



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Máster Universitario en Biología de la Conservación

FACTORES ASOCIADOS A LA ELECTROCUCIÓN DE
AVES EN TENDIDOS ELÉCTRICOS: UN CASO DE
ESTUDIO EN EL CENTRO DE LA ESPAÑA PENINSULAR

FACTORS ASSOCIATED WITH BIRD ELECTROCUTION IN POWER LINES: A CASE
STUDY IN THE CENTER OF PENINSULAR SPAIN

Trabajo Final de Máster

Paula Varela Cabaleiro

Factores asociados a la electrocución de aves en tendidos eléctricos: un caso de estudio en el centro de la España peninsular

Paula Varela Cabaleiro

Tutores:

Álvaro Ramírez García

Juan José Iglesias Lebrija

6 de octubre de 2020

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 4 |
| INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| MATERIAL Y MÉTODOS..... | 9 |
| - Área de estudio..... | 9 |
| - Muestreo de los datos..... | 9 |
| - Análisis estadísticos..... | 10 |
| RESULTADOS..... | 12 |
| - Aves muertas por electrocución..... | 12 |
| - Efecto de la envergadura en el riesgo de electrocución..... | 12 |
| - Efecto del tipo de apoyo en el riesgo de electrocución..... | 13 |
| - Influencia del tipo de propiedad de la línea eléctrica sobre la mortalidad de aves. | 14 |
| - Factores ambientales que influyen en la mortalidad de aves por electrocución..... | 16 |
| DISCUSIÓN..... | 18 |
| - Efectos biológicos que influyen en el riesgo de electrocución..... | 18 |
| - Efecto del diseño de los apoyos sobre el riesgo de electrocución..... | 19 |
| - Influencia del tipo de propiedad de la línea eléctrica sobre la mortalidad de aves | 19 |
| - Factores ambientales que influyen en la mortalidad por electrocución de aves..... | 20 |
| CONCLUSIÓN..... | 21 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 22 |

RESUMEN

Los accidentes por electrocución con los tendidos eléctricos amenazan la conservación de las aves, y en algunos casos este tipo de accidentes puede agravar la situación de algunas especies amenazadas. Aquellas de mediana y gran envergadura, como las rapaces, suelen ser las más vulnerables. En España, se han llevado a cabo medidas de protección de la avifauna para paliar este problema (Real Decreto 1432/2008), pero su aplicación no ha sido del todo efectiva y homogénea en todo el territorio. El objetivo de este trabajo es estudiar las muertes por electrocución en tendidos tras más de diez años de aprobación del Real Decreto, y analizar la influencia de tres factores sobre el riesgo de electrocución de la avifauna: la biología de las especies (envergadura alar), la tipología de los apoyos (diseño y tipo de propiedad a la que pertenecen) y los rasgos ambientales del apoyo y su entorno (usos del suelo y cobertura arbórea). Se muestrearon un total de 2618 apoyos entre diciembre de 2017 y mayo de 2019, en las provincias de Ávila, Guadalajara, Madrid y Toledo. Se encontraron 212 individuos muertos en 138 apoyos. La tipología y tipo de propiedad de los apoyos, así como la cobertura forestal, son factores que ejercieron un efecto significativo sobre la mortalidad, al contrario que la envergadura alar y el tipo de uso de suelo. Causas como el comportamiento, el hábito de posada de las aves en los postes y la baja cobertura forestal influyen en la frecuencia de uso de los apoyos, lo que aumenta la probabilidad de sufrir un accidente. Los apoyos con cables por encima de la zona de posada son los más peligrosos, y además son predominantes en tendidos eléctricos de propiedad particular, al contrario que aquellos tendidos que pertenecen a compañías eléctricas. Para disminuir el número de muertes de aves por electrocución, será necesario realizar seguimientos periódicos del estado de los apoyos eléctricos y prestar especial atención en la corrección de aquellos pertenecientes a particulares.

