

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA

SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

INSTITUTO INTERNACIONAL EN CONSERVACIÓN

MANEJO DE VIDA SILVESTRE

“Caracterización del riesgo de impacto de aves con aviones y posibles medidas de manejo para su reducción en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría de Costa Rica”.

DAVID PEIRÓ PUENTE

Comité asesor

Tutor: Víctor Montalvo. PhD.

Asesora: Ruth Muñiz. PhD.

Asesora: Jenny Marcela Rodríguez. MAG.

Trabajo Final de Graduación en modalidad Proyecto de Graduación para optar por el título de Maestría Profesional en Conservación de Vida Silvestre y Biodiversidad.

Heredia, Costa Rica

Noviembre, 2025

TABLA DE CONTENIDO

Índice de Tablas	3
Índice de Figuras	4
Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
Introducción	8
Objetivos	14
Objetivo General	14
Objetivos Específicos	14
Metodología	15
Formulación de Variables de la Matriz IRIEE Modificada	16
Cálculo de Pesos Relativos	27
Formulación Final de Matriz de Riesgo IRIEE Modificada por Especie	33
Validación de Índice de Riesgo IRIEE Modificado Aplicado a Especies Focales	34
Resultados y Discusión	34
Conclusiones	40
Recomendaciones	41
Referencias	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Horario de distribución de vuelos durante el año 2020 en el AIJS.	16
Tabla 2. Variable de Horario de Actividad	17
Tabla 3. Variable de Abundancia Relativa.	18
Tabla 4. Variable de Bandada.	19
Tabla 5. Variable de Movilidad.	21
Tabla 6. Variable de Frecuencia.	22
Tabla 7. Variable de Masa.	23
Tabla 8. Adaptación de las variables que usa IRIA a variable “Altura” del índice IRIEE.	25
Tabla 9. Variable de Altura de Vuelo.	25
Tabla 10. Variable de Impactos.	26
Tabla 11. Variable de Agilidad.	27
Tabla 12. Variable de Respuesta al Hostigamiento.	28
Tabla 13. Matriz de comparaciones por pares del experto del AIJS.	30
Tabla 14. Matriz de comparaciones por pares del experto del aeropuerto Daniel Oduber.	30
Tabla 15. Matriz de comparaciones por pares de la experta del aeropuerto Mariscal Sucre (Quito, Ecuador)	31
Tabla 16. Matriz de AHP con los resultados de los pesos relativos de las variables por tres expertos participantes.	32
Tabla 17. Matriz de riesgo por especie.	34
Tabla 18. Matriz de riesgo IRIEE modificada para las cuatro especies focales.	35
Tabla 19. Diferencias en la posición del ranking de riesgo entre el índice IRIA y el IRIEE modificado para cada especie focal.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tiempo (minutos) en pista activa por eventos con fauna en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría en el año 2024.	8
Figura 2. Carta de concentración de aves en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría y sus alrededores en el año 2023.	9
Figura 3. Carta de concentración de aves en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría y sus alrededores en el año 2023.	11
Figura 4. Conos de proximidad de aeronaves en Aeropuerto Internacional Juan Santamaria, ubicación en el Gran Área Metropolitana.	20
Figura 5. Comparación del ranking de riesgo entre el índice IRIA y el IRIEE modificado para las cuatro especies focales.	38

AGRADECIMIENTOS

Al comité asesor por su guía experta, a los profesionales de los aeropuertos participantes por su invaluable contribución al proceso AHP, al personal del Aeropuerto Juan Santa María por facilitar el acceso a los datos históricos, al Instituto de Conservación y Manejo de Vida Silvestre ICOMVIS, por su apoyo institucional en mi crecimiento como profesional, y a mis hijos por ser mi fuerza e inspiración para todo en la vida.

RESUMEN

Los impactos de aves con aeronaves representan una amenaza creciente para la seguridad aérea mundial y una problemática particular en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, Costa Rica, debido a su alta biodiversidad y a la presencia de múltiples atrayentes de fauna en su entorno. En este contexto, el estudio desarrolló y validó, por primera vez en Centroamérica, una versión modificada del Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE). Este índice integró variables etológicas y ecológicas ponderadas mediante el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP), permitiendo una evaluación más objetiva y contextualizada del riesgo. El modelo fue validado seleccionando cuatro especies focales de alto riesgo (*Coragyps atratus*, *Caracara cheriway*, *Quiscalus mexicanus* y la familia Hirundinidae), identificando a *C. atratus* como la especie de mayor riesgo por su elevada masa corporal, alta frecuencia de presencia y mediana respuesta al hostigamiento. Además, el análisis evidenció una sinergia entre variables conductuales y ecológicas, donde la interacción de ciertos factores potencia o multiplica el riesgo total de colisión, subrayando la importancia de considerar estas interdependencias en los modelos predictivos. El IRIEE modificado demostró ser más completo que el método IRIA actualmente utilizado, al incorporar ponderaciones expertas y criterios de comportamiento animal, mejorando así la precisión y aplicabilidad en la evaluación del riesgo de impacto. Los resultados aportan una herramienta preventiva para la gestión del peligro de fauna en aeropuertos, proponiendo medidas de mitigación basadas en evidencia científica y experiencias internacionales adaptables al contexto costarricense. Su aplicación permitirá optimizar recursos, reducir colisiones y fortalecer la seguridad operacional aérea en equilibrio con la conservación de la biodiversidad.

Palabras clave: riesgo aviario, seguridad operacional, IRIEE, etología, Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

ABSTRACT

Bird strikes represent an increasing threat to global aviation safety and a particular challenge at Juan Santamaría International Airport, Costa Rica, due to its high biodiversity and the presence of multiple wildlife attractants in the surrounding area. In this context, the study developed and validated, for the first time in Central America, a modified version of the Species-Specific Bird Strike Risk Index (IRIEE). This index integrated ethological and ecological variables weighted through the Analytic Hierarchy Process (AHP), enabling a more objective and context-based risk assessment. The model was validated using four high-risk focal species (*Coragyps atratus*, *Caracara cheriway*, *Quiscalus mexicanus*, and the family *Hirundinidae*), identifying *C. atratus* as the species with the highest risk due to its large body mass, high frequency of presence, and moderate response to harassment. Furthermore, the analysis revealed a synergistic interaction among behavioral and ecological variables, where the combination of certain factors amplifies the overall collision risk, emphasizing the importance of considering these interdependencies in predictive models. The modified IRIEE proved to be more comprehensive than the IRIA method currently in use, by incorporating expert weighting and animal behavior criteria, thus improving the accuracy and applicability of risk evaluation. The results provide a preventive tool for managing wildlife hazards in airports, proposing mitigation measures based on scientific evidence and international experience adapted to the Costa Rican context. Its application will help optimize resources, reduce collisions, and strengthen operational air safety in balance with biodiversity conservation.

Keywords: bird strike risk, operational safety, IRIEE index, behavior, Juan Santamaría International Airport.

INTRODUCCIÓN

El transporte aéreo ha crecido exponencialmente en las últimas décadas en todo el mundo, con más de 4.200 millones de pasajeros en 2018, lo que supone un aumento del 659% desde 1980 (Banco Mundial, 2019). Esto ha hecho que hayan aumentado considerablemente los impactos de fauna silvestre contra aeronaves, que representan un serio problema para la seguridad aérea a nivel global. Durante el último siglo, han causado la pérdida de cientos de vidas (Federal Aviation Administration, 2025), y han aumentado notablemente.

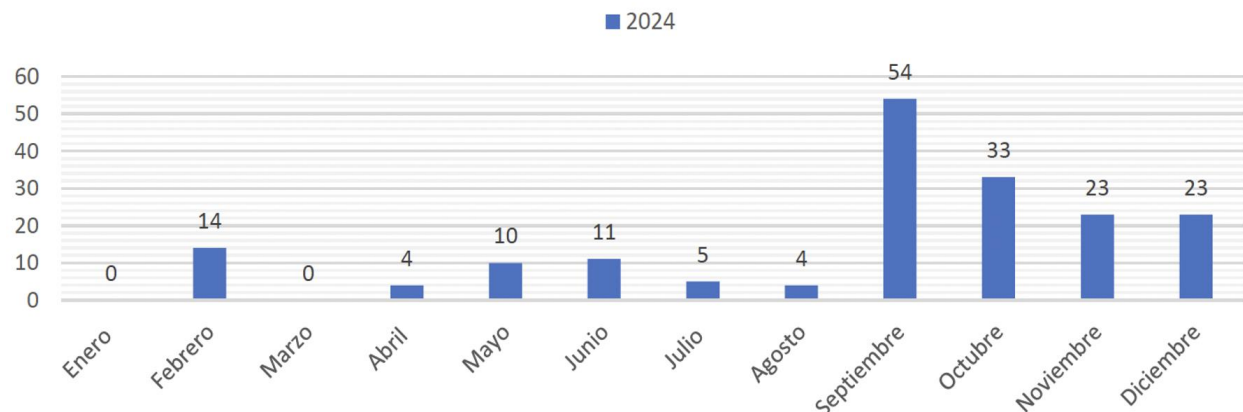
La problemática global se agrava en el contexto latinoamericano debido a su alta riqueza ornitológica y limitaciones en infraestructura. Este incremento se atribuye a factores como la adaptación de varias especies a entornos urbanos, el gran aumento del tráfico aéreo, la sustitución de aviones más ruidosos por bimotores más silenciosos (López-Lago et al., 2017), y las transformaciones en la infraestructura aeroportuaria (Portela, D., et al., 2023).

Las aves, en concreto, representan la mayor amenaza actualmente para las operaciones de vuelo, especialmente en el área del aeropuerto y sus alrededores (Matyjasiak, P., 2008), donde se sienten atraídas por la seguridad de un entorno relativamente libre de depredadores (Australian Airports Association, 2016). Las consecuencias de las colisiones de aves con aeronaves son graves debido a las altas velocidades involucradas, que casi siempre son mortales para ellas (DeVault T.L., et al., 2015), ya que la energía cinética aumenta con el cuadrado de la velocidad (SKYbrary Aviation Safety, 2020).

Adicionalmente, el nivel de riesgo no es constante. Este varía a lo largo del año (Figura 1), requiriendo información sobre la presencia de especies de aves transitorias, residentes y el riesgo particular asociado a cada especie (Nilsson, C. et al., 2021).

Figura 1

Tiempo (minutos) en pista activa por eventos con fauna en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría en el año 2024.



Nota. Los meses con mayor acumulación de tiempo coinciden con la temporada migratoria, lo que incrementa los eventos con fauna (AERIS, 2024).

Los aeropuertos y las autoridades aéreas tienen en especial consideración esta clase de accidentes e incidentes, ya que tienen unas características muy particulares y requieren ser tratados mediante la llamada Gestión del Peligro de Fauna (Wildlife Risk Management, en inglés), que se engloba dentro del Sistema de la Gestión de la Seguridad Operacional (Safety Management System, en inglés) (Culla Belmonte, G., 2019). La International Civil Aviation Organization (ICAO, 2013) define esta última como “un estado en que el riesgo de lesiones a las personas o daños a los bienes se reduce y se mantiene en un nivel aceptable, o por debajo del mismo, por medio de un proceso continuo de identificación de peligros y gestión de riesgos”. Por lo tanto, los aeropuertos deben de realizar estas evaluaciones e implementar planes de gestión para mitigar el riesgo de daños a bienes o lesiones humanas .

