

Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) de las aves en aeropuertos de Colombia

| Fecha de recibido: 27 de mayo de 2024 | Fecha de aprobado: 04 de agosto de 2024 |

| Reception date: May 27, 2024 | Approval date: August 04, 2024 |

| Data de recebimento: 27 de maio de 2024 | Data de aprovação: 04 de agosto de 2024 |

Holman Enrique Durán Márquez

<https://orcid.org/0000-0002-7681-7821>

hduran.bio.ua@gmail.com

Universidad del Atlántico

Investigador independiente, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

University of the Atlantic

Independent researcher, Colombia

Researcher's role: theorist and writer

Universidade do Atlântico

Investigador independente, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escritor

Cómo citar este artículo: 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>



Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) de las aves en aeropuertos de Colombia

Resumen: La mayoría de los impactos entre aeronaves y fauna ocurre con aves, pero algunas especies son más propensas que otras a involucrarse en impactos; por lo tanto, es necesario identificar el nivel de riesgo inherente que representa cada especie de ave, es decir: el riesgo especie-específico. Para esto, se propone el Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) como una herramienta cuantitativa y estandarizada que consta de una multimatriz de ocho variables, con tres estados de variable cada una. También, se sugiere un método pre-existente para obtener el peso relativo o aporte de cada variable al riesgo total, y se discuten las virtudes y limitaciones de cada variable, así como del método en general. El IRIEE pretende ser una herramienta de evaluación objetiva y práctica para la implementación regular a la mayoría de aeropuertos de Colombia, y está diseñada como un método de fácil interpretación y diligenciamiento que solo requiere información asequible desde las observaciones en campo.

Palabras clave: control de fauna silvestre; evaluación del riesgo; peligro aviario; riesgo especie-específico; seguridad aérea.

Species-Specific Impact Risk Index (SSIRI) of birds in Colombian airports

Abstract: Most wildlife-aircraft collisions involve birds, but some species are more prone than others to being involved in such incidents; therefore, it is necessary to identify the level of risk inherent to each bird species, that is, species-specific risk. To address this, the Species-Specific Impact Risk Index (SSIRI) is proposed as a quantitative and standardized tool consisting of an eight-variable multi-matrix, with each variable having three states. Additionally, a pre-existing method is suggested to obtain the relative weight or contribution of each variable to the total risk, and the strengths and limitations of each variable, as well as the method in general, are discussed. The SSIRI aims to be an objective and practical assessment tool for regular implementation at most airports in Colombia, and is designed as an easily interpretable and manageable method that only requires accessible information from field observations.

Keywords: Wildlife control; risk assessment; bird hazard; species-specific risk; aviation safety.

Índice de Risco de Impacto Específico (IRIEE) de aves em aeroportos da Colômbia

Resumo: A maioria dos impactos entre aeronaves e fauna envolve aves, mas algumas espécies são mais propensas do que outras a se envolver em tais incidentes; portanto, é necessário identificar o nível de risco inerente a cada espécie de ave, ou seja, o risco específico da espécie. Para isso, propõe-se o Índice de Risco de Impacto Específico (IRIEE) como uma ferramenta quantitativa e padronizada que consiste em uma multimatriz de oito variáveis, com três estados de variável cada uma. Além disso, sugere-se um método pré-existente para obter o peso relativo ou a contribuição de cada variável para o risco total, e são discutidas as virtudes e limitações de cada variável, bem como do método em geral. O IRIEE pretende ser uma ferramenta de avaliação objetiva e prática para implementação regular na maioria dos aeroportos da Colômbia, e é projetado como um método de fácil interpretação e preenchimento que só requer informações acessíveis a partir das observações de campo.

Palavras-chave: Controle de fauna selvagem; avaliação de risco; perigo aviário; risco específico da espécie; segurança aérea.

Introducción

Los choques entre aeronaves y representantes de la fauna es un problema creciente para la industria de la aviación que ha causado la muerte de 464 seres humanos y destruido más de 305 aviones entre 1988 y 2022 en todo el mundo. Esta problemática es fomentada por el aumento de las poblaciones de aves grandes, el aumento del tráfico aéreo y el desarrollo de aviones más silenciosos (Dolbeer *et al.*, 2023).

El 96 % de los impactos entre aeronaves y fauna ocurre con aves (Dolbeer *et al.*, 2023). Pero cada especie de ave es biológica, etológica y ecológicamente diferente, lo que explica por qué algunas son más propensas a involucrarse en impactos que otras. Por eso, es necesario identificar el nivel de riesgo inherente de cada especie de ave, es decir: el riesgo especie-específico, para así poder priorizar los esfuerzos de gestión en las especies que representen mayor riesgo de manera particularizada y eficiente, porque de otra forma sería ineficaz pretender abordar a todas las especies de aves con estrategias generalistas que no funcionan por igual para todas las aves.

La evaluación del riesgo de impacto que representa la fauna para las aeronaves es un tema emergente en la investigación, el cual se ha abordado desde ángulos como: el riesgo de impacto general del aeropuerto (Ning y Chen 2014; Anagnostopoulos, 2003); los riesgos económicos y operativos (DeVault *et al.*, 2018; Fernández-Juricic *et al.*, 2018; Allan, 2006; Zakrajsek y Bissonette 2005; Dolbeer *et al.*, 2000); el riesgo por fauna asociado a los usos del suelo fuera del aeropuerto (Metz *et al.*, 2021a y 2021b; Shao *et al.*, 2020a y 2020b; Coccon *et al.*, 2015; Geringer *et al.*, 2016); y particularmente el riesgo especie-específico (Soldatini *et al.*, 2010 y 2011; Holbech *et al.*, 2015; Barrientos *et al.*, 2016; Marateo *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2019; Fu *et al.*, 2023).

