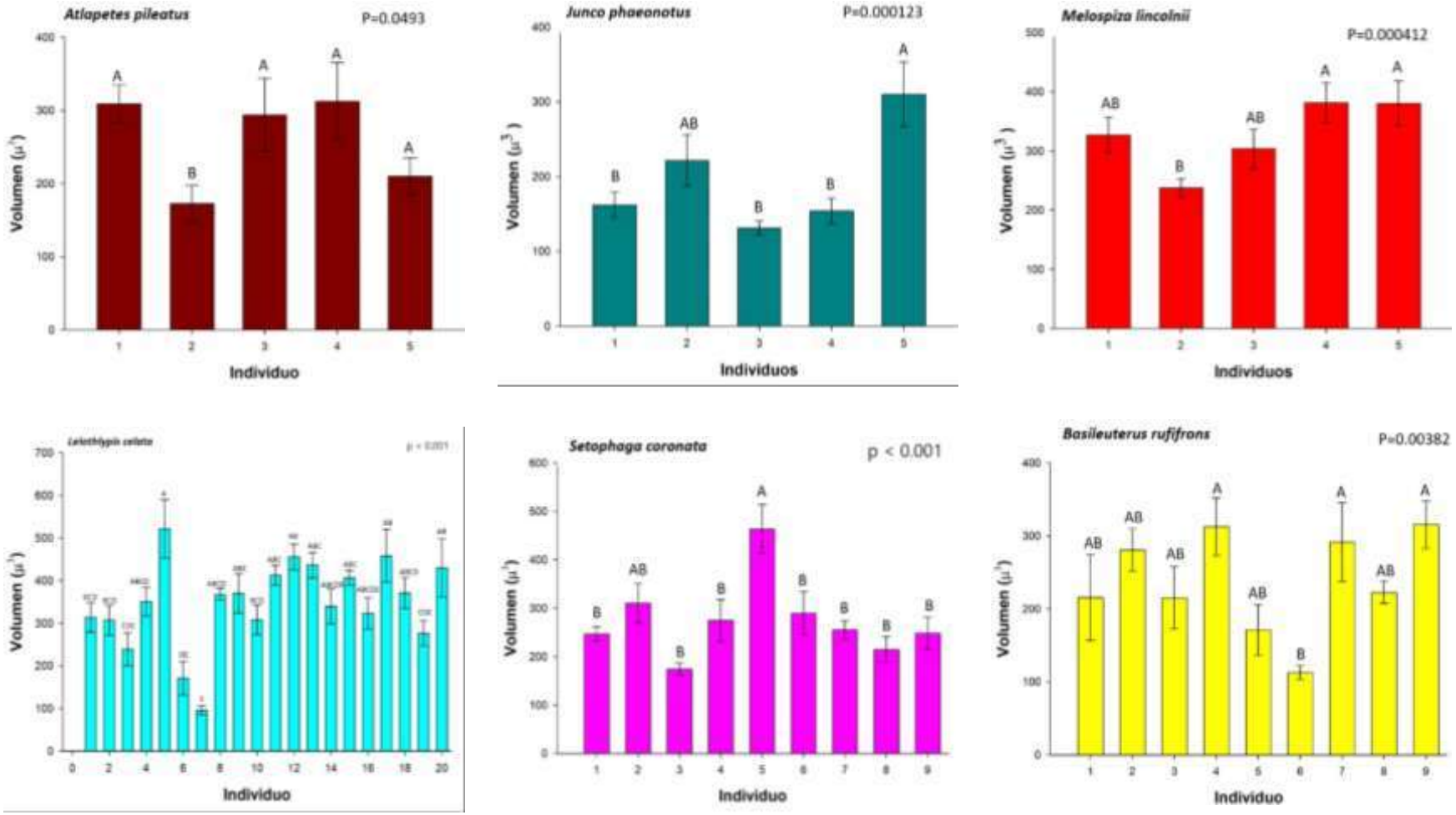


Figura 2.11. Variación individual del volumen de **heterófilos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México

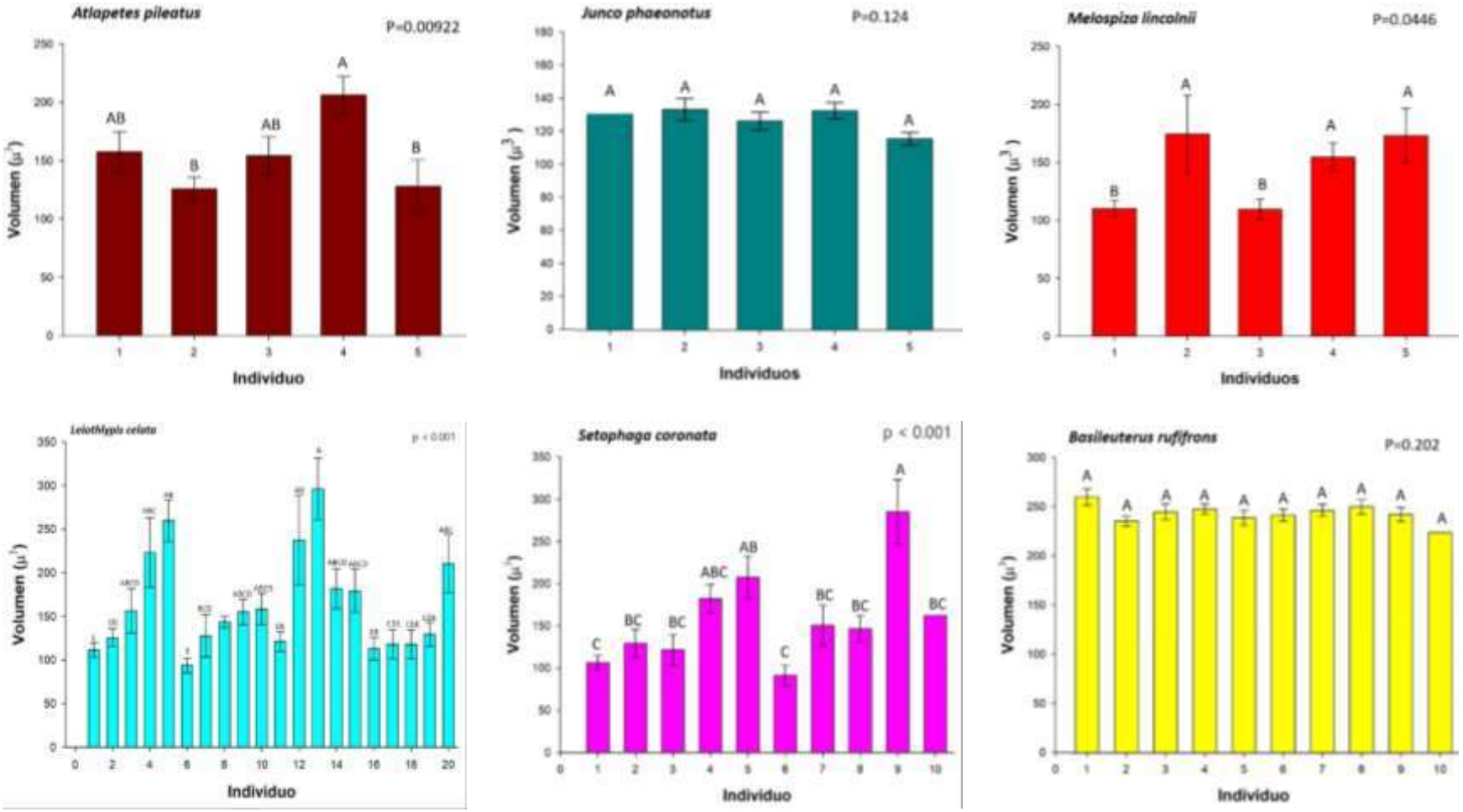


Figura 2.12. Variación individual del volumen de **linfocitos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México

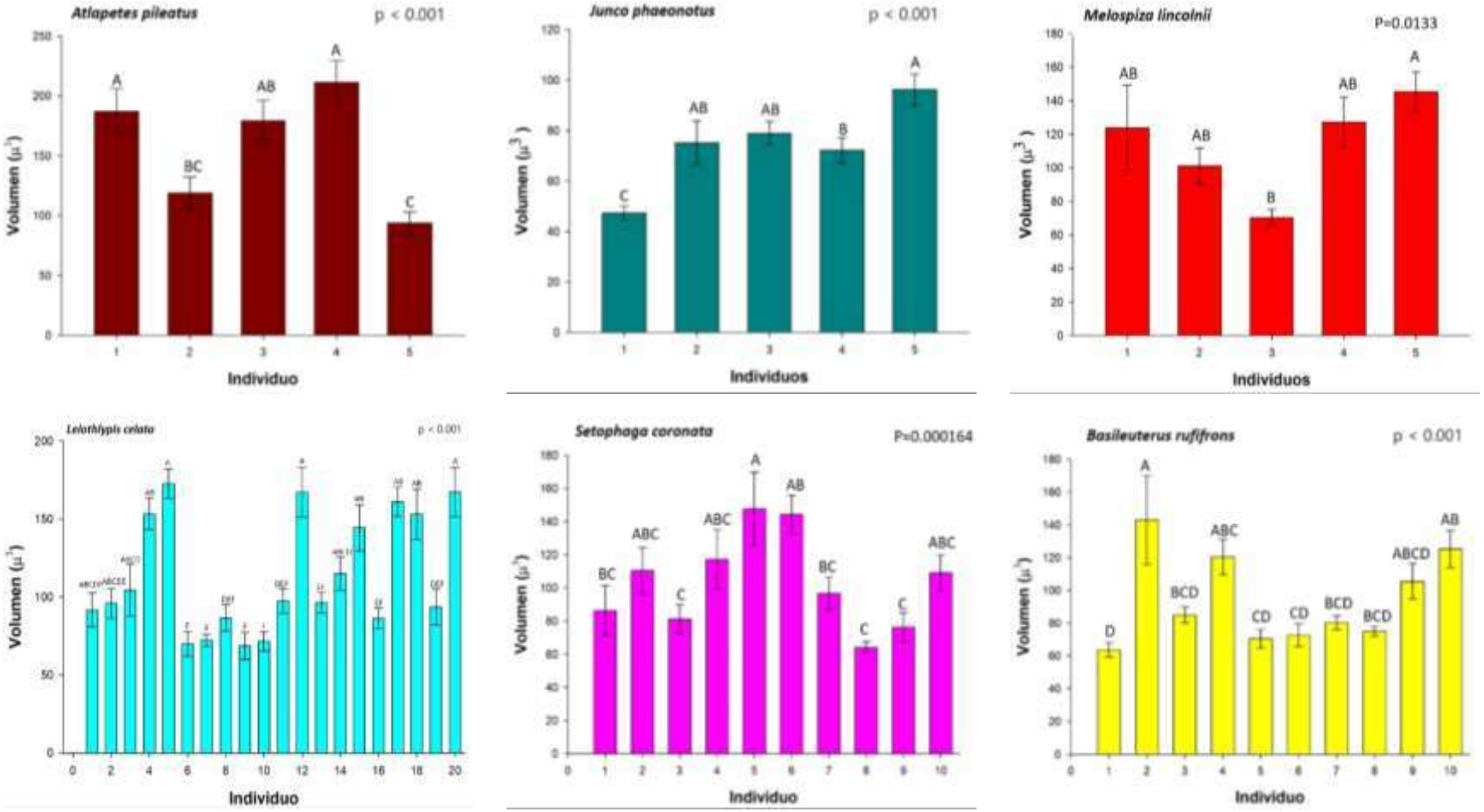


Figura 2.13. Variación individual del volumen de **basófilos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México.

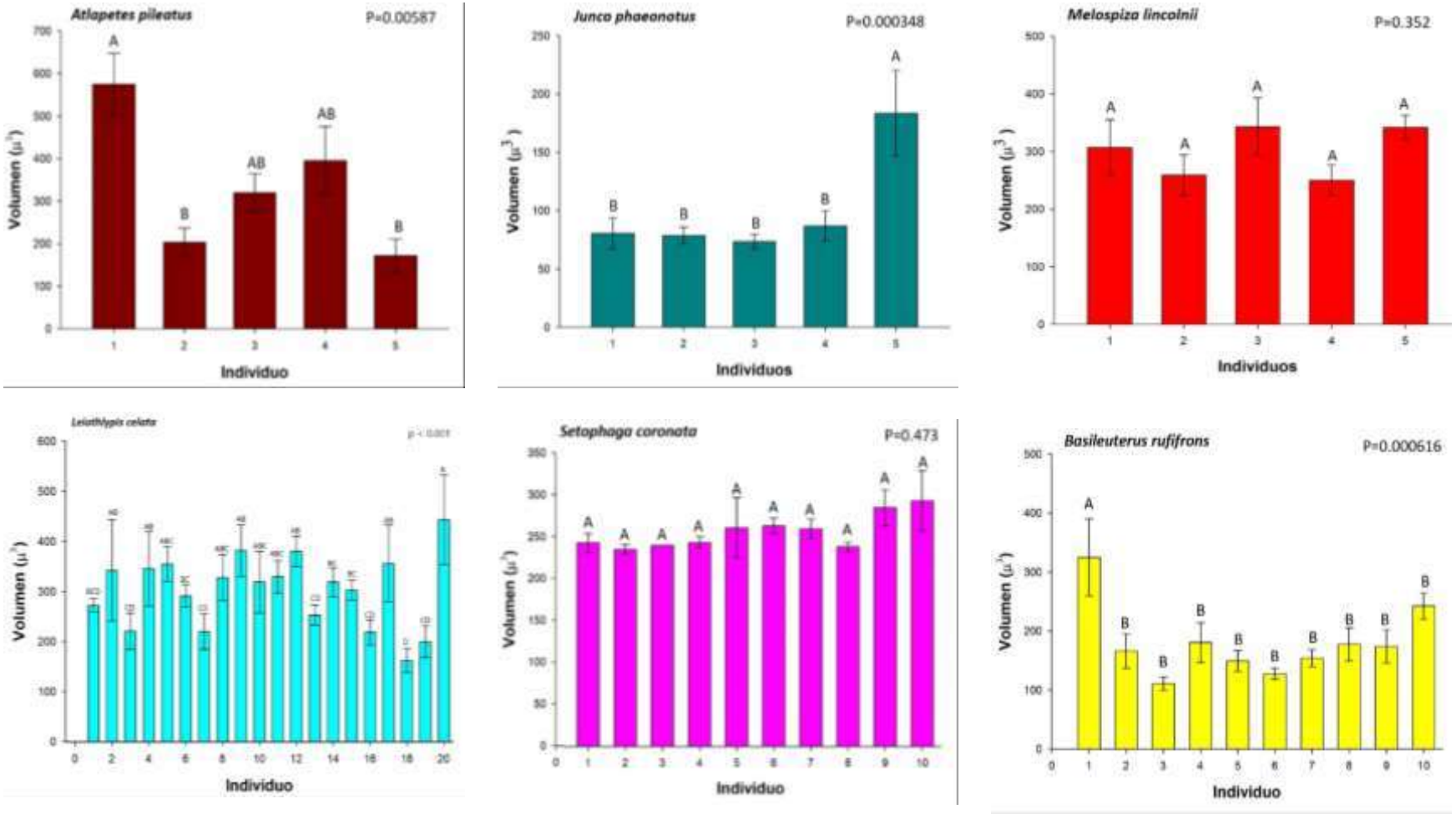


Figura 2.14. Variación individual del volumen de **eosinófilos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México.

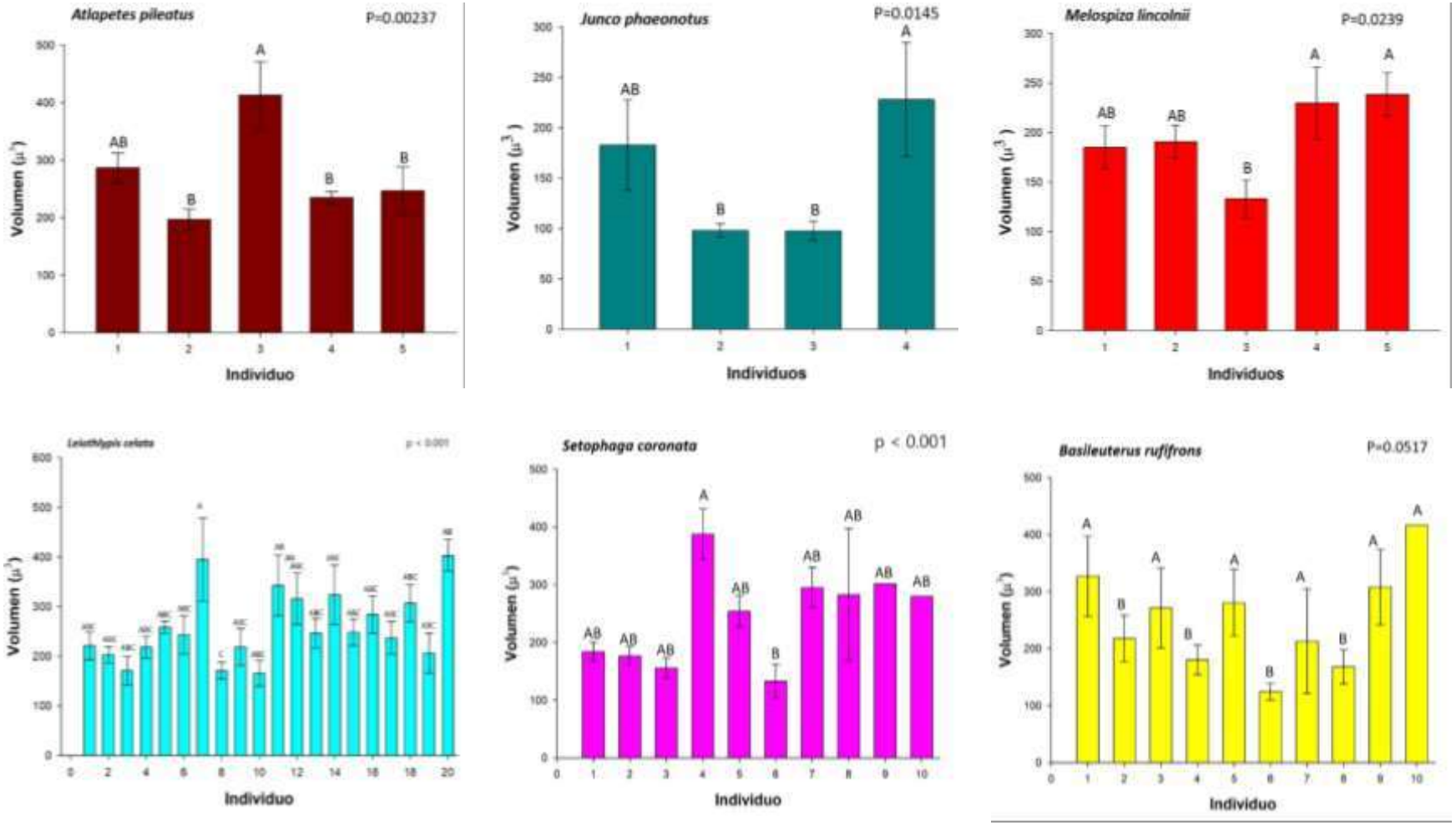


Figura 2.15. Variación individual del volumen de **monocitos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México

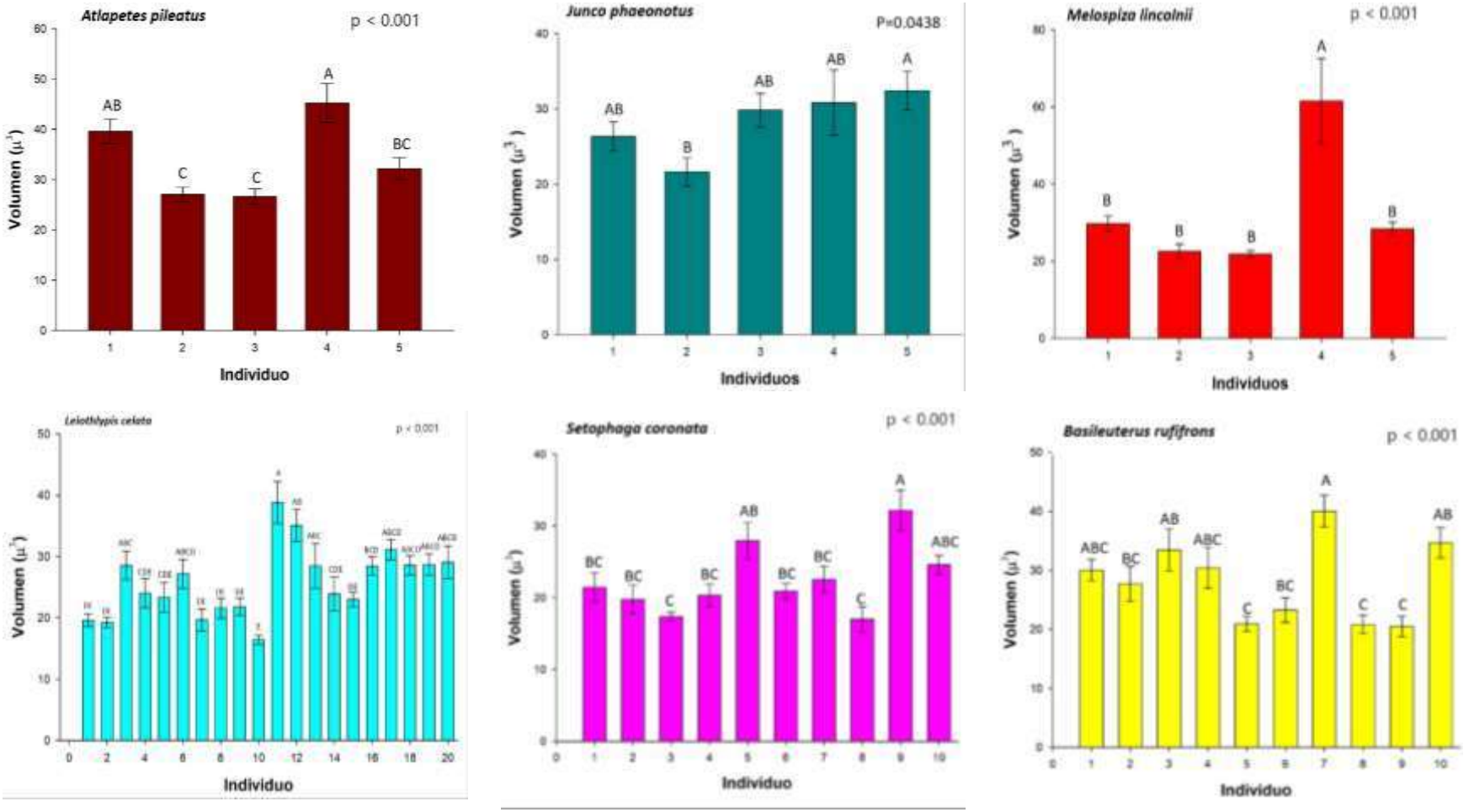


Figura 2.16. Variación individual del volumen de **trombocitos** en especies de Passerellidae (A, B y C) y Parulidae (D, E y F) en el centro de México.