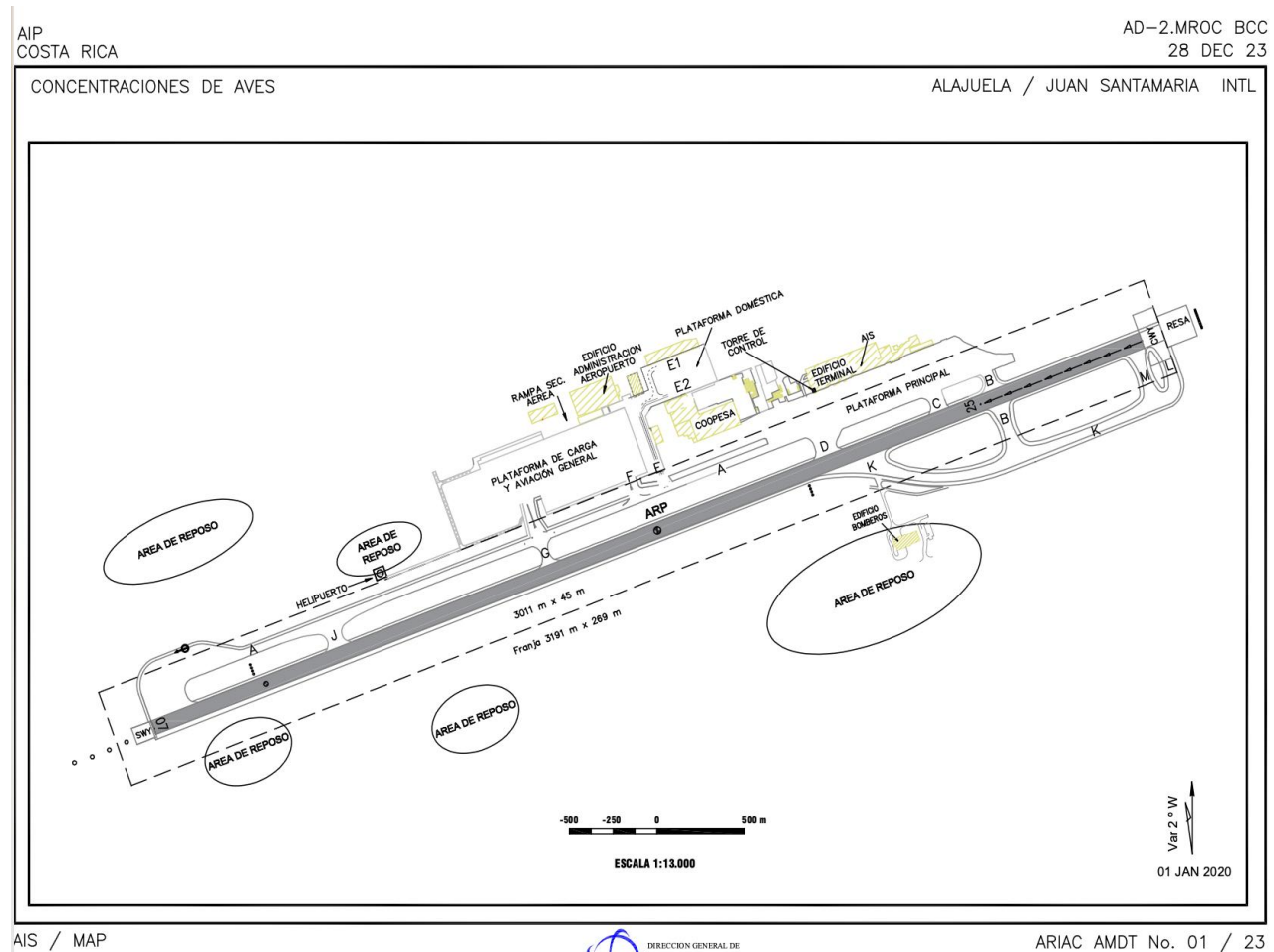
Costa Rica, por su parte, no es ajena a esta problemática, siendo un país donde el turismo ha aumentado significativamente en los últimos años (ICT, 2024). Según datos del operador, en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (AIJS), solo en el 2022 se observaron 14.539 animales de 65 especies distintas en los alrededores del aeropuerto, y entre 2020 y 2024 se reportaron 95 eventos con fauna (AERIS, 2024), identificando también los puntos de concentración de aves (Figura 2). Esta situación se explica por la presencia de parches boscosos en cercanías de aeropuertos conectados con áreas protegidas del Valle Central, que albergan una gran diversidad de especies en hábitats modificados, favoreciendo así la presencia de aves migratorias y residentes (Molina, 2013).

La presencia de múltiples usos del suelo, junto con actividades industriales y residenciales, crea condiciones que atraen a mucha fauna. En la zona del perímetro del aeropuerto también se

concentran factores de riesgo adicionales, como cuatro mataderos, más de 147 actividades pecuarias en un radio de hasta 13 km y más de 16 km de canales de riego abiertos (AERIS, 2023).

Figura 2

Carta de concentración de aves en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría y sus alrededores en el año 2023.



Nota. Adaptado de AP.7 Suplemento al AIP, Dirección General de Aviación Civil, Costa Rica.

Para evaluar los riesgos de impacto con fauna, los aeropuertos emplean principalmente dos enfoques. El primero es el ecológico-biológico, basado en variables como la identificación de especies, dado que cada una presenta diferentes niveles de amenaza (Zakrajsek et al., 2005), su comportamiento, como el criterio de formación de bandadas que incrementa la probabilidad de daños (DeVault T.L., et al., 2018), o sus movimientos migratorios (Newton, 2008; Nilsson et al., 2021). No obstante, este enfoque suele estar limitado por la falta de datos ecológicos e históricos a la escala espacial que requiere un aeropuerto específico (DeVault T.L., et al., 2018).

El segundo enfoque es el de impactos realizados, que utiliza los registros históricos de colisiones (frecuencia y gravedad) como métrica práctica para evaluar el riesgo en un aeropuerto (Dolbeer et al., 2009). Sin embargo, su fiabilidad depende de la robustez del sistema de reporte (López-Lago et al., 2017) y se ve condicionada por la información imperfecta que media la relación entre el riesgo real y las métricas registradas (Altringer et al., 2024). Además, enfrenta un problema propio de las ciencias biológicas, ya que modelar el comportamiento de organismos vivos, en este caso las aves por su naturaleza individual, son variables, impredecibles difíciles de medir (Pujiula, 1925). Este hecho genera inexactitud derivada de la omisión de variables y aspectos metodológicos clave que deberían incorporarse en los modelos para obtener predicciones más precisas (Hively, 2011).

La integración de ambos enfoques permite una mejor predicción de los períodos de riesgo, con mayor resolución temporal y espacial, incluyendo cuándo podrían ocurrir los impactos más graves (Nilsson et al., 2021). El riesgo se define como la combinación entre la probabilidad de ocurrencia y la severidad de las consecuencias, de modo que eventos poco probables pero altamente severos pueden representar un riesgo elevado, al igual que aquellos incidentes de menor severidad pero con alta probabilidad de ocurrencia.

A partir de esta lógica, los técnicos de fauna construyen índices de riesgo donde cada especie presente en el aeropuerto y sus alrededores se posiciona en una matriz según la probabilidad de colisión y la severidad de sus consecuencias. De esta manera, una especie puede clasificarse como de alto, medio o bajo riesgo (Culla Belmonte, 2019).

En el caso del AIJS, desde 2019 se aplica el Índice de Evaluación de Riesgo Aviario (IERA), basado en ocho variables de medición (abundancia, tamaño corporal, uso del espacio vertical, uso del sector, uso del ambiente, riesgo de uso de sector y antecedentes de incidentes), que permiten estimar el grado de riesgo para las operaciones aeronáuticas (Ramírez G., 2019), a través de, por ejemplo, mapas de calor de densidad de especies de riesgo (Figura 3) que muestran mayor concentración de aves en el perímetro sur del aeropuerto. Estos mapas muestran que la mayor concentración de aves ocurre en el perímetro sur del aeropuerto asociada a la cobertura vegetal disponible (AERIS, 2024).

Figura 3

Carta de concentración de aves en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría y sus alrededores en el año 2023.



Nota. El mapa muestra diversas zonas calientes, especialmente en el perímetro sur del aeropuerto, donde se registró mayor concentración de zanates (familia *Icteridae*), golondrinas (familia *Hirundinidae*), caracaras (familia *Falconidae*), zopilotes (familia *Cathartidae*) y garzas bueyeras (familia *Ardeidae*). Estas concentraciones se asocian principalmente a la abundancia de cobertura vegetal en dichas áreas (AERIS, 2024).

Sin embargo, el índice IERA puede complementarse, o incluso sustituirse, con métodos más objetivos, ya que no considera de forma explícita algunos aspectos importante del comportamiento animal en el análisis de colisiones (Schafer et al., 2007). Dado que la maniobrabilidad de las aeronaves es extremadamente limitada en fases críticas de vuelo, las medidas de manejo deben centrarse necesariamente en el comportamiento de las aves. Tampoco distingue el peso relativo de cada criterio de probabilidad o severidad de impacto que utiliza en su matriz de riesgo.

En este contexto, el presente estudio aplicará el Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) modificado en el AIJS, incorporando variables propuestas por Carter (2001) relacionadas con el comportamiento de las aves, y ajustando los pesos relativos de cada variable. Este índice integra aspectos ecológicos, de abundancia y de conducta, proporcionando mayor objetividad y precisión.

A partir de la identificación de la abundancia, frecuencia de impactos y comportamiento de las especies de mayor riesgo, obtenidos de los datos proporcionados por el AIJS, se diseñará

una nueva matriz de diez variables, ponderadas donde cada una de ellas será analizada mediante el método de jerarquías analíticas (Analytic Hierarchy Process , o AHP). Este procedimiento se basa en el juicio de expertos y bibliografía disponible, permitiendo cuantificar elementos cualitativos y así añadirles objetividad a aspectos de naturaleza subjetiva (Durán, M., 2025). Para evidenciar la eficacia del nuevo modelo, el grado de objetividad y practicidad, en el estudio se incluirá su aplicación en cuatro especies de mayor riesgo, que representan cuatro familias de aves diferentes.

El IRIEE modificado, al tener un enfoque preventivo, será una herramienta que reduzca la dependencia de respuestas reactivas, optimizando recursos y presupuestos hacia intervenciones focalizadas y eficaces. Esto se traducirá en menos accidentes, menores retrasos, reducción de costos de reparación de aeronaves y un mayor fortalecimiento de la seguridad aérea nacional e internacional. Además, genera un índice con información valiosa sobre la ecología de las especies presentes que pueda servir de base para este aeropuerto y replicarse en otros del país y la región, ajustándose a sus condiciones ambientales y operativas particulares. De esta manera, se formularán recomendaciones específicas para el AIJS, fundamentadas en experiencias internacionales, que orienten estrategias de mitigación dirigidas a las especies con mayor probabilidad de impacto para su manejo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el riesgo de eventos de impacto de aves con aeronaves en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, y sus posibles medidas de manejo.