No obstante, estos últimos autores evidencian la utilización de diferentes métodos para obtener su valoración de riesgo. Unos con muchas variables cualitativas que inducen a la subjetividad de la evaluación y otros con diseños muy específicos para la

avifauna de otras latitudes; algunos con el establecimiento y uso arbitrario de algunas variables, y otros con el uso de matemáticas complejas que limitan la practicidad de los índices para su implementación regular en aeropuertos. Todo esto produce índices de poca aceptación universal, lo que revela la necesidad de un método estándar de amplia aceptación para el cálculo del riesgo especie-específico (Gutiérrez-Serralde *et al.*, 2023).

Para complicar el escenario, existe la idea generalizada de que el indicador ideal del riesgo especie-específico debe ser el índice de impactos y el índice de impactos con daños (Alhumaidi *et al.*, 2023). Pero esto, aunque parece razonable, tiene serias limitaciones porque las evaluaciones de riesgo basadas solamente en el historial de impactos no pueden seguirles el ritmo a los cambios rápidos de la abundancia y distribución de las especies. Por ejemplo, si aparece un nuevo atrayente de aves, le tomará bastante tiempo al indicador para actualizarse, lo cual finalmente retrasaría las alertas y los esfuerzos de mitigación; sin mencionar la poca disponibilidad de registros de impacto que sufren muchos aeropuertos.

Por eso, el objetivo de la presente reflexión es reformular una metodología para la evaluación del riesgo de impacto de las aves en aeropuertos de Colombia, mediante la utilización de variables cuantitativas que se retroalimentan constantemente de información de campo asequible y actualizada para acercarse a un indicador más objetivo, práctico y estándar.

Desarrollo del Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE)

Para evaluar el riesgo de impacto con aeronaves que representa cada especie de ave en el aeropuerto, se propone el IRIEE, que será desarrollado en cuatro secciones en el siguiente orden lógico: variables, variables adicionales sugeridas por Carter (2001), método de jerarquías analíticas (AHP) y matriz de riesgo.

Variables

Las variables seleccionadas no son novedosas, ya que se han planteado antes en otros trabajos. Pero sí se pretende es redefinirlas con un carácter más cuantitativo en el marco de una matriz más exacta tal como se presentó arriba. Así pues, las variables propuestas se basaron principalmente en las sugerencias de Carter (2001) y los estados de las variables son modificaciones de lo propuesto en la “matriz de peligrosidad de la avifauna” de la Aerocivil (2016). A continuación, se desarrollan ocho variables y también se presentan dos potenciales variables adicionales.

Horario: Horario de actividad. De manera generalizada, la mayoría de aeropuertos del mundo son más activos durante el día, pero la mayoría de las especies de aves tropicales (como las que viven en Colombia) son diurnas. En este sentido, Blackwell y Fernández-Juricic (2013) sugieren que las aves nocturnas o crepusculares tienden a evitar las luces de las aeronaves que se acercan, antes que aturdirse y congelarse como hacen los mamíferos. Todo esto explica por qué el 78 % de los impactos en el mundo ocurren durante el día (Dolbeer *et al.*, 2023; MacKinnon, 2004). Entonces, es razonable asumir que las aves estrictamente diurnas tienen mayor probabilidad de impactar que las aves estrictamente nocturnas, y a su vez las aves activas tanto de día como de noche tienen mayor probabilidad de impactar que aquellas dos, por cuanto acumulan sus probabilidades.

Ahora bien, para evitar el sesgo por la mezcla de especies en la transición día/noche noche/día (como, por ejemplo, las aves diurnas que se desplazan rezagadamente en busca de sus sitios de pernocta a última hora o las aves nocturnas que empiezan sus actividades muy temprano en el crepúsculo vespertino o viceversa para el caso de las primeras horas de la mañana), no se considerará para esta variable como diurno ni como nocturno los eventos de observación ocurridos entre las 18:00 y las 19:00 horas y entre las 05:00 y las 06:00 horas; sino que se considerará como estrictamente nocturno los eventos entre las 19:05 y las 04:55, y como estrictamente diurno los eventos entre las 06:05 y las 17:55.

Ventajas: La variable requiere información fácil de adquirir desde los monitoreos regulares de aves, pero incluso si no es posible monitorear en horas nocturnas por las restricciones logísticas propias de cada aeropuerto, se puede recurrir alternativamente a la información secundaria sobre los hábitos diurnos/nocturnos (d/n) de las especies de aves, con un nivel de confiabilidad bastante aceptable.

Desventajas: La variable atribuye la probabilidad de coincidencia entre aves y aeronaves solo al comportamiento d/n de las aves, ya que da por sentado que el aeropuerto es más activo durante el día, pero no considera el momento real de mayor tráfico aéreo del aeropuerto. Por ejemplo, si un aeropuerto es más activo en la noche, entonces el sentido de la variable se invierte, o si es igualmente activo de día y de noche entonces las especies diurnas y nocturnas tendrán la misma probabilidad de impacto y se cancela la variable. Sin embargo, es necesario omitir esto para poder aplicar la variable a todos los aeropuertos.

Abundancia: Abundancia relativa. La abundancia absoluta es el número de individuos de cada especie, mientras que la abundancia relativa es el porcentaje que aporta cada especie a la abundancia total de todas las especies. Entonces, dicha variable se presenta en función de la abundancia relativa, con estados de variables ajustados desde la propuesta de Marateo *et al.* (2011). La variable asume que: si un ave puede chocar con una aeronave, entonces un mayor número de aves tiene mayor probabilidad de chocar.