Palabras Clave: aves, especies amenazadas, tendidos eléctricos, electrocución, propiedad de líneas eléctricas.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo humano lleva asociada la producción y consumo de grandes cantidades de energía (Vitousek et al., 1997). En la mayoría de los casos, los lugares de producción de la energía distan de aquellos donde es utilizada, lo que exige grandes y complejas redes de distribución. Los tendidos eléctricos son un buen ejemplo de estas redes, que llevan la energía desde las centrales de producción hasta las subestaciones de transformación y los puntos de consumo, extendiéndose por gran parte del territorio. En España, por ejemplo, se estimó en 2009 la existencia de 870.252 km de líneas aéreas y 145.939 km de líneas subterráneas (Pérez-García et al., 2015).

Los tendidos eléctricos son responsables de una serie de impactos medioambientales que operan a varios niveles. Causan un impacto visual en el paisaje, generando un contraste con las formas asimétricas de los paisajes naturales. La creación de pasillos despejados de vegetación para la instalación de los apoyos eléctricos supone, además de una discontinuidad en el paisaje, la destrucción y fragmentación de hábitats (Ferrer, 2012). A pesar de ello, este hecho puede tener efectos positivos para aquellas especies que prefieren hábitats herbáceos o de matorral, al evitar el crecimiento de especies arbóreas y facilitar el mantenimiento de su hábitat idóneo (Ferrer y Negro, 1992; Forrester et al., 2005). Además, los apoyos eléctricos son utilizados por diversos grupos faunísticos, en especial por las aves, que los usan como posaderos, lugares de descanso o como sustratos de nidificación (Bevanger, 1994). Esto puede beneficiar a algunas poblaciones de aves, en especial a aquellas especies que habitan en medios con baja presencia de perchas naturales debido a la agricultura intensiva (Olendorff et al., 1981; Ferrer, 2012), como por ejemplo la cigüeña blanca (Infante y Peris, 2003). Sin embargo, los accidentes por colisión o electrocución con los tendidos eléctricos y, en menor medida por enganche en los apoyos (Pérez-García, 2014), suponen una grave amenaza para la conservación de las aves. Por ejemplo, en EEUU, se estima que cada año mueren entre 8 y 57 millones de aves por colisión y entre 0,9 y 11,6 millones de aves por electrocución (Loss et al., 2014). En España, se calcula que cada año se electrocutan hasta 33.000 aves (Soria y Guil, 2017).

Aunque se trata de un problema que ocurre en todo el mundo (Bevanger, 1994), la mayoría de países carecen de estimaciones de mortalidad fiables o de legislaciones de efectivas que ayuden a atajar la situación (Haas et al., 2005; Lehman et al., 2007). El número de muertes, incluso en los países más desarrollados, es difícil de estimar con exactitud. En primer lugar, porque es necesario revisar la totalidad de la red eléctrica, algo que implicaría importantes cantidades de tiempo y recursos humanos dada la enorme extensión de la red. Además, los cadáveres de las

aves muertas por electrocución o colisión suelen desaparecer a los pocos días por depredación (Olendorff et al., 1981; Haas et al., 2005), lo que supone realizar revisiones periódicas con una frecuencia relativamente elevada. Por este motivo, se hace necesario realizar análisis que permitan cuantificar y entender los patrones de mortalidad asociados a los tendidos eléctricos.

La colisión sucede cuando el ave, en vuelo, choca contra los conductores o el cable de tierra del apoyo eléctrico (Bevanger, 1994). Una gran variedad de especies de aves se ve afectada por este fenómeno (Janss y Sánchez, 1994), especialmente las aves gregarias y las crepusculares (Janss y Sánchez, 1994; Ferrer, 2012). La electrocución, sin embargo, ocurre al posarse, cuando un ave sufre una descarga eléctrica al entrar en contacto simultáneamente con dos conductores o con un conductor y una parte metálica del apoyo, o incluso por arco eléctrico sin necesidad de contacto físico, en condiciones de elevada humedad o cuando las plumas están mojadas. La electrocución ocurre principalmente en líneas de distribución, con tensión inferior a 66 kV, donde las dimensiones del apoyo favorecen que el ave pueda tocar los conductores y el poste al mismo tiempo, y en apoyos con transformadores (Olendorff et al., 1981; Bevanger, 1994; Bevanger, 1998; Ferrer, 2012; Pérez-García et al., 2015).