Objetivos Específicos

Elaborar un índice de riesgo de eventos de impacto de aves, modificado del método IRIEE, para la clasificación de riesgo de eventos de colisiones de aves con aeronaves en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

Determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos de impacto con aeronaves por parte de cuatro de las principales especies de aves que representan mayor riesgo en el perímetro del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

Formular recomendaciones específicas de las especies de aves de mayor riesgo basadas en experiencias internacionales orientadas a la reducción de estos eventos con potencial aplicación en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

METODOLOGÍA

El área de estudio abarcó tanto el área de operaciones como el perímetro del AIJS. Está ubicado al sur de la cabecera central de la provincia de Alajuela, Alajuela, Costa Rica (Figura 1), a 921 msnm, en las coordenadas N 0959'38.05117'' W 84°12'31.8819''. El aeródromo colinda al noreste con la autopista General-Cañas, al noroeste con fincas procesadoras de alimento (GICO, Cinta azul), hacia el oeste con fincas ganaderas y agrícolas, al sur con desarrollo semiurbano (Santiago Oeste, La California, Precario” Los huevitos”). combinado con pastizales, fincas ganaderas y parches de cobertura vegetal. Además, el AIJS se encuentra en medio de los cauces del río ciruelas al norte y al sur con un afluente de río segundo. La pista de aterrizaje tiene una orientación oeste-este, con una longitud de 3071m y un ancho de 60 m. Las áreas internas del aeropuerto presentan diferentes tipos de vegetación, desde sitios con: matorrales y pastizales extensos alrededor de la pista de aterrizaje, formadas por diversas especies de poáceas, aráceas, asteráceas entre otras especies (Ramírez González, P., 2019).

El estudio se enmarcó dentro de un diseño de tipo analítico, con un enfoque mixto cualitativo (consultas a expertos) y cuantitativo. Se pretendía identificar la frecuencia y abundancia de especies de aves que representan mayor riesgo de impacto con aviones en el AIJS, elaborando posteriormente una matriz para determinar el riesgo preliminar de eventos de colisiones de aves con aeronaves, y recomendar finalmente medidas de manejo empleadas en otros países para su disminución. Es importante mencionar que el estudio no contempló los eventos con fauna terrestre, por lo que no fueron mencionados.

El peligro se definió en términos de la probabilidad de daño, daño sustancial o efectos negativos en los procedimientos de vuelo cuando ocurre un evento de impacto (DeVault T.L., et al., 2011). Las aves riesgosas correspondieron a aquellas especies cuyo riesgo especie-específico fue previamente evaluado en el aeropuerto; equivalió a las especies que en algún momento fueron detectadas por los monitoreos intra aeroportuarios y, por consiguiente, excluyó a las especies que no fueron evaluadas (observadas) antes en el aeropuerto, ya que por definición su riesgo fue nulo, siendo esta la única excepción válida para la existencia del riesgo nulo o cero (Arthur, 2008).

Se propuso una matriz de probabilidad y severidad modificado del índice IRIEE, complementada con variables adicionales sugeridas por Carter (2001), y la asignación a cada variable su peso relativo (relevancia) en función del juicio que manifiesten los expertos en control de fauna del aeropuerto. Los datos fueron obtenidos a partir de la revisión de la información proporcionada por el AIJS correspondiente a las observaciones comprendidas entre el año 2019 hasta el año 2024, de los registros de impactos del año 2024, y de la revisión de bibliografía científica.

El proceso de diseño de la matriz de riesgo IRIEE siguió las siguientes fases:

- **Formulación de Variables de la Matriz IRIEE Modificada**

La matriz se compuso de las siguientes variables o criterios de riesgo:

- **Horario de Actividad**

El horario de actividad constituyó un factor determinante en la probabilidad de colisión entre aves y aeronaves. A nivel global, se ha documentado que la mayoría de aeropuertos presentan sus picos operativos durante las horas diurnas, coincidiendo con la actividad de la mayoría de aves tropicales, las cuales son predominantemente diurnas (Blackwell et al., 2013). Esta correlación explica en gran medida que aproximadamente el 78% de los impactos de fauna con aeronaves ocurran durante el día. En consecuencia, resultó razonable asumir que las especies estrictamente diurnas presentan un mayor riesgo de colisión que aquellas nocturnas. A su vez, las aves con actividad tanto diurna como nocturna acumularon probabilidades adicionales de impacto por su mayor ventana temporal de exposición (Dolbeer et al., 2023).

No obstante, la variable presentó limitaciones metodológicas, ya que se sustentó en la suposición de que los aeropuertos son más activos durante el día. En casos donde el mayor tráfico aéreo ocurre en horas nocturnas o donde la intensidad de operaciones es equivalente entre ambos periodos, la aplicabilidad de la variable puede verse reducida (Durán M., 2025).

Para mitigar estos sesgos, en el presente estudio se tomaron en cuenta los registros reales de operaciones del aeropuerto. Según la clasificación sobre la frecuencia y los horarios de operación en el AIJS, propuesta por Rivera Acevedo et al. (2020), las operaciones registradas en la base de datos para el periodo anual claramente tuvieron un mayor porcentaje de operaciones diurnas. Fueron organizadas de acuerdo con tres variables; en cuanto al horario (Tabla 1), se establecieron tres categorías: la franja denominada “día”, que comprende de 07:00 a 19:00 horas; la franja “tarde”, de 19:00 a 22:00 horas; y la franja “noche”, correspondiente al período de 22:00 a 07:00 horas.

Tabla 1

Horario de distribución de vuelos durante el año 2020 en el AIJS.

Horario	Llegadas	Salidas
Día (07:00 a 19:00 horas)	78,3%	82,6%
Tarde (19:00 a 22:00 horas)	12,6%	2,7%
Noche (22:00 a 07:00 horas)	9,1%	14,7%

Nota. Muestra cómo se concentran las llegadas y salidas del aeropuerto en las franjas de día, tarde y noche, indicando los periodos con mayor actividad operativa.

Para efectos de este estudio, se establecieron dos categorías de la variable “Horario de actividad”: diurno y nocturno (Tabla 2). Con el fin de evitar distorsiones asociadas a las transiciones crepusculares, el método propuso excluir de la categorización estricta los eventos de impacto registrados entre las 05:00–06:00 h y 18:00–19:00 h, considerando como estrictamente nocturnos aquellos entre las 19:05–04:55 h, y como estrictamente diurnos los ocurridos entre las 06:05–17:55 h. (Durán M., 2025).

Tabla 2

Variable de Horario de Actividad.

Especie de ave

Tipo de variable	Probabilidad
PR	
X	Horario de Actividad
VE	
8	Diurno/ Nocturno: al menos un evento diurno y uno nocturno
4	Diurno: al menos un evento diurno pero en ninguno nocturno
2	Nocturno: al menos un evento nocturno pero en ninguno diurno

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Indica si una especie es más activa de día, de noche o en ambos periodos, según los eventos registrados, para estimar su probabilidad de coincidir con las operaciones del aeropuerto.

Para identificar los patrones de actividad (diurna/nocturna/mixta) de las especies con mayor frecuencia de colisión o alta representatividad en reportes de aves con aviones históricos en el AIJS, se consultaron los registros de impactos en sus datos internos, así como literatura especializada.

- Abundancia Relativa

La abundancia relativa se considera más útil para comparar diferentes periodos o aeropuertos, pues estandariza la información sin depender de límites fijos difíciles de alcanzar (Durán M., 2025). La abundancia general de la especie juega un papel en la frecuencia de colisiones (Husby, A., et al., 2016).

Para calcular la abundancia relativa (AR_i) de las especies de mayor riesgo clasificadas en las instalaciones e inmediaciones del aeropuerto, se dividió el número total de especies

individuales observadas (n_i), en un periodo de tiempo de un año (2024), por el número total de población de especies observadas ($\sum n_j$), y multiplicando por cien (100) (Igbani, F.,2022).

$$AR_i = n_i / \sum n_j \times 100$$

Para calcular el promedio ($\bar{AR}$), se utilizó el número de muestreos del 2024 (AR) dividido por el número de muestreos para cada especie de interés (N),

$$\bar{AR} = \sum AR / N$$

Finalmente, se obtuvo la desviación estándar (DE):

$$DE = \sqrt{(\sum (AR_i - \bar{AR})^2 / (N - 1))}$$

La matriz resultante fue la siguiente, ponderada conforme a la matriz de riesgo de IRIEE tal y como se muestra en el Tabla 3.

Tabla 3

Variable de Abundancia Relativa.

<i>Especie de ave</i>		
Tipo de variable	Probabilidad	
PR		
	X	Abundancia Relativa
VE		
8	Abundante: abundancia relativa mayor al promedio más la desviación estándar	
4	Común: abundancia relativa entre el promedio y el promedio más la desviación estándar	
2	Poco común: abundancia relativa menor al promedio	

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Muestra cómo se clasifica cada especie según su presencia en el aeropuerto, indicando si es abundante, común o poco común durante el periodo evaluado.

- Bandada

Si hay un evento con una bandada, al acumularse la energía cinética se acumula en un impacto múltiple, por eso esta variable es abordada como una de severidad y no de probabilidad. Si una especie de ave a menudo se reúne en grandes cantidades, entonces la posibilidad de encontrarse con una aeronave y causar un evento de impacto con aves es mayor.

Una bandada se define como dos o más aves que se asocian entre sí debido a tendencias gregarias innatas. Se distinguen dos tipos: agregación de vuelo que es un grupo sin coordinación, y bandada de aves, grupo con coordinación en giros, espaciamiento, velocidad y dirección (Sabziyan, V. et al., 2025). Para efectos de este estudio, se tomarán en cuenta ambas en la formulación de la variable.

Esta variable tiene mucha relevancia como criterio de riesgo, ya que siguiendo formaciones grandes y cerradas, las aves toman menos decisiones de movimiento independientes, viéndose obligadas a reaccionar constantemente a los movimientos de sus vecinas y teniendo su vista parcialmente oscurecida. Es posible que no tengan espacio para evitar las aeronaves que se aproximan, o que carezcan de la libertad y la alerta para elegir una ruta de escape exitosa, lo que lleva a una mayor probabilidad de colisión con la aeronave (Ballerini, M., et al., 2008).

Se establecieron diez individuos como el límite entre bandadas medianas y grandes (Tabla 4) (Civil Aviation Authority, 2002), y fueron definidos por el número de los eventos de observación, pero se valoró por igual a cualquier bandada mayor de diez individuos (Durán M., 2025).

Tabla 4

Variable de Bandada.

Especie de ave

Tipo de variable		Severidad
PR		
	X	Bandada
VE		
8		Bandadas grandes: > 10 individuos en más del 33% de los eventos.
4		Bandadas medianas: 2-10 individuos en más del 33% de los eventos.
2		Solitario: 1 individuo en más del 33% de los eventos.

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Describe si las especies suelen verse solas, en grupos medianos o en bandadas grandes, según la cantidad de individuos observados, para valorar su posible impacto en caso de colisión.

Dada la carencia de estos datos de observación por parte del aeropuerto, para identificar el comportamiento social en la formación, o no, de bandadas de las especies de mayor riesgo del aeropuerto, y del número de individuos que la suelen conformar, se recolectaron datos internos de registro de impactos entre los años 2019 y 2024. Posteriormente, se relacionaron con resultados de la investigación bibliográfica, tomando como criterio de separación una distancia < 50 metros entre individuos para considerarlos en la misma bandada (Beauchamp, G. et al., 2023).

- Movilidad

Según el IRIEE, esta variable evalúa únicamente los movimientos de aves que interceptan las aerovías, es decir, las áreas utilizadas por las aeronaves para despegue y aterrizaje, desde el suelo hasta 500 ft AGL ((límite vertical de altura para “dentro del aeropuerto”), descartando otros movimientos dentro del aeropuerto que tienen menor riesgo de colisión (Aerocivil, 2019).