Ventajas: La abundancia relativa es más útil que la abundancia absoluta para comparar entre distintos periodos de evaluación e incluso entre aeropuertos con diferencias en la estructura de su comunidad de aves. Además, los parámetros auxiliares de promedio y desviación estándar contribuyen a minimizar el contraste entre los estados de variable, porque evita el uso de límites de la abundancia relativa como, por ejemplo, 20, 50 o 70 %, que pueden ser muy difíciles de alcanzar para las especies, lo cual podría sesgar la variable. Por último, estos parámetros son muy fáciles de calcular incluso en línea.

Desventajas: Es posible que estos artificios no siempre reflejen de manera exacta los cambios reales de la abundancia, y, por tanto, la probabilidad de impacto.

Bandada: Tamaño de la bandada. Los estados de variable obedecen a la clasificación de El-Sayed (2019) y de la Civil Aviation Authority (CAA, 2002), en la cual se establecen diez individuos como el límite entre bandadas medianas y grandes. En particular, este último estudio encontró una relación de impactos del 8 % para aves solitarias, 14 % para bandadas pequeñas (2-10) y 40 % para bandadas grandes (>10). El supuesto de la variable es que: si un ave causa daños al impactar con una aeronave, entonces el impacto de muchas aves causará mayores daños; esto se debe a que la energía cinética se acumula en un impacto múltiple, por eso esta variable es abordada como una de severidad y no de probabilidad

Ventajas: La variable presenta estados de variables más objetivos, porque son definidos por el número de los eventos de observación; además, para el observador de campo es más fácil e intuitivo identificar grupos de dos a diez o más de diez individuos.

Desventajas: Existe un problema de acumulación de gravedad que no se expresa en la variable, porque valora por igual a cualquier bandada mayor de diez individuos. Por ejemplo: bandadas de once, cincuenta o cien individuos, etc., a pesar de que estas son más graves según el supuesto planteado.

Movilidad: Interceptación o uso de las aerovías.

Esta variable se limita a valorar solo los movimientos de las aves que interceptan las aerovías y descarta todos los demás movimientos, dirección o usos que las aves puedan hacer de otras partes del aeródromo, por cuanto son poco relevantes para el riesgo de impacto. En este sentido, considérese que: “una aerovía es el área de control o parte de ella dispuesta en forma de corredor y equipada con radio ayudas para la navegación” (Aerocivil, 2019); en otras palabras: es la pista y las trayectorias de vuelo, que en este caso puntual se limita a lo primero, y debe entenderse como el corredor que usan las aeronaves dentro del aeropuerto para el

aterrizaje y despegue desde el nivel del suelo hasta 500 ft AGL (límite vertical para “dentro del aeropuerto”).

Ahora bien, para que ocurra un impacto en el aeropuerto, las aves deben coincidir en el espacio y en el tiempo con aeronaves a alta velocidad, y si el espacio regular de alta velocidad que usan las aeronaves son las aerovías (trayectorias y pista), entonces es razonable evaluar solo el uso que las aves hacen de las aerovías y descartar otros espacios del aeropuerto donde no ocurren las aeronaves o donde ocurren pero a velocidades tan bajas que es fácil para las aves evitar la colisión, tal como las zonas de seguridad, el terminal, las calles de rodaje, la plataforma, etc. Por lo tanto, esta variable asume que los impactos en el aeropuerto solo ocurren cuando las aves cruzan la pista.

Ventajas: La variable no descarta a las especies que no cruzan la pista (0 % de los eventos de observación), sino que las incluye en su estimación y les asigna, por prevención, un nivel de riesgo bajo para destacar así a las especies que sí lo hacen, lo cual permite formular tres estados de variable más simples y prácticos. El supuesto planteado aplica para la mayoría de aeropuertos, ya que las aeronaves de ala fija son más utilizadas que las de ala rotatoria.

Desventajas: La variable no considera el uso diferente que hacen las aeronaves de ala rotatoria o situaciones específicas con aeronaves de ala fija, para lo cual no aplica completamente el supuesto planteado. Por ejemplo, no contempla los impactos que pueden ocurrir con un helicóptero (ala rotatoria) en la plataforma, o incluso los que pueden ocurrir con aeronaves de ala fija en las calles de rodaje, que a pesar de moverse a bajas velocidades, sus aspas o hélices en rotación podrían impactar a un ave. Estos son solo algunos ejemplos que desafían el supuesto planteado.

Frecuencia: Frecuencia de aparición o presencia/ausencia.

Esta variable mide la distribución de la frecuencia de aparición de la especie en los eventos de observación; por tanto, es una medida de presencia/ausencia, que se presenta de manera organizada en tres estados de variable equitativos a la distribución de la aparición. Esta variable supone que la frecuencia de aparición es directamente proporcional a la

probabilidad de impacto; es decir que si una especie es muy frecuente en el aeropuerto, entonces tendrá más probabilidades de chocar con una aeronave

Ventajas: La variable puede indicar satisfactoriamente la probabilidad de impacto entre aves y aeronaves, porque contrasta implícitamente la presencia/ausencia de las aves con el número de operaciones aéreas del aeropuerto.

Desventajas: La variable no precisa el tiempo de permanencia efectivo de la especie en el evento de observación (que puede ser de 5, 8, 10 minutos, etc., según lo defina la metodología). Por lo tanto, puede valorar por igual como “presente” en el evento de observación tanto a un ave fugaz (por ejemplo, un carpintero que cruza el aeropuerto) como a un ave que permanece todo el tiempo del evento de observación (tal como un alcaraván en la zona de seguridad). Esto es un sesgo importante, ya que es evidente que un ave fugaz que solo transita por el aeropuerto está menos expuesta a las aeronaves que una que permanece más tiempo en el aeropuerto, y por eso sus probabilidades de impacto no pueden ser iguales.