En contraste, el volumen de linfocitos presentó un patrón más dependiente de la especie con diferencias significativas en *A. pileatus* ($p = 0.00922$), *M. lincolnii* ($p = 0.0446$), *L. celata* ($p < 0.001$) y *S. coronata* ($p < 0.001$), pero sin variación detectable en *J. phaeonotus* ($p = 0.124$) ni *B. rufifrons* ($p = 0.202$) (Fig. 2.12).

El volumen de basófilos mostró diferencias significativas entre individuos en todas las especies: *A. pileatus* ($p < 0.001$), *J. phaeonotus* ($p < 0.001$), *M. lincolnii* ($p = 0.0133$), *L. celata* ($p < 0.001$), *S. coronata* ($p = 0.000164$) y *B. rufifrons* ($p < 0.001$) (Fig. 2.13).

Para eosinófilos, la variación intraespecífica fue significativa en *A. pileatus* ($p = 0.00587$), *J. phaeonotus* ($p = 0.000348$), *L. celata* ($p < 0.001$) y *B. rufifrons* ($p = 0.000616$), pero no en *M. lincolnii* ($p = 0.352$), ni *S. coronata* ($p = 0.473$) (Fig. 2.14).

El volumen de monocitos difirió entre individuos en *A. pileatus* ($p = 0.00237$), *J. phaeonotus* ($p = 0.0145$), *M. lincolnii* ($p = 0.0239$), *L. celata* ($p < 0.001$) y *S. coronata* ($p < 0.001$), mientras que en *B. rufifrons* se observó un valor cercano al umbral ($p = 0.0517$) (Fig. 2.15).

Finalmente, el volumen de trombocitos presentó diferencias significativas entre individuos en las seis especies: *A. pileatus* ($p < 0.001$), *J. phaeonotus* ($p = 0.0438$), *M. lincolnii* ($p < 0.001$), *L. celata* ($p < 0.001$), *S. coronata* ($p < 0.001$) y *B. rufifrons* ($p < 0.001$) (Fig. 2.16); en conjunto, los agrupamientos de Tukey respaldan que la variación intraespecífica en volumen es frecuente y particularmente consistente en eritrocitos (y su núcleo), heterófilos, basófilos y trombocitos (Figs. 2.9 a 2.16).

GLMs (Modelos lineales generalizado mixto gaussiano)

Ovalidad

Para el conjunto de variables “familia, índice de masa escalado (IME) y estatus de residencia”, el modelo nulo (m0) fue el mejor para explicar la ovalidad de eritrocitos, heterófilos, basófilos, linfocitos y trombocitos, con altos pesos de Akaike (wi = 0.69–0.87) (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3: Resumen de los modelos lineales generalizados mixtos (GLMMs) más parsimoniosos y mejor soportados para explicar la variación en la ovalidad celular en función de distintos conjuntos de variables fijas [para cada tipo celular, el cuadro incluye el modelo con mayor soporte estadístico (ΔAICc = <2) dentro de cada conjunto de variables fijas evaluadas]: (1) familia taxonómica, índice de masa escaldo (IME) y estatus de residencia; (2) lugar de muestreo, IME y especie; y (3) edad y sexo. Se reporta el tamaño de muestra (n), el número de parámetros estimados (k), el valor del criterio de información de Akaike corregido para tamaños de muestra pequeños (AICc), la diferencia respecto al mejor modelo (ΔAICc) y el peso de Akaike (wi), como medida del soporte relativo del modelo. Los valores en color rojo son los casos en los que el mejor modelo fue el nulo.

CÈLULAS	VARIABLES FIJAS	MEJOR MODELO	n	k	AICc	ΔAIC	wi
Eritrocito	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m0=OVALIDAD~ 1	56	6	-508.5	0	0.769
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m0=OVALIDAD~ 1	40	3	-387	0	0.804
	EDAD Y SEXO	m0=OVALIDAD~ 1	15	3	-211.7	0	0.648
Heteròfilo	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m0=OVALIDAD~ 1	56	6	-252.4	0	0.702
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m0=OVALIDAD~ 1	40	6	-170.8	0	0.801
	EDAD Y SEXO	m0=OVALIDAD~ 1	15	3	-57.8	0	0.613
		m2 =OVALIDAD ~ EDAD	15	3	-55.9	1.95	0.231
Basòfilo	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m0=OVALIDAD~ 1	56	6	-433.6	0	0.856
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m0=OVALIDAD~ 1	40	6	-339.7	0	0.912
	EDAD Y SEXO	m0=OVALIDAD~ 1	15	3	-177.3	0	0.493
Linfocito	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m0=OVALIDAD~ 1	56	6	-620.1	0	0.865
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m1=OVALIDAD~ IME	40	6	-525	0	0.309
		m5=OVALIDAD ~ IME + ESPECIE	40	6	-523.2	1.28	0.163
		m4=OVALIDAD ~ IME + LUGAR	40	6	-523.2	1.8	0.126
		m3= OVALIDAD ~ ESPECIE	40	6	-523.1	1.82	0.125
		m0=OVALIDAD~ 1	40	6	-522	1.91	0.119
	EDAD Y SEXO	m2 =OVALIDAD ~ EDAD	15	4	-248.2	0	0.422
		m0=OVALIDAD~ 1	15	4	-247.5	0.78	0.286
		m4 =OVALIDAD ~ SEXO * EDAD	15	4	-246.4	1.84	0.16
Trombocito	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m0=OVALIDAD~ 1	56	6	-78	0	0.692
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m6=OVALIDAD ~ LUGAR + ESPECIE	40	6	-23.7	0	0.66
		m7=OVALIDAD ~ IME + LUGAR + ESPECIE	40	6	-22.3	1.43	0.326
	EDAD Y SEXO	m0=OVALIDAD~ 1	15	3	87.3	0	0.597
		m2 =OVALIDAD ~ EDAD	15	3	89	1.69	0.256

Para el análisis de “sitio, IME y especie” en la familia *Parulidae*, el modelo nulo fue nuevamente el mejor para eritrocitos, heterófilos y basófilos (wi = 0.80–0.91). En contraste, para los linfocitos, el modelo que incluyó únicamente el efecto del “IME” (m1) presentó el mayor soporte relativo (wi = 0.31), mientras que en trombocitos el mejor modelo incluyó los efectos aditivos de “lugar y especie” (m6; wi = 0.66), indicando variación de la ovalidad asociada a estos factores en dicho tipo celular (Cuadro 2.3).

Con respecto al conjunto de variables “edad y sexo”, evaluado exclusivamente en *Leiothlypis celata*, el modelo nulo fue el mejor modelo para eritrocitos, heterófilos, basófilos y trombocitos (wi = 0.49–0.65). En contraste, para linfocitos, el modelo que incluyó el efecto de “edad” (m2) mostró el mayor soporte (wi = 0.42), indicando diferencias en la ovalidad asociadas a esta variable intrínseca (Cuadro 2.3).

En conjunto, los resultados muestran que la ovalidad celular fue predominantemente explicada por modelos nulos en la mayoría de los tipos celulares y conjuntos de variables analizados, con excepciones específicas en linfocitos y trombocitos, casos en los que las variables relacionadas con la condición corporal, el sitio de muestreo, la especie o la edad contribuyeron a explicar la variación observada.

Volumen

Con base en la selección por AICc (ΔAIC y peso de Akaike, *wi*), el patrón general fue que los predictores (familia–residencia–IME y lugar–especie–IME) explicaron la variación del volumen celular con mayor consistencia que sexo y edad, y que la evidencia para efectos de IME varió entre tipos celulares (Cuadro 2.4).

En general, los resultados mostraron que los modelos con predictores a escala de familia/residencia/IME y lugar/especie/IME fueron los mejor soportados para eritrocitos, citoplasma y heterófilos. Para el caso de linfocitos y basófilos, ninguna de las variables independientes explica su volumen, predominando el modelo nulo, además de que todos los modelos adicionales mostraron un nivel explicativo bastante limitado. En trombocitos, la evidencia se distribuyó entre modelos con familia, lugar/especie y, en el conjunto de edad/sexo, un efecto de edad (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4: Modelos lineales generalizados mixtos (GLMMs) mejor soportados para explicar la variación en el volumen celular en función de distintos conjuntos de variables fijas [para cada tipo celular, el cuadro incluye el modelo con mayor soporte estadístico (ΔAICc = <2) dentro de cada conjunto de variables fijas evaluadas]: (1) familia taxonómica, índice de masa escalado (IME) y estatus de residencia; (2) lugar de muestreo, IME y especie; y (3) edad y sexo. Se reporta el tamaño de muestra (n), el valor del criterio de información de Akaike corregido para tamaños de muestra pequeños (AICc), la diferencia respecto al mejor modelo (ΔAICc) y el peso de Akaike (wi), como medida del soporte relativo del modelo.

CELULAS	VARIABLES FIJAS	MEJOR MODELO	n	AICc	ΔAIC	wi
Eritrocito	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m7= VOLUMEN ~ IME + RESIDENCIA + FAMILIA	56	5935.3	0	1
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m6=VOLUMEN ~ LUGAR + ESPECIE	40	4097.6	0	0.65
		m7= VOLUMEN~ IME + LUGAR + ESPECIE	40	4098.8	1.23	0.35
	EDAD Y SEXO	m0=VOLUMEN~ 1	15	1365.7	0	0.53
Citoplasma	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m7= VOLUMEN ~ IME + RESIDENCIA + FAMILIA	56	5694.031	0	0.952
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m7= VOLUMEN~ IME + LUGAR + ESPECIE	40	4039.516	0	0.95
	EDAD Y SEXO	m0=VOLUMEN~ 1	15	1352.9	0	0.535
Heterofilo	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m2= RESIDENCIA	56	6898.3	0	0.964
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m3= VOLUMEN ~ ESPECIE	40	5004.2	0	0.369
		m6= VOLUMEN ~ LUGAR + ESPECIE	40	5004.6	0.43	0.297
		m5= VOLUMEN~ IME + LUGAR + ESPECIE	40	5006.1	1.88	0.144
	EDAD Y SEXO	m0=VOLUMEN~ 1	15	1811.5	0	0.538
Linfocito	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m0=VOLUMEN~ 1	56	6113.3	0	0.238
		m2= VOLUMEN ~ RESIDENCIA	56	6113.5	0.24	0.211
		m1= VOLUMEN ~ IME	56	6114.1	0.8	0.159
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m0= VOLUMEN ~ 1	40	4416.2	0	0.368
		m2= VOLUMEN ~ LUGAR)	40	4417.5	1.31	0.191
	EDAD Y SEXO	m0= VOLUMEN ~ 1	15	1472.8	0	0.475
Basofilo	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m0= VOLUMEN ~ 1	56	6020	0	0.297
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m0= VOLUMEN ~ 1	40	4323	0	0.3
		m2= VOLUMEN ~ LUGAR)	40	4324	0.93	0.189
	EDAD Y SEXO	m0= VOLUMEN ~ 1	15	1391.5	0	0.512
Trombocito	FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m3= VOLUMEN~ FAMILIA	56	3980.6	0	0.299
		m5=VOLUMEN ~ IME + FAMILIA	55	3981.4	0.85	0.195
	LUGAR, IME Y ESPECIE	m6= VOLUMEN ~ LUGAR + ESPECIE	40	2791.5	0	0.288
		m7= VOLUMEN ~ IME + LUGAR + ESPECIE	40	2791.6	0.06	0.279
	EDAD Y SEXO	m2 = VOLUMEN ~ EDAD	15	889.6	0	0.331

Los modelos para explicar el volumen de eritrocitos y citoplasma (que es parte del mismo eritrocito) fueron los mismos y presentaron un comportamiento similar, por lo que se reportan de forma exclusiva los modelos para explicar el volumen de eritrocitos, mientras que no se realiza ningún tipo de inferencia con respecto a los linfocitos y basófilos.

Volumen eritrocitos

Familia/estatus de residencia/IME

En un primer análisis general para evaluar efecto del volumen en Familia, estatus de residencia e IME, la selección de modelos indicó que el mejor para explicar la variación en el volumen celular fue el que incluyó como predictores al "Índice de masa escalada (IME), familia y estatus de residencia" (modelo m7; AICc = 5935.3, peso de modelo = 1.0) (Cuadro 2.4). Este modelo presentó una diferencia sustancial con respecto al resto de los modelos evaluados (ΔAICc > 18.8). El promedio de modelos reveló efectos consistentes y estadísticamente significativos para el IME, indicando que esta variable constituye el principal predictor del volumen. En efecto, el IME presentó un coeficiente negativo significativo (Estimación = –59.95, SE = 11.84, z = 5.054, p < 0.001), lo que sugiere que un aumento en este índice se asocia con una disminución del volumen celular (Fig. 2.17).

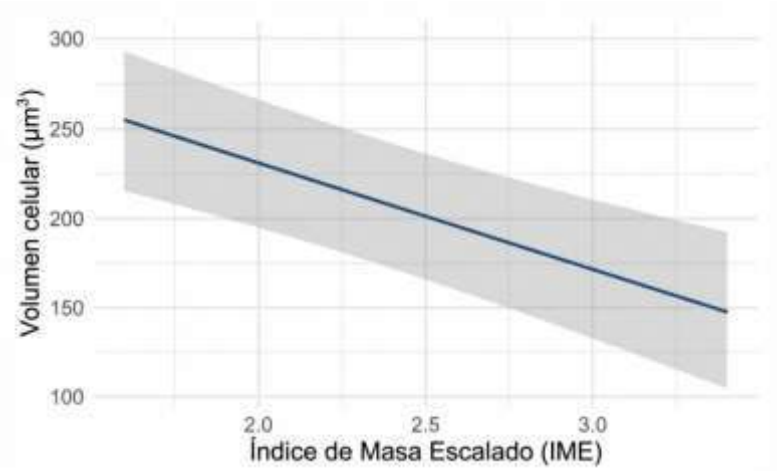


Figura 2.17: Relación entre condición corporal (índice de masa escaldo, IME) y el volumen celular de los eritrocitos en aves de las familias Passerellidae y Parulidae por estatus de residencia (migratorio y residente). Las líneas continuas representan los valores predichos por el modelo lineal generalizado mixto, y las líneas discontinuas indican los rangos mínimo y máximo.

En cuanto a los factores categóricos, la familia Passerellidae mostró un efecto positivo, pero no significativo sobre el volumen (Fig.2.18 A) (Estimación = 37.72, SE = 24.98, z = 1.507, p = 0.1319), lo que indica que, aunque existe una tendencia a presentar volúmenes mayores en comparación con Parulidae, esta diferencia no fue significativa estadísticamente. Por el contrario, el estatus de residencia exhibió un efecto significativo: los individuos residentes presentaron volúmenes celulares mayores que los migratorios (Fig. 2.18 B) (Estimación = 48.59, SE = 23.74, z = 2.042, p = 0.0411).

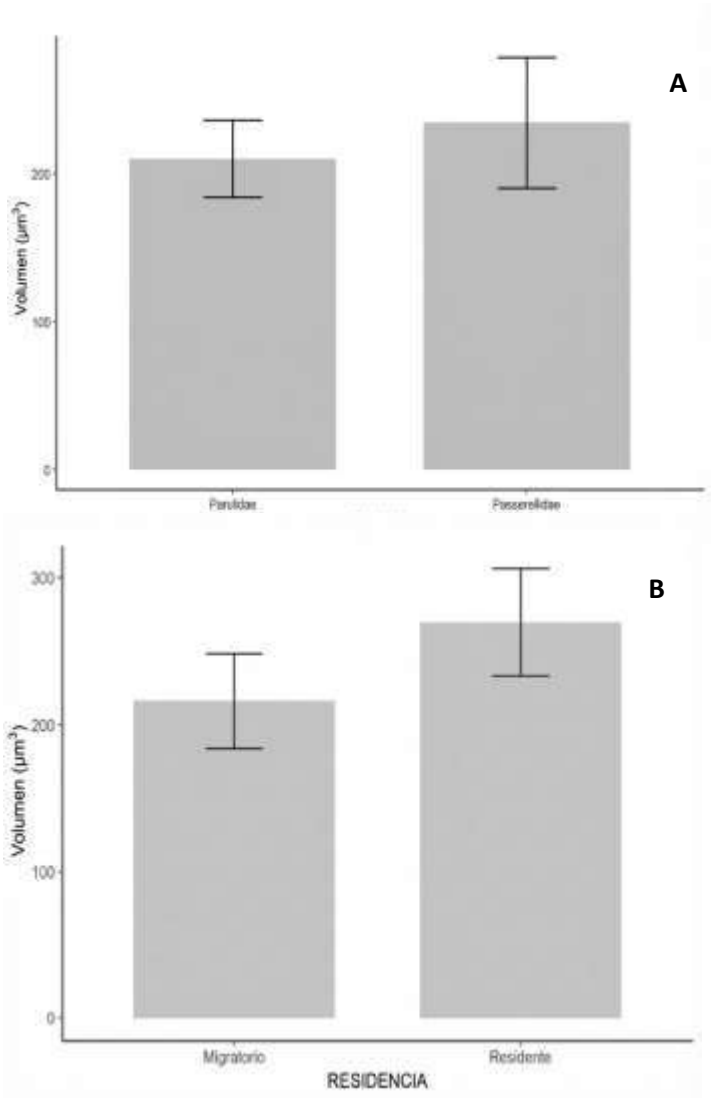


Figura 2.18: Efecto de factores categóricos sobre el volumen de eritrocitos en aves. (A) Comparación del volumen celular entre las familias Parulidae y Passerellidae. (B) Comparación del volumen celular entre individuos migratorios y residentes. Las barras representan el promedio ± intervalo de confianza al 95%.

Sitio/especie/IME

Para las especies de la familia Parulidae, el volumen eritrocitario fue explicado principalmente por el sitio de muestreo y la especie, ya que el modelo 6 (VOLUMEN ~ SITIO + ESPECIE) presentó el mejor ajuste según el criterio de información de Akaike corregido (AICc = 4097.6; wi = 0.65) (Fig.2.19). Sin embargo, el modelo 7, que incorporó adicionalmente el índice de masa corporal (IME), mostró un ajuste muy similar (AICc = 4098.8; wi = 0.35), por lo que ambos modelos se consideran plausibles (ΔAICc < 2) y concentran prácticamente la totalidad del peso de evidencia (Fig. 2.20). En ambos modelos, el sitio Tlalpujahua se asoció con un aumento significativo del volumen eritrocitario respecto Morelia (modelo 6: Estimación = 41.54 ± 7.97, SE = 3.73, t = 5.21, p = 6.11×10^{-6}; modelo 7: Estimación = 40.48 ± 7.97, t = 5.08, p = 9.35×10^{-6}). Dicho de otra manera, el volumen eritrocitario fue significativamente mayor en Tlalpujahua, con un incremento promedio de 41.5 ± 8.0 unidades respecto a Morelia.

Asimismo, las especies *Leiothlypis celata* y *Setophaga coronata* presentaron volúmenes eritrocitarios significativamente menores en comparación con *Basileuterus rufifrons* (modelo 6: Estimado = −66.18 ± 9.77, p = 3.92×10^{-8}; Estimado = −51.52 ± 11.30, p = 4.72×10^{-5}; modelo 7: Estimado = −70.15 ± 10.59, p = 6.35×10^{-8}; Estimado = −49.57 ± 11.38, p = 8.89×10^{-5}) (Fig. 2.19). En contraste, el efecto del IME en el modelo 7 fue negativo, pero no significativo (Estimado = −22.08 ± 24.03, t = −0.92, p = 0.364) (Fig. 2.20), indicando que la condición corporal no contribnuye sustancialmente para explicar del volumen eritrocitario una vez considerados el sitio y la especie. El modelo 6 explicó una proporción relevante de la varianza total ($R^2m = 0.44$; $R^2c = 0.64$), evidenciando la importancia conjunta de los efectos fijos (sitio, especie e IME) y de la variación entre individuos.

Volumen Heterófilos

Familia/residencia /IME

La evaluación del efecto del estatus migratorio, familia e índice de masa corporal (IME) sobre el volumen de los heterófilos mediante modelos lineales mixtos indicó que el modelo que incluye únicamente el estatus migratorio como efecto fijo fue el mejor modelo (peso

AICc = 0.47), y que la inclusión de IME y familia no mejoró sustancialmente el ajuste del modelo.

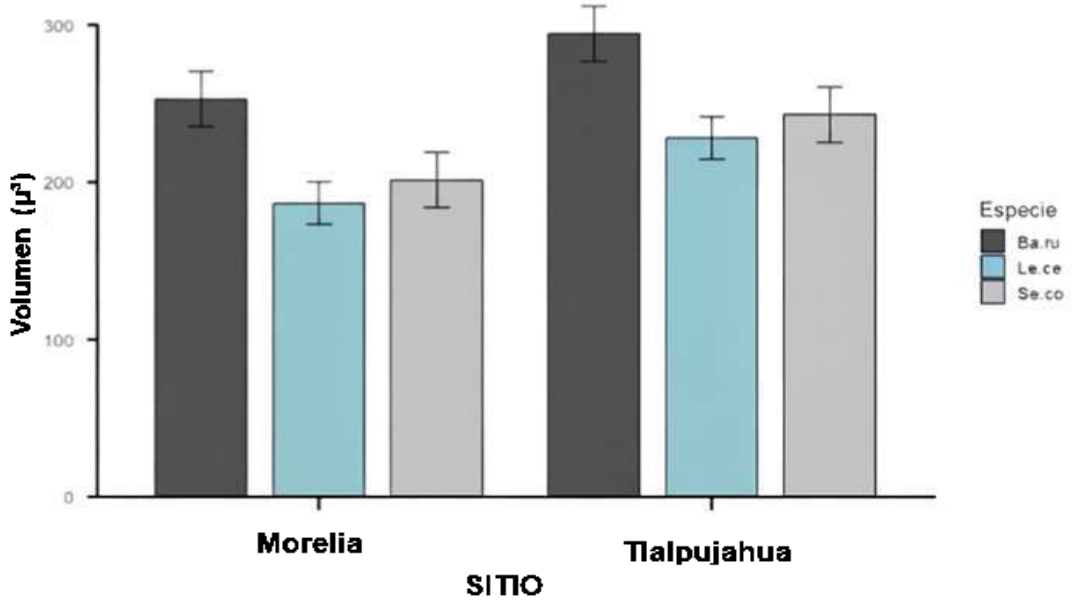


Figura 2.19. Volumen eritrocitario en especies de la familia Parulidae en función del sitio de muestreo (Morelia y Tlalpujahua). Las barras representan los valores estimados del modelo y las líneas de error los errores estándar.