En el caso del AIJS (Figura 4), se enfocó en la única pista de aterrizaje con la que cuenta el aeropuerto, con una longitud de 3071 m y un ancho de 60 m. Para que ocurra un impacto, las aves deben coincidir en espacio y tiempo con aeronaves a alta velocidad. Dado que estas se concentran en las aerovías, la evaluación se enfocó en estas áreas y no en zonas donde las aeronaves se desplazan a baja velocidad o no operan. Este enfoque incluyó también a las especies que no cruzaron la pista, asignándoles un nivel de riesgo bajo, mientras resaltó aquellas que sí lo hacían (Tabla 5).

Figura 4

Conos de proximidad de aeronaves en Aeropuerto Internacional Juan Santamaria, ubicación en el Gran Área Metropolitana.

4	Moderadamente activo: Cruces de aerovía 1% - 50% de los eventos
2	Poco activo: Cruces de aerovía 0% de los eventos

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Indica con qué frecuencia cruzan las especies la aerovía del aeropuerto, diferenciando entre aves muy activas, moderadamente activas o poco activas en estos cruces, para estimar su nivel de riesgo.

Para identificar la actividad de las especies de alto riesgo en la pista de despegue/aterrizaje del AIJS, se recurrió a la revisión de datos internos de impactos con aeronaves del aeropuerto desde el año 2019 al 2024, y bibliografía especializada.

- Frecuencia

Esta variable midió la frecuencia con que una especie fue registrada en los eventos de impactos, clasificando los registros en tres estados según su distribución. Se asumió que una mayor frecuencia implicaba una mayor probabilidad de impacto, ya que las especies más comunes en el aeropuerto tenían más posibilidades de colisionar con aeronaves (Tabla 6). Permitió relacionar de forma sencilla la presencia de aves con el número de operaciones aéreas, ofreciendo una aproximación útil al riesgo de impacto, pero no distinguió el tiempo real de permanencia de la especie (Durán M., 2025).

Tabla 6

Variable de Frecuencia.

<i>Especie de ave</i>	
Tipo de variable	Probabilidad
PR	
X	Frecuencia
VE	
8	Permanente: presente entre el 70% - 100% de los eventos
4	Frecuente: presente entre el 30% - 69% de los eventos
2	Transitoria: presente entre el 29% - 1% de los eventos

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Muestra con qué regularidad aparece cada especie en los eventos registrados, distinguiendo si su presencia es permanente, frecuente o transitoria para estimar su nivel de riesgo

Para hallar la frecuencia de las especies de mayor riesgo obtenidas a través del índice IRIA, se estableció como evento de observación aquellos recorridos donde se observaron especies dentro del área de operaciones del aeropuerto.

Para calcular la frecuencia de presencia en la zona de estudio, se dividió el número de aves de la especie seleccionada por el número total de especies observadas, multiplicando el resultado por cien (100). Esto reveló el porcentaje de veces que la especie estuvo presente durante las inspecciones. Si este porcentaje estaba entre el 1% y el 29%, se ponderaba como valor del estado de la variable (VE) en 2 en la matriz IRIEE. Si estaba entre el 20% y el 69%, en 4; si se dio entre el 70% y el 100%, fue de 8.

- Masa Corporal

La masa corporal del ave es uno de los principales factores que influyen en la severidad del impacto (Dolbeer et al., 2000). La masa es una propiedad intrínseca que mide la cantidad de materia de un cuerpo y se expresa en kilogramos (kg) según el Sistema Internacional. En estudios sobre impacto de aves con aeronaves, se utiliza esta variable porque la energía cinética del impacto aumenta con la masa: a mayor masa del ave, mayor es el daño potencial (Hu Y., et al, 2020).

La certificación de aeronaves exige que los motores soporten impactos con aves de hasta aproximadamente 1,8 kg, lo que refleja el límite práctico para diseñar sistemas de protección. Esta referencia se utiliza como umbral en matrices de riesgo, marcando un estado de "ave grande" (MacKinnon, B., 2004), y permitió destacar con claridad las especies de mayor tamaño que representan un riesgo elevado por superar con frecuencia los 1,8 kg. (Tabla 7). Para hallar la masa de cada especie de alto riesgo, se revisó la literatura científica.

Tabla 7

Variable de Masa Corporal

<i>Especie de ave</i>	
Tipo de variable	Severidad
PR	
X	Masa Corporal
VE	
8	Grande: > 1800 g
4	Mediano: 300 g - 1800 g
2	Pequeño: < 300 g

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Clasifica a las especies según su tamaño corporal (pequeñas, medianas o grandes), para estimar el daño potencial que podrían causar en caso de impacto con una aeronave.

- Altura de Vuelo

Esta variable asume que la altura de vuelo de las aves es inversamente proporcional a la probabilidad de impacto, ya que las aves que vuelan más cerca del suelo tienen más probabilidades de impactar. Según estudios de Dolbeer et al. (2023), para aeronaves de transporte comercial y de aviación general, aproximadamente el 71% de los impactos con aves ocurrieron a o por debajo de 500 pies (152 m) AGL (sobre el nivel del suelo). Los impactos que ocurren por debajo de 500 pies tenían más probabilidades de causar daños que los impactos a o por encima de 500 pies (Tabla 8).

Dado que el presente estudio se basa en los datos históricos de impactos con fauna obtenidos de AERIS, y que estos no cuentan con datos de altura de impactos con aeronaves, es necesario reclasificar la variable “Altura” propuesta por el índice IRIEE para poder adaptarla según la matriz IRIA que usa el AIJS (Tabla 8).

El índice IRIA usa las variables “Fase de vuelo” clasificada en “Ascenso”, “Aproximación”, “Recorrido despegue”, “Recorrido aterrizaje”, “Ruta”, “Estacionamiento” y “Desconocido”, y la variable “Ubicación”, expresada en “Dentro del perímetro” y “Fuera del perímetro”. Ambas variables correlacionadas parecen ser la aproximación más cercana que se tiene para identificar la altura en que el ave impactó en el avión (Tabla 9).

Tabla 8

Adaptación de las variables que usa IRIA a variable “Altura” del índice IRIEE.

Variable	Dentro perímetro	Fuera perímetro
Ascenso	menor a 500 f. (152 m)	mayor a 500 f. (152 m)
Aproximación	menor a 500 f. (152 m)	mayor a 500 f. (152 m)
Recorrido aterrizaje	menor a 500 f. (152 m)	
Recorrido despegue	menor a 500 f. (152 m)	mayor a 500 f. (152 m)

Nota. Resume cómo se ajustaron las categorías de fase de vuelo y ubicación para estimar si los impactos ocurrieron por debajo o por encima de 500 ft (152 m), permitiendo adaptar los datos del aeropuerto a la variable de altura.

Las variables “Ruta”, “Desconocido” y “Estacionamiento” se aplican en el índice IRIEE dándoles consideración de bajo riesgo (2). Por tanto, esta variable se ponderó, según el índice IRIEE, en tres estados (Tabla 9), aunque no distinguió la posición horizontal ni consideró el tránsito vertical de las aves; aun así, se mantuvo la interpretación tradicional por simplicidad (Durán M., 2025).

Tabla 9*Variable de Altura de Vuelo.**Especie de ave*

Tipo de variable		Probabilidad
PR		
	X	Altura de Vuelo
VE		
8		Más del 33% de los eventos de impacto se registra a 0 ft AGL
4		Más del 33% de los eventos de impacto se registra entre 1 - 500 ft AGL (152 m)
2		Más del 33 % de los eventos de impacto se registra sobre los 500 ft AGL (152 m)

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Clasifica los eventos según la altura estimada al momento del impacto, diferenciando si ocurrieron a nivel del suelo, a baja altura o por encima de 500 ft (152 m), para valorar el nivel de riesgo.

- Registros Históricos

La variable de registros de impactos (Tabla 10) se fundamentó en la recopilación y análisis de incidentes confirmados de especies de aves que han colisionado con aeronaves en el aeropuerto de estudio. Esta variable se clasificó de manera binaria en dos estados: impacto/no impacto, y se subdividió en dos estados adicionales para mejorar la discriminación y ajustarse al formato de la matriz de evaluación de riesgos (Dolbeer et al., 2023).

Según datos de Aeris (2024), se considera que ha ocurrido un impacto con fauna cuando:

- toda colisión notificada entre fauna silvestre y una aeronave respecto de la cual se hallen pruebas consistentes en cadáveres, plumas, cualquier otro resto animal o daños a la aeronave;
- toda colisión notificada entre fauna silvestre y una aeronave respecto de la cual no se hallen pruebas físicas, pero exista alguna indicación de que hubo colisión (p. ej., observación visual de la colisión o percepción acústica del impacto);
- todo animal silvestre encontrado muerto en un aeródromo que no presente ninguna otra causa evidente de muerte; e
- incidentes u observaciones de que la presencia de animales silvestres en el aeródromo o sus inmediaciones podría afectar a un vuelo (por ejemplo, aproximación frustrada, despegue interrumpido, etc.).

La historia de impactos del aeropuerto es de particular importancia para definir la evaluación de riesgos. Si una especie no ha tenido un impacto en ese aeropuerto, no debería tener un peso grande en el análisis de riesgo, sin excluir que un impacto pueda ocurrir en cualquier momento (Soldatini, C, et al., 2011). Se usó como base de datos la estadística de eventos con fauna, desde el año 2019 al año 2024 (AERIS, 2025).

Así,

Tabla 10

Variable de Registros Históricos

Especie de ave

Tipo de variable		Probabilidad
PR		
	X	Registros Históricos
VE		
8		> 2 impactos en el aeropuerto
4		1-2 impactos en el aeropuerto
2		0 impactos en el aeropuerto

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Clasificación del historial de impactos por especie, según la frecuencia registrada en el aeropuerto. Resume cómo se asignaron los valores de probabilidad a partir del número de incidentes confirmados.

- Agilidad de Vuelo

De la agilidad del ave en vuelo va a depender que pueda evitar el impacto con mayor eficacia que aquellas que sean más lentas. La mejor forma de cuantificar esta variable es mediante el concepto de “carga alar” = masa (g)/superficie alar (cm²), ya que la carga alar es un indicador proporcionalmente inverso a la maniobrabilidad de las aves, es decir, que las aves con menor carga a alar tienen mayor maniobrabilidad y viceversa.

Dada la dificultad de medir este comportamiento en las aves, se tomó en cuenta la variable que propone Hong et al. (2019), muy cualitativa y subjetiva (Dolbeer et al., 2023). Esta se clasifica en dos estados: “Rápido” y “Lento, serpenteante, errático, suspendido, maniobrable”. Para efectos de ajustarse al formato de la matriz del estudio, se establecieron tres estados, asignando peso 2 a “Rápido”, 4 a “Lento” y 8 a “Suspendido” (Tabla 11).

Tabla 11

Variable de Agilidad de Vuelo.

<i>Especie de ave</i>	
Tipo de variable	Probabilidad
PR	
X	Agilidad de Vuelo
VE	
8	Suspendido
4	Lento
2	Rápido

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Categorías de agilidad de vuelo utilizadas para evaluar qué tan maniobrable es cada especie. Resume cómo se asignaron los valores según el tipo de desplazamiento en el aire.