Masa: Masa corporal. La masa es una propiedad intrínseca de los cuerpos y expresa la cantidad de materia en un cuerpo; su unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es el kilogramo y por eso no debe confundirse con el peso. Los estados de variable aquí propuestos son una adaptación de la clasificación de masa para las aves de MacKinnon (2004), que establece, entre otras cosas, que 1800 g es el valor mínimo para las aves grandes, lo cual es coherente con el hecho de que la mayoría de los motores de aviones se desarrollan para resistir impactos con aves de hasta 1,8 kg (European Aviation Safety Agency [EASA], 2010). Esta variable supone que cuanto mayor sea la masa corporal del ave, mayor será la gravedad del impacto, debido a la relación existente entre la masa, la velocidad y la energía cinética, lo cual maximiza los daños (Morgenroth, 2003; Godínez, 2006).

Ventajas: La variable presenta un estado de variable “grande” como mayor de 1,8 kg, lo cual puede representar mejor o ser más sensible a la presencia de las especies grandes de la avifauna colombiana,

que pueden sobrepasar fácilmente los 3 kg, tal como los pelícanos, los chavarríes, los grandes buitres, las cigüeñas, los grandes patos y los pavos de monte, entre otros.

Desventajas: La flota de aeronaves colombianas todavía conserva algunas aeronaves antiguas (especialmente en zonas apartadas del suroriente del país) que no están diseñadas para resistir impactos con aves grandes (1,8 kg), ni siquiera con aves de tamaño mediano; por lo tanto, el estado de variable “grande” podría sesgar la evaluación al sobreestimar las capacidades de la flota.

Altura: Altura de vuelo observada. La estadística de impactos más completa disponible hoy es la de Dolbeer *et al.* (2023), en la que se evidencia que hasta el 71 % de los impactos con aves ocurren en el estrato vertical de 0-500 ft AGL. En particular, el 40 % de todos los impactos se concentra al nivel del suelo (0 ft AGL). Esto último tiene mucho sentido al considerar que los aviones usan principalmente este nivel en el aeropuerto, y que las aves que se posan sobre la pista experimentan las fuerzas de la inercia estática que les ofrece resistencia al levantar el vuelo y evitar un impacto, mientras que las aves que ya están en vuelo (> 0 ft AGL) por el contrario sufren inercia dinámica que les favorece al huir de los impactos. Finalmente, en alturas superiores a 500 ft AGL los impactos se vuelven más escasos con tan solo el 29 %. Por eso, esta variable asume que la altura de vuelo de las aves es inversamente proporcional a la probabilidad de impacto; o lo que es igual: que las aves que vuelan más cerca del suelo tienen más probabilidades de impactar.

Como una recomendación práctica para evitar complicaciones relacionadas con la medición exacta de las aves en vuelo o la adquisición de equipos, se sugiere el uso de cualquier *app* de *smartphone* con altímetro que pueda medir la altura de estructuras fijas y altas como árboles, edificios u otra estructura de referencia, a fin de estimar por comparación la altitud de vuelo de las aves. Por último, si ocurriera el caso improbable de empate en el porcentaje de registro de los estratos verticales, se asignará el estado de variable de mayor riesgo conforme al principio de prevención.

Ventajas: Los estados de variable son cuantitativos y más fáciles de interpretar para los biólogos en campo, porque requiere familiarizarse con una sola altura de referencia (500 ft), en vez de dos o más, lo cual ofrece menos posibilidades de error por la sub o sobreestimación vertical.

Desventajas: La variable no discrimina respecto a la posición horizontal, sino que valora de la misma manera a cualquier ave en la misma escala vertical. Por ejemplo: a una especie que prefiere el suelo de las zonas de seguridad frente a una que también prefiere el suelo, pero de la pista, donde en efecto hay más probabilidad de impacto.

Nota reflexiva adicional: Esta variable formula sus estados de variable de manera excluyente, porque asume que las aves usan un único estrato vertical y no que transitan entre ellas; es decir que no contempla que las aves registradas en el estrato más alto (> 500 ft) implica la acumulación de la probabilidad de impacto (>70%), debido a que las aves que vuelan alto necesariamente empezaron en o cerca del nivel del suelo y transitaron verticalmente hasta alcanzar el estrato más alto. Así mismo, las aves registradas en el estrato medio (1-500 ft) pueden acumular el 70% de probabilidad de impacto, y las aves registradas en el suelo solo acumulan el 40%. En ese orden de ideas, sería razonable invertir la variable de manera que las aves que vuelan alto sean más riesgosas que las que vuelan bajo. Este es un tema que merece una revisión más detallada en futuros trabajos; sin embargo, por el momento se acoge la primera interpretación apelando a la practicidad y tradición de su utilización.

Impactos: Registros de impactos. Esta variable utiliza los incidentes de especies (confirmadas) con aeronaves en el aeropuerto de estudio. Es una variable binaria de impactos/no impactos; la opción de impactos se separa en dos estados de variable para que discrimine mejor y para que se ajuste al formato de la matriz. La variable supone que el historial de impactos de una especie es un buen predictor de futuros impactos.

Ventajas: La variable considera solo los incidentes ocurridos en el aeropuerto en cuestión, con lo que privilegia la particularidad de cada aeropuerto

(composición y estructura de la avifauna, clima, geografía, aeronavegación, dinámica social, etc.) antes que la generalización o extrapolación de impactos ocurridos en otros aeropuertos, donde las condiciones pueden ser muy diferentes. Por eso, se elimina el sesgo que implica la incorporación de información secundaria.