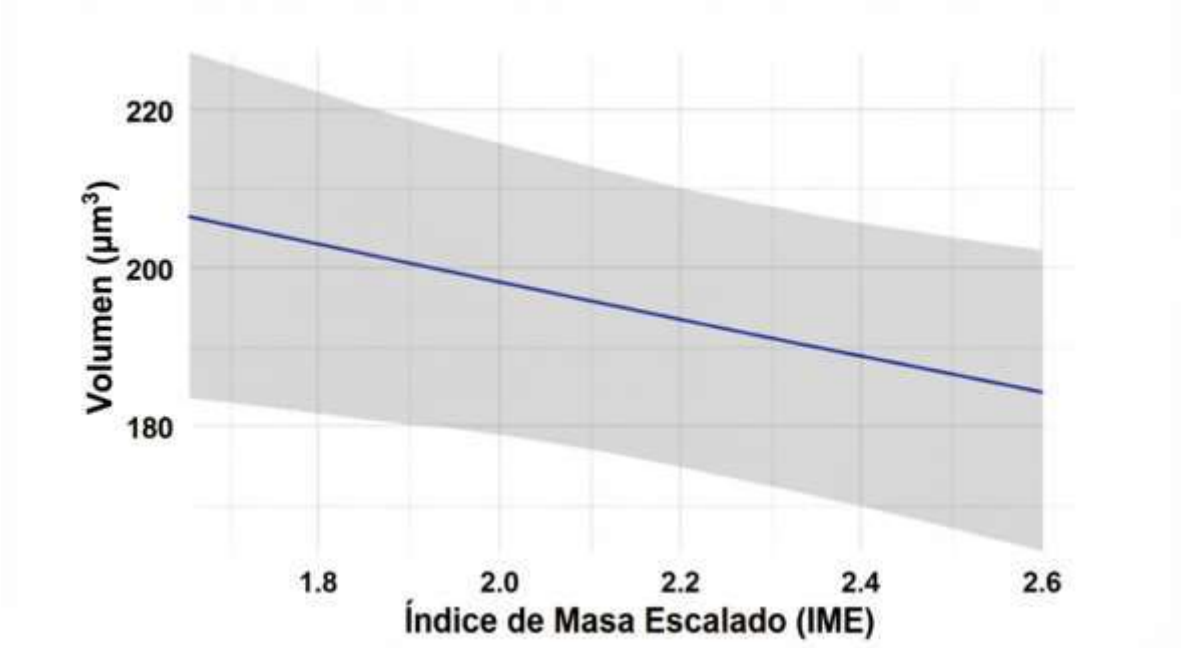


Figura 2.20. Relación entre el índice de masa corporal (IME) y el volumen eritrocitario en Parulidae. La línea negra representa el valor predicho por el modelo mixto (modelo 7), mientras que el sombreado gris indica el intervalo de confianza del 95%. Se observa una tendencia negativa del volumen eritrocitario con el aumento del IME.

El mejor modelo mostró un efecto significativo del estatus migratorio ($\beta = -87.2 \pm 32.8$, $p = 0.048$), indicando que los individuos residentes presentan en promedio, un volumen de heterófilos menor que los individuos migratorios (Fig. 2.21). Este resultado fue confirmado mediante una prueba de razón de verosimilitud entre el modelo con residencia y el modelo nulo ($\chi^2 = 5.97$, $p = 0.015$).

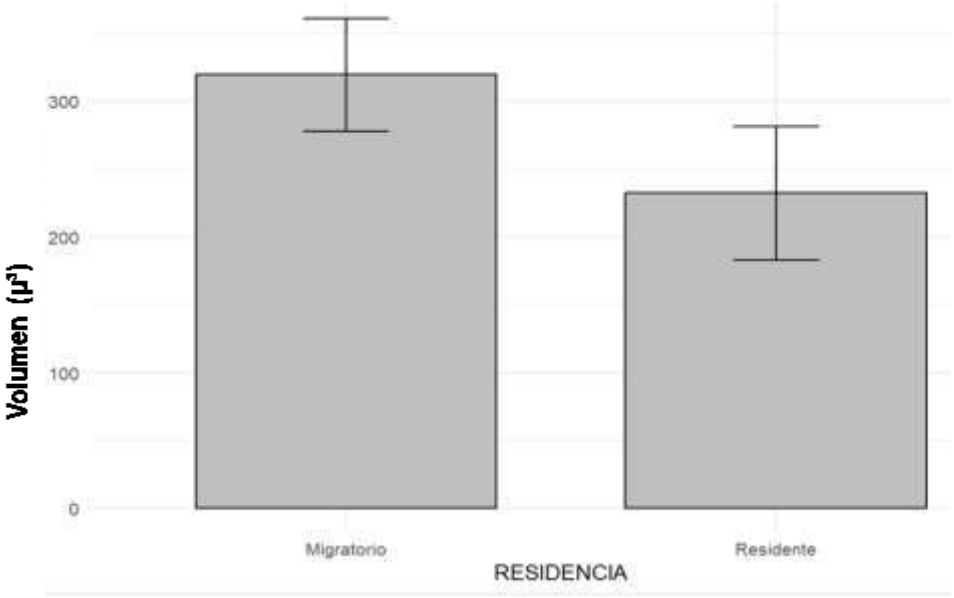


Figura 2.21. Volumen promedio de los heterófilos en aves migratorias y residentes según el mejor modelo mixto (VOLUMEN ~ RESIDENCIA). Las barras representan los valores estimados del volumen celular y las líneas verticales indican los intervalos de confianza del 95%.

Sitio/especie/IME

El volumen de los heterófilos mostró diferencias significativas entre especies dentro de la familia Parulidae (Fig. 2.22). El modelo mixto que incluyó únicamente a la especie como efecto fijo fue el mejor modelo según el criterio de información de Akaike corregido (m3: AICc = 5004.2, wi = 0.369), superando al modelo nulo y al resto de los modelos evaluados (Cuadro 2.4). La inclusión de la especie mejoró significativamente el ajuste del modelo respecto al modelo nulo (LRT: $\chi^2 = 9.88$, gl = 2, $p = 0.00715$).

En el modelo mejor soportado (m3: VOLUMEN ~ ESPECIE + (1|IND_UID)), la especie *Leiothlypis celata* presentó un volumen de heterófilos significativamente mayor en comparación *Basileuterus rufifrons* (Fig. 2.22) (Estimado = 109.41 ± 34.74, t = 3.15, p = 0.00318), mientras que *Setophaga coronata* no mostró diferencias significativas (Estimado = 37.26 ± 40.88, t = 0.91, p = 0.368).

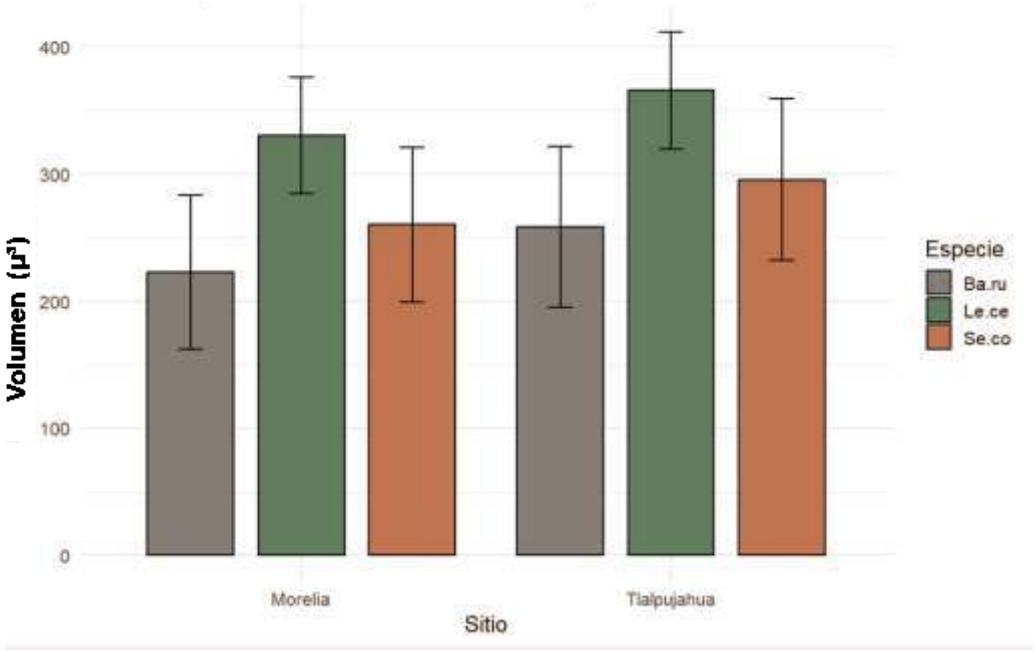


Figura 2.22. Volumen promedio de los heterófilos (Promedio± IC del 95%) en tres especies de Parulidae (*Basileuterus rufifrons* (Ba.ru), *Leiothlypis celata* (Le.ce) y Setophaga coronata (Se.co) en dos sitios de muestreo (Morelia y Tlalpujahua). Los valores corresponden a las predicciones del modelo mixto m6 (VOLUMEN ~ SITIO + ESPECIE + (1|IND_UID)).

No obstante, dos modelos alternativos presentaron valores de ΔAICc < 2 y, por tanto, también contaron con soporte empírico: el modelo que incluyó especie y sitio (m6: AICc = 5004.6, wi = 0.297, ΔAICc = 0.43) y el modelo que incluyó especie e IME (m5: AICc = 5006.1, wi = 0.144, ΔAICc = 1.88). En conjunto, estos tres modelos concentraron la mayor parte del peso de evidencia. En el modelo m6 (VOLUMEN ~ SITIO + ESPECIE + (1|IND_UID)), el efecto del sitio Tlalpujahua fue positivo, pero no significativo (Estimado = 35.57 ± 27.54, t = 1.29, p = 0.204), mientras que el efecto de *Leiothlypis celata* se mantuvo robusto y significativo (Estimado = 107.50 ± 34.01, t = 3.16, p =

0.00309) y *Setophaga coronata* continuó sin diferencias significativas (Estimate = 37.32 ± 39.99, t = 0.93, p = 0.357). En el modelo m5 (VOLUMEN ~ IME + ESPECIE + (1|IND_UID)), el IME no mostró evidencia de asociación con el volumen (Fig. 2.23) (Estimado = 35.81 ± 82.83, t = 0.43, p = 0.668).

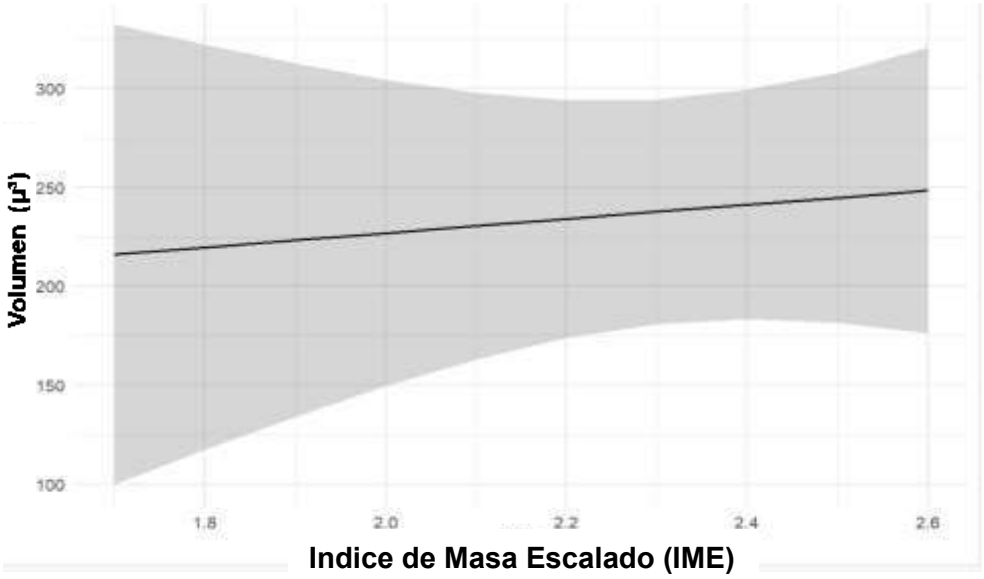


Figura 2.23. Relación entre el volumen celular de los heterófilos y el índice de masa escalada (IME) según el modelo m5 (VOLUMEN ~ IME + ESPECIE). La línea negra representa los valores predichos del volumen, mientras que la banda sombreada indica el intervalo de confianza del 95%. El modelo sugiere una tendencia positiva entre la condición corporal (IME) y el volumen de los heterófilos.

El modelo mejor soportado explicó una fracción modesta de la varianza total mediante los efectos fijos (R^2 marginal = 0.094), pero una proporción considerable al incluir los efectos aleatorios (R^2 condicional = 0.346). La varianza estuvo dominada por diferencias entre individuos (desviación estándar del intercepto aleatorio = 77.33) y por la variación residual (desviación estándar = 124.64), lo que indica una elevada heterogeneidad intraespecífica en el volumen de los heterófilos.

Volumen Trombocito
Familia/residencia/IME

El modelo con mayor soporte fue aquel que incluyó únicamente a la familia como efecto fijo (m3: VOLUMEN ~ FAMILIA + efectos aleatorios; AICc = 3980.6, wi = 0.299, ΔAICc = 0.00), superando al modelo nulo y al resto de los modelos candidatos (Cuadro 2.4, p. 128).

No obstante, otros tres modelos presentaron valores de ΔAICc < 2 (m5, m6 y m7), lo que sugiere que representan hipótesis alternativas plausibles. Estos modelos incluyeron combinaciones de familia con IME y estatus de residencia, sugiriendo que tanto la condición corporal como la residencia podrían influir de manera secundaria en el volumen de los trombocitos, aunque con menor peso explicativo que la familia (Fig. 2.24 y 2.25).

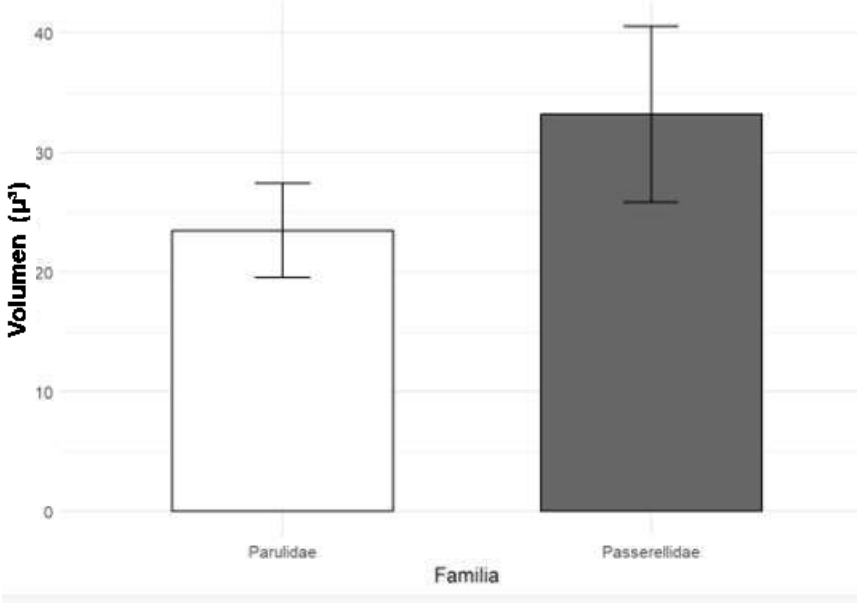


Figura 2.24. Valores del volumen (en micras cúbicas) de los trombocitos en función de la familia, con base en estimaciones del mejor modelo lineal mixto con la familia como principal predictor de volumen trombocitario.

La prueba de razón de verosimilitudes confirmó que la inclusión de la familia mejoró significativamente el ajuste del modelo respecto al modelo nulo ($\chi^2 = 5.06$, gl = 1, p = 0.024). En el modelo mejor soportado, los individuos de la familia Passerellidae presentaron trombocitos significativamente más grandes que los de la familia de referencia (Parulidae), con un incremento promedio de 6.07 ± 2.65 unidades de volumen (t = 2.29, p = 0.047) (Fig. 2.24).

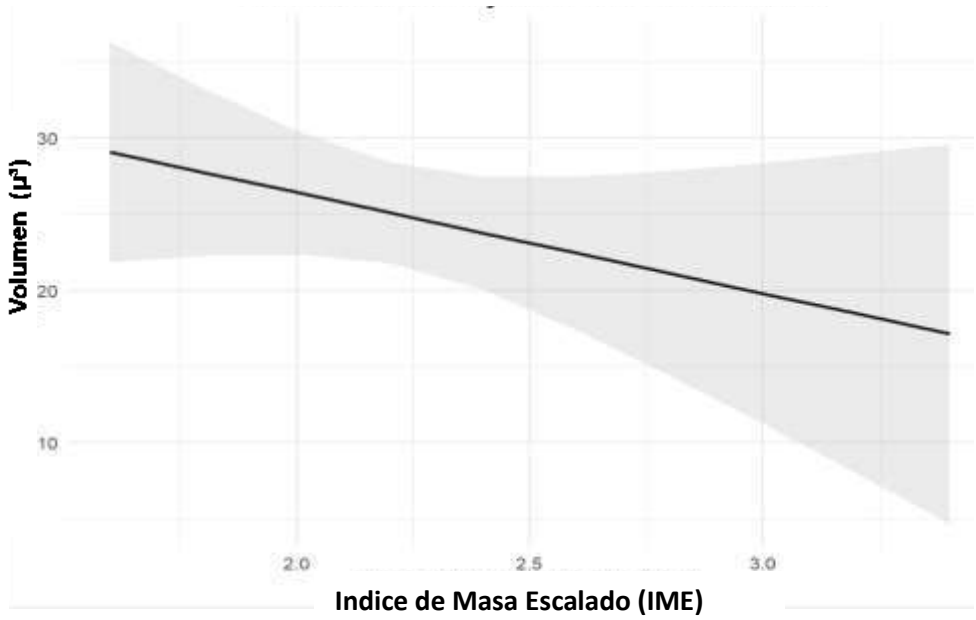


Figura 2.25: Relación entre el índice de masa escalado (IME) y el volumen de los trombocitos. La línea representa los valores predichos por el mejor modelo lineal mixto, y la banda sombreada el intervalo de confianza al 95%.

En conjunto, estos resultados sugieren que el volumen de los trombocitos difiere significativamente entre familias taxonómicas, siendo la familia el predictor más consistente, y que la condición corporal y el estatus de residencia representan factores secundarios con menor capacidad explicativa.

Sitio/especie/IME

El modelo con mayor soporte empírico fue aquel que incluyó conjuntamente al sitio y a la especie como predictores (m6: VOLUMEN ~ SITIO + ESPECIE + (1|IND_UID); AICc = 2791.5, wi = 0.288, ΔAICc = 0.00) (Fig. 2.26). Un segundo modelo que incluyó además la condición corporal (m7) presentó un valor de ΔAICc = 0.06, el cual también representa una hipótesis plausible, aunque con un peso explicativo ligeramente menor (wi = 0.279) (Fig. 2.13). Otros dos modelos con ΔAICc < 2 incluyeron a IME + SITIO (m4) y a SITIO únicamente (m2), sugiriendo que el sitio es un factor consistente asociado con la variación en el volumen de los trombocitos (Cuadro 2.4, Fig. 2.26).

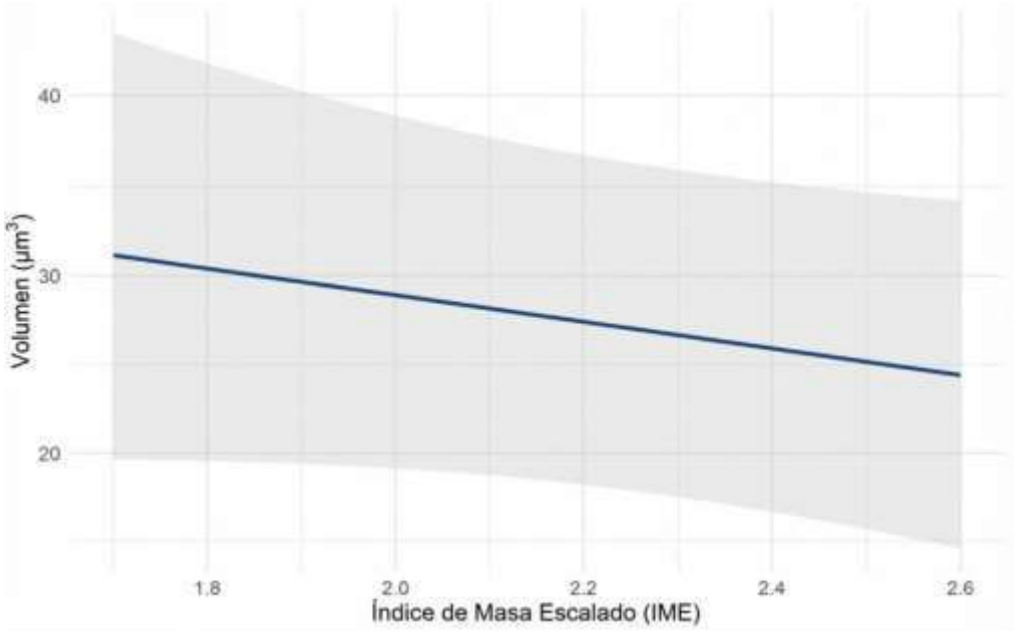


Figura 2.26: Relación entre el índice de masa escalado (IME) y el volumen de los trombocitos en especies de Parulidae. La línea representa los valores estimados por el modelo lineal mixto mejor soportado, mientras que la banda gris indica el intervalo de confianza del 95%.