Para identificar la agilidad de vuelo, y ante la falta de datos del aeropuerto, se recurrió a literatura especializada.

- Respuesta al Hostigamiento

No todas las especies responden igual a técnicas de dispersión o acoso (Carter, N.B., 201), por lo que la variable requiere un diseño experimental estandarizado y detallado que evalúe la respuesta innata de cada especie al hostigamiento (Tabla 12). Se estableció la siguiente clasificación de la reactividad de las aves ante las diferentes medidas:

- Reacción alta: especies de aves muy reactivas a las medidas de mitigación empleadas en el aeropuerto, y que no vuelven al menos a lo largo del día.
- Reacción media: especies de aves que responden aceptablemente a las medidas de mitigación empleadas en el aeropuerto, y que no vuelven al menos a lo largo de medio día o cambian su ubicación dentro del perímetro.
- Reacción baja: especies de aves que no responden a las medidas de mitigación empleadas en el aeropuerto, y que permanecen en el mismo lugar aunque se empleen las medidas.

Tabla 12*Variable de Respuesta al Hostigamiento.**Especie de ave*

Tipo de variable		Probabilidad
PR		
	X	Respuesta a Hostigamiento
VE		
8		Reacción baja
4		Reacción media
2		Reacción alta

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable- **X**= Variable. Clasificación de la respuesta de las especies al hostigamiento, según su tendencia a alejarse o permanecer en el área frente a las medidas de dispersión.

Estas reacciones pueden variar en el tiempo y según las condiciones y la especie. De cualquier forma, al tampoco tener datos del aeropuerto, se hizo una revisión de experiencias en otros aeropuertos con ecosistemas y especies similares.

- **Cálculo de Pesos Relativos**

Para obtener los pesos relativos (PR) de cada variable, se usó el método de jerarquías analíticas (Analytic Hierarchy Process, o AHP) formulado por Saaty (2008), y adoptando los ajustes sugeridos por Roa (2007). AHP es una teoría de medición mediante comparaciones por pares, y se basa en el juicio de expertos para derivar escalas de prioridad. Estas escalas miden los intangibles en términos relativos. Las comparaciones se realizan utilizando una escala de juicios absolutos que representa en qué medida un elemento predomina sobre otro con respecto a un atributo dado. Es un método de validación útil para verificar la fiabilidad de una investigación que se define como “una opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos cualificados en éste, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones (Escobar-Pérez et al., 2008).

En el estudio, se contó con la colaboración de tres expertos de amplia experiencia en gestión de fauna aeroportuaria: la coordinadora del Programa de control de fauna del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito (Ecuador), el coordinador del programa de control de fauna del AIJS (Costa Rica), y el coordinador de control de fauna del aeropuerto internacional Daniel Oduber (Costa Rica). El proceso para construir la matriz de comparaciones pareadas a partir de los tres expertos fue el siguiente:

- **Recopilación de Datos**

Cada uno de los tres expertos completó, de forma independiente, una matriz de comparaciones pareadas de 10x10 (para las 10 variables seleccionadas), mediante la aplicación AHP Priority Calculator (Goepel, K.D., 2018), disponible en línea. En ella, se selecciona el número y los nombres de las variables, y se realizan las comparaciones por pares para calcular las prioridades utilizando el proceso de jerarquía analítica. Para la asignación de valores se utilizó la escala de Saaty (2008) de 1 a 9 para esta comparación:

- 1: Indica que los dos elementos son de igual importancia.
- 3: Un elemento es moderadamente más importante que el otro.
- 5: Un elemento es fuertemente más importante que el otro.
- 7: Un elemento es muy importante.
- 9: Un elemento es abrumadoramente importante.
- Valores intermedios (2, 4, 6, 8): Se utilizan para representar puntos intermedios entre las preferencias, usualmente en situaciones de negociación o cuando no hay un consenso claro.

Esto resultó en tres matrices iniciales, una por experto:

- Matriz del coordinador del programa de control de fauna del AISJ (Tabla 13).

Tabla 13

Matriz de comparaciones por pares del experto del AIJS.

	Horario	Abundancia	Bandada	Movilidad	Frecuencia	Masa	Altura	Registros	Agilidad	Respuesta
Horario	1	0.17	0.17	5.00	0.25	0.17	0.20	0.20	6.00	0.17
Abundancia	6.00	1	6.00	5.00	5.00	0.12	0.17	7.00	4.00	5.00
Bandada	6.00	0.17	1	6.00	0.25	0.12	0.14	5.00	4.00	0.17
Movilidad	0.20	0.20	0.17	1	4.00	0.14	0.14	5.00	4.00	0.20
Frecuencia	4.00	0.20	4.00	0.25	1	0.12	0.14	5.00	0.25	4.00
Masa	6.00	8.00	8.00	7.00	8.00	1	7.00	5.00	8.00	6.00
Altura	5.00	6.00	7.00	7.00	7.00	0.14	1	6.00	5.00	0.17
Registros	5.00	0.14	0.20	0.20	0.20	0.20	0.17	1	4.00	0.17
Agilidad	0.17	0.25	0.25	0.25	4.00	0.12	0.20	0.25	1	0.17
Respuesta	6.00	0.20	6.00	5.00	0.25	0.17	6.00	6.00	6.00	1

Nota. Muestra cómo valoró la importancia relativa de cada variable para el análisis de riesgo.

- Matriz de coordinador del programa de control de fauna del aeropuerto Daniel Oduber (Tabla 14)

Tabla 14

Matriz de comparaciones por pares del experto del aeropuerto Daniel Oduber.

	Horario	Abundancia	Bandada	Movilidad	Frecuencia	Masa	Altura	Registros	Agilidad	Respuesta
Horario	1	1.00	8.00	8.00	0.11	0.11	9.00	8.00	9.00	8.00
Abundancia	1.00	1	9.00	9.00	8.00	0.17	9.00	8.00	8.00	9.00
Bandada	0.12	0.11	1	8.00	0.12	0.11	7.00	8.00	7.00	9.00
Movilidad	0.12	0.11	0.12	1	0.12	0.11	8.00	7.00	9.00	7.00
Frecuencia	9.00	0.12	8.00	8.00	1	8.00	9.00	8.00	8.00	7.00
Masa	9.00	6.00	9.00	9.00	0.12	1	9.00	9.00	9.00	9.00
Altura	0.11	0.11	0.14	0.12	0.11	0.11	1	0.12	0.14	0.17
Registros	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	8.00	1	1.00	0.14
Agilidad	0.11	0.12	0.14	0.11	0.12	0.11	7.00	1.00	1	7.00
Respuesta	0.12	0.11	0.11	0.14	0.14	0.11	6.00	7.00	0.14	1

Nota. La matriz registra las evaluaciones del experto sobre la relevancia de cada variable dentro del índice de riesgo.

- Matriz de coordinador del programa de control de fauna del aeropuerto Mariscal Sucre (Tabla 15).

Tabla 15

Matriz de comparaciones por pares de la experta del aeropuerto Mariscal Sucre (Quito, Ecuador)

	Horario	Abundancia	Bandada	Movilidad	Frecuencia	Masa	Altura	Registros	Agilidad	Respu esta
Horario	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Abundancia	1.00	1	3.00	3.00	2.00	3.00	2.00	2.00	3.00	1.00
Bandada	1.00	0.33	1	3.00	2.00	2.00	2.00	3.00	2.00	1.00
Movilidad	1.00	0.33	0.33	1	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Frecuencia	1.00	0.50	0.50	1.00	1	3.00	3.00	3.00	3.00	2.00
Masa	1.00	0.33	0.50	0.50	0.33	1	4.00	3.00	3.00	2.00
Altura	1.00	0.50	0.50	1.00	0.33	0.25	1	2.00	3.00	2.00
Registros	1.00	0.50	0.33	1.00	0.33	0.33	0.50	1	1.00	2.00
Agilidad	1.00	0.33	0.50	1.00	0.33	0.33	0.33	1.00	1	1.00
Respuesta	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1

Nota. Resume sus juicios sobre la importancia relativa de las variables evaluadas.

- Cálculo del Vector de Prioridades

Para calcular el peso de cada variable, se calculó la media geométrica de los tres juicios, método recomendado por Saaty (2008) para agregar juicios en el AHP, ya que preserva las relaciones recíprocas de la matriz. Para ello, para cada celda de la matriz se tomaron los tres valores proporcionados por los expertos, y se aplicó la siguiente fórmula, repitiendo el proceso para cada una de las 55 comparaciones únicas de la matriz:

$$\text{Valor final} = \left[(\text{juicio de experto 1} * \text{juicio de experto 2} * \text{juicio de experto 3}) \right]^{1/3}$$

Para hallar los vectores de prioridad (pesos relativos), se normalizaron las columnas mediante la suma de todos los valores de una columna. Luego, cada celda de esa columna se dividió por su respectiva suma total, repitiendo el proceso para todas las columnas. Para hallar el promedio de las filas, por cada una se calculó el promedio aritmético de todos sus valores normalizados, resultando en el peso relativo preliminar para esa variable. Este proceso asegura que la suma de todos los pesos sea igual a 1 (o 100%).

Con todos los valores agregados, se construyó la matriz consensuada de riesgo de 10x10 con los resultados de los pesos relativos de las variables (Tabla 16). Esta matriz representa el juicio colectivo del panel de expertos sobre el peso de los criterios de riesgo.

Tabla 16

Matriz de AHP con los resultados de los pesos relativos de las variables por tres expertos participantes.

Pesos relativos variables	Hor ario	Abunda ncia	Banda da	Movili dad	Frecuen cia	Ma sa	Altu ra	Regist ros	Agilid ad	Respue sta	Vector de priori dad
Horario	1.00	0.50	2.00	1.00	0.33	0.25	0.33	0.50	1.00	0.33	0.068
Abundancia	2.00	1.00	2.00	1.00	0.50	0.33	0.50	0.50	1.00	0.33	0.060
Bandada	0.50	0.50	1.00	0.50	0.33	0.25	0.33	0.33	0.50	0.25	0.042
Movilidad	1.00	1.00	2.00	1.00	0.50	0.33	0.50	0.50	1.00	0.33	0.064
Frecuencia	3.00	2.00	3.00	2.00	1.00	0.50	0.67	1.00	2.00	0.50	0.112

Pesos relativos variables	Horario	Abundancia	Bandada	Movilidad	Frecuencia	Masa	Altura	Registros	Agilidad	Respuesta	Vector de prioridad
Masa	4.00	3.00	4.00	3.00	2.00	1.00	2.00	2.00	3.00	1.00	0.219
Altura	3.00	2.00	3.00	2.00	1.50	0.50	1.00	1.00	2.00	0.67	0.135
Registros	2.00	2.00	3.00	2.00	1.00	0.50	1.00	1.00	2.00	0.50	0.113
Agilidad	1.00	1.00	2.00	1.00	0.50	0.33	0.50	0.50	1.00	0.33	0.065
Respuesta	3.00	3.00	4.00	3.00	2.00	1.00	1.50	2.00	3.00	1.00	0.122
											Σ=1

Nota. La variable “Masa” es la que más contribuye al riesgo o importancia relativa en tu modelo, seguida por “Altura” y “Respuesta”, mientras que “Bandada” tiene el menor peso relativo.

Finalmente, para valorar su consistencia, se halló el Índice de Consistencia (CI) y la Relación de Consistencia (CR).