Desventajas: La variable es insensible a la acumulación del número de impactos, ya que valora por igual, por ejemplo, a una especie con tres impactos y a una con cincuenta impactos, aunque es evidente que esta última es más riesgosa. La variable no considera la antigüedad de los impactos, así que valora por igual a una especie con un impacto registrado hace varios años y a una con un impacto registrado recientemente, por ejemplo, en el periodo actual en el que se hace la evaluación, desconociendo los cambios temporales de las condiciones que favorecen los impactos. Esto, a propósito, sugiere que los impactos se deben clasificar también por antigüedad. Los aeropuertos sin registros, o con una base de datos de impactos muy limitada, podrían repercutir en un desempeño tendencioso o parcializado de la variable, ya que ese subregistro podría ocultar el riesgo de especies que han impactado, pero que no han sido registradas.

VARIABLES ADICIONALES SUGERIDAS POR CARTER (2001)

Las siguientes dos variables fueron planteadas por Carter (2001), pero no se incluyeron en la matriz para calcular el IRIEE porque no han sido desarrolladas, ya que requieren información previa no disponible o son metodológicamente muy difíciles de cuantificar.

Agilidad o comportamiento de vuelo. Esta es una variable relativa a la destreza o maniobrabilidad de una especie para cambiar de dirección, altura o velocidad de vuelo, lo cual supone una ventaja para evitar impactos con obstáculos como las aeronaves. 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. Pero para calcular la carga alar se necesita primero calcular la superficie alar, que a su vez requiere al menos tres medidas lineales: la envergadura de las alas (*wingspan*), la medida del ala tradicional (*WL*) y una nueva medida específica del ala (*S1*) para entonces calcular matemáticamente la superficie alar. Sin embargo, estas medidas no están disponibles en la literatura para cada especie, por lo cual sería necesario la captura de ejemplares de cada especie registrada en el aeropuerto (con los retos logísticos que ello implica), o el uso de ejemplares de museo. Esto último acarrea sus propios desafíos como, por ejemplo, la limitada disponibilidad de especímenes con alas extendidas o alas plegadas bien preparados con información sobre la envergadura de las alas, etc. (Fu *et al.*, 2023). Todo lo anterior dificulta el desarrollo de esta variable en la mayoría de los aeropuertos.

Debido a la complejidad del método anterior, la opción más factible disponible hoy es la de asignar valores generalizados de agilidad (con base en la experiencia observacional) a grupos emparentados de aves como familias o géneros, pero esto resultaría en una variable muy cualitativa y subjetiva como la que propone Hong *et al.* (2019), en la Tabla 1, que resulta bastante generalizado e impreciso.

Tabla 1.
Variables y estados de variable propuestos por Hong *et al.*, 2019

Flight behavior	Score
Rapid direct	1
Slow, meandering, erratic, hovering, maneuverable	2

Fuente: Hong *et al.* (2019).

Respuesta al hostigamiento. Variable relativa a la respuesta intrínseca de cada especie frente a las estrategias de dispersión y hostigamiento, lo cual supone que las especies más susceptibles representan menos riesgo que aquellas especies difíciles de erradicar. Para cuantificar esta variable, se requiere un diseño experimental estandarizado y detallado que evalúe la respuesta innata de cada especie al hostigamiento, lo cual representa un desafío adicional *per se*, con limitaciones para su aplicación en cualquier aeropuerto.

Método de jerarquías analíticas (AHP)

Las variables propuestas no pueden solo sumarse para obtener el valor de riesgo total, porque eso asume erróneamente que cada variable tiene la misma importancia relativa respecto a las demás, pero en la práctica eso no ocurre. Por ejemplo, un evaluador puede estimar que la abundancia de las aves es más importante que su altura de vuelo o que su historial de impactos, y esto a su vez puede ser diferente para otro evaluador desde su experiencia; por eso, queda en evidencia que las variables hacen todo menos un aporte homogéneo al riesgo total. En otras palabras, las variables tienen pesos relativos diferentes.

Para mitigar este sesgo de opinión, se debe determinar el peso relativo de cada variable mediante un mecanismo compensatorio de ponderación de criterios, como el que ofrece el método de jerarquías analíticas (Analytic Hierarchy Process o AHP) formulado por Saaty (2008 y 2010), y adoptando los ajustes sugeridos por Roa (2007). Este método es usado para cuantificar elementos cualitativos y así añadirles objetividad a aspectos de naturaleza subjetiva. Lo que este hace es apelar al criterio y la experiencia de expertos en un tema específico para compilar sus calificaciones, ponderarlas y finalmente obtener un criterio unificado, y así se corrige la subjetividad por la pluralidad de opiniones.

Lo anterior, en términos prácticos, es una encuesta estructurada matemáticamente, presentada a los biólogos de aeropuertos para recoger sus criterios de evaluación y someterlos a las ecuaciones del método de AHP de Saaty (Tabla 2); al mismo tiempo que deben elegir un número en la escala de valoración de Roa (Tabla 3) para cada variable según su propio criterio, luego la preferencia definitiva para cada variable será la más votada. Por último, cada variable tendrá un peso relativo representado por un número decimal menor que 1, de tal manera que la sumatoria de todos los pesos relativos debe ser igual a 1.

Para ilustrar mejor el punto, se presenta un formato de la AHP no diligenciado de tres variables (Tabla 2). Consiste en una matriz de filas y columnas dobles que coinciden en un cuadrante en el que los expertos consultados le deben asignar un valor relativo a cada

variable para comparar cada pareja y así seguir las ecuaciones contenidas en la matriz, de la cual finalmente se obtiene un peso relativo mejorado y consistente para cada variable.

Tabla 2.
Matriz del AHP simplificada con tres variables

(x) \ (j)	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Σx_j	$\Sigma x_j/n$	$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	$\Sigma(\Sigma x_j/n)\Sigma x_j/n$
Variable 1	1						
Variable 2		1					
Variable 3			1				
							1

Fuente: modificado a partir de Roa (2007).