La prueba de razón de verosimilitudes mostró que el mejor modelo explicó significativamente más variación que el modelo nulo ($\chi^2 = 11.11$, gl = 3, p = 0.011), lo que apunta hacia un efecto conjunto del sitio y la especie sobre el volumen de los trombocitos.

En el modelo mejor soportado, el volumen promedio de los trombocitos fue significativamente mayor en el sitio Tlalpujahua en comparación con Morelia ($\beta = 4.07 \pm 1.61$, t = 2.52, p = 0.016). Respecto a las diferencias interespecíficas, la especie *Setophaga coronata* presentó trombocitos significativamente más pequeños que *Basileuterus rufifrons* ($\beta = -5.74 \pm 2.28$, t = −2.51, p = 0.016), mientras que *Leiothlypis celata* no mostró diferencias significativas (p = 0.242) (Fig. 2.27).

La varianza asociada con el efecto aleatorio del individuo fue considerable (DE = 4.61), indicando una alta variabilidad intraindividual en el tamaño de los trombocitos. El modelo explicó el 10.8% de la variación total mediante los efectos fijos (R^2 marginal =

0.108), mientras que al incluir el efecto del individuo explicó el 38.5% de la varianza total (R^2 condicional = 0.385).

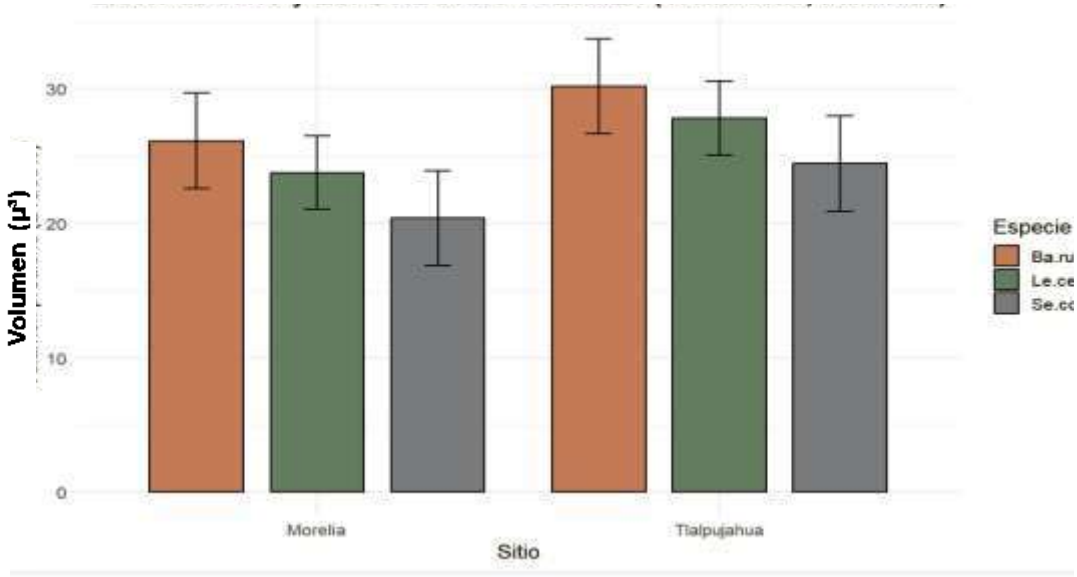


Figura 2.27. Volumen de trombocitos estimado por el mejor modelo lineal mixto en función del sitio y la especie (familia Parulidae). Las barras representan las medias predichas y las líneas verticales los intervalos de confianza al 95%.

Sexo/ edad

La comparación de modelos mediante el criterio de información de Akaike corregido (AICc) indicó que el modelo con mayor soporte empírico fue aquel que incluyó únicamente a la edad como predictor (m2: VOLUMEN ~ EDAD + (1|IND_UID); AICc = 889.6, wi = 0.331, ΔAICc = 0.00) (Fig. 2.28). Sin embargo, el modelo nulo (m0) presentó un valor de ΔAICc = 0.32, lo que sugiere que ambos modelos son prácticamente equivalentes en su capacidad explicativa. Otros modelos con ΔAICc < 2 incluyeron a sexo + edad (m3) y sexo únicamente (m1), lo que indica un soporte limitado para efectos del sexo y la edad sobre el volumen trombocitario.

En el modelo mejor soportado, los juveniles tendieron a presentar trombocitos de menor volumen que los adultos (β = −3.85 ± 2.34), aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa (t = −1.64, p = 0.125). La prueba de razón de verosimilitudes entre el modelo con edad y el modelo nulo no mostró diferencias significativas (χ^2 = 2.45,

gl = 1, p = 0.118), lo que confirma que la inclusión de la edad no mejora sustancialmente el ajuste del modelo.

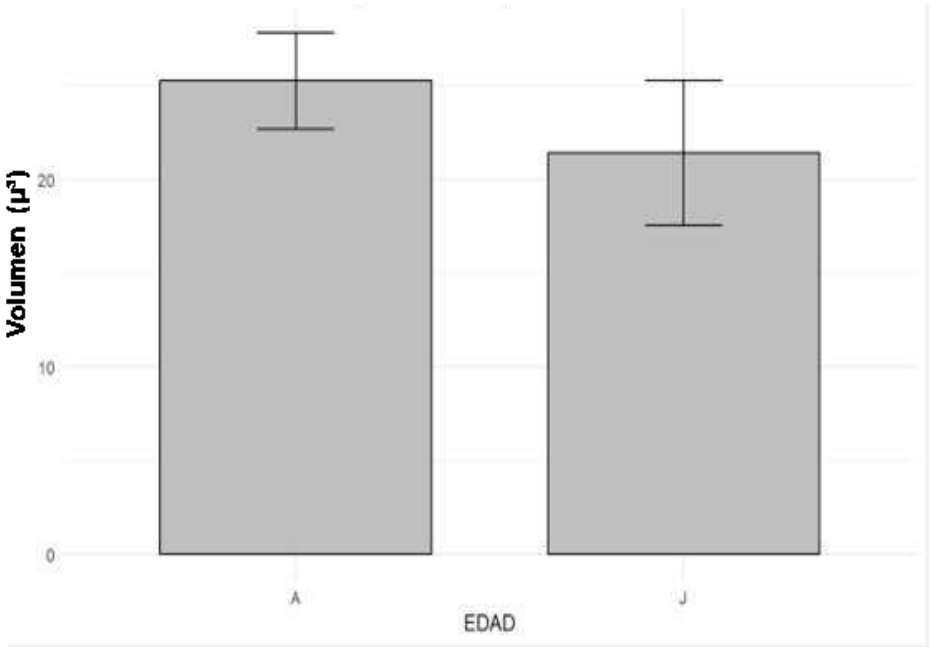


Figura 2.28. Volumen estimado de los trombocitos (± IC95%) en *Leiothlypis celata* en función de la edad (A = adulto, J = juvenil), estimado a partir del modelo lineal mixto mejor soportado. Los resultados indican que los individuos adultos presentan, en promedio, trombocitos de mayor volumen que los juveniles, lo que sugiere un efecto de la edad sobre la morfometría celular dentro de la especie.

La varianza asociada al efecto aleatorio del individuo fue considerable (DE = 3.45), indicando una alta variabilidad intraindividual en el volumen de los trombocitos. Los efectos fijos explicaron únicamente el 6.4% de la varianza total (R^2 marginal = 0.064), mientras que al incluir la variación entre individuos se explicó el 30.3% de la varianza total (R^2 condicional = 0.303).

Discusión

Ovalidad a nivel individual

Los análisis sobre la ovalidad a nivel intra e interespecífico sugieren que la ovalidad de las células sanguíneas es un rasgo morfológico relativamente conservado, con variación limitada y dependiente del tipo celular. Aunque se detectaron diferencias significativas entre especies en algunos tipos celulares (principalmente eritrocitos, núcleo eritrocitario, linfocitos, monocitos y trombocitos), estas diferencias no se observaron de manera consistente en todos los tipos leucocitarios. A nivel de familia, la ovalidad fue similar, con excepción de los linfocitos.

A escala intraespecífica, la mayor variabilidad se concentró en trombocitos y en el núcleo eritrocitario, mientras que los linfocitos mostraron una notable estabilidad morfológica entre individuos, lo que sugiere una estructura mantenida en su forma. Este patrón indica que, aunque la ovalidad de los leucocitos puede expresar cierta señal taxonómica o individual en células específicas, su valor como indicador ecofisiológico es limitado, ya que responde más a propiedades celulares intrínsecas y conservadas que a factores ambientales o fisiológicos, reforzando la idea de que parámetros integradores como el volumen celular son más informativos para interpretar la variación funcional en aves silvestres.

Volumen nivel individual

En conjunto, los resultados indican que el volumen celular captura de manera efectiva la variación relevante asociada con la identidad específica, ya que se detectaron diferencias significativas entre especies en la mayoría de los tipos celulares (particularmente en eritrocitos, núcleo eritrocitario y varios leucocitos). Asimismo, el análisis a nivel individual reveló una marcada heterogeneidad intraespecífica, con amplios rangos de volumen dentro de cada especie y diferencias significativas entre individuos para casi todos los tipos celulares. Este patrón sugiere que el volumen celular es un rasgo sensible tanto a diferencias estructurales entre especies como a la variación fisiológica entre individuos,

reflejando procesos biológicos dinámicos que no son capturados por rasgos morfológicos más conservados como la ovalidad.

Glms para ovalidad y Volumen

En el presente estudio, la ovalidad celular mostró una capacidad explicativa limitada frente a las variables ecológicas y fisiológicas evaluadas. En la mayoría de los tipos celulares, y en prácticamente todos los conjuntos de predictores analizados, los modelos nulos presentaron el mayor soporte empírico, lo que indica que la variación en la forma celular no estuvo asociada de manera consistente con la familia, el estatus de residencia, el sitio, la condición corporal, la edad o el sexo.

Este patrón sugiere que la ovalidad constituye un rasgo morfológico relativamente conservado y poco sensible a gradientes ecológicos o fisiológicos en aves silvestres. Desde un punto de vista funcional, la forma celular está fuertemente definida por requerimientos estructurales y biomecánicos asociados con la circulación sanguínea, por lo que suele variar principalmente bajo condiciones patológicas o experimentales, más que como respuesta adaptativa fina (Maxwell y Robertson, 1998; Campbell, 2015).

Las excepciones observadas en linfocitos y trombocitos sugieren cierto grado de plasticidad morfológica en estos tipos celulares, posiblemente relacionada con procesos de activación diferenciación funcional. Sin embargo, estos efectos fueron débiles y no generalizables al conjunto de células analizadas.

En contraste, el volumen celular mostró una mayor sensibilidad a los factores ecológicos y fisiológicos, y representa un descriptor funcional más informativo, ya que integra simultáneamente información sobre tamaño y forma, y se relaciona directamente con propiedades fisiológicas clave (como el contenido citoplasmático, la carga de organelos y la relación superficie-volumen) (Minias, 2015; Gregory et al., 2009). Por ello, los resultados respaldan el uso del volumen como el principal rasgo morfométrico para interpretar la variación ecofisiológica de las células sanguíneas en aves silvestres, mientras que la ovalidad aporta información complementaria, pero de menor relevancia explicativa.

Variables que explican el volumen eritrocitario

El presente estudio identificó que el volumen eritrocitario en aves silvestres está determinado principalmente por el índice de masa escalada (IME), el estatus de residencia y la familia. El modelo que incluyó simultáneamente estas tres variables fue el que presentó el mayor soporte empírico, lo que resalta la importancia de considerar tanto factores fisiológicos individuales como atributos ecológicos y filogenéticos para comprender la variación en la morfología eritrocitaria.

Entre estos factores, el IME emergió como el predictor más relevante, mostrando una relación negativa significativa con el volumen eritrocitario. Este hallazgo indica que los individuos con mejor condición corporal presentan eritrocitos de menor tamaño, lo que sugiere que la condición fisiológica está estrechamente vinculada a la morfología eritrocitaria y, por ende, a la eficiencia del transporte de oxígeno. Desde una perspectiva fisiológica, el tamaño de los eritrocitos es un parámetro clave que influye directamente en la relación superficie-volumen y, por tanto, en la eficiencia del intercambio gaseoso (Gregory et al., 2009; Laguë, 2017). Eritrocitos más pequeños y elongados favorecen una difusión más rápida de O_2 y CO_2, lo cual resulta ventajoso en contextos de alta demanda metabólica, como el vuelo (Minias, 2015; Nasser et al., 2021; Penman et al., 2022). Así, la relación negativa entre IME y volumen eritrocitario puede interpretarse como un ajuste funcional, donde individuos con mejor condición presentan células más eficientes para el intercambio gaseoso, en lugar de presentar eritrocitos grandes que, aunque con más hemoglobina, son menos eficientes en términos de intercambio gaseoso.

El estatus de residencia también mostró un efecto significativo: los individuos residentes presentaron eritrocitos de mayor volumen que los migratorios. Este resultado es congruente con la literatura, que indica que las aves migratorias tienden a presentar eritrocitos más pequeños, numerosos y elongados, como una adaptación a las demandas aeróbicas extremas del vuelo prolongado (Snyder, 1981; Soulsbury et al., 2021, 2022). Estudios comparativos a gran escala han demostrado que las especies migratorias de larga distancia poseen sistemáticamente eritrocitos más pequeños, optimizando la oxigenación sin incrementar excesivamente la viscosidad sanguínea (Soulsbury et al., 2022). Por tanto, los mayores volúmenes eritrocitarios observados en residentes podrían reflejar una menor

presión selectiva sobre la eficiencia aeróbica, favoreciendo células más grandes que funcionan como reservorios de oxígeno (como el caso extremos de las aves buceadoras).

Estos resultados se alinean con la teoría del tamaño celular óptimo, la cual propone que el tamaño de los eritrocitos resulta de compromisos funcionales entre la eficiencia difusiva, la capacidad de transporte de oxígeno y los costos metabólicos bajo distintas condiciones ambientales (Leiva et al., 2026). En este sentido, los patrones observados en este estudio son consistentes con la hipótesis de que la morfología eritrocitaria responde a exigencias fisiológicas y ecológicas, más que al linaje evolutivo *per se* (Canals et al., 2007). Además, estudios recientes han demostrado que el tamaño y la forma de los eritrocitos varían en función de actividades energéticamente demandantes, como la migración de larga distancia, donde las aves presentan células más pequeñas y elongadas, mientras que aquellas con mayor competencia entre machos tienden a tener células más pequeñas y redondeadas (Soulsbury et al., 2022).

A nivel interespecífico, dentro de la familia Parulidae, el volumen eritrocitario estuvo determinado principalmente por la especie y el sitio de muestreo. Las diferencias entre especies fueron marcadas, siendo *Basileuterus rufifrons* la que presentó eritrocitos significativamente más grandes, mientras que *Leiothlypis celata* y *Setophaga coronata* mostraron volúmenes menores. Este patrón sugiere la existencia de componentes intrínsecos de historia de vida o fisiología específica de cada especie que modulan el tamaño eritrocitario, en concordancia con estudios previos en aves rapaces y passeriformes (Kostelecka-Myrcha, 1997; Samour et al., 2005; Haas, 2020).

El efecto del sitio fue consistente, con volúmenes de eritrocitos mayores en Tlalpujahua en comparación con Morelia, lo que indica que factores ambientales locales, como altitud, temperatura, disponibilidad de oxígeno o calidad del hábitat, pueden influir en la morfología eritrocitaria. Este resultado es congruente con estudios que documentan variación geográfica y ambiental en el tamaño de los eritrocitos en aves y otros vertebrados (Maxwell et al., 1990; Haas y Janiga, 2020; Janiga et al., 2017), así como con evidencias de que condiciones de hipoxia inducen ajustes en la concentración de hemoglobina y en la morfología celular (Snyder, 1981; Maekawa y Kato, 2015). En ambientes de alta altitud, donde la presión parcial de oxígeno disminuye, se espera la activación de respuestas

eritropoyéticas compensatorias, lo que puede reflejarse en ajustes funcionales del sistema de transporte de oxígeno (Maekawa y Kato, 2015).

En contraste, ni la edad ni el sexo explicaron significativamente la variación en el volumen eritrocitario, lo que sugiere que, al menos en las especies analizadas, estos factores no constituyen determinantes primarios de la morfología celular. Esto difiere de algunos estudios que han documentado efectos ontogenéticos y hormonales sobre el tamaño eritrocitario (Kostelecka-Myrcha, 1997; Puerta et al., 1995), lo que indica que la influencia de estas variables podría ser altamente dependiente del contexto ecológico, taxonómico o del rango de edad de los individuos muestreados.

En conjunto, estos resultados apoyan la idea de que el tamaño de los eritrocitos en aves silvestres responde principalmente a exigencias fisiológicas y ecológicas. Esto coincide con lo propuesto por Canals et al. (2007), quienes encontraron que las especies voladoras, independientemente de su filiación taxonómica, tienden a presentar eritrocitos más pequeños como respuesta convergente a las demandas energéticas del vuelo. Así, el volumen eritrocitario emerge como un rasgo funcional altamente plástico, modulable por la condición corporal, la estrategia migratoria y el ambiente, y constituye un indicador integrador del desempeño fisiológico en contextos naturales.

Desde una perspectiva ecofisiológica, el presente estudio aporta evidencia empírica de que la morfometría eritrocitaria en aves silvestres refleja ajustes adaptativos vinculados a la eficiencia respiratoria, la condición corporal y el uso del hábitat. La variación observada en el volumen y la morfometría eritrocitaria entre los grupos analizados sugiere que estos rasgos celulares constituyen componentes funcionales sensibles a las demandas fisiológicas impuestas por el ambiente y el modo de vida. El tamaño de los eritrocitos ha sido reconocido como un rasgo estrechamente vinculado con la eficiencia del transporte de oxígeno y con procesos metabólicos a escala del organismo (Lay y Baldwin, 1999; Leiva et al., 2026). En este contexto, la tendencia a presentar eritrocitos de mayor volumen en las aves que habitan sitios a mayor altitud en el presente estudio, podría reflejar un ajuste hematológico asociado a condiciones de hipoxia ambiental, aunque la dirección de esta respuesta no es universal entre vertebrados. Mientras que en algunos organismos ectotermos de altura se ha documentado una reducción del tamaño eritrocitario acompañada

de incrementos en el número de células y en la concentración de hemoglobina (Ruiz Valenzuela, 1986), en aves y otros endotermos pueden operar compromisos funcionales distintos que involucran almacenamiento intracelular de hemoglobina, propiedades reológicas y costos metabólicos de mantenimiento celular.

Finalmente, la evidencia presentada aquí contribuye a llenar una brecha importante en la literatura, tradicionalmente dominada por estudios en especies domésticas o en condiciones controladas (Ribeiro et al., 2024; Haas, 2020), y posiciona al volumen eritrocitario como un biomarcador prometedor para evaluar la salud fisiológica, la adaptación ecológica y los costos metabólicos asociados a distintas estrategias de vida en aves silvestres.

Variables que explican el volumen de los heterófilos

En el presente estudio, el volumen de los heterófilos difirió significativamente entre individuos migratorios y residentes, siendo mayor en los migratorios. Este resultado sugiere que el ser un individuo residente o migratorio puede ser determinante que marca una influencia en el tamaño celular de los heterófilos, lo que sugiere la existencia de diferencias fisiológicas relevantes en el sistema inmune innato asociadas a la estrategia de historia de vida.

Los heterófilos participan activamente en procesos de fagocitosis, producción de especies reactivas de oxígeno y liberación de enzimas antimicrobianas (Maxwell y Robertson, 1998; Campbell, 2015). Aunque el tamaño celular no representa una ventaja funcional directa, se ha propuesto que heterófilos de mayor tamaño podrían reflejar un mayor contenido citoplasmático y una mayor abundancia de gránulos, lo que estaría asociado a un estado de activación inmunitaria elevado (Stacy et al., 2022; Ribeiro et al., 2024). En este sentido, el mayor volumen observado en individuos migratorios podría interpretarse como una señal morfológica de mayor activación basal del sistema inmune.

Desde una perspectiva ecofisiológica, las aves migratorias están sometidas a elevadas demandas energéticas, cambios abruptos en condiciones ambientales y dietarias, así como a una mayor exposición a una diversidad de patógenos a lo largo de sus rutas migratorias (Altizer et al., 2011; Buehler y Piersma, 2008). Estos factores pueden inducir estados persistentes de estrés fisiológico y activación inmunitaria, lo que se ha asociado con

modificaciones en la morfología leucocitaria en vertebrados. En aves domésticas, por ejemplo, se ha documentado que los heterófilos aumentan de tamaño bajo condiciones de estrés crónico, infecciones o desafíos inmunológicos, presentando además alteraciones citológicas como vacuolización y basofilia citoplasmática (Shini et al., 2008; Maxwell, 1993). De manera similar, en mamíferos se ha observado que leucocitos de mayor tamaño suelen estar asociados a procesos inflamatorios o patológicos, más que a una mejora funcional directa (Worthen et al., 1989; Schmid-Schönbein et al., 1981).

En el primer capítulo de este trabajo, se muestra que las aves migratorias presentaron un índice H/L menor en comparación con las aves residentes. Sin embargo, en el presente análisis se evidencia que el volumen de los heterófilos en las aves migratorias es más elevado. Esta aparente contradicción podría justificarse considerando que, aunque la proporción de heterófilos respecto a linfocitos es menor, el aumento en el tamaño celular podría ser una respuesta compensatoria ante el estrés fisiológico y la activación inmune sostenida asociada a la migración. Es decir, el mayor volumen de heterófilos podría reflejar un estado inflamatorio o una adaptación funcional que compensa la menor cantidad relativa de estas células, permitiendo mantener la eficacia inmunitaria bajo las exigentes condiciones de la migración.

Además del estatus migratorio, se detectaron diferencias significativas entre especies dentro de la familia Parulidae, siendo *Leiothlypis celata* la especie con heterófilos de mayor volumen. Este patrón sugiere que existen componentes interespecíficos consistentes, posiblemente relacionados con diferencias filogenéticas o con estrategias inmunológicas particulares de cada especie. La presencia de modelos alternativos con soporte empírico que incluyeron al sitio y al índice de masa corporal (IME) indica que estas variables podrían modular secundariamente el tamaño celular; sin embargo, sus efectos fueron más débiles y no superaron al efecto de especie. En particular, la tendencia positiva entre IME y volumen podría interpretarse como una mayor inversión inmunitaria en individuos con mejor condición corporal, lo cual concuerda con estudios que muestran una relación entre condición fisiológica y capacidad inmune (Martin et al., 2006), aunque en este caso el efecto no fue estadísticamente concluyente.