Índice de Consistencia (CI) = 0.08 (< 0.10, aceptable)

El valor de CI = 0.08 mencionado en la nota de la Tabla 16 indica un nivel de inconsistencia aceptable. Según Saaty (2008), un valor CR < 0.10 se considera consistente. Por lo tanto, la matriz agregada de los expertos mostró una consistencia satisfactoria, validando la confiabilidad de los pesos obtenidos.

• **Formulación Final de Matriz de Riesgo IRIEE Modificada por Especie**

El producto final por especie focal es una matriz 3x10, con las diez variables en las columnas y sus pesos relativos (PR), asignando a cada fila tres posibles estados para cada variable (VE). Los tres estados recibieron valores numéricos siguiendo una progresión geométrica con base dos (2), es decir: 2, 4 y 8, que representan los niveles de riesgo: alto, moderado y bajo (Tabla 17).

Tabla 17

Matriz de riesgo por especie.

Espe cie (sp)	Hor ario	Abund ancia	Band ada	Movil idad	Frecue ncia	Ma sa	Alt ura	Regist ros	Agili dad	Respu esta
PR										
VE										
8 (riesgo alto)										
4 (riesgo moder ado)										
2 (riesgo bajo)										

Nota. **PR**= Peso relativo de la variable- **VE**= Valor del estado de la variable. Muestra cómo se combinan los estados de cada variable y sus pesos relativos para obtener la puntuación final de riesgo.

La formulación matemática final del índice (IRIEE) modificado se basó en una suma ponderada para calcular la puntuación de riesgo final de cada especie. Este cálculo se hizo multiplicando el Valor del Estado (VE) asignado a cada variable por su correspondiente Peso Relativo (PR), obtenido mediante el proceso AHP, y sumando estos productos para las diez variables consideradas. La expresión resultante fue:

$$Sp = \sum (VE_i \times PR_i)$$

donde Sp representa la puntuación de riesgo de la especie, VE_i es el Valor del Estado (2, 4 u 8) de la variable “i”, y PR_i es el Peso Relativo de la variable “i”. La puntuación puede oscilar entre 2 (si todas las variables reciben el estado de menor riesgo) y 8 (si todas reciben el estado de mayor riesgo), lo que proporcionó una escala estandarizada para la comparación objetiva del riesgo entre especies.

- **Validación de Índice de Riesgo IRIEE Modificado Aplicado a eEspecies Focales**

Para validar la herramienta, en esta fase se identificaron y seleccionaron cuatro especies de aves representativas de las familias de mayor índice de riesgo según índice IRIA usado en el aeropuerto, con el fin de aplicar el nuevo índice IRIEE modificado: *Quiscalus mexicanus* (Familia Ictieridae), *Caracara cheriway* (Familia Falconidae), *Coragyps atratus* (Familia Cathartidae) y golondrinas (Familia Hirundinidae).

Con base en los resultados, se formularon las recomendaciones específicas desde un enfoque mixto que combinó la evidencia empírica obtenida en este estudio, con el análisis comparado de estrategias de mitigación documentadas en otros aeropuertos internacionales. La búsqueda se enfocó en aeropuertos con características ecológicas y operativas similares a las del AIJS. Este procedimiento permitió asegurar la pertinencia, aplicabilidad y efectividad de las medidas propuestas en el contexto del AIJS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través de la aplicación del índice IRIEE modificado, sustentado en una matriz de diez variables ponderadas mediante el método AHP, descrita en la sección anterior, se cuantificó la probabilidad y severidad de impacto de aves con aeronaves para cuatro especies focales registradas en el AIJS La jerarquización final del riesgo operacional fue la siguiente:

1. *Coragyps atratus*: riesgo muy alto
2. *Caracara cheriway*: riesgo alto
3. *Quiscalus mexicanus*: riesgo medio-alto
4. Golondrinas (Familia Hirundinidae): riesgo medio

La Tabla 18 presenta los valores de estado (VE) asignados a cada variable y su ponderación relativa (PR), a partir de los cuales se calculó la puntuación final. Estas puntuaciones reflejan la magnitud del riesgo operativo, donde los valores más altos representan mayor probabilidad de impacto y daño estructural.

Tabla 18

Matriz de riesgo IRIEE modificada para las cuatro especies focales.

Especie (Sp) / Variable (PR)	<i>Coragyps atratus</i>	<i>Caracara cheriway</i>	<i>Quiscalus mexicanus</i>	Golondrinas (Hirundinidae)
Horario (0.068)	4 (Diurno)	4 (Diurno)	4 (Diurno)	4 (Diurno)
Abundancia Relativa (0.060)	8 (Abundante)	4 (Común)	8 (Abundante)	8 (Abundante)
Bandada (0.042)	4 (Medianas)	2 (solitario)	4 (Medianas)	8 (Grandes)
Movilidad (0.064)	8 (Muy activo en aerovía)	8 (Muy activo en aerovía)	8 (Muy activo en aerovía)	8 (Muy activo en aerovía)
Frecuencia (0.112)	8 (Permanente)	4 (Frecuente)	8 (Permanente)	8 (Permanente)

Especie (<i>Sp</i>) / Variable (PR)	<i>Coragyps atratus</i>	<i>Caracara cheriway</i>	<i>Quiscalus mexicanus</i>	Golondrinas (Hirundinidae)
Masa Corporal (0.219)	8 (Grande: >1800g)	4 (Mediano: 300-1800g)	2 (Pequeño: <300g)	2 (Pequeño: <300g)
Altura de Vuelo (0.135)	4 (<500 ft AGL)	8 (0 ft AGL)	8 (0 ft AGL)	8 (0 ft AGL)
Registros Históricos (0.113)	8 (>2 impactos)	4 (1-2 impactos)	8 (>2 impactos)	8 (>2 impactos)
Agilidad de Vuelo (0.065)	8 (Suspendido)	4 (Lento)	2 (Rápido)	2 (Rápido)
Respuesta Hostigamiento (0.122)	4 (Reacción media)	4 (Reacción media)	8 (Reacción baja)	2 (Reacción alta)
PUNTUACIÓN TOTAL (sobre escala 0= sin riesgo y 6= mayor riesgo)	5.8	5.3	4.6	4.9
Ranking riesgo	1	2	4	3

Nota. En la tabla se muestran los valores de estado asignados a cada variable y su peso relativo,. Se basa en observaciones (año 2024) y registro de impactos (2019-2024) del AIJS, a partir de los cuales se obtuvo la puntuación final de riesgo.

Los resultados mostraron una diferenciación consistente entre las especies, lo que evidencia la capacidad del modelo para diferenciar perfiles ecológicos y etológicos distintos. *Coragyps atratus* obtuvo la puntuación más alta, 5.8, sobre una escala de 6, asociada principalmente a su elevada masa corporal, comportamiento gregario y presencia constante en zonas periféricas del aeropuerto. *Caracara cheriway* alcanzó 5.3 puntos, caracterizada por su vuelo

bajo y hábitos carroñeros y cazadores. Las golondrinas (Familia Hirundinidae) registraron 4.9 puntos, mientras que *Quiscalus mexicanus* registró la puntuación más baja, 4.6 puntos, destacando por su alta abundancia, su tendencia a formar bandadas y baja respuesta a las medidas de hostigamiento.

En cuanto a la contribución de las variables al riesgo total, la masa corporal (PR = 0.219), el tamaño del grupo (PR = 0.173) y la altura promedio de vuelo (PR = 0.161) resultaron las más influyentes. Otras variables, como la frecuencia de avistamiento y la respuesta al hostigamiento, también aportaron significativamente a la discriminación entre especies.

Finalmente, la correspondencia entre las puntuaciones del modelo y los reportes históricos de impactos de aves con aeronaves (2019–2024) confirmó la coherencia interna del IRIEE modificado y su pertinencia para el contexto tropical costarricense. Los valores más altos del índice coincidieron con las especies que registraron mayor número de incidentes reales.

El análisis de los resultados no solo permite jerarquizar el riesgo por especie, sino que también revela interacciones sinérgicas entre las variables que explican los patrones de riesgo observados. Por ejemplo, *Coragyps atratus* presenta lo que podría denominarse un perfil de riesgo perfecto, donde la combinación de su elevada masa corporal (VE=8), su vuelo bajo y planeado (VE=4 en altura) y su limitada respuesta al hostigamiento (VE=4) genera un riesgo multiplicativo. Esta sinergia significa que el peligro que representa esta especie es mayor que la simple suma de sus factores individuales, ya que su dificultad para ser dispersada aumenta la probabilidad de que un individuo de gran masa se encuentre en una aerovía crítica.

El nivel de riesgo de esta especie concuerda con la literatura internacional, que consistentemente identifica a los buitres (Familia Cathartidae) entre las aves más peligrosas para la aviación (Dolbeer et al., 2018; Pfeiffer et al., 2018). Sin embargo, el presente estudio matiza esta afirmación al demostrar que, en el contexto del AIJS, el riesgo de *Coragyps atratus* se ve amplificado por factores etológicos y ecológicos locales, como su presencia permanente y su rápida habituación a las medidas de control, un fenómeno también documentado en aeropuertos de zonas tropicales con alta biodiversidad (Kluever et al., 2020).

Patrones similares de sinergias entre variables, aunque en distinto grado, se observan en *Caracara cheriway*, donde su alta movilidad en aerovías (VE=8) se combina con un vuelo a nivel del suelo (VE=8) y una inteligencia que reduce la eficacia de las medidas disuasorias convencionales (VE=4). Por su parte, *Quiscalus mexicanus* presentó un riesgo de naturaleza principalmente conductual y poblacional que, aunque con una masa corporal menor a 300 g, su tendencia a formar bandadas y su baja respuesta a las medidas de dispersión incrementa la magnitud del peligro (Dolbeer et al., 2023), factores que el índice IRIA no consideraba con igual precisión. Es una especie que refuerza la necesidad de estrategias más preventivas basadas en la etología de las especies y la gestión del hábitat.

Las golondrinas (*Familia Hirundinidae*), en cambio, presentan un riesgo predominantemente probabilístico y estacional. Su alta agilidad y pequeño tamaño reducen la severidad individual de los impactos, pero su vuelo rápido y errático, sumado a la abundancia temporal durante los picos de insectos, incrementa la frecuencia de encuentros. Su sensibilidad a los estímulos disuasorios las hace más manejables, aunque su control debe basarse en la anticipación mediante herramientas predictivas más que en la reacción directa.

En cuanto al análisis comparativo entre el IRIEE modificado y el índice IRIA usado por el AIJS actualmente (Figura 5), destaca la mejora con respecto a esta como herramienta diagnóstica, al permitir descomponer el riesgo en sus componentes conductuales. El nuevo índice muestra diferencias significativas en la clasificación de riesgo de las especies focales (Tabla 19).

Figura 5

Comparación del ranking de riesgo entre el índice IRIA y el IRIEE modificado para las cuatro especies focales.