Tabla 3.
Escala de valores para la ponderación de las variables

Importancia	Definición	Descripción
1	Igual Preferencia	Los dos criterios (x, j) contribuyen de igual manera a evaluar el riesgo de impacto
2	Moderada Preferencia	Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (x) sobre el (j)
3	Fuerte Preferencia	Prácticamente la dominación del criterio (x) sobre el (j) está demostrada
4	Absoluta Preferencia	Existe evidencia que determina la supremacía del criterio (x)

Fuente: modificado a partir de Roa (2007).

Matriz de riesgo

Se plantea una matriz de probabilidad/severidad, también conocida simplemente como matriz de riesgo, en la que ocho variables (horario, abundancia, bandada, frecuencia, movilidad, masa, altura e impactos) se han ordenado en las columnas de la matriz, mientras que a las filas se les asignaron tres opciones posibles para cada variable denominadas “estados de variable”. A estos estados de variable se les dieron valores numéricos que obedecen a una progresión geométrica de valor dos (2), es decir: 2, 4 y 8, el cual se multiplica por el peso relativo de la variable correspondiente y luego se suman todos los valores de la variable. Por último, para facilitar una interpretación práctica, los valores finales obtenidos se agrupan en tres rangos numéricos

que también corresponden a tres niveles de riesgo: alto, moderado y bajo.

Esto da como resultado una matriz multivariable grillada de 3x8 denominada IRIEE (Tabla 4), formulada matemáticamente como la suma del valor de los estados de variable (VE) por el valor del peso relativo (PR) de cada una de las variables (Tabla 5).

Consideraciones y recomendaciones

La metodología IRIEE es un ejercicio reflexivo de investigación presentado como un esfuerzo minucioso para alcanzar la objetividad, pero completamente consciente de la naturaleza subjetiva de una reflexión, lo cual podría inducir a una perspectiva incompleta al ocuparse solo de algunas pocas variables. Pero, especialmente, este ejercicio se enfrenta a un problema fundamental de las ciencias biológicas, al intentar modelar el comportamiento de organismos vivos (aves) irreducibles a las matemáticas dada su naturaleza como sujetos individuales, variables, impredecibles e inmensurables (Pujiula, 1925). Lo anterior conduce inevitablemente a la inexactitud por la omisión de variables y aspectos metodológicos importantes que deberían insertarse en el modelo para obtener predicciones exactas (Hively, 2011). Sin embargo, el método presentado es suficiente para los presupuestos planteados; por tanto, no pretende un pronóstico matemático exacto, sino una aproximación en la estimación del riesgo.

Se sugieren cuatro frentes de investigación para el perfeccionamiento del IRIEE. Primero: desarrollar la variable “respuesta al hostigamiento” mediante una metodología rigurosa que permita cuantificar la susceptibilidad de cada especie frente a las estrategias de dispersión, entendida esta como una variable muy importante en la evaluación del riesgo y en la prevención de impactos. Segundo: averiguar la manera de medir objetivamente la variable “agilidad o comportamiento de vuelo”, bien sea desde otras perspectivas metodológicas o asumiendo la metodología presentada aquí y obteniendo las medidas alares de todas las especies de aves.

Tabla 4.
Matriz del IRIEE

Índice de Riesgo de Impacto Especie-específico									
Tipo de variable	Probabilidad	Probabilidad	Severidad	Probabilidad	Probabilidad	Severidad	Probabilidad	Probabilidad	
PR	?	?	?	?	?	?	?	?	$\Sigma PR = 1$
X VE	Horario	Abundancia	Bandada	Frecuencia	Movilidad	Masa	Altura	Impactos	Nivel de Riesgo
8	Diurno/ Nocturno: al menos un evento de observación diurno y uno nocturno	Abundante: abundancia relativa mayor al promedio mas la desviación estándar	Bandadas grandes: > 10 individuos en más del 33% de los eventos de observación	Permanente: presente entre el 70% - 100% de los eventos de observación	Muy activo: Cruces de aerovia > 50% de los eventos de observación	Grande: > 1800 g	Más del 33% de los eventos de observación se registra a 0 ft AGL	> 2 impactos en el aeropuerto	6,1 – 8 = Alto
4	Diurno: al menos un evento de observación diurno pero en ninguno nocturno	Común: abundancia relativa entre el promedio y el promedio mas la desviación estándar	Bandadas medianas: 2-10 individuos en más del 33% de los eventos de observación	Frecuente: presente entre el 30% - 69% de los eventos de observación	Moderadamente activo: Cruces de aerovia 1% - 50% de los eventos de observación	Mediano: 300 g - 1800 g	Más del 33% de los eventos de observación se registra entre 1 - 500 ft AGL (152,4 m)	1-2 impactos en el aeropuerto	4 – 6 = Moderado
2	Nocturno: al menos un evento de observación nocturno pero en ninguno diurno	Poco común: abundancia relativa menor al promedio	Solitario: 1 individuo en más del 33% de los eventos de observación	Trnsitoria: presente entre el 29% - 1% de los eventos de observación	Poco activo: Cruces de arovia 0% de los eventos de observación	Pequeño: < 300 g	Más del 33 % de los eventos de observación se registra sobre los 500 ft AGL	0 impactos en el aeropuerto	2 – 3,9 = Bajo

VE= Valor del estado de la variable PR= Peso relativo de la variable X= Variable

Nota. Los valores de los pesos relativos se indican con un signo de interrogación porque deben ser establecidos primero por el método de AHP.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.
Formulación matemática del IRIEE

$IRIEE = \sum VE_x \times PR_x$
$IRIEE = VE_{Horario} \times PR_{Horario} + VE_{Abundancia} \times PR_{Abundancia} + VE_{Bandada} \times PR_{Bandada} + VE_{Frecuencia} \times PR_{Frecuencia} + VE_{Movilidad} \times PR_{Movilidad} + VE_{Masa} \times PR_{Masa} + VE_{Altura} \times PR_{Altura} + VE_{Impactos} \times PR_{Impactos}$

Fuente: elaboración propia.