Un resultado clave fue que la mayor proporción de la variación en el volumen de los heterófilos fue explicado por efectos aleatorios, especialmente a nivel del individuo. Esto indica una marcada heterogeneidad intraespecífica, lo que sugiere que el tamaño de los heterófilos podría estar influenciado por factores intrínsecos individuales, como el historial de infecciones, procesos inflamatorios previos, estrés acumulado o activación inmunitaria reciente. Este patrón concuerda con la naturaleza multifactorial de la respuesta inmune en vertebrados, donde múltiples procesos fisiológicos interactúan y generan una alta variabilidad individual (Downs et al., 2014; Martin et al., 2006).

En conjunto, estos resultados sugieren que, en aves silvestres, el volumen de los heterófilos está influenciado principalmente por el estatus migratorio, las diferencias interespecíficas y una fuerte variación individual, mientras que variables como la condición corporal y el sitio de muestreo juegan un papel secundario. Este patrón contrasta con la literatura tradicional, centrada principalmente en proporciones leucocitarias como indicadores de estrés (Davis et al., 2008; Owen y Moore, 2006), y aporta evidencia novedosa de que la morfometría leucocitaria puede constituir un biomarcador complementario del estado inmunológico y del costo fisiológico de la migración en aves silvestres. En este sentido, el presente estudio amplía el marco conceptual de la ecofisiología inmunológica, al mostrar que el tamaño celular de los heterófilos refleja procesos inmunológicos complejos asociados a la historia de vida y al contexto ecológico.

Variables que explican el volumen Trombocitario

Los resultados obtenidos apuntan a que, en aves silvestres, el tamaño trombocitario no responde de manera directa a la condición corporal, el sexo o la edad, sino que está dominado por diferencias taxonómicas y una fuerte variación individual, a diferencia de lo documentado en mamíferos, donde el tamaño trombocitario se ha asociado principalmente con procesos de activación, inflamación y estado fisiológico (Basrur et al., 1983; George, 2000), El presente estudio constituye, hasta donde se tiene conocimiento, el primer análisis sistemático de la variación en el tamaño de los trombocitos en aves silvestres, evaluando su relación con variables taxonómicas, ecológicas y fisiológicas. Los resultados sugieren que en aves silvestres este rasgo presenta una estructura distinta.

A nivel taxonómico, se encontró que la familia fue el predictor más consistente del volumen trombocitario, con individuos de Passerellidae presentando trombocitos significativamente más grandes que los de Parulidae, patrón que sugiere la existencia de una señal filogenética en la morfometría trombocitaria, lo que podría reflejar diferencias evolutivas en la organización citoplasmática, el sistema conectado a la superficie (SCS) o la fisiología basal de estos linajes. En contraste con mamíferos, en los que el tamaño trombocitario se interpreta principalmente como un indicador dinámico de activación, en aves silvestres podría tratarse en parte de un rasgo estructural conservado evolutivamente.

El volumen de los trombocitos en Parulidae varía principalmente a nivel individual, pero muestra patrones consistentes asociados tanto con el sitio de muestreo como a la identidad específica, sugiriendo una combinación de efectos ambientales locales y diferencias interespecíficas en la morfometría trombocitaria. El volumen de los trombocitos en el caso particular de *Leiothlypis celata* no presenta patrones claros asociados al sexo o la edad, y que la variación en esta característica está dominada principalmente por diferencias a nivel individual.

A pesar de los avances logrados en la caracterización de otros tipos celulares sanguíneos, el conocimiento sobre los trombocitos en aves sigue siendo limitado. Actualmente, existen importantes vacíos en la comprensión de su morfología, funciones fisiológicas y posibles implicaciones ecológicas. Esta carencia de información representa una brecha significativa en la ecofisiología comparada y la biología de la conservación, subrayando la necesidad de estudios futuros que profundicen en el papel de los trombocitos aviares. Investigar estos aspectos permitirá no sólo ampliar el entendimiento de la fisiología sanguínea en aves, sino también explorar su potencial como indicadores de salud y adaptación en contextos ecológicos diversos.

Perspectivas y/o recomendaciones

Los resultados de este estudio evidencian que la morfometría de las células sanguíneas en aves silvestres puede aportar información relevante sobre procesos ecofisiológicos, particularmente cuando se analizan rasgos funcionales como el volumen celular. En

comparación con la ovalidad, el volumen de eritrocitos, heterófilos y trombocitos mostró una mayor sensibilidad a factores biológicos y ecológicos, lo que sugiere su potencial como indicador del estado fisiológico de los individuos y de las demandas ambientales asociadas a distintas estrategias de vida.

Futuras investigaciones deberían ampliar el enfoque comparativo hacia un mayor número de especies y linajes de aves, así como considerar gradientes ambientales más amplios, especialmente altitudinales y climáticos. La inclusión de especies con diferentes estrategias migratorias y modos de vida permitiría evaluar con mayor precisión la generalidad de los patrones observados y comprender mejor la relación entre la morfometría celular y las demandas metabólicas o respiratorias.

Asimismo, sería relevante integrar la morfometría celular con otros parámetros hematológicos y fisiológicos, como el hematocrito, la concentración de hemoglobina o indicadores de estrés fisiológico, enfoque que permitiría entender con mayor profundidad los mecanismos que vinculan la morfología celular con el transporte de oxígeno, la respuesta inmunitaria y la condición fisiológica en aves silvestres.

En particular, los resultados obtenidos para leucocitos y trombocitos sugieren que el tamaño celular podría reflejar procesos de activación inmunitaria y variación fisiológica individual aún poco explorados en aves silvestres. Estudios futuros que incorporen información sobre carga parasitaria, historial de infección o exposición a estresores ambientales, permitirían evaluar con mayor precisión el valor de estos rasgos como biomarcadores del estado de salud en poblaciones naturales.

Conclusiones

- La morfometría celular en aves silvestres se organiza en una dimensión estructural conservada, representada por la ovalidad, con baja variabilidad intraindividual e interespecífica y escasa sensibilidad a variables ecológicas o fisiológicas; y una dimensión funcional plástica, representada por el volumen celular, caracterizada por alta variabilidad entre especies e individuos, que captura información biológica relevante asociada al contexto ecológico, fisiológico y de historia de vida.

- El volumen eritrocitario constituye un rasgo funcional altamente sensible a la condición fisiológica y a la estrategia de vida, estando principalmente modulado por la condición corporal, el estatus de residencia y el ambiente. En particular, los individuos en mejor condición, las especies migratorias y los individuos que habitan en sitios de mayor altitud, presentan eritrocitos de menor tamaño, lo que refleja un ajuste morfológico orientado a maximizar la eficiencia del intercambio gaseoso bajo altas demandas aeróbicas.
- El volumen de los heterófilos puede reflejar diferencias ecofisiológicas asociadas al estado basal de activación inmunitaria, siendo mayor en aves migratorias y mostrando además una marcada variación interespecífica e individual. Este patrón sugiere que el tamaño de los heterófilos integra señales del costo fisiológico de la migración, la exposición a patógenos y la historia individual de activación inmune, posicionándolo como un biomarcador potencial del estado inmunológico en aves silvestres.
- El volumen trombocitario está estructurado principalmente por diferencias taxonómicas y una fuerte variación individual, y responde débilmente a variables intrínsecas de corto plazo, lo que indica que este rasgo refleja en mayor medida componentes filogenéticos y procesos inmunológicos crónicos o históricos, más que ajustes fisiológicos inmediatos.

Anexos

Anexo 2.1. Modelos lineales generalizados mixtos (GLMMs) utilizados para analizar la ovalidad celular en función de distintos conjuntos de variables fijas (familia, índice de masa escalado (IME), estatus de residencia, lugar de muestreo, especie, edad y sexo). Se incluyeron modelos simples, aditivos y un modelo nulo para cada conjunto de variables.

V.FIJAS	Descripción del Modelo
FAMILIA, IME Y ESTATUS DE RESIDENCIA	m0 =OVALIDAD ~ 1 m1=OVALIDAD~ IME m2=OVALIDAD~ RESIDENCIA m3=OVALIDAD ~ FAMILIA m4=OVALIDAD ~ IME + RESIDENCIA m5=OVALIDAD ~ IME + FAMILIA m6=OVALIDAD ~ RESIDENCIA + FAMILIA m7=OVALIDAD~ IME + RESIDENCIA + FAMILIA
LUGAR, IME Y ESPECIE	m0=OVALIDAD~ 1 m1=OVALIDAD~ IME m2=OVALIDAD ~ LUGAR) m3= OVALIDAD ~ ESPECIE m4=OVALIDAD ~ IME + LUGAR m5=OVALIDAD ~ IME + ESPECIE m6=OVALIDAD ~ LUGAR + ESPECIE m7=OVALIDAD ~ IME + LUGAR + ESPECIE
EDAD Y SEXO	m0=OVALIDAD ~ 1 m1 =OVALIDAD ~ SEXO m2 =OVALIDAD ~ EDAD m3 =OVALIDAD~ SEXO + EDAD m4 =OVALIDAD ~ SEXO * EDAD

Anexo 2.2. Modelos lineales generalizados mixtos (GLMMs) utilizados para analizar el volumen celular en función de distintos conjuntos de variables fijas (familia, índice de masa escalado (IME), estatus de residencia, lugar de muestreo, especie, edad y sexo). Se incluyeron modelos simples, aditivos y un modelo nulo para cada conjunto de variables.

V.FIJAS	Descripción del Modelo
Estatus de Residencia, Familia e IME	m0 =VOLUMEN ~ 1 m1= VOLUMEN ~ IME m2= VOLUMEN ~ RESIDENCIA m3= VOLUMEN~ FAMILIA m4= VOLUMEN~ IME + RESIDENCIA m5=VOLUMEN ~ IME + FAMILIA m6= VOLUMEN ~ RESIDENCIA + FAMILIA m7= VOLUMEN ~ IME + RESIDENCIA + FAMILIA
Sitio, Especie e IME	m0= VOLUMEN ~ 1 m1= VOLUMEN ~ IME m2= VOLUMEN ~ LUGAR) m3= VOLUMEN ~ ESPECIE m4= VOLUMEN ~ IME + LUGAR m5=VOLUMEN ~ IME + ESPECIE m6= VOLUMEN ~ LUGAR + ESPECIE m7= VOLUMEN ~ IME + LUGAR + ESPECIE
Sexo y Edad	m0= VOLUMEN ~ 1 m1 = VOLUMEN ~ SEXO m2 = VOLUMEN ~ EDAD m3 =VOLUMEN ~ SEXO + EDAD m4 = VOLUMEN ~ SEXO * EDAD

Literatura citada

Abbas, A. K., Lichtman, A. H., y Pillai, S. (2024). Inmunología básica: funciones y trastornos del sistema inmunitario. *Elsevier Health Sciences*

Alleman, A. R., Jacobson, E. R., y Raskin, R. E. (1992). Morphologic and cytochemical characteristics of blood cells from the desert tortoise (*Gopherus agassizii*). *American Journal of Veterinary Research*, 53(9), 1645-1651.

Altizer, S., Bartel, R., y Han, B. A. (2011). Animal migration and infectious disease risk. Science, 331(6015), 296-302. https://doi.org/10.1126/science.1194694

Alvarado, M. C., Arriaga-Alvarado, C., Rincón, R., Fernández, G., Aguilar Lara, J., Villasmil-Ontiveros, Y., y Henríquez, A. (2008). Valores hematológicos de psitácidos de los géneros *Ara* y *Amazona* cautivos en zoológicos de Venezuela. *Revista Científica*, 18(6), 469-661.

Arancibia-Calcagno, C. P. (2023). Descripción y registro visual de la morfología de células sanguíneas de Águilas Mora (*Geranoaetus melanoleucus*) en proceso de rehabilitación. Memoria de titulación. Departamento de Patología Animal. Facultad de Medicina, Universidad de Chile. Santiago, Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/199845

Arikan, H., y Çiçek, K. (2014). Haematology of reptiles: a review. Turkish Journal of Zoology, 38, 1–17. https://journals.tubitak.gov.tr/zoology/issues/zoo-14-38-1/zoo-38-1-1-1305-8.pdf

Balasch, J., Musquera, S., Palacios, L., Jiménez, M., y Palomeque, J. (1976). Comparative hematology of some falconiforms. The Condor, 78(2), 258–273. https://doi.org/10.2307/1366399

Barrett, L.A. y Scheinberg, S.L. (1972). The development of avian red cell shape. J. Exp. Zool., 182: 1-13

Bartsch, P., Ball, W.H., Rosenzweig, W. and Salman, S. (1937). Size of red blood corpuscles and their nucleus in fifty North American birds. The Auk, 54: 516-519.

Basrur, P. K., Bouvet, A., y McDonell, W. N. (1988). Open canalicular system of platelets in porcine stress syndrome. Canadian Journal of Veterinary Research = Revue

Canadienne de Recherche Veterinaire ;52(3):380-385. PMID: 3167720; PMCID: PMC1255468.

Basrur, P. K., Frombach, S., y McDonell, W. N. (1983). Platelet morphology and membrane bound calcium in porcine stress syndrome. Scanning Electron Microscopy, (Pt 1), 209-214.

Bhattacherjee, A., Acharya, C., Rana, N., Mallik, B., y Mohanty, P. (2018). Haematological and morphometrical analysis of blood cells of Khaki Campbell duck (*Anas platyrhynchos*) in different age groups with respect to sexual dimorphism. C*omparative Clinical Pathology,* 27(6). https://doi.org/10.1007/s00580-018-2758-6

Bienzle, D., Pare, J. A., y Smith, D. A. (1997). Leukocyte changes in diseased non-domestic birds. *Veterinary Clinical Pathology*, 26(2), 76-84.

Breuer, K., Lill, A. y Baldwin, J. (1995). Hematological and body-mass changes of small passerines overwintering in south-eastern Australia. Aust. J. *Zool.*, 43: 31-38.

Buehler, D. M., & Piersma, T. (2008). Seasonal redistribution of immune function in a migrant shorebird: Annual-cycle effects override adjustments to thermal regime. The American Naturalist, 172(6), 783-796. https://doi.org/10.1086/592865

Burnham, K. P., y Anderson, D. R. (2002). Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach (2nd ed.). Springer.

Campbell, T.W. (1995). Avian Hematology and Cytology. Iowa State University Press. Ames, Iowa.

Canals, M., Donoso, C., Figueroa, D., y Sabat, P. (2007). Parámetros hematológicos pulmonares, demandas energéticas de vuelo y su correlación con la capacidad de difusión de oxígeno en los pulmones. *Revista Chilena de Historia Natural,* 80 (3), 275-284.

Carvajal-Villacres, L.E. (2021). Determinación de un perfil hemático en loros cabeciazul (*Pionus menstruus*) de la familia Psittacidae del zoológico “El Arca” del Tena. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agropecuarias Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.

Clark, P.; Boardman, W.; Raidal, S. (2009). Atlas of clinical avian hematology. Wiley-Blackwell. Singapur, 46 pp.

Claver, J. (2005). El trombocito aviar. InVet, 7(1): 139-146.

Claver, J. A., y Quaglia, A. I. (2009). Comparative morphology, development, and function of blood cells in nonmammalian vertebrates. *Journal of exotic pet medicine*, 18(2), 87-97.

Copete-Sierra, M. (2013). Aspectos Generales de la Evaluación Hematológica en Fauna silvestre y no Convencional. Memorias de la Conferencia Interna en Medicina y Aprovechamiento de Fauna Silvestre, Exótica y no Convencional. Bogotá, Colombia. 9, 17-39

Daimon, T., y Uchida, K. (1978). Electron microscopic and cytochemical observations on the membrane systems of the chicken thrombocyte. *Journal of Anatomy*, 125(Pt 1), 11.

Daimon, T., Mizuhira, V., Takahashi, I., y Uchida, K. (1979). The surface connected canalicular system of carp (*Cyprinus carpio*) thrombocytes: Its fine structure and three-dimensional architecture. *Cell and Tissue Research,* 203(3), 355–365. https://doi.org/10.1007/BF00233264

Davis, A. K., Maney, D. L., y Maerz, J. C. (2008). The use of leukocyte profiles to measure stress in vertebrates: a review for ecologists. Functional Ecology, 22(5), 760–772. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01467.x

Dolka, B., Włodarczyk, R., Żbikowski, A., Dolka, I., Szeleszc-zuk, P. y Kluciński, W. (2014) Hematological parameters in relation to age, sex and biochemical values for mute swans (*Cygnus olor*). Vet. Res. Commun., 38: 93-100.

Downs, C. J., Adelman, J. S., y Demas, G. E. (2014). Mechanisms and methods in ecoimmunology: Integrating within-organism and between-organism processes. Integrative and Comparative Biology, 54(3), 340–352. https://doi.org/10.1093/icb/icu082

Ferdous, F. y Scott, T. (2023). La capacidad inmunológica de los trombocitos. Revista Internacional de Ciencias Moleculares , 24 (16), 12950. https://doi.org/10.3390/ijms241612950

Fiorello, C. V., Nisbet, I. C., Hatch, J. J., Corsiglia, C., y Pokras, M. A. (2009). Hematology and absence of hemoparasites in breeding common terns (*Sterna hirundo*) from Cape Cod, Massachusetts. Journal of Zoo and Wildlife Medicine, 40(3), 409-413.

Fudge, A. M. (2000). Laboratory reference ranges for selected avian, mammalian, and reptilian species. Laboratory Medicine: Avian and Exotic Pets. Philadelphia, PA: WB Saunders, 375, 400.

Gallo, S.S.M., Ederli, N.B., Bôa-Morte, M.D.O., y Oliveira, F.C.R.D. (2015). Hematological, morphological and morphometric characteristics of blood cells from rhea, *Rhea americana* (Struthioniformes: Rheidae): a standard for Brazilian birds. Brazilian Journal of Biology, 75, 953-962.

Gálvez-Martínez, C. F., Ramírez Benavides, G. F., y Osorio, J. H. (2009). El laboratorio clínico en hematología de aves exóticas. *Biosalud*, 8(1), 178-188.

Gaspar, H., Bargallo, F., Grifols, J., Correia, E., & de Lurdes Pinto, M. (2021). Intervalos de referencia hematológicos en loros grises africanos (Psittacus erithacus) en cautiverio. Veterinární medicína, 66(1), 24–31. https://doi.org/10.17221/15/2020-VETMED

George, J. N. (2000). Platelets. The Lancet, 355(9214), 1531–1539. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02175-9

Gillooly, J. F., y Zenil-Ferguson, R. (2014). Vertebrate blood cell volume increases with temperature: Implications for aerobic activity. PeerJ, 2, e346. https://doi.org/10.7717/peerj.346

Glomski, C. y Pica, A. (2011). The avian erythrocyte. Its phylogenetic Odyssey. 1st ed. CRC Press, Boca Raton, FL

Gordon, C. C., y Taylor, P. T. (1992). Human monocyte heterogeneity: functional characterization of two morphologically distinct subpopulations. Journal of Immunology, 148(5), 1450–1458.

Gregory, T.R., Andrews, C.B., McGuire, J.A. y Witt, C.C. (2009). The smallest avian genomes are found in hummingbirds. Proc. Royal Soc. B: Biol. Sci., 276: 3753-3757.

Gregory, T. R. (2026). Animal Genome Size Database. http://www.genomesize.com

Grenat, P. R., Bionda, C., Salas, N. E., y Martino, A. L. (2009). Variation in erythrocyte size between juveniles and adults of Odontophrynus americanus. Amphibia-Reptilia, 30(1), 141–145. https://doi.org/10.1163/156853809787392713

Gross, W.B. y Siegel, H.S. (1983). Evaluation of the Heterophil/Lymphocyte Ratio as a Measure of Stress in Chickens. Avian Diseases 27(4), 972-979. https://doi.org/10.2307/1590198

Guliver, G. (1875). Observations on the Sizes and Shapes of the Red Corpuscles of the Blood of Vertebrates, with drawings of them to a uniform scale, and extended and revised tables of measurements. Proc. Zool. Soc. London, 474-495.

Haas, M. (2020). Erythrocyte size in birds; an additional data set. Oecologia Montana, 29(2), 79-95.

Haas, M. y Janiga, M. (2020). Variation in erythrocyte morphology in alpine accentors *(Prunella collaris* Scop.) from Tian Shan, Rila and the High Tatra mountains and effects of molting. Eur. Zool. J., 87: 475-488

Halliday, D., Resnick, R., y Walker, J. (2014). Fundamentals of Physics (10th ed.). Wiley.

Hanauska-Brown, U. y Dufty, A.M Jr. (1996). Blood chemistry, cytology, and body condition in adult northern goshawks (*Accipiter gentilis*). Journal of Raptor Research, 37(4), 299-306.

Hartman, F.A. y Lessler, M.A. (1963). Erythrocyte measurements in birds. The Auk, 80: 467-473.

Hawkey, C. M., Bennett, P. M., Gascoyne, S. C., Hart, M. G., y Kirkwood, J. K. (1991a). Erythrocyte size, number and haemoglobin content in vertebrates. British journal of haematology, 77(3), 392-397. https://doi.org/10.1111/j.1365-2141.1991.tb08590.x

Hawkey, C. M., Bennett, P. M., Gascoyne, S. C., Hart, M. G., y Kirkwood, J. K. (2010). Comparative hematology: studies on avian species with differing activity levels and metabolic demands. Veterinary Record, 166(5), 132–136.

Hawkey, C. M., Dennett, T. B., y Keymer, I. F. (1991b). Comparative hematology of avian species: the effects of captivity. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 99(3), 397–401.

Hawkey, C. M., y Dennett, T. B. (1989). A Colour Atlas of Comparative Veterinary Hematology: Normal and Abnormal Blood Cells in Mammals, Birds and Reptiles. Wolfe Publishing Ltd.

Hawkey, C.M. y Samour, H.J. (1988) The value of clinical hematology in exotic birds. In: Exotic Animals. (eds E.R. Jacobson y G.V. Kollias), pp. 109–141. Churchill Livingstone, New York.

Holland, R. A. B., y Forster, R. E. (1966). The effect of size of red cells on the kinetics of their oxygen uptake. Journal of General Physiology, 49(4), 727–742. https://doi.org/10.1085/jgp.49.4.727

iNatutalist. (2024) Passeriformes. https: //mexico.inaturalis.org /impuestos/7251 - P#cita_nota -2 fecha de acceso 18 de diciembre de 2024.