Las aves más sensibles a la electrocución son aquellas de mediana o gran envergadura, que suelen posarse en los apoyos, como las rapaces, ya que tienen más probabilidades de tocar varias partes del apoyo con las alas desplegadas (Olendorff et al., 1981; Ferrer y Negro, 1992; Janss y Ferrer, 2001; Lehman et al., 2007). Pero si existe poca separación entre conductores o si los aisladores son muy cortos, incluso las aves pequeñas pueden electrocutarse (Haas et al., 2005). Los grupos de aves más sensibles a la electrocución son Ciconiiformes, Accipitriformes, Falconiformes, Strigiformes, y Passeriformes (Bevanger, 1998). Las electrocuciones suelen afectar especialmente a los individuos juveniles, por lo que puede afectar a la dinámica de las poblaciones (Bayle, 1999). Además, la mortalidad por electrocución afecta especialmente a la conservación de especies raras (Bevanger, 1998; Prinsen et al., 2011). Por ejemplo, en España este tipo de suceso tuvo un gran papel en el declive del águila imperial ibérica (*Aquila adalberti*), donde casi el 50% de la mortalidad en un período de 15 años fue causada por electrocución (Ferrer et al., 1991; Ferrer y Negro, 1992; González et al., 2007). Algo similar ocurrió en el declive del águila de Bonelli (*A. fasciata*) (Carrete et al., 2002).

El problema de la electrocución de aves empezó a investigarse a principios de los años 70 en Estados Unidos (Olendorff et al., 1981), y los primeros estudios en España se realizaron a finales de los años 80 (Negro y Ferrer, 1995). Como resultado de los mismos, a partir de los años 90, empezaron a ponerse en marcha medidas para mitigar la mortalidad por electrocución (Ferrer

et al., 1991; Negro y Ferrer, 1995). Algunos ejemplos son la instalación de disuasores de posada, el cambio de diseño de apoyos peligrosos, de forma que se incremente la distancia entre los conductores y el apoyo metálico, y el aislamiento de los apoyos para evitar que se produzca contacto entre el ave y los conductores (Mañosa, 2001; Prinsen et al., 2011; Pérez-García, 2014; Pérez-García et al., 2015). Es importante señalar que el interés por solucionar la problemática de las electrocuciones no sólo es de carácter conservacionista: estos accidentes pueden originar problemas económicos al causar cortes en el suministro de energía, o incluso pueden llegar a ocasionar incendios (Bevanger, 1994; Ferrer, 2012).

Las medidas adoptadas han ayudado a reducir la mortalidad de aves allí donde se han aplicado (p.e., Harness y Garrett, 1999; Moleón et al., 2007). Por ejemplo, en el caso del águila imperial, han facilitado la recuperación de sus poblaciones (López-López et al., 2011). No obstante, no todas las medidas mitigadoras protegen de la electrocución a largo plazo: al cabo de 10 años, los aislantes se degradan y pueden producir mayor riesgo de electrocución en aquellos apoyos sin aislantes (Guil et al., 2011), por lo que es necesario realizar controles periódicos de su eficacia. La única forma de evitar completamente la muerte de aves por electrocución es mediante el enterramiento de las líneas de distribución (Bayle, 1999), pero debido a que esta medida tiene un coste muy elevado, en España apenas se ha aplicado (Prinsen et al., 2011; Ferrer, 2012).

Por todo ello, en 2008 se aprobó la primera normativa a nivel estatal: el Real Decreto 1432/2008, que establece medidas para la protección de la avifauna contra la colisión y la electrocución en líneas eléctricas de alta tensión. Entre estas medidas se incluye la delimitación, por parte de las Comunidades Autónomas, de Zonas de Protección y de la inclusión de líneas con peligro de electrocución para las aves que se hallen dentro de estas zonas (Real Decreto 1432/2008). Sin embargo, la aplicación del Real Decreto 1432/2008 no ha sido completamente efectiva, ya que algunas Comunidades Autónomas se han retrasado en la declaración de Zonas Protegidas y de líneas peligrosas, y el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (MAGRAMA) no ha creado un fondo de carácter específico para la corrección de tendidos peligrosos (Tragsatec, 2014). Mientras, algunas Comunidades Autónomas han aprobado legislación propia en esta materia (Ferrer, 2012), y se han aprobado proyectos como el ya finalizado Life Bonelli (LIFE12 NAT/ES/000701), que incluyó acciones específicas para minimizar el riesgo de electrocución del águila de Bonelli, y que tiene ahora continuación en el proyecto AQUILA a-LIFE (LIFE16 NAT/ES/000235), para la recuperación del águila de Bonelli en el mediterráneo occidental.