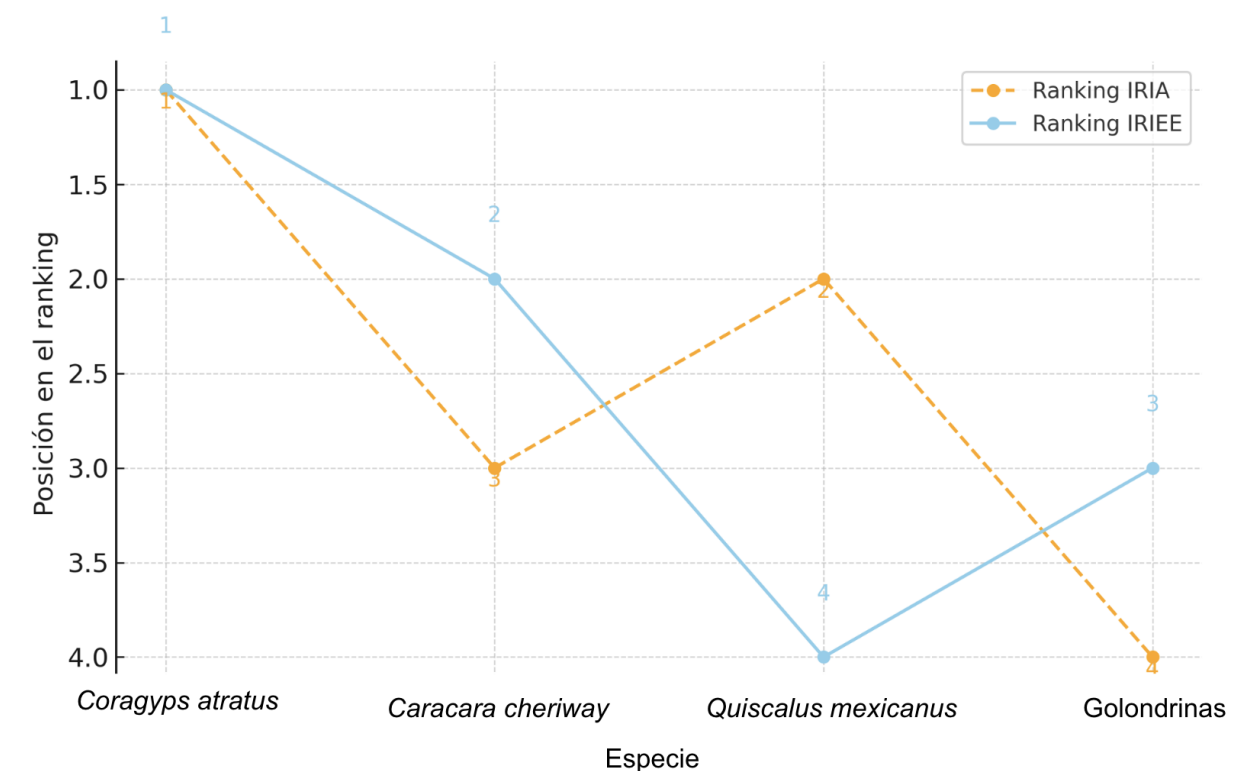


Tabla 19

Diferencias en la posición del ranking de riesgo entre el índice IRIA y el IRIEE modificado para cada especie focal.

Especie	Diferencia
<i>Coragyps atratus</i>	=
<i>Caracara cheriway</i>	+1
<i>Quiscalus mexicanus</i>	-2
Golondrinas	+1

De cualquier forma, los rankings de riesgo no son universales, sino que están mediados por el comportamiento específico de las poblaciones locales y las características del entorno aeroportuario. Por ello, es importante valorar y analizar los diferentes índices de evaluación de riesgo más usados en otros aeropuertos, para validar y contextualizar nuevas propuestas como el IRIEE modificado. Un estudio comparativo de diferentes aeropuertos, de Gutiérrez-Serralde et al. (2023), demuestra que tanto el índice HRA (Heuristic Risk Assessment- Evaluación Heurística de Riesgo), propuesto por Allan (2006), el R Index, propuesto por Carter (2001) y el BRI2 (Bird Strike Risk Index 2- Índice de Riesgo de Impacto de Aves 2), propuesto por Soldatini et al. (2011), presentan diferentes resultados, incluso para los mismos datos en el mismo aeropuerto.

Finalmente, se identificaron limitaciones metodológicas asociadas a la disponibilidad y calidad de los datos conductuales. La falta de registros sistemáticos sobre maniobras evasivas, agilidad o respuesta ante estímulos visuales y auditivos, reduce la sensibilidad del modelo para discriminar entre especies con comportamientos similares pero niveles de riesgo distintos. Además, la dependencia de fuentes secundarias y la disparidad en los métodos de observación entre actores introducen sesgos que pueden afectar la ponderación de algunos indicadores.

Otro limitante identificado fue la subjetividad inherente del juicio de los expertos, que podría afectar los pesos relativos si se replicara el estudio con otro panel de especialistas. Sin embargo, el Índice de Consistencia de 0.08 obtenido sugiere que las comparaciones fueron lógicas y coherentes. Para futuras aplicaciones, se recomienda ampliar el número de expertos y realizar análisis de sensibilidad para verificar la estabilidad de los resultados.

El IRIEE modificado muestra un alto potencial de aplicación regional, especialmente en aeropuertos ubicados en zonas tropicales con condiciones ecológicas y operativas similares al AIJS. Su estructura flexible permite ajustar los pesos de las variables según la composición faunística y las particularidades ambientales de cada sitio, lo que lo convierte en una herramienta transferible y adaptable para la gestión del riesgo de fauna. La validación de este índice en otros aeropuertos costarricenses, como Daniel Oduber o Limón, permitiría comparar patrones ecológicos y conductuales de las especies de mayor riesgo, contribuyendo al desarrollo de un

marco nacional de evaluación del riesgo aviario basado en evidencia científica, adaptabilidad ecológica y sostenibilidad operativa.

CONCLUSIONES

La aplicación del Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) modificado demuestra ser significativamente más efectivo que el método IRIA previamente utilizado en el AIJS. La incorporación del proceso analítico jerárquico (AHP) para ponderar diez variables críticas permite una evaluación más objetiva y comprehensiva del riesgo, integrando por primera vez criterios etológicos, como la agilidad de vuelo y respuesta al hostigamiento. La consistencia entre las puntuaciones del modelo (5.8, 5.3, 4.9 y 4.6) y los registros históricos de impactos (2019-2024) valida su confiabilidad predictiva para la gestión de riesgo aviario en sitios particulares.

El estudio establece una clara gradación del riesgo operacional entre las especies focales: *Coragyps atratus* (5.8 - riesgo muy alto), *Caracara cheriway* (5.3 - riesgo alto), golondrinas *Hirundinidae* (4.9 - riesgo medio) y *Quiscalus mexicanus* (4.6 - riesgo medio-alto). Esta clasificación refleja la capacidad del modelo para discriminar entre perfiles ecológicos y conductuales distintos, identificando a *Coragyps atratus* como la especie de mayor preocupación debido a su combinación de masa corporal, presencia permanente y limitada respuesta a medidas de dispersión.

En cuanto a los pesos relativos de las variables, realizados a través del método de jerarquización AHP, la masa corporal (PR=0.219), la altura de vuelo (PR=0.135) y la respuesta al hostigamiento (PR=0.122) emergen como las más influyentes en la determinación del riesgo. El análisis revela patrones sinérgicos donde la combinación de múltiples factores que generan un riesgo multiplicativo que excede la suma simple de variables individuales, explicando sus posiciones en el ranking.

El modelo demuestra tener una estructura flexible lo que permite su adaptación a diferentes contextos aeroportuarios tropicales, posicionándolo como una herramienta transferible para aeropuertos centroamericanos con condiciones ecológicas similares. Las limitaciones identificadas, particularmente en la calidad de datos conductuales, señalan áreas de mejora para futuras aplicaciones sin comprometer la utilidad práctica del índice.

Su implementación y estandarización permitiría establecer un marco nacional coherente para la gestión de fauna aeroportuaria. De esta manera, se podrían optimizar recursos y fortalecer la seguridad operacional en balance con la conservación de la biodiversidad.

RECOMENDACIONES

Los resultados evidencian la necesidad de replantear las estrategias de manejo de fauna en el aeropuerto hacia un modelo que contemple nuevos criterios de riesgo, una metodología colaborativa y un enfoque predictivo. Se propone una implementación escalonada en dos fases temporales.

A corto plazo, se recomienda institucionalizar el IRIEE como herramienta de referencia en la gestión del riesgo, mediante la estandarización y enriquecimiento de la toma de datos. Esto incluye la creación de protocolos etológicos sistematizados, que registren variables como agilidad de vuelo, respuesta al hostigamiento y organización social (formación de bandadas), garantizando su uso por técnicos, operadores y pilotos. Asimismo, se debe ampliar el número de expertos en la aplicación del método AHP, realizar análisis de sensibilidad y fomentar la recolección colaborativa de datos a través de plataformas como eBird, lo cual permitirá construir perfiles de riesgo dinámicos y fortalecer la base científica del índice.

A mediano plazo, se recomienda evolucionar hacia una gestión más tecnológica e integrada, implementando sistemas de radar aviar para anticipar la presencia de aves en aerovías y ajustar operaciones (Nilsson et al., 2021). Desde un enfoque ecosistémico, donde deben de continuar priorizándose acciones de prevención de atracción trófica y estructural, mediante la fiscalización del manejo de residuos y la restauración ecológica de los bordes aeroportuarios con especies vegetales menos atractivas para la avifauna oportunista.

Como complemento, se sugiere el uso de telemetría GPS en especies prioritarias (*C. atratus* y *C. cheriway*) para identificar fuentes externas de alimento, vertederos ilegales o focos de atracción no regulados. Estos datos pueden funcionar como un sistema de alerta temprana ambiental, más eficiente que otros métodos tradicionales. El seguimiento GPS presenta importantes ventajas en comparación con otras metodologías utilizadas para detectar vertidos ilegales (Navarro et al., 2016).

Finalmente, en alineación con todas las conclusiones, se insta a fortalecer las alianzas interinstitucionales entre la administración aeroportuaria, universidades y autoridades ambientales, con el fin de institucionalizar un programa permanente de investigación aplicada sobre ecología y conducta de aves en entornos aeroportuarios. La integración entre conocimiento científico, monitoreo adaptativo y participación social constituye el pilar para una gestión de fauna coherente con la seguridad operacional y la conservación de la biodiversidad (ICAO, 2012; Dolbeer et al., 2023).

REFERENCIAS

- AERIS Holding. (2024). *Protocolo de reubicación de especies Aeropuerto Internacional Juan Santamaría* (Código: 0068) [Documento interno].
- AERIS Holding. (2023). *Manual de operaciones de aeropuerto programa de gestión de la seguridad operacional* (Vol. 13, Versión 10). <https://www.aeris.cr/wp-content/uploads/2025/01/MPO-Vol-13-Sistema-de-Gestion-de-la-Seguridad-Operacional.pdf>
- Aerocivil. (2019). *Guía para la gestión del riesgo por fauna en los aeródromos colombianos*. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil de Colombia. <https://www.aerocivil.gov.co>
- Allan, J. A. (2006). Heuristic risk assessment technique for birdstrike management at airports. *Risk Analysis*, 26(3), 723–729. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00773.x>
- Altringer, L., Begier, M. J., Washburn, J. E., & Shwiff, S. A. (2024). Estimating the impact of airport wildlife hazards management on realized wildlife strike risk. *Scientific Reports*, 14, 10233. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79946-3>
- Australian Airports Association. (2016). *Wildlife hazard management at airports* (Airport Practice Note 9). <https://airports.asn.au/wp-content/uploads/2022/11/Airport-Practice-Note-9-Wildlife-Hazard-Management-at-Airports.pdf>
- Ballerini, M., Cabibbo, N., Candelier, R., Cavagna, A., Cisbani, E., Giardina, I., ... Zdravkovic, V. (2008). Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(4), 1232–1237. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711437105>
- Banco Mundial. (2019). *Pasajeros transportados por vía aérea*. <https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR>
- Beauchamp, G., & Krams, I. (2023). *Flock size increases with the diversity and abundance of local predators in an avian family*. *Oecologia*, 202(3), 629–637. <https://doi.org/10.1007/s00442-023-05423-9>
- Blackwell, B. F., & Fernández-Juricic, E. (2013). *Behavior and physiology in the development and application of visual deterrents at airports*. En T. L. DeVault, B. F. Blackwell, & J.