Irisova, O.A. (1988). Ecological and geographic features of the bird blood. PhD. Thesis, Zoological Faculty, Altay State University. (En Ruso)

Janiga, M., y Haas, M. (2019). Alpine accentors as monitors of atmospheric long-range lead and mercury pollution in alpine environments. Environ. Sci. Pollut. Res., 26: 2445-2454

Janiga, M., Haas, M. y Kufelová, M. (2017). Age, sex and seasonal variation in the shape and size of erythrocytes of the alpine accentor*, Prunella collaris* (Passeriformes: Prunellidae). Eur. Zool. J., 84: 583-590

Johnstone, C. P., Reina, R. D., y Lill, A. (2015). Use of erythrocyte indicators of health and condition in vertebrate ecophysiology. Biological Reviews, 90(4), 1091–1107. https://doi.org/10.1111/brv.12150

Kaiser, P. (2007). El genoma inmunitario aviar: ¿un vaso medio lleno o medio vacío? Cytogenetic and Genome Research, 117, 221-230. doi: 10.1159/000103183

Kaiser, P. (2010). Advances in avian immunology—prospects for disease control: a review. Avian pathology, 39(5), 309-324.

Kannan, G. y Mench, J.A. (1996). Influence of different handling methods and crating periods on plasma corticosterone concentrations in broilers. British Poultry Science 37, 21-31.

Karasuyama, H., Mukai, K., Tsujimura y K Obata. (2009). Newly-discovered roles for basophils: a neglected minority gains new respect. Nature Reviews Immunology 9(1): 9-13.

Kizhina, A. G., Kalinina, S. N., Uzenbaeva, L. B., Panchenko, D. V., Łapiński, S., Ilyukha, V. A., Pechorina, E. F., y Fokina, V. O. (2020). Comparative study of erythrocyte morphology and size in relation to ecophysiological adaptations in Rodentia species. Russian Journal of Theriology, 19(2), 161–171. https://doi.org/10.15298/rusjtheriol.19.2.06

Kleiber, M. (1932). Body size and metabolism. Hilgardia, 6(11), 315–353. https://doi.org/10.3733/hilg.v06n11p315

Kobayashi, S., Qasimi, M. I., y Watanabe, G. (2022). The positive relationship between androgens and hematocrit levels in the Japanese quail (Coturnix japonica). Journal of Experimental Zoology A, 337, 195–198. https://doi.org/10.1002/jez.2612

Kolesnik, E., Derkho, M., Strizhikov, V., Strizhikova, S., Sereda, T., Gizatullina, F., y Rebezov, M. (2020). Functional morphology of birds' blood leukocytes. Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, 8 (Spl-2- AABAS), S374 – S380

Kostelecka-Myrcha, A. (1997). The ratio of amount of haemoglobin to total surface area of erythrocytes in birds in relation to body mass, age of nestlings and season of the year. Physiol. Zool., 70: 278-282.

Kostelecka-Myrcha, A. y Jaroszewicz, M. (1999) The changes in the values of red blood indices dur-ing the nestling development of the house martin (*Delichon urbica*). Acta Ornithol., 28: 39-45

Kostelecka-Myrcha, A., Jaroszewicz, M. y Chołostia-kow-Gromek, J. (1993). Relationship between the values of red blood indices and the body mass of birds. Acta Ornithol., 28: 47-53.

Kostelecka-Myrcha, A., Myrcha A. (1989). Changes of the red blood picture during nesting development of Wilson's storm petrel (*Oceanites oceanicus* Kühl). Pol. Polar Res., 10: 151-162.

Kostelecka-Myrcha, A., Pinowski, J. y Tomek, T. (1971). Changes of the respiratory function of the blood of nestling common sparrows (*Passer domesticus* L.) during their development. Bull. Acad. Polon. Sci., CI.2, 19: 639-645.

Krietsch, J., Goymann, W., Valcu, M., y Kempenaers, B. (2025). Sex differences in testosterone and hematocrit levels reflect mating system differences of two Arctic-breeding shorebird species. Behavioral Ecology, 36(6), araf136. https://doi.org/10.1093/beheco/araaf136

Kumar, M.V. (2016). Morphometric studies of blood cells in *Cyprinus carpio, Ctenopharyngodan idella* and *Hypophthalmichthys molitrix* cultured fish in west Godavari region of Andhra Pradesh. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies 5:489–493.

Laguë, S.L. (2017). High-altitude champions: birds that live and migrate at altitude. J. Appl. Physiol.,123: 942-950

Lahnsteiner, F. (2021). Erythrocyte morphometry in teleost fish—Species-specific, inter-individual and environmental-related differences. Acta Zoologica, 102(3), 237–249. https://doi.org/10.1111/azo.12397

Lay, P. A., y Baldwin, J. (1999). A comparative analysis of metabolic enzyme activities in fish tissues: relationships with erythrocyte size and swimming performance. Comparative Biochemistry and Physiology. (consulta en repositorio).

Lay, P. A., y Baldwin, J. (1999). What determines the size of teleost erythrocytes? Correlations with oxygen transport and nuclear volume. Fish Physiology and Biochemistry, 20(1), 31–35. https://doi.org/10.1023/A:1007785202280

León-Velarde, F., Monge, C., y Arregui, A. (1993). Adaptation to high altitude in birds and mammals. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 106(3), 597–601. https://doi.org/10.1016/0300-9629(93)90376-X

Leiva, F. P., Molina-Venegas, R., Alter, K., Freire, C. A., Hendriks, A. J., Hermaniuk, A., Serre-Fredj, L., Shokri, M., Czarnoleski, M., y Mark, F. C. (2026). ErythroCite: A database on red blood cell size of fishes. Scientific Data, 13, 307. https://doi.org/10.1038/s41597-026-06904-1

Lüdecke, D. (2018). ggeffects: Tidy data frames of marginal effects from regression models. Journal of Open Source Software, 3(26), 772. https://doi.org/10.21105/joss.00772

Maekawa, S., y Kato, T. (2015). Diverse aspects of erythropoiesis responding to hypoxia and low environmental temperature in vertebrates. BioMed Research International, 2015, 1–12. https://doi.org/10.1155/2015/742079

Martin, L. B., Han, P., Kwong, J., & Hau, M. (2006). Cutaneous immune activity varies with physiological state in female house sparrows (Passer domesticus). Physiological and Biochemical Zoology, 79(4), 775–783. https://doi.org/10.1086/504608

Martínez Quintanilla, M. C., Torres Bugarín, O., Martínez Guerrero, J. H., Delgado León, T. G., Salas Pacheco, J. M., y Pereda Solís, M. E. (2017). Relación Heterófilo/Linfocito, frecuencia espontánea de eritrocitos micronucleados y prolongaciones nucleares en el ganso nevado (*Chen caerulescens*): Una propuesta como posible biomonitor de estrés y genotóxicos ambientales. Huitzil, 18(1), 102-111.

Maxwell, M.H., Robertson, G.W., Spence, S. y McCorquodale, C.C. (1990). Comparison of haematological values in restricted and ad libitum fed domestic fowls: red blood cell characteristics. Br. Poult. Sci., 31: 407-413.

Maxwell, M. H. (1993). Avian blood leucocyte responses to stress. World's Poultry Science Journal, 49(1), 34–43. https://doi.org/10.1079/WPS19930004

Maxwell, M. H., y Robertson, G. W. (1998). The avian heterophil leucocyte: a review. World's Poultry Science Journal, 54(2), 155–178. https://doi.org/10.1079/WPS19980012

Megarani, D. V., Hardian, A. B., Arifianto, D., Santosa, C. M., y Salasia, S. I. (2020). Comparative morphology and morphometry of blood cells in zebrafish (*Danio rerio*), common carp (*Cyprinus carpio carpio*), and tilapia (*Oreochromis niloticus*). Journal of the American Association for Laboratory *Animal Science*, 59(6), 673-680. Doi: 10.30802/AALAS-JAALAS-20-000013 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7604688/

Minias, P. (2015). The use of hemoglobin concentrations to assess physiological condition in birds: a review. *Conservation physiology*, 3(1), cov007.

Moe, R.O., Guemene, D., Bakken, M., Larsen H.J.S, Shini, S., Lervik, S., Skeerve, E., Michel., V. y Tauson, R. (2010). Effects of housing conditions during the rearing and laying period on adrenal reactivity, immune response and heterophil to lymphocyte (H/L) ratios in laying hens. *Animal* 4(10), 1709-1715.

Morera, D., y MacKenzie, S. A. (2011). Is there a direct role for erythrocytes in the immune response? Veterinary Research, 42, 89. https://doi.org/10.1186/1297-9716-42-89

Moura-Fortes, E.A., de Sousa, A.F., de Almeida, E.C.S., Junior, A.M.C. y de Moura, W.L. (2009). Morfologia das células do sangue periférico em emas (*Rhea americana*). Revista Brasileña de Investigación Veterinaria y Ciencia Animal 46(3), 215-221.

Murphy, K. M., y Weaver, C. (2017). Janeway's immunobiology (9ª ed.). Garland Science.

Murphy, W. G. (2014). The sex difference in haemoglobin levels in adults — mechanisms, causes, and consequences. Blood Reviews, 28, 41–47. https://doi.org/10.1016/j.blre.2013.12.003

Nakagawa, S., y Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. Methods in Ecology and Evolution, 4, 133–142. https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x

Nasser, N. A., Azevedo, A. C., Dos Santos, P. D. y Farias, M. (2021). Cell size and hemoglobin content in erythrocytes of birds: implications for oxygen transport. Journal of Comparative Physiology B, 191(6), 845–857.

Nurden, A. T., y Nurden, P. (2011). The role of platelets in blood vessel repair, hemostasis and thrombosis. Thrombosis and Haemostasis, 105(S1), S13–S33. https://doi.org/10.1160/THS10-11-0720

Owen, J.C. y F.R. Moore. (2006). Seasonal differences in immunological condition of three species of thrushes. Condor 108: 389–398.

Palomeque, J., Rodriguez, J.D., Palacios, L. y Planas, J. (1980). Blood respiratory properties of swifts. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 67: 91-95.

Passantino, L., Massaro, M. A., Jirillo, F., Di Modugno, D., Ribaud, M. R., Di Modugno, G., y Jirillo, E. (2007). Antigenically activated avian erythrocytes release cytokine-like factors: a conserved phylogenetic function discovered in fish. Immunopharmacology and immunotoxicology, 29(1), 141-152.

Penman, R. S., Chappell, M. A., y Nagy, K. A. (2012). Changes in erythrocyte size and number with body mass and age in lizards. Physiological and Biochemical Zoology, 85(2), 165–172. https://doi.org/10.1086/664647

Penman, Z., Deeming, D. C., y Soulsbury, C. D. (2022). Ecological and life-history correlates of erythrocyte size and shape in Lepidosauria. Journal of Evolutionary Biology, 35, 708–718. https://doi.org/10.1111/jeb.14004

Peters, A. (1983). The morphometry of blood cells in birds and reptiles. Journal of Zoology, 200(1), 77–91. https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1983.tb04260.x

Puerta, M., Nava, M.P., Venero, C. y Veiga, J.P. (1995): Hematology and plasma chemistry of house sparrows (*Passer domesticus*) along the summer months and after testosterone treatment. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 110: 303–307

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. https://www.r-project.org/

Ribeiro, L. R.., Sans, E. C. de O., Santos, R. M., Taconelli, C. A., de Farias, R., y Molento, C. F. M. (2024). Will the white blood cells tell? A potential novel tool to assess broiler chicken welfare. Frontiers in Veterinary Science, 11, Article 1384802. https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1384802

Ribeiro, R. C., Cardoso, T. F., y Silva, L. P (2024). Leucocyte morphological alterations in broilers under stress conditions. Frontiers in Veterinary Science, 11, 1293. https://doi.org/10.3389/fvets.2024.0129

Ruiz, G., Rosenmann, M., Novoa, F.F. y Sabat, P. (2002). Hematological parameters and stress index in rufous-collared sparrows dwelling in urban environments. The Condor 104, 162166.

Ruiz Valenzuela, G. (1986). Adaptaciones hematológicas de anuros a las alturas andinas [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151563

Salakij, C., Salakij, J., Narkkong, N. A., Pitakkingthong, D., y Poothong, S. (2003). Hematology, morphology, cytochemistry and ultrastructure of blood cells in painted stork (*Mycteria leucocephala*). Agriculture and Natural Resources, 37(4), 506-513.

Samour, J.H., Naldo, J.L. y John, S.K. (2005) Normal haematological values of captive gyr falcons (*Falco rusticolus*). *Veterinary Record* 157, 844–847.

Schmid-Schönbein, G. W., Sung, K. L., Tözeren, A., Skalak, R., y Chien, S. (1981) Passive mechanical properties of human leukocytes. Biophysical Journal, 36(1), 243–256. https://doi.org/10.1016/S0006-3495(81)84792-4

Schmidt-Nielsen, K. (1975). Animal physiology: Adaptation and environment. *Cambridge University Press*.

Shini, S., Kaiser, P., Shini, A., y Bryden, W. L. (2008). Differential alterations in ultrastructural morphology of chicken heterophils and lymphocytes induced by corticosterone and lipopolysaccharide. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry & Molecular Biology, 149(2), 324–333. https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2007.10.003

Snyder, G. K. (1981). Influence of hypoxia on erythrocyte volume in birds. Respiration Physiology, 46(1), 1–12. https://doi.org/10.1016/0034-5687(81)90124-2

Soulsbury, C. D., Dobson, J., Deeming, D. C., y Minias, P. (2022). Energetic lifestyle drives size and shape of avian erythrocytes. Integrative and Comparative Biology, 62(1), 71-80. (doi:10.6084/m9.figshare.16545852).

Soulsbury, C. D., Johnson, A. C., y Carey, F. J. (2021). Hematological and physiological correlates of avian migration. Journal of Avian Biology, 52(4), e02718. https://doi.org/10.1111/jav.02718

Stacy, N.I., Hollinger, C., Arnold, J.E., Cray, C., Pendl, H., Nelson, P.J. y Harvey, J.W. (2022). Left shift and toxic change in heterophils and neutrophils of non-mammalian vertebrates: A comparative review, image atlas, and practical considerations. Vet Clin Pathol. 51(1):18-44. doi: 10.1111/vcp.13117. Epub 2022 Feb 24. PMID: 35199862.

Starostová, Z., Konarzewski, M., Kozłowski, J., & Kratochvíl, L. (2013). Ontogeny of metabolic rate and red blood cell size in eyelid geckos: species follow different paths. PLoS One, 8(5), e64715. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064715

Sturkie, P. D., y Griminger, P. (1986). Body fluids: blood. En: Avian Physiology (pp. 102–129). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4862-0_5

Tadjalli, M., Nazifi , S. y Eemanparvar, A. (2003). Normal cellular morphology of the blood of Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*). Comparative Clinical Pathology 12, 102–105.

Vargas, M., Ledezma, G.Illanes, Á., Ruiz P, G., Choque, T., Anagua, F., y Bautista, C. (2016). Valores hematológicos, química sérica y descripción de células sanguíneas del cóndor andino (*Vultur gryphus*) cautivos en el Zoológico Vesty Pakos, de La Paz, Bolivia. *Revista Con-ciencia*, 4(1), 35-48.

Walker, E.L. (1904). A Comparative Study of the Blood Corpuscles of Vertebrates. Journal of Medical Research 13(1): 61-78. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2099149/pdf/jmedres00109-0072.pdf

White, J. G. (1972). The structure of blood platelets. En: Montagna, W. y Dobson, R. L. (Eds.), Advances in Biology of Skin (Vol. 13, pp. 169–199). Oxford: Pergamon Press.

Williams, J.I. y Trainer, D.O. (1971) A hematological study of snow, blue, and Canada geese. *Journal of Wildlife Diseases* 7, 258–265.

Witeska, M. (2013). Erythrocytes in teleost fishes: a review. Zoology and Ecology, 23, 275–281. https://doi.org/10.1080/21658005.2013.846963

Worthen, G. S., Schwab, B., Elson, E. L., y Downey, G. P. (1989). Mechanics of stimulated neutrophils: Cell stiffening induces retention in capillaries. *Science*, 245(4914), 183–186. https://doi.org/10.1126/science.2740913

Consideraciones finales

El presente trabajo aporta evidencia relevante sobre la complejidad y plasticidad de la respuesta hematológica y morfométrica en aves silvestres, integrando análisis de perfiles leucocitarios y morfología celular en especies de las familias Passerellidae y Parulidae bajo distintos contextos ecológicos y biológicos. Los resultados obtenidos demuestran que tanto el índice H/L como los parámetros morfométricos celulares constituyen herramientas sensibles y complementarias para evaluar el estado fisiológico, inmunológico y adaptativo de las aves frente a presiones ambientales y estrategias de vida diferenciadas.

Se confirma que el índice H/L es un biomarcador robusto de estrés fisiológico, capaz de reflejar diferencias entre familias, especies, sexos, estatus migratorio y localidades, así como su relación con la condición corporal. La alta proporción de basófilos detectada en varias especies desafía los paradigmas clásicos de la hematología aviar y sugiere la existencia de procesos inmunológicos particulares, posiblemente asociados a factores ambientales o parasitarios locales, que requieren mayor investigación.

Por otro lado, el análisis morfométrico revela que el volumen celular, especialmente de eritrocitos y heterófilos, es un descriptor funcional altamente sensible a variables fisiológicas, ecológicas y filogenéticas. El volumen eritrocitario se asocia negativamente con la condición corporal y es menor en especies migratorias, reflejando adaptaciones a demandas aeróbicas extremas. El volumen de los heterófilos, mayor en migratorias, sugiere una activación inmunitaria basal elevada, mientras que el volumen trombocitario responde principalmente a diferencias taxonómicas y variabilidad individual.

Estos hallazgos contribuyen a ampliar el marco conceptual de la ecofisiología hematológica en aves silvestres, demostrando que la integración de biomarcadores tradicionales y morfométricos permite una evaluación más precisa y contextualizada del estado de salud y adaptación de las poblaciones. Además, se destaca la importancia de establecer valores de referencia específicos y de considerar la historia natural, la ecología y la variabilidad individual en la interpretación de los datos.

En conjunto, este proyecto refuerza el valor de los estudios hematológicos y morfométricos como herramientas diagnósticas y de monitoreo en ecología y conservación, aportando bases para el desarrollo de estrategias de manejo y protección de la avifauna ante

escenarios de cambio ambiental. La evidencia generada aquí sienta precedente para futuras investigaciones comparativas y multidisciplinarias, orientadas a comprender los mecanismos fisiológicos que subyacen a la resiliencia y vulnerabilidad de las especies silvestres.

Apéndice General

Valores promedio de ovalidad y volumen de las células sanguíneas estudiadas por especie e individuo. Los datos muestran los promedios, su error estándar y su pertenecia a grupos de acuerdo con los resultados del análisis estadístico.

				OVALIDAD			VOLUMEN		
ESPECIE	**CÉLULA**	**INDIVIDUO**	**n**	**PROMEDIO**	**EE**	**GRUPO**	**PROMEDIO**	**EE**	**GRUPO**
Atlapetes pileatus	Basófilo	1	10	1.3841	0.0607	a	187.2336	19.1234	a
Atlapetes pileatus	Basófilo	2	11	1.1617	0.0610	a	119.1052	13.0012	bc
Atlapetes pileatus	Basófilo	3	10	1.2527	0.0685	a	179.2683	17.0563	ab
Atlapetes pileatus	Basófilo	4	12	1.2314	0.0506	a	211.4411	18.2240	a
Atlapetes pileatus	Basófilo	5	11	1.2685	0.0545	a	93.7964	9.3022	c
Atlapetes pileatus	Eosinófilo	1	6	1.0613	0.0101	a	574.5724	73.1079	a
Atlapetes pileatus	Eosinófilo	2	5	1.1217	0.0365	a	203.2653	33.6114	b
Atlapetes pileatus	Eosinófilo	3	5	1.0872	0.0363	a	319.9999	44.8628	ab
Atlapetes pileatus	Eosinófilo	4	10	1.1478	0.0306	a	395.5058	80.1962	ab
Atlapetes pileatus	Eosinófilo	5	5	1.0891	0.0302	a	172.1585	39.1500	b
Atlapetes pileatus	Eritrocito	1	10	1.9109	0.0333	b	294.9660	13.8461	ab
Atlapetes pileatus	Eritrocito	2	10	1.8283	0.0475	b	271.2724	11.2264	bc
Atlapetes pileatus	Eritrocito	3	10	2.1271	0.0344	a	254.9812	9.1043	bc
Atlapetes pileatus	Eritrocito	4	10	1.8501	0.0743	b	339.5324	16.5218	a
Atlapetes pileatus	Eritrocito	5	11	1.8925	0.0465	b	238.3122	6.1900	c
Atlapetes pileatus	Heterófilo	1	7	1.0591	0.0194	ab	309.3574	25.5304	a
Atlapetes pileatus	Heterófilo	2	10	1.2009	0.0494	ab	172.7795	24.6184	a
Atlapetes pileatus	Heterófilo	3	10	1.0487	0.0111	b	294.0043	49.8752	a
Atlapetes pileatus	Heterófilo	4	10	1.2124	0.0506	a	312.6308	53.0986	a
Atlapetes pileatus	Heterófilo	5	9	1.1219	0.0391	ab	210.1443	25.5760	a
Atlapetes pileatus	Linfocito	1	11	1.1038	0.0292	a	157.4990	17.5107	ab
Atlapetes pileatus	Linfocito	2	10	1.1782	0.0569	a	125.8210	10.2116	b
Atlapetes pileatus	Linfocito	3	10	1.1665	0.0315	a	154.2216	16.3030	ab