El objetivo de este trabajo es estudiar, pasados diez años de la entrada en vigor del Real Decreto 1432/2008, la situación de la red eléctrica con relación a los riesgos de electrocución de las aves. Para ello se han estudiado tres tipos de factores (biológicos, de diseño de los apoyos y ambientales) previamente identificados por su relación con la mortalidad por electrocución en aves. En primer lugar, se estudia el efecto de la envergadura del ave y su relación con el riesgo de electrocución. Trabajos previos han mostrado una relación entre ambos parámetros (Bevanger, 1998), de modo que esperamos que las aves de mayor envergadura alar presenten un mayor riesgo de electrocución, debido a que es más probable que entren en contacto con dos elementos.

En cuanto al diseño del apoyo, se ha documentado que la tipología del mismo condiciona su peligrosidad. Esta se ve influida por la manera en que la configuración de los elementos de la cruzeta facilita el contacto del ave con los conductores o partes metálicas del apoyo (Olendorff et al., 1981; Bevanger, 1994). Esperamos que aquellas tipologías de apoyo con cables más accesibles (aquellos situados por encima de la zona de posada del ave) sean responsables de un mayor número de muertes.

La titularidad del tendido eléctrico también puede ser un factor que influya en la mortalidad de la avifauna, debido a las diferencias en la gestión que se pueden producir en tendidos pertenecientes a compañías eléctricas frente a tendidos de propiedad particular. En principio, las compañías eléctricas parecen haber llevado a cabo más medidas dirigidas a mitigar y corregir los problemas de la electrocución de aves en los tendidos eléctricos (Ferrer, 2012). En el caso de los propietarios privados, sin embargo, debido al coste asociado a la modificación de los tendidos, la implantación de las medidas dirigidas a reducir las electrocuciones podría ser más lenta. En caso de estar ocurriendo esto, habría que valorar la situación para dirigir las medidas de conservación.

Por último, otro factor determinante en la peligrosidad de un apoyo es el ambiente donde se ubica. A través del efecto que factores como la estructura de la vegetación, la disponibilidad de lugares para posarse o la densidad de presas pueden tener sobre la selección de hábitat de las aves, los rasgos ambientales del lugar donde se localiza un apoyo pueden afectar a su peligrosidad (Bevanger, 1994; Lehman et al., 2007). Así, se espera que haya una mayor mortalidad por electrocución en zonas naturales donde son más abundantes las especies que acumulan más electrocuciones, o en las zonas con menor cobertura de arbolado, donde las aves podrían hacer un mayor uso de los apoyos debido a la escasez de perchas naturales (Ferrer et al., 1991; Guzmán y Castaño, 1998).

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en las provincias de Ávila, Guadalajara, Madrid y Toledo. Se trata de una región importante para diversas especies de rapaces, varias de ellas amenazadas, como el buitre negro (*Aegypius monachus*), el buitre leonado (*Gyps fulvus*), el águila imperial (*A. adalberti*), el águila real (*A. chrysaetos*) y el águila de Bonelli (*A. fasciata*) (Madroño et al., 2004).

Muestreo de los datos

Un grupo de trabajo, formado por trabajadores medioambientales y voluntarios, realizaron varias salidas al mes en el período comprendido entre diciembre de 2017 y mayo de 2019, revisando un total de 2618 apoyos eléctricos (Figura 1). Debido a que los muestreos se enmarcan dentro del proyecto AQUILA a-LIFE (LIFE16 NAT/ES/000235), coordinado por GREFA, se priorizaron las zonas que albergasen líneas eléctricas de apariencia más peligrosa.