Tercero: debido a que el IRIEE utiliza como fuente de información los “eventos de observación”, se requiere definir formalmente el método como el observador debe registrar los datos de las aves en campo: debe ser estandarizado y tener como unidad de medida los eventos de observación, debe definir un número estándar de eventos de observación, cuánto tiempo debe durar cada evento de observación, cuáles

son los horarios de observación, y cuáles son los límites espaciales de la observación en el aeropuerto, todo esto para obtener un método verificable que permita la comparación entre periodos de evaluación y entre aeropuertos. Cuarto: en este trabajo, el rango de valores del IRIEE y su correspondiente nivel de riesgo se definen arbitrariamente al no tener más criterio que la repartición proporcional de los valores, lo cual podría

acarrear sesgos en la limitación superior o inferior de cada rango. Por ello, es necesario investigar una metodología que permita definir objetivamente estos rangos; por ejemplo, con el método de lógica difusa, el método Delphi o incluso una AHP.

Por último, se señala la necesidad de que esta metodología sea sometida a cuestionamientos y a crítica formal para identificar nuevas oportunidades de mejora que fomenten su progreso como herramienta de mejoramiento para la seguridad aérea. También que el IRIEE, hasta ahora formulada teóricamente, sea implementada en la práctica para que sea completada.

Conclusiones

El IRIEE es una propuesta metodológica para la evaluación del riesgo de impacto que representa cada especie de ave en el aeropuerto, y se constituye como una mejora significativa de las metodologías precedentes, al tomar lo mejor de cada una para obtener un tante más cuantitativo, objetivo y práctico. Todo esto implica un progreso general para el sistema de análisis del riesgo de los programas de gestión del peligro que representa la fauna silvestre en aeropuertos, pero específicamente implica una mejora en el rigor de la evaluación del riesgo como componente del sistema de análisis del riesgo, y que al mismo tiempo contribuye a combatir el rezago tradicional que ha sufrido este sector frente a otras áreas de las operaciones aeroportuarias que cuentan con metodologías más desarrolladas y detalladas para la evaluación de sus riesgos particulares.

El carácter del IRIEE, en síntesis, es un balance entre la rigurosidad y el utilitarismo. Por un lado, es más riguroso que sus predecesores al acudir a una mayor cuantificación de las variables, lo que dirige al evaluador a revisar sus datos de observación en campo, en vez de simplemente hacer una valoración subjetiva de la situación como ocurre con las variables cualitativas. Por otro lado, es muy práctico porque no plantea la exigencia de sofisticados equipos para la obtención de datos ni complejas operaciones matemáticas para su

análisis, sino que solo requiere datos fáciles de obtener en campo y de operaciones matemáticas simples. Todo esto facilita su implementación regular en cualquier aeropuerto de Colombia, especialmente en aquellos pequeños aeropuertos regionales alejados del territorio nacional que suelen tener limitaciones financieras, logísticas y de acceso a la información. En este sentido, incluso podría tener un alcance de aplicación más amplio hasta varios países vecinos de la región.

Referencias

- Aerocivil. (2016). *Programa de limitación de fauna en aeródromos* [en línea]. <https://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/Aerodromos/Documents/Programa%20nacional%20de%20limitaci%C3%B3n%20de%20fauna%20en%20aer%C3%B3dromos.pdf>
- Aerocivil. (2019). *Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC)* [en línea]. <https://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/reglamentacion/rac>
- Anagnostopoulos, A. (2003). *Bird Strike Risk Assessment for Athens International Airport* [en línea]. https://www.aerohabitat.eu/uploads/media/BIRDSTRIKE_RISK_ASSESSMENT.pdf
- Allan, J. (2006). A Heuristic Risk Assessment Technique for Bird-strike Management at Airports. *Risk Analysis*, 26(3), 723-729. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00776.x>
- Alhumaidi, S.H.S., Alruwaili, I.Y.N. y Wheeler, B. (2023). u.s. Wildlife Strikes by Phase of Flight. *Journal of Management & Engineering Integration*, 16(1), 39-47. <https://doi.org/10.62704/10057/25980>
- Barrientos, C., González-Acuña, D., Moreno, L., Ardiles, K. y Figueroa, R. A. (2016). Aves asociadas al Aeropuerto Carriel Sur de Talcahuano, sur de Chile: evaluación de peligro aviario. *Gayana (Concepción)*, 80(1), 40-55. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382016000100005>
- Blackwell, B. F. y Fernández-Juricic, E. (2013). Behavior and physiology in the development and application of visual deterrents at airports. *Wildlife in Airport Environments: Preventing Animal-Aircraft Collisions through Science-Based Management*. The Johns Hopkins University Press (T. L. DeVault, B. F. Blackwell y J. L. Belant, eds.; pp. 11-22).