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Atlapetes pileatus	Linfocito	4	12	1.1477	0.0300	a	206.2354	16.1508	a
Atlapetes pileatus	Linfocito	5	10	1.1310	0.0261	a	127.9778	23.0873	b
Atlapetes pileatus	Monocito	1	12	1.3240	0.0589	b	286.7735	25.9402	ab
Atlapetes pileatus	Monocito	2	6	1.0442	0.0135	c	196.9366	18.5427	b
Atlapetes pileatus	Monocito	3	10	1.1932	0.0617	bc	413.2461	58.3088	a
Atlapetes pileatus	Monocito	4	10	1.8102	0.0666	a	234.9755	10.6197	b
Atlapetes pileatus	Monocito	5	8	1.1787	0.0563	bc	247.0032	41.6393	b
Atlapetes pileatus	Núcleo	1	10	2.3957	0.1047	a	20.7553	1.8749	ab
Atlapetes pileatus	Núcleo	2	10	2.0513	0.0456	b	25.1540	1.1438	a
Atlapetes pileatus	Núcleo	3	10	2.2877	0.1008	ab	19.4365	0.8439	b
Atlapetes pileatus	Núcleo	4	10	2.0998	0.0499	ab	21.7724	0.7602	ab
Atlapetes pileatus	Núcleo	5	11	2.2247	0.0685	ab	18.2200	1.0374	b
Atlapetes pileatus	Trombocito	1	11	1.3216	0.0678	a	39.6282	2.4317	ab
Atlapetes pileatus	Trombocito	2	10	1.1200	0.0192	b	27.0780	1.4943	c
Atlapetes pileatus	Trombocito	3	10	1.1580	0.0408	ab	26.6389	1.5519	c
Atlapetes pileatus	Trombocito	4	10	1.1896	0.0459	ab	45.2463	3.8443	a
Atlapetes pileatus	Trombocito	5	10	1.0649	0.0127	b	32.1770	2.1765	bc
Basileuterus rufifrons	Basófilo	1	11	1.3184	0.0551	a	63.7027	4.4629	d
Basileuterus rufifrons	Basófilo	2	11	1.2275	0.0534	a	143.0699	27.0109	a
Basileuterus rufifrons	Basófilo	3	10	1.1781	0.0429	a	84.9768	5.0572	bcd
Basileuterus rufifrons	Basófilo	4	10	1.1646	0.0550	a	120.3738	10.7158	abc
Basileuterus rufifrons	Basófilo	5	11	1.2888	0.0859	a	70.5949	5.6215	cd
Basileuterus rufifrons	Basófilo	6	10	1.1421	0.0266	a	72.6932	6.9422	cd
Basileuterus rufifrons	Basófilo	7	10	1.2442	0.0498	a	80.3286	4.2187	bcd
Basileuterus rufifrons	Basófilo	8	11	1.1423	0.0319	a	74.9408	2.9100	bcd
Basileuterus rufifrons	Basófilo	9	11	1.2920	0.0579	a	105.5305	10.8207	abcd
Basileuterus rufifrons	Basófilo	10	11	1.1426	0.0406	a	125.3215	11.3912	ab
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	1	7	1.1411	0.0658	b	325.0355	65.4905	a

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	2	11	1.2388	0.0723	b	166.3845	29.1854	b
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	3	10	1.2050	0.0746	b	110.7558	11.4247	b
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	4	8	1.5834	0.1963	a	180.4747	34.0229	b
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	5	10	1.0720	0.0207	b	149.5722	17.9485	b
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	6	12	1.0647	0.0196	b	127.5720	9.4478	b
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	7	10	1.1058	0.0266	b	153.9204	14.6363	b
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	8	12	1.1088	0.0236	b	177.4434	27.9534	b
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	9	12	1.1486	0.0379	b	174.0922	28.6556	b
Basileuterus rufifrons	Eosinófilo	10	4	1.0672	0.0178	b	242.6154	22.4113	ab
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	1	11	1.9500	0.0319	ab	231.4204	9.4844	cd
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	2	10	1.9544	0.0423	ab	200.3813	6.8289	d
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	3	10	1.8727	0.0419	abc	243.4449	13.5123	cd
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	4	10	1.6327	0.0169	d	250.5418	10.6971	cd
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	5	10	1.9761	0.0478	ab	225.6878	14.5663	cd
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	6	10	1.7185	0.0339	cd	328.4327	11.4533	ab
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	7	10	1.7096	0.0413	cd	318.3176	16.7516	ab
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	8	10	1.7352	0.0474	cd	343.9737	17.6772	a
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	9	10	1.8190	0.0318	bcd	319.1463	9.8229	ab
Basileuterus rufifrons	Eritrocito	10	10	2.0492	0.0620	a	273.5185	12.9947	bc
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	1	10	1.3602	0.1076	a	215.7040	59.0003	ab
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	2	9	1.2077	0.0424	ab	280.9815	29.0196	ab
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	3	10	1.0572	0.0154	b	215.3434	42.5965	ab
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	4	11	1.2534	0.0521	ab	312.3682	39.3343	a
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	5	10	1.1472	0.0563	ab	171.1739	34.5742	ab
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	6	9	1.0762	0.0190	b	112.8342	9.5555	b
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	7	10	1.0819	0.0272	b	291.5460	53.9373	ab
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	8	10	1.0821	0.0180	b	222.6205	15.4744	ab
Basileuterus rufifrons	Heterófilo	9	14	1.0901	0.0378	b	315.6219	32.5351	a

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Basileuterus rufifrons	Linfocito	1	8	1.2182	0.0393	a	137.6999	16.4645	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	2	10	1.1040	0.0251	a	142.2916	17.3233	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	3	7	1.1473	0.0389	a	126.5140	17.3814	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	4	8	1.1616	0.0231	a	156.9108	17.9544	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	5	10	1.1191	0.0358	a	125.7712	9.7114	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	6	12	1.1321	0.0301	a	108.3898	9.9398	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	7	8	1.1543	0.0280	a	189.0749	67.2994	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	8	11	1.1715	0.0348	a	98.5520	10.9463	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	9	12	1.1350	0.0335	a	150.3847	9.7076	a
Basileuterus rufifrons	Linfocito	10	1	1.0493	NA	a	232.7050	NA	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	1	5	1.2205	0.1313	abc	326.8806	70.3677	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	2	9	1.1966	0.0505	bc	217.4809	40.8636	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	3	5	1.0893	0.0443	c	271.3368	70.0135	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	4	6	1.4855	0.0912	abc	180.3370	25.7967	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	5	11	1.2450	0.0996	bc	280.3931	58.3341	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	6	11	1.5294	0.0758	ab	124.4046	14.7770	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	7	3	1.3689	0.1712	abc	213.0428	91.5556	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	8	8	1.6554	0.0990	a	168.2122	30.2117	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	9	10	1.2095	0.0709	a	308.0967	66.4045	a
Basileuterus rufifrons	Monocito	10	1	1.3389	NA	a	416.9942	NA	a
Basileuterus rufifrons	Núcleo	1	11	2.1700	0.0468	a	17.9149	0.7168	b
Basileuterus rufifrons	Núcleo	2	10	2.2182	0.0726	a	19.5715	0.7369	ab
Basileuterus rufifrons	Núcleo	3	10	2.1432	0.0861	ab	27.0412	1.9380	a
Basileuterus rufifrons	Núcleo	4	10	2.0406	0.0410	ab	20.3156	1.0920	ab
Basileuterus rufifrons	Núcleo	5	10	2.2270	0.1130	a	21.3435	2.6480	ab
Basileuterus rufifrons	Núcleo	6	10	1.8352	0.0586	b	28.3650	4.1762	a
Basileuterus rufifrons	Núcleo	7	10	1.9880	0.0502	ab	17.4366	1.0127	b
Basileuterus rufifrons	Núcleo	8	10	1.9547	0.0517	ab	27.2851	1.3274	a

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Basileuterus rufifrons	Núcleo	9	10	1.9548	0.0504	ab	22.5646	2.3360	ab
Basileuterus rufifrons	Núcleo	10	10	2.1540	0.0821	a	20.0793	1.3490	ab
Basileuterus rufifrons	Trombocito	1	8	1.4251	0.0580	a	29.9978	1.7748	abc
Basileuterus rufifrons	Trombocito	2	10	1.2175	0.0460	b	27.7065	2.9578	bc
Basileuterus rufifrons	Trombocito	3	10	1.2229	0.0492	b	33.4333	3.5777	ab
Basileuterus rufifrons	Trombocito	4	10	1.1789	0.0418	b	30.3877	3.4503	abc
Basileuterus rufifrons	Trombocito	5	10	1.2287	0.0414	b	20.9406	1.3002	c
Basileuterus rufifrons	Trombocito	6	10	1.0811	0.0205	b	23.2340	2.0730	bc
Basileuterus rufifrons	Trombocito	7	10	1.1540	0.0382	b	40.0395	2.6727	a
Basileuterus rufifrons	Trombocito	8	10	1.1643	0.0451	b	20.7937	1.5858	c
Basileuterus rufifrons	Trombocito	9	10	1.1018	0.0250	b	20.4896	1.7278	c
Basileuterus rufifrons	Trombocito	10	10	1.1047	0.0319	b	34.6717	2.6063	ab
Junco phaeonotus	Basófilo	2	11	1.1952	0.0452	ab	47.2755	2.7750	c
Junco phaeonotus	Basófilo	3	11	1.3186	0.0556	a	75.1377	8.6788	ab
Junco phaeonotus	Basófilo	4	11	1.2077	0.0726	ab	78.8606	4.6547	ab
Junco phaeonotus	Basófilo	5	12	1.2399	0.0350	ab	72.1800	4.9515	b
Junco phaeonotus	Basófilo	6	10	1.1090	0.0222	b	96.1579	6.3191	a
Junco phaeonotus	Eosinófilo	2	11	1.2917	0.0649	a	80.4636	13.3031	b
Junco phaeonotus	Eosinófilo	3	12	1.2980	0.0518	a	78.7864	7.0939	b
Junco phaeonotus	Eosinófilo	4	12	1.1915	0.0369	a	73.4635	6.1071	b
Junco phaeonotus	Eosinófilo	5	16	1.2109	0.0429	a	87.0556	12.8523	b
Junco phaeonotus	Eosinófilo	6	12	1.1292	0.0286	a	183.4937	36.5382	a
Junco phaeonotus	Eritrocito	1	10	1.7397	0.0423	ab	269.6889	7.9774	a
Junco phaeonotus	Eritrocito	2	10	1.6897	0.0576	b	268.1679	20.5236	ab
Junco phaeonotus	Eritrocito	3	11	1.9286	0.0288	a	220.5448	9.3865	c
Junco phaeonotus	Eritrocito	4	10	1.8946	0.0466	ab	218.0027	6.9793	c
Junco phaeonotus	Eritrocito	5	10	1.8003	0.0291	ab	220.8390	8.7071	bc
Junco phaeonotus	Eritrocito	6	10	1.8816	0.0829	ab	204.8690	10.6651	c

				OVALIDAD			VOLUMEN		
ESPECIE	**CÉLULA**	**INDIVIDUO**	**n**	**PROMEDIO**	**EE**	**GRUPO**	**PROMEDIO**	**EE**	**GRUPO**
Junco phaeonotus	Heterófilo	2	10	1.1697	0.0468	a	162.0910	17.2454	b
Junco phaeonotus	Heterófilo	3	14	1.2029	0.0425	a	221.7398	34.4184	ab
Junco phaeonotus	Heterófilo	4	15	1.0995	0.0234	a	131.3497	9.1968	b
Junco phaeonotus	Heterófilo	5	11	1.1889	0.0323	a	154.1007	16.9972	b
Junco phaeonotus	Heterófilo	6	11	1.0282	0.0896	a	310.3545	42.8119	a
Junco phaeonotus	Linfocito	2	1	1.5589	NA	a	83.1313	NA	a
Junco phaeonotus	Linfocito	3	12	1.3345	0.0673	a	115.8444	8.5042	a
Junco phaeonotus	Linfocito	4	12	1.2653	0.0534	a	124.7020	11.9037	a
Junco phaeonotus	Linfocito	5	14	1.3265	0.0497	a	131.0015	12.1293	a
Junco phaeonotus	Linfocito	6	10	1.1566	0.0380	a	155.4555	11.3798	a
Junco phaeonotus	Monocito	3	5	1.6804	0.1178	ab	182.9957	44.9027	ab
Junco phaeonotus	Monocito	4	10	1.7815	0.0559	a	98.1056	6.4867	b
Junco phaeonotus	Monocito	5	7	1.7865	0.1250	a	97.5666	9.4750	b
Junco phaeonotus	Monocito	6	7	1.3247	0.0854	b	228.1210	56.5144	a
Junco phaeonotus	Núcleo	1	10	1.7573	0.0937	c	25.0906	1.1791	ab
Junco phaeonotus	Núcleo	2	10	1.7318	0.1267	c	28.0807	2.9578	a
Junco phaeonotus	Núcleo	3	11	2.0147	0.0518	bc	18.8039	1.1899	bc
Junco phaeonotus	Núcleo	4	10	2.3941	0.0843	a	12.5200	0.7818	c
Junco phaeonotus	Núcleo	5	10	1.7658	0.0562	c	17.5643	1.0725	c
Junco phaeonotus	Núcleo	6	10	2.1400	0.0641	ab	17.9468	2.0142	c
Junco phaeonotus	Trombocito	2	11	1.2710	0.0448	a	26.3349	1.9402	ab
Junco phaeonotus	Trombocito	3	10	1.1700	0.0449	ab	21.6344	1.8476	b
Junco phaeonotus	Trombocito	4	10	1.1259	0.0219	b	29.8307	2.2387	ab
Junco phaeonotus	Trombocito	5	9	1.1358	0.0373	ab	30.8313	4.3205	ab
Junco phaeonotus	Trombocito	6	14	1.0835	0.0264	b	32.4254	2.5646	a
Leiothlypis celata	Basófilo	1	9	1.1843	0.0537	ab	91.6408	10.9110	ef
Leiothlypis celata	Basófilo	2	11	1.1950	0.0519	ab	95.8244	9.7385	ef
Leiothlypis celata	Basófilo	3	11	1.2836	0.0489	ab	104.2927	16.7779	cdef

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Leiothlypis celata	Basófilo	4	14	1.1325	0.0304	ab	153.2309	10.3199	abc
Leiothlypis celata	Basófilo	5	10	1.1132	0.0331	ab	172.7055	9.4487	a
Leiothlypis celata	Basófilo	6	10	1.3370	0.0881	a	69.9186	8.1274	f
Leiothlypis celata	Basófilo	7	10	1.2988	0.0591	ab	72.2064	3.9691	f
Leiothlypis celata	Basófilo	8	10	1.2682	0.0494	ab	86.7053	8.4742	f
Leiothlypis celata	Basófilo	9	10	1.1277	0.0391	ab	68.5123	8.6939	f
Leiothlypis celata	Basófilo	10	10	1.1884	0.0569	ab	71.4692	6.3259	f
Leiothlypis celata	Basófilo	11	10	1.1008	0.0187	ab	97.3201	7.9867	def
Leiothlypis celata	Basófilo	12	10	1.1152	0.0242	ab	167.1092	15.8436	ab
Leiothlypis celata	Basófilo	13	10	1.1807	0.0402	ab	96.4575	6.6691	def
Leiothlypis celata	Basófilo	14	10	1.2757	0.0445	ab	114.9263	10.5687	bcdef
Leiothlypis celata	Basófilo	15	10	1.1818	0.0305	ab	144.4037	14.6991	abcde
Leiothlypis celata	Basófilo	16	10	1.3152	0.0470	ab	86.2428	6.5625	f
Leiothlypis celata	Basófilo	17	10	1.1528	0.0337	ab	161.0123	9.3141	ab
Leiothlypis celata	Basófilo	18	10	1.2947	0.0495	ab	153.0707	16.0516	abcd
Leiothlypis celata	Basófilo	19	10	1.0943	0.0483	b	93.6209	11.7035	ef
Leiothlypis celata	Basófilo	20	10	1.1407	0.0296	ab	167.1736	15.6660	ab
Leiothlypis celata	Eosinófilo	1	3	1.0580	0.0265	ab	272.2949	13.7869	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	2	2	1.1079	0.1040	ab	341.8778	100.9709	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	3	4	1.0642	0.0377	ab	220.5004	36.4893	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	4	7	1.1426	0.0201	ab	345.2029	74.1358	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	5	10	1.1764	0.0483	ab	354.7225	34.6150	ab
Leiothlypis celata	Eosinófilo	6	6	1.0993	0.0188	ab	291.2120	22.9736	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	7	10	1.1916	0.0534	ab	219.8946	35.3852	bc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	8	7	1.3483	0.1125	a	327.5849	45.9064	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	9	8	1.0545	0.0129	b	381.7542	51.8299	ab
Leiothlypis celata	Eosinófilo	10	7	1.0895	0.0133	ab	318.6422	61.3798	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	11	10	1.1894	0.0637	ab	329.6981	32.2808	abc

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Leiothlypis celata	Eosinófilo	12	8	1.0333	0.0120	b	380.3453	30.4451	ab
Leiothlypis celata	Eosinófilo	13	9	1.0835	0.0292	b	253.2115	20.3891	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	14	11	1.0738	0.0208	b	318.8920	28.7201	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	15	12	1.1259	0.0309	ab	302.6259	20.5274	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	16	11	1.2413	0.0532	ab	218.4954	25.2045	bc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	17	6	1.1332	0.0202	ab	355.6575	77.2155	abc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	18	10	1.1924	0.0685	ab	162.3883	24.2469	c
Leiothlypis celata	Eosinófilo	19	11	1.1986	0.0372	ab	199.6527	31.6504	bc
Leiothlypis celata	Eosinófilo	20	6	1.1593	0.0250	ab	443.2998	89.4291	a
Leiothlypis celata	Eritrocito	1	12	1.9448	0.0584	abc	212.9687	9.4571	bc
Leiothlypis celata	Eritrocito	2	14	1.9537	0.0278	abc	201.8397	7.9495	cd
Leiothlypis celata	Eritrocito	3	11	2.0311	0.0328	abc	210.2913	6.1756	bc
Leiothlypis celata	Eritrocito	4	11	1.8643	0.0494	abc	192.2735	9.5107	cd
Leiothlypis celata	Eritrocito	5	10	1.8284	0.0358	bc	188.1217	9.6950	cd
Leiothlypis celata	Eritrocito	6	10	1.9612	0.0383	abc	223.1903	9.5630	bc
Leiothlypis celata	Eritrocito	7	10	2.0473	0.0616	ab	199.0514	9.0994	cd
Leiothlypis celata	Eritrocito	8	12	1.9052	0.0374	abc	193.3555	8.1382	cd
Leiothlypis celata	Eritrocito	9	10	1.9686	0.0340	abc	163.7339	6.9599	de
Leiothlypis celata	Eritrocito	10	10	2.0406	0.0448	ab	138.5911	5.2329	e
Leiothlypis celata	Eritrocito	11	10	1.8828	0.0452	abc	275.3649	11.9392	a
Leiothlypis celata	Eritrocito	12	10	1.9110	0.0314	abc	245.1783	8.6007	ab
Leiothlypis celata	Eritrocito	13	10	1.9783	0.0402	abc	203.8395	7.3511	bcd
Leiothlypis celata	Eritrocito	14	10	1.8177	0.0350	c	225.6061	7.0568	bc
Leiothlypis celata	Eritrocito	15	10	1.9467	0.0462	abc	187.9255	7.8601	cd
Leiothlypis celata	Eritrocito	16	11	2.0547	0.0375	a	205.5485	6.1973	bcd
Leiothlypis celata	Eritrocito	17	10	1.8597	0.0545	abc	218.5629	9.5000	bc
Leiothlypis celata	Eritrocito	18	10	1.8878	0.0543	abc	219.8645	9.0717	bc
Leiothlypis celata	Eritrocito	19	11	1.9803	0.0207	abc	220.0739	8.0113	bc

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Leiothlypis celata	Eritrocito	20	10	1.8819	0.0439	abc	218.6571	7.2465	bc
Leiothlypis celata	Heterófilo	1	11	1.1641	0.0458	abcd	313.8424	34.8153	bcd
Leiothlypis celata	Heterófilo	2	7	1.0941	0.0262	bcd	307.1760	34.5281	abcde
Leiothlypis celata	Heterófilo	3	14	1.1967	0.0442	abcd	238.5302	38.6977	cde
Leiothlypis celata	Heterófilo	4	11	1.4162	0.0502	ab	350.9249	33.6249	abcd
Leiothlypis celata	Heterófilo	5	11	1.1635	0.0458	abcd	521.2003	68.8756	a
Leiothlypis celata	Heterófilo	6	10	1.1069	0.0304	cd	171.1727	39.3694	de
Leiothlypis celata	Heterófilo	7	10	1.4565	0.0944	a	95.7929	10.6878	e
Leiothlypis celata	Heterófilo	8	11	1.2324	0.0526	abcd	367.6318	13.9989	abcd
Leiothlypis celata	Heterófilo	9	11	1.2534	0.0606	abcd	369.7392	46.0027	abcd
Leiothlypis celata	Heterófilo	10	11	1.1466	0.0255	bcd	307.9179	34.5465	bcd
Leiothlypis celata	Heterófilo	11	10	1.1020	0.0217	cd	412.7445	23.4209	abc
Leiothlypis celata	Heterófilo	12	10	1.0739	0.0200	d	455.5492	30.3846	ab
Leiothlypis celata	Heterófilo	13	10	1.1956	0.0449	abcd	436.7436	29.7189	ab
Leiothlypis celata	Heterófilo	14	10	1.3291	0.1354	abcd	339.6891	41.7911	abcd
Leiothlypis celata	Heterófilo	15	12	1.1815	0.0249	abcd	406.4311	17.3082	abc
Leiothlypis celata	Heterófilo	16	10	1.0819	0.0245	d	323.0447	37.3232	abcd
Leiothlypis celata	Heterófilo	17	11	1.3942	0.0508	abc	458.1556	61.8912	ab
Leiothlypis celata	Heterófilo	18	12	1.2769	0.0703	abcd	371.0335	36.2723	abcd
Leiothlypis celata	Heterófilo	19	10	1.1446	0.0590	abcd	276.1485	29.5860	bcde
Leiothlypis celata	Heterófilo	20	10	1.3629	0.1196	abcd	429.9827	68.3213	abc
Leiothlypis celata	Linfocito	1	11	1.1885	0.0293	ab	111.3148	8.4955	de
Leiothlypis celata	Linfocito	2	10	1.1662	0.0361	ab	125.6535	10.0139	cde
Leiothlypis celata	Linfocito	3	8	1.1207	0.0309	ab	156.4404	25.5530	bcde
Leiothlypis celata	Linfocito	4	10	1.2348	0.0646	ab	223.2540	39.7368	abcd
Leiothlypis celata	Linfocito	5	10	1.1433	0.0267	ab	259.7587	23.8401	ab
Leiothlypis celata	Linfocito	6	10	1.1670	0.0341	ab	93.8297	8.4264	e
Leiothlypis celata	Linfocito	7	10	1.1579	0.0300	ab	127.5164	24.4515	cde