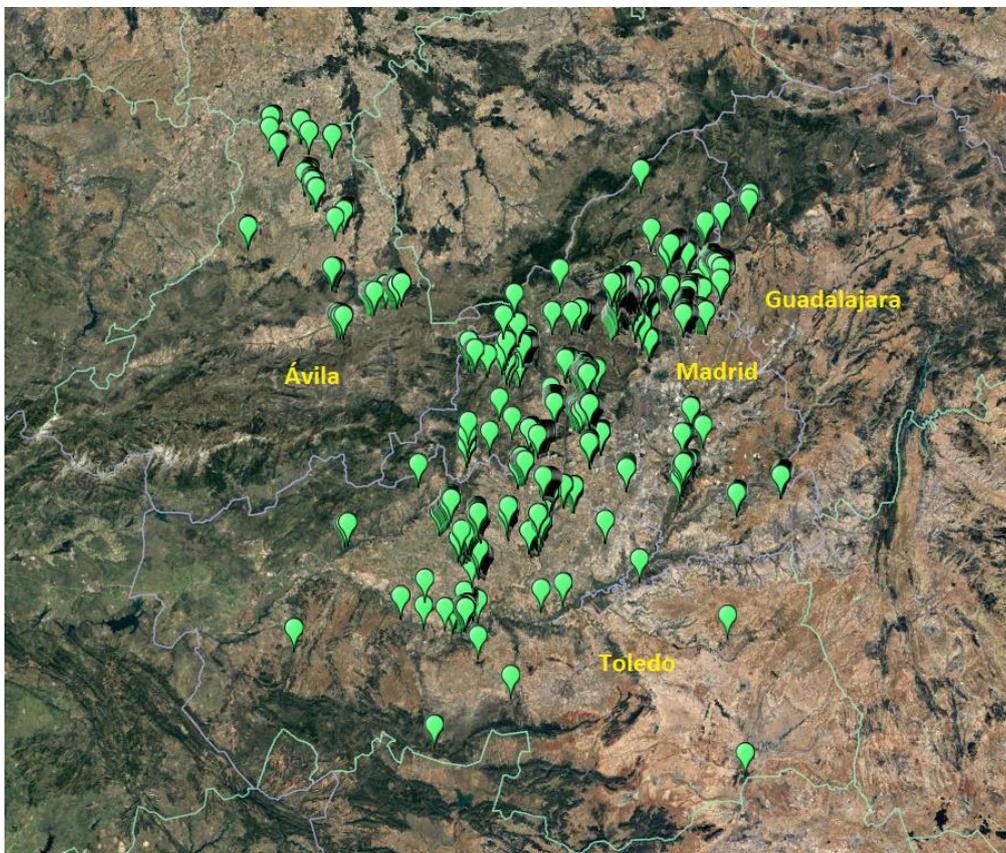


Figura 1: Localización de los 2618 apoyos eléctricos muestreados.

El método de muestreo fue el siguiente: en cada jornada, el equipo se dividía en pequeños grupos, cada uno de los cuales recorría las líneas caminando bajo los conductores en busca de aves muertas. La superficie de muestreo se extendía 30 metros a cada lado de los conductores, ya que una vez que sufre el accidente, el cuerpo del ave puede caer a cierta distancia del apoyo (p.e., aves heridas) o ser arrastrado lejos del apoyo por los depredadores (Janss y Ferrer, 2001; Ponce et al., 2010).

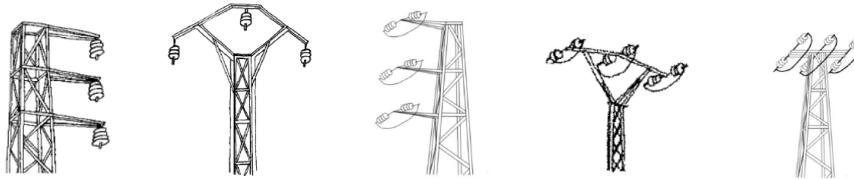
Los datos tomados por los grupos de trabajo en cada uno de los apoyos eran los siguientes: coordenadas geográficas del apoyo, fecha del muestreo, municipio, tipología del apoyo, propiedad de la línea (compañía eléctrica o propietarios particulares), presencia de aves muertas, número de animales muertos encontrados y en caso de encontrar alguno, se indicaba su identidad específica. Además de tomar fotografías, a cada apoyo se le asignaba un código de identificación único. Todos estos datos se subían a una aplicación móvil llamada Cartodroid, para generar una base de datos común.

Análisis estadísticos