- L. Belant (Eds.), *Wildlife in airport environments: Preventing animal-aircraft collisions through science-based management* (pp. 11–22). Johns Hopkins University Press.
- Carter, N. B. (2001). *All birds are not created equal: Risk assessment and prioritization of wildlife hazards at airfields* [Conferencia]. Bird Strike Committee-USA/Canada, Third Joint Annual Meeting, Calgary, AB, Canada.
<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=birdstrike2001>
- Civil Aviation Authority. (2002). *Aerodrome bird control* (Report Prepared by the Safety Regulation Group). <https://www.caa.co.uk/publication/download/12316>
- Culla Belmonte, G. (2019). *Estudio comparativo de índices de riesgo de impacto por fauna en aeropuertos* [Trabajo de fin de grado, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/f4259830-8a22-4d7b-a171-8b2d89876a3a/content>
- DeVault, T. L., Belant, J. L., Blackwell, B. F., & Seamans, T. W. (2011). Interspecific variation in wildlife hazards to aircraft: Implications for airport wildlife management. *Wildlife Society Bulletin*, 35(4), 394–402. <https://doi.org/10.1002/wsb.75>
- DeVault, T. L., Blackwell, B. F., Seamans, T. W., Begier, M. J., Kougher, J. D., Washburn, J. E., Miller, P. R., & Dolbeer, R. A. (2018). Estimating interspecific economic risk of bird strikes with aircraft. *Wildlife Society Bulletin*, 42(1), 94–101.
<https://doi.org/10.1002/wsb.859>
- DeVault, T. L., Blackwell, B. F., Seamans, T. W., Lima, S. L., & Fernández-Juricic, E. (2015). Speed kills: Ineffective escape responses by wildlife to approaching vehicles. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1801), 20142188.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2188>
- DeVault, T. L., Begier, M. J., Miller, P. R., Weller, J. R., & Anderson, A. L. (2023). *Wildlife strikes to civil aircraft in the United States, 1990-2022* [Base de datos]. Federal Aviation Administration.
https://www.faa.gov/airports/airport_safety/wildlife/wildlife_strikes_civil_aircraft_united_states_1990_2022
- Dolbeer, Richard & Wright, S. & Weller, J. & Anderson, A. & Beiger, M.. (2015). Wildlife strikes to civil aircraft in the United States, 1990-2014.. 10.13140/RG.2.1.2370.6649.

- https://www.researchgate.net/publication/291353952_Wildlife_strikes_to_civil_aircraft_in_the_United_States_1990-2014#fullTextFileContent
- Dolbeer, R. A., & Wright, S. E. (2009). Safety management systems: How useful will the FAA Wildlife Strike Database be? *Human–Wildlife Conflicts*, 3(2), 167–178.
<https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1265&context=hwi>
- Dolbeer, R. A., Wright, S. E., & Cleary, E. C. (2000). Ranking the hazard level of wildlife species to aviation. *Wildlife Society Bulletin*, 28(2), 372–378.
<https://www.jstor.org/stable/3784863>
- Durán Márquez, H. E. (2025). Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) de las aves en aeropuertos de Colombia. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 46–58.
<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.815>
- Escobar-Pérez, J., y Cuervo-Martínez, A. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en Medición*, 6(1), 27–36.
http://www.humanas.unal.edu.co/psicometria/files/7113/8574/5708/Articulo3_Juicio_de_expertos_27-36.pdf
- Federal Aviation Administration. (2025). *Wildlife hazard mitigation*.
https://www.faa.gov/airports/airport_safety/wildlife
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10(3), 469–487. <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>
- Gutiérrez-Serralde, S. M., Soldatini, C., Albores-Barajas, V., Rosas-Hernández, M. P., De la Cueva, H., & Rangel-Barón, P. (2023). Comparing Bird Strike Risk Assessment Methods: A New Perspective for Safety Management. *European Journal of Wildlife Research*, 69(3), 57. <https://doi.org/10.1007/s10344-023-01683-1>
- Hively, D. (2011). *Biological modeling in data poor scenarios* [Tesis de maestría, University of California, Santa Cruz]. eScholarship.
<https://users.soe.ucsc.edu/~msmangel/Hively%20MS.pdf>
- Hong, M.-J., Kim, M.-S., Moon, Y.-M., Choi, J.-H., Lee, W.-S., & Yoo, J.-C. (2019). A Comparison of Single and Multi-Matrix Models for Bird Strike Risk Assessment. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 33(6), 624–635.
<https://doi.org/10.13047/KJEE.2019.33.6.624>

- Hu, Y., Xing, P., Yang, F., Feng, G., Yang, G., & Zhang, Z. (2020). A birdstrike risk assessment model and its application at Ordos Airport, China. *Scientific Reports*, 10, 19627. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76275-z>
- Husby, A., & Husby, M. (2014). Interspecific analysis of vehicle avoidance behavior in birds. *Behavioral Ecology*, 25(3), 504–508. <https://doi.org/10.1093/beheco/aru014>
- Igbani, F. (2022). Formula for relative abundance of one species [Publicación en foro en línea]. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/post/Formula-for-relative-abundance-of-one-species>
- Instituto Costarricense de Turismo. (2024). Informe de resultados del turismo receptor 2023. <https://www.ict.go.cr/es/documentos-institucionales/estadisticas.html>
- International Civil Aviation Organization. (2012). *Tercer Taller/Seminario para la evaluación del riesgo antes de la implantación de la Versión 02 de la Red de Rutas ATS de la Región SAM – Fase 3*. https://www.icao.int/SAM/Documents/SAMIG10/PPT%20MOD04_conceptos%20basicos.pdf
- International Civil Aviation Organization. (2013). *Safety Management Manual (SMM)* (Doc 9859, 3rd ed.). https://nbaa.org/wp-content/uploads/2017/12/Doc.9859.3rd-Edition.alltext.en_.pdf
- Kluever, B. M., Pfeiffer, M. B., Barras, S. C., Dunlap, B. G., & Humberg, L. A. (2020). Black vulture conflict and management in the United States: Damage trends, management overview, and research needs. *Human–Wildlife Interactions*, 14(3), 10. <https://doi.org/10.26077/190v-5a56>
- López-Lago, M., Casado, R., & Serna, J. (2017). A predictive model for risk assessment on imminent bird strikes on airport areas. *Aerospace Science and Technology*, 62, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.11.020>
- MacKinnon, B. (2004). *Sharing the skies: An aviation industry guide to the management of wildlife hazards* (TP 13549). Transport Canada. <https://tc.canada.ca/en/aviation/publications/sharing-skies-guide-management-wildlife-hazards-tp-13549>

- Matyjasiak, P. (2008). *Métodos de control de aves en aeropuertos*. Editorial Universidad Cardinal Stefan Wyszyński.
https://www.researchgate.net/publication/233389769_Methods_of_bird_control_at_airports
- Molina, R. (2013). Caracterización de la avifauna del extrarradio de la Ciudad de Alajuela. *Zeledonia*, 16(2), 34-47. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7512780>
- Morrison, J. L., & Saggese, M. D. (2025). Assessing knowledge of the Caracaras: Compiling information, identifying knowledge gaps, and recommendations for future research. *Journal of Raptor Research*, 58(2), 141–152. <https://doi.org/10.3356/JRR-23-39>
- Navarro, J., Grémillet, D., Afán, I., Ramírez, F., Bouten, W., & Forero, M. G. (2016). *Feathered detectives: Real-time GPS tracking of scavenging gulls pinpoints illegal waste dumping*. PLOS ONE, 11(7), Article e0159974. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159974>
- Newton, I. (2008). *The migration ecology of birds*. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-517367-4.X5001-5>
- Nilsson, C., La Sorte, F. A., Dokter, A., Horton, K., Van Doren, B. M., Kolodzinski, J. J., Shamoun-Baranes, J., & Farnsworth, A. (2021). Bird impacts at commercial airports explained by citizen science and weather radar data. *Journal of Applied Ecology*, 58(10), 2029–2039. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13971>
- Pfeiffer, M. B., Blackwell, B. F., & DeVault, T. L. (2018). Quantifying avian risk at a military airfield: A wildlife management case study. *PLOS ONE*, 13(12), Article e0206599. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206599>
- Portela, D., & Weber, M. (2023). Systematic review and meta-analysis of bird management techniques used in aerodromes. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2907938/v1>
- Pujiula, D. J. (1925). *Nota sobre la irreductibilidad de la biología a las matemáticas*. Institució Catalana d'Història Natural, 5, 97–103.
<https://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000134/00000020.pdf>
- Ramírez González, P. (2019). *Programa de Control de Fauna Aeris-CCR* [Presentación]. Universidad Latina de Costa Rica.

- Rivera Acevedo, J. M., y Agüero Valverde, J. (2020). Compatibilidad del ruido aeronáutico y zonificación del uso de suelo alrededor del aeropuerto Juan Santamaría, Costa Rica. *Revista de Ingeniería*, 30(1), 7-20. <https://doi.org/10.15517/RI.V30I1.37436>
- Saaty, T. L. (2008). *Decision making with the Analytic Hierarchy Process*. International Journal of Services Sciences, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Schafer, L. M., Blackwell, B. F., & Linnell, M. A. (2007). *Quantifying risk associated with potential bird–aircraft collisions* [Conferencia]. 2007 International Conference on Ecology and Transportation, Raleigh, NC, Estados Unidos. <https://escholarship.org/content/qt8x3078s3/qt8x3078s3.pdf?v=lg>
- Secretaría Técnica del Plan Nacional de Desarrollo Urbano 2013-2030. (2013). *Cartografía/Zonas_Control_Especial/Conos_Aproximacion_Aeropuertos.pdf*. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. <https://www.mivah.go.cr/Documentos/PlanGAM2013/03>
- SKYbrary Aviation Safety. (2020). *Aircraft certification for bird strike risk*. <https://skybrary.aero/articles/aircraft-certification-bird-strike-risk>
- Soldatini, C., Albores-Barajas, Y., Lovato, T., Andreon, A., Torricelli, P., Montemaggiori, A., Corsa, C., & Georgalas, V. (2011). Wildlife Strike Risk Assessment in Several Italian Airports: Lessons from BRI and a New Methodology Implementation. *PLOS ONE*, 6(12), Article e28920. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028920>
- Soldatini, C., Georgalas, V., Torricelli, P., & Albores-Barajas, Y. V. (2009). An ecological approach to birdstrike risk analysis. *European Journal of Wildlife Research*, 56(4), 623–632. <https://doi.org/10.1007/s10344-009-0357-1>
- Zakrajsek, E. J., & Bissonette, J. A. (2005). Ranking the risk of wildlife species hazardous to military aircraft. *Wildlife Society Bulletin*, 33(1), 258–264. <https://www.jstor.org/stable/3784863>