- Carter, N. B. (2001). All birds are not created equal: Risk assessment and prioritization of wildlife hazards at airfields [ponencia]. *2001 Bird Strike Committee-USA/Canada, Third Joint Annual Meeting, Calgary* [en línea]. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=birdstrike2001>
- Civil Aviation Authority (CAA). (2002). *Aerodrome Bird Control. Report Prepared by the Safety Regulation Group*. CAA.
- Coccon, F., Zucchetta, M., Bossi, G., Borrotti, M., Torricelli, P. y Franzoi, P. (2015). A Land-Use Perspective for Birdstrike Risk Assessment: The Attraction Risk Index. *PLoS ONE*, 10(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128363>
- DeVault, T. L., Blackwell, B. F., Seamans, T. W., Begier, M. J., Kougher, J. D., Washburn, J. E., Miller, P. R. y 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>
- Dolbeer, R. A., Wright, S. E. y 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/3783694>
- Dolbeer, R., Begier, M., Miller, P., Weller, J. y Anderson, A. (2023). *Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States, 1990-2022* [en línea]. https://www.faa.gov/airports/airport_safety/wildlife/wildlife_strikes_civil_aircraft_united_states_1990_2022
- European Aviation Safety Agency (EASA). (2009). *Bird Strike Damage and Windshield Bird Strike* [en línea]. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/research-reports/easa2008c49>
- El-Sayed, A. F. (2019). *Bird Strike in Aviation: Statistics, Analysis and Management*. John Wiley & Sons.
- Fernández-Juricic, E., Brand, J., Blackwell, B. F., Seamans, T. W. y DeVault, T. L. (2018). Species with Greater Aerial Maneuverability have Higher Frequency of Collisions with Aircraft: A Comparative Study. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00017>
- Fu, H., Su, M. S., Chu, J. J., Margaritescu, A. y Claramunt, S. (2023). New Methods for Estimating the Total Wing Area of Birds. *Ecology and Evolution*, 13(9). <https://doi.org/10.1002/ece3.10480>
- Gerringer, M., Lima, S. y DeVault, T. (2016). Evaluation of an avian radar system in a midwestern landscape. *Wildlife Society Bulletin*, 40(1), 150-159. <https://doi.org/10.1002/wsb.614>
- Gutiérrez-Serralde, S. M., Soldatitni, C., Albores-Barajas, Y. V., Rosas-Hernández, M. P., De la Cueva, H. y Rangel-Barón, P. (2023). Comparing Bird Strike Risk Assessment Methods: A New Perspective for Safety Management. *European Journal of Wildlife Research*, 69(57).
- Godínez, E. (2006). *Aves y aeronaves: riesgos y peligros* (3.ª ed.). Amazon.
- Hively, D. (2011). *Biological modeling in data poor scenarios* [thesis dissertation, University of California]. <https://users.soe.ucsc.edu/~msmangel/Hively%20MS.pdf>
- Holbech, L. H., Asamoah, A. y Owusu, E. H. (2015). A Rapid Assessment of Species-Specific Bird Strike Risk at the Kotoka International Airport in Accra, Ghana. *Ostrich*, 86(3), 277-285. <https://www.ajol.info/index.php/ostrich/article/view/141530>
- Hong, M.-J., Kim, M.-S., Moon, Y.-M., Choi, J.-H., Lee, W.-S. y 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>
- MacKinnon, B. (2004). *Sharing the Skies: An Aviation Industry Guide to the Management of Wild Life Hazards* (Transportation Canada, ed.). Aviation Publishing Division.
- Marateo, G., Grilli, P. G., Ferretti, V. y Bouzas, N. (2011). Diagnóstico de riesgo aviario en un aeródromo de un aérea megadiversa del Perú. *Revista Conexión SIPAER*, 2(3), 203-227. <http://conexaosipaer.com.br/index.php/sipaer/article/viewFile/101/141>
- Morgenroth, C. (2003). Development of an Index for Calculating the Flight Safety Relevance of Bird Species for an Assessment of the Bird Strike Hazard at Airports. *Bird and Aviation*, 23(2), 1-7.
- Metz, I. C., Ellerbroek, J., Mühlhausen, T., Kügler, D., Kern, S. y Hoekstra, J. M. (2021a). The Efficacy of Operational Bird Strike Prevention. *Aerospace*, 8(1), 17. <https://doi.org/10.3390/aerospace8010017>
- Metz, I. C., Ellerbroek, J., Mühlhausen, T., Kügler, D. y Hoekstra, J. M. (2021b). Analysis of Risk-Based Operational Bird Strike Prevention. *Aerospace*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/aerospace8020032>
- Ning, H. y Chen, W. (2014). Bird Strike Risk Evaluation at Airports. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 86(2), 129-137. <https://doi.org/10.1108/AEAT-07-2012-0111>
- Pujiula, D. J. (1925). *Nota sobre la irreductibilidad de la biología a las matemáticas*. Institució Catalana d'Història Natural [en línea]. <https://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000134/00000020.pdf>

- Roa, J. G. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(2), 183-219. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24702>
- Saaty, T. L. (2000). *Fundamental of Decision and Priority Theory*. RWS Publications.
- Saaty, T. L. (2008). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://dx.doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Shao, Q., Zhou, Y., Zhu, P., Ma, Y. y Shao, M. (2020a). Key Factors Assessment on Bird Strike Density Distribution in Airport Habitats: Spatial Heterogeneity and Geographically Weighted Regression Model. *Sustainability*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/su12187235>
- Shao, Q., Zhou, Y. y Zhu, P. (2020b). Spatiotemporal Analysis of Environmental Factors on the Birdstrike Risk in High Plateau Airport with Multi-Scale Research. *Sustainability*, 12(22), 9357. <https://doi.org/10.3390/su12229357>
- Soldatini, C., Georgalas, V., Torricelli, P. y Albores-Barajas, Y. V. (2010). An Ecological Approach to Birdstrike Risk Analysis. *European Journal of Wildlife Research*, 56, 623-632. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10344-009-0359-z>
- Soldatini, C., Albores-Barajas, Y. V., Lovato, T., Andreon, A., Torricelli, P., Montemaggiori, A., Corsa, C. y Georgalas, V. (2011). Wildlife strike risk assessment in several Italian airports: lessons from BRI and a new methodology implementation. *PLoS ONE*, 6(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028920>
- Zakrajsek, E. J. y 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>