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Leiothlypis celata	Linfocito	8	10	1.1305	0.0190	ab	143.4762	6.1058	bcde
Leiothlypis celata	Linfocito	9	10	1.1057	0.0213	ab	154.9985	14.6478	bcde
Leiothlypis celata	Linfocito	10	10	1.1154	0.0290	ab	158.5406	18.0083	bcde
Leiothlypis celata	Linfocito	11	10	1.1953	0.0429	ab	121.1846	11.3789	cde
Leiothlypis celata	Linfocito	12	10	1.1174	0.0589	ab	237.4502	50.9538	abc
Leiothlypis celata	Linfocito	13	10	1.0536	0.0154	b	296.2115	35.5995	a
Leiothlypis celata	Linfocito	14	10	1.0936	0.0339	ab	181.9329	22.8999	abcde
Leiothlypis celata	Linfocito	15	10	1.2631	0.0581	a	179.3272	24.7513	abcde
Leiothlypis celata	Linfocito	16	11	1.1976	0.0343	ab	113.0367	12.7805	de
Leiothlypis celata	Linfocito	17	10	1.1527	0.0166	ab	118.0805	16.7496	cde
Leiothlypis celata	Linfocito	18	12	1.2562	0.0704	a	118.0595	16.4600	de
Leiothlypis celata	Linfocito	19	10	1.0876	0.0176	ab	129.5418	13.3976	cde
Leiothlypis celata	Linfocito	20	10	1.1118	0.0245	ab	210.6472	33.2383	abcde
Leiothlypis celata	Monocito	1	10	1.4797	0.0666	a	220.9174	27.8344	abc
Leiothlypis celata	Monocito	2	11	1.2581	0.0763	a	202.7400	16.3826	c
Leiothlypis celata	Monocito	3	10	1.4783	0.0892	a	170.9039	29.0459	c
Leiothlypis celata	Monocito	4	13	1.3942	0.0691	a	218.2758	22.0500	bc
Leiothlypis celata	Monocito	5	9	1.3382	0.0594	a	257.9515	12.1846	abc
Leiothlypis celata	Monocito	6	10	1.2989	0.0875	a	242.9408	38.4788	abc
Leiothlypis celata	Monocito	7	10	1.1314	0.0418	a	394.6555	83.7622	ab
Leiothlypis celata	Monocito	8	12	1.3617	0.0712	a	170.6911	16.6902	c
Leiothlypis celata	Monocito	9	9	1.3657	0.0545	a	218.1924	37.4831	abc
Leiothlypis celata	Monocito	10	10	1.2929	0.0421	a	165.3768	25.6833	c
Leiothlypis celata	Monocito	11	9	1.2889	0.0838	a	342.8497	61.5432	abc
Leiothlypis celata	Monocito	12	9	1.1694	0.0630	a	315.9575	51.3220	abc
Leiothlypis celata	Monocito	13	7	1.1582	0.0891	a	246.2482	29.3665	abc
Leiothlypis celata	Monocito	14	9	1.3464	0.0646	a	323.6418	59.9346	abc
Leiothlypis celata	Monocito	15	10	1.2083	0.0458	a	247.8632	27.0167	abc

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Leiothlypis celata	Monocito	16	9	1.2668	0.0708	a	284.1038	37.7307	abc
Leiothlypis celata	Monocito	17	9	1.2854	0.0862	a	236.8976	33.0263	abc
Leiothlypis celata	Monocito	18	10	1.3802	0.0833	a	306.6442	37.5790	abc
Leiothlypis celata	Monocito	19	8	1.2178	0.0849	a	206.0499	40.0964	abc
Leiothlypis celata	Monocito	20	11	1.2262	0.0624	a	403.2096	32.1770	a
Leiothlypis celata	Núcleo	1	12	2.1389	0.0830	abcde	17.2615	0.7210	abcde
Leiothlypis celata	Núcleo	2	14	2.1014	0.0460	bcde	17.1939	0.6174	abcde
Leiothlypis celata	Núcleo	3	11	2.4026	0.0670	ab	17.7601	0.6564	abc
Leiothlypis celata	Núcleo	4	11	2.0474	0.0496	cde	16.5025	0.5947	abcde
Leiothlypis celata	Núcleo	5	10	2.1893	0.0685	abcde	15.0634	0.7865	bcde
Leiothlypis celata	Núcleo	6	10	2.4838	0.0824	a	15.3534	0.6820	bcde
Leiothlypis celata	Núcleo	7	10	2.2471	0.1126	abcde	17.4478	1.2649	abcde
Leiothlypis celata	Núcleo	8	12	2.2326	0.0720	abcde	15.3160	1.0547	bcde
Leiothlypis celata	Núcleo	9	10	2.4146	0.0857	ab	13.0807	0.7073	cde
Leiothlypis celata	Núcleo	10	10	2.3892	0.0705	abc	12.9381	0.7817	de
Leiothlypis celata	Núcleo	11	10	2.1185	0.0520	bcde	17.4716	1.0711	abcde
Leiothlypis celata	Núcleo	12	10	2.2945	0.0470	abcd	16.1062	1.3287	abcde
Leiothlypis celata	Núcleo	13	10	1.9994	0.0582	de	18.5968	1.5796	ab
Leiothlypis celata	Núcleo	14	10	1.8941	0.0642	e	16.1085	0.7106	abcde
Leiothlypis celata	Núcleo	15	10	1.9939	0.0374	de	15.2984	0.5290	bcde
Leiothlypis celata	Núcleo	16	11	2.2704	0.0650	abcd	15.9277	0.6348	abcde
Leiothlypis celata	Núcleo	17	10	2.1259	0.0674	abcde	12.8057	0.4828	e
Leiothlypis celata	Núcleo	18	10	2.0833	0.0543	bcde	17.8387	1.4082	abcd
Leiothlypis celata	Núcleo	19	11	2.1409	0.0798	abcde	20.4080	1.5729	a
Leiothlypis celata	Núcleo	20	10	2.1558	0.0868	abcde	14.0202	0.5177	bcde
Leiothlypis celata	Trombocito	1	10	1.5821	0.0872	bcd	19.5881	1.0441	de
Leiothlypis celata	Trombocito	2	12	1.2342	0.0417	de	19.2345	0.8128	de
Leiothlypis celata	Trombocito	3	10	1.5261	0.0866	cde	28.5341	2.2981	abcd

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Leiothlypis celata	Trombocito	4	10	1.6507	0.0989	bc	24.0032	2.3771	cde
Leiothlypis celata	Trombocito	5	12	1.5148	0.1510	cde	23.3148	2.4029	cde
Leiothlypis celata	Trombocito	6	10	1.4319	0.1155	cde	27.1757	2.3365	bcde
Leiothlypis celata	Trombocito	7	11	1.9907	0.0955	ab	19.6494	1.7992	de
Leiothlypis celata	Trombocito	8	11	2.0793	0.1180	a	21.5648	1.6383	cde
Leiothlypis celata	Trombocito	9	10	1.4847	0.0873	cde	21.8059	1.4280	cde
Leiothlypis celata	Trombocito	10	10	1.3850	0.0679	cde	16.4139	0.7274	e
Leiothlypis celata	Trombocito	11	10	1.4135	0.0698	cde	38.7875	3.4367	a
Leiothlypis celata	Trombocito	12	10	1.3178	0.0814	cde	35.0540	2.6080	ab
Leiothlypis celata	Trombocito	13	10	1.1388	0.0409	e	28.4818	3.6619	abcd
Leiothlypis celata	Trombocito	14	10	1.1200	0.0280	e	23.8877	2.7604	cde
Leiothlypis celata	Trombocito	15	10	1.2570	0.0519	cde	22.9846	1.1954	cde
Leiothlypis celata	Trombocito	16	10	1.2123	0.0386	de	28.4113	1.4812	abcd
Leiothlypis celata	Trombocito	17	10	1.1791	0.0467	de	31.1368	1.6329	abc
Leiothlypis celata	Trombocito	18	11	1.2996	0.0560	cde	28.5911	1.5320	abcd
Leiothlypis celata	Trombocito	19	10	1.2801	0.0512	cde	28.6639	1.7599	abcd
Leiothlypis celata	Trombocito	20	10	1.2097	0.0587	de	29.0401	2.6360	abcd
Melospiza lincolnii	Basófilo	1	10	1.1609	0.0320	a	123.7570	25.6132	ab
Melospiza lincolnii	Basófilo	2	10	1.2469	0.0614	a	101.1019	10.7382	ab
Melospiza lincolnii	Basófilo	3	10	1.1717	0.0350	a	70.4344	4.9063	b
Melospiza lincolnii	Basófilo	4	11	1.1853	0.0682	a	127.2537	14.8382	ab
Melospiza lincolnii	Basófilo	5	10	1.1378	0.0370	a	145.3601	11.7279	a
Melospiza lincolnii	Eosinófilo	1	7	1.3958	0.1619	ab	307.1988	48.0046	a
Melospiza lincolnii	Eosinófilo	2	11	1.3232	0.0623	ab	259.1814	35.4420	a
Melospiza lincolnii	Eosinófilo	3	9	1.1048	0.0307	b	342.9996	50.0383	a
Melospiza lincolnii	Eosinófilo	4	3	1.7658	0.2667	a	250.2855	26.5482	a
Melospiza lincolnii	Eosinófilo	5	9	1.1099	0.0365	b	341.9155	21.2576	a
Melospiza lincolnii	Eritrocito	1	10	1.8745	0.0447	a	261.4803	9.7044	a

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Melospiza lincolnii	Eritrocito	2	10	1.9005	0.0463	a	230.9990	10.2044	ab
Melospiza lincolnii	Eritrocito	3	10	1.9216	0.0476	a	247.7284	10.5517	a
Melospiza lincolnii	Eritrocito	4	10	1.9017	0.0361	a	203.8076	13.2294	b
Melospiza lincolnii	Eritrocito	5	10	1.8688	0.0325	a	200.7897	7.6885	b
Melospiza lincolnii	Heterófilo	1	10	1.2222	0.0451	a	326.7487	30.1688	ab
Melospiza lincolnii	Heterófilo	2	12	1.2532	0.0324	a	237.5926	15.3491	b
Melospiza lincolnii	Heterófilo	3	7	1.1697	0.0878	a	303.8528	33.1847	ab
Melospiza lincolnii	Heterófilo	4	10	1.4487	0.1233	a	381.3431	33.6662	a
Melospiza lincolnii	Heterófilo	5	10	1.2116	0.0454	a	380.5178	37.5523	a
Melospiza lincolnii	Linfocito	1	10	1.2285	0.0506	a	110.2457	7.1320	a
Melospiza lincolnii	Linfocito	2	10	1.1365	0.0485	a	174.4724	33.4863	a
Melospiza lincolnii	Linfocito	3	10	1.1763	0.0449	a	109.5056	8.6148	a
Melospiza lincolnii	Linfocito	4	10	1.2264	0.0553	a	154.7788	12.2035	a
Melospiza lincolnii	Linfocito	5	11	1.1638	0.0336	a	173.1987	23.5127	a
Melospiza lincolnii	Monocito	1	10	1.6507	0.0888	a	185.0643	21.4846	ab
Melospiza lincolnii	Monocito	2	9	1.2999	0.1352	b	190.8249	16.7023	ab
Melospiza lincolnii	Monocito	3	10	1.3692	0.0840	ab	133.0958	18.8240	b
Melospiza lincolnii	Monocito	4	10	1.2881	0.0631	b	229.9356	36.2345	ab
Melospiza lincolnii	Monocito	5	13	1.2753	0.0486	b	238.6211	21.9886	a
Melospiza lincolnii	Núcleo	1	10	2.7983	0.0554	a	17.8662	0.9444	a
Melospiza lincolnii	Núcleo	2	10	2.1602	0.0622	c	16.2069	0.5288	ab
Melospiza lincolnii	Núcleo	3	10	2.6706	0.0819	a	17.1996	0.8785	ab
Melospiza lincolnii	Núcleo	4	10	2.6398	0.0863	ab	14.3243	1.2213	b
Melospiza lincolnii	Núcleo	5	10	2.3594	0.0877	bc	14.9325	0.6262	ab
Melospiza lincolnii	Trombocito	1	10	1.5406	0.0967	a	29.7178	2.0287	b
Melospiza lincolnii	Trombocito	2	10	1.6209	0.0855	a	22.5613	1.8488	b
Melospiza lincolnii	Trombocito	3	10	1.6135	0.0798	a	21.8626	0.8806	b
Melospiza lincolnii	Trombocito	4	6	1.2692	0.0737	a	61.5634	11.0302	a

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Melospiza lincolnii	Trombocito	5	13	1.3900	0.0554	a	28.3565	1.7817	b
Setophaga coronata	Basófilo	1	12	1.2856	0.0473	a	86.3193	15.0675	bc
Setophaga coronata	Basófilo	2	10	1.1310	0.0451	a	110.3521	14.0579	abc
Setophaga coronata	Basófilo	3	11	1.1725	0.0296	a	81.2643	8.5920	bc
Setophaga coronata	Basófilo	4	12	1.1207	0.0279	a	117.2582	17.7911	abc
Setophaga coronata	Basófilo	5	11	1.1584	0.0511	a	147.7210	22.1788	a
Setophaga coronata	Basófilo	6	10	1.1726	0.0475	a	144.2747	11.4510	ab
Setophaga coronata	Basófilo	7	11	1.1688	0.0318	a	96.8146	9.7532	abc
Setophaga coronata	Basófilo	8	10	1.1581	0.0445	a	64.2073	3.5041	c
Setophaga coronata	Basófilo	9	10	1.1123	0.0357	a	76.2721	8.9335	c
Setophaga coronata	Basófilo	10	10	1.2685	0.0519	a	109.2850	10.5792	abc
Setophaga coronata	Eosinófilo	1	5	1.1107	0.0514	a	175.2475	14.2844	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	2	7	1.0749	0.0249	a	217.6905	48.5386	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	3	1	1.0976	NA	a	162.2332	NA	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	4	7	1.1130	0.0302	a	141.5097	22.5477	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	5	2	1.1929	0.1651	a	261.4744	41.8221	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	6	10	1.2034	0.0424	a	189.5423	37.1451	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	7	10	1.1880	0.0524	a	142.1045	23.5990	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	8	10	1.0894	0.0259	a	200.5092	29.1860	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	9	10	1.3019	0.0986	a	162.6271	8.7289	a
Setophaga coronata	Eosinófilo	10	3	1.3399	0.1643	a	221.6792	95.1316	a
Setophaga coronata	Eritrocito	1	10	2.0995	0.0306	ab	224.0051	6.1545	ab
Setophaga coronata	Eritrocito	2	10	2.0213	0.0360	bc	233.0680	7.6827	ab
Setophaga coronata	Eritrocito	3	10	2.2347	0.0394	a	171.9434	5.7970	c
Setophaga coronata	Eritrocito	4	10	2.0592	0.0384	abc	213.8798	8.6484	ab
Setophaga coronata	Eritrocito	5	10	1.8109	0.0245	de	214.9073	7.8529	ab
Setophaga coronata	Eritrocito	6	10	1.9652	0.0494	bcd	230.2090	11.5233	ab
Setophaga coronata	Eritrocito	7	10	1.8727	0.0404	cde	250.0828	11.1734	a

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Setophaga coronata	Eritrocito	8	10	1.8902	0.0387	cde	248.6765	8.8607	a
Setophaga coronata	Eritrocito	9	10	1.7241	0.0417	e	201.8037	6.6552	bc
Setophaga coronata	Eritrocito	10	10	2.0864	0.0636	ab	230.8426	9.5083	ab
Setophaga coronata	Heterófilo	1	10	1.2773	0.0410	a	247.0961	14.0960	b
Setophaga coronata	Heterófilo	2	10	1.1757	0.0344	a	310.5837	40.2560	ab
Setophaga coronata	Heterófilo	3	9	1.1801	0.0422	a	174.3807	12.5786	b
Setophaga coronata	Heterófilo	4	11	1.2768	0.0723	a	274.7985	43.3969	b
Setophaga coronata	Heterófilo	5	10	1.1169	0.0328	a	463.8081	50.2126	a
Setophaga coronata	Heterófilo	6	10	1.2362	0.0807	a	289.8984	44.5880	b
Setophaga coronata	Heterófilo	7	10	1.1692	0.0513	a	255.5219	18.7154	b
Setophaga coronata	Heterófilo	8	10	1.1476	0.0215	a	215.0619	26.2436	b
Setophaga coronata	Heterófilo	9	10	1.1476	0.0247	a	248.2533	33.5386	b
Setophaga coronata	Linfocito	1	10	1.2165	0.0405	a	106.6235	8.3458	c
Setophaga coronata	Linfocito	2	12	1.1906	0.0387	a	128.9848	16.7459	bc
Setophaga coronata	Linfocito	3	10	1.1854	0.0383	a	121.3072	18.5789	bc
Setophaga coronata	Linfocito	4	10	1.1312	0.0272	a	182.1660	16.6748	bc
Setophaga coronata	Linfocito	5	10	1.1651	0.0295	a	207.3403	25.1571	ab
Setophaga coronata	Linfocito	6	10	1.2736	0.0321	a	91.4038	12.1813	c
Setophaga coronata	Linfocito	7	10	1.1647	0.0408	a	150.4167	24.1539	bc
Setophaga coronata	Linfocito	8	10	1.1466	0.0356	a	146.5462	15.4562	bc
Setophaga coronata	Linfocito	9	10	1.1755	0.0230	a	284.8367	38.3246	a
Setophaga coronata	Linfocito	10	1	1.4857	NA	a	162.2127	NA	abc
Setophaga coronata	Monocito	1	10	1.4708	0.0551	a	183.9581	16.1120	b
Setophaga coronata	Monocito	2	7	1.4860	0.0851	a	176.8509	16.1436	b
Setophaga coronata	Monocito	3	8	1.2831	0.0778	a	155.7565	17.5910	b
Setophaga coronata	Monocito	4	10	1.2524	0.0952	a	387.8358	44.1251	a
Setophaga coronata	Monocito	5	10	1.3699	0.0747	a	254.4612	27.4706	ab
Setophaga coronata	Monocito	6	3	1.6960	0.2084	a	133.1248	29.1133	b

ESPECIE	CÉLULA	INDIVIDUO	n	OVALIDAD			VOLUMEN		
				PROMEDIO	EE	GRUPO	PROMEDIO	EE	GRUPO
Setophaga coronata	Monocito	7	3	1.5146	0.2201	a	295.1992	34.8890	ab
Setophaga coronata	Monocito	8	4	1.3633	0.0812	a	282.8463	114.5988	ab
Setophaga coronata	Monocito	9	1	1.6814	NA	a	301.9758	NA	ab
Setophaga coronata	Monocito	10	1	1.1632	NA	a	280.2274	NA	ab
Setophaga coronata	Núcleo	1	10	2.2565	0.0457	abc	20.7982	1.2707	a
Setophaga coronata	Núcleo	2	10	2.2070	0.0577	abc	20.3420	1.0970	ab
Setophaga coronata	Núcleo	3	10	2.2953	0.0502	ab	17.4988	0.5525	abc
Setophaga coronata	Núcleo	4	10	2.1005	0.0514	abc	20.1571	0.7692	abc
Setophaga coronata	Núcleo	5	10	2.0560	0.0467	bc	19.7993	0.7209	abc
Setophaga coronata	Núcleo	6	10	2.2174	0.0893	abc	15.2375	0.6326	bc
Setophaga coronata	Núcleo	7	10	1.9679	0.0551	c	20.5263	1.1420	a
Setophaga coronata	Núcleo	8	10	2.0043	0.0702	bc	17.4002	1.3451	abc
Setophaga coronata	Núcleo	9	10	2.1950	0.1123	abc	15.0893	1.8947	c
Setophaga coronata	Núcleo	10	10	2.3986	0.0713	a	18.5455	1.1026	abc
Setophaga coronata	Trombocito	1	10	1.2597	0.0582	a	21.4325	2.0933	bc
Setophaga coronata	Trombocito	2	10	1.1938	0.0414	a	19.7518	1.9881	bc
Setophaga coronata	Trombocito	3	10	1.1648	0.0307	a	17.3843	0.5864	c
Setophaga coronata	Trombocito	4	10	1.1209	0.0325	a	20.3479	1.6035	bc
Setophaga coronata	Trombocito	5	10	1.1533	0.0484	a	27.9635	2.5511	ab
Setophaga coronata	Trombocito	6	10	1.2647	0.0248	a	20.9189	1.0893	bc
Setophaga coronata	Trombocito	7	10	1.3275	0.0644	a	22.5525	1.8425	bc
Setophaga coronata	Trombocito	8	10	1.1118	0.0352	a	17.0039	1.7449	c
Setophaga coronata	Trombocito	9	10	1.1958	0.0725	a	32.1854	2.8310	a
Setophaga coronata	Trombocito	10	10	1.1617	0.0387	a	24.6013	1.3271	abc

Yanet Villaseñor Cortez

Niveles de HL y morfometría de células sanguíneas en especies de Passerellidae y Parulidae (Aves) en el centro-occidente de ...

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:582659776

Fecha de entrega
24 abr 2026, 11:52 a.m. GMT-6

Fecha de descarga
24 abr 2026, 12:21 p.m. GMT-6

Nombre del archivo
Niveles de HL y morfometría de células sanguíneas en especies de Passerellidae y Parulidae (Ave....pdf

Tamaño del archivo
2.5 MB

196 páginas

56.361 palabras

310.998 caracteres

16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

15% Fuentes de Internet
12% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

● Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo. ● Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias. ● Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento. ● Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	**Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biologicas**	
Título del trabajo	**Niveles de H/L y morfometría de células sanguíneas en especies de Passerellidae y Parulidae (Aves) en el centro-occidente de México**	
	Nombre	**Correo electrónico**
Autor/es	**Yanet Villaseñor Cortez**	**1426102g@umich.mx**
Director	**Dr. José Fernando Villaseñor Gómez**	**jose.fernando.gomez@umich.mx**
Codirector	**Dr. Javier Salgado Ortiz**	**javier.salgado@umich.mx**
Coordinador del programa	**Dra. Rosa Elvira Núñez Anita**	**mae.ciencias.biologicas@umich.mx**

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	**Uso (sí/no)**	**Descripción**

Asistencia en la redacción	si	Revisar ortografía

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	**Uso (sí/no)**	**Descripción**
Traducción al español	si	Para traducir algunos párrafos que no lograba entender de los artículos científicos
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	si	Resumir información
Análisis de datos	si	Para corregir errores que me marcaba el programa R
Búsqueda y organización de información	si	Para cuando no lograba enlazar dos o más ideas
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Yanet Villaseñor
Lugar y fecha	21 mayo 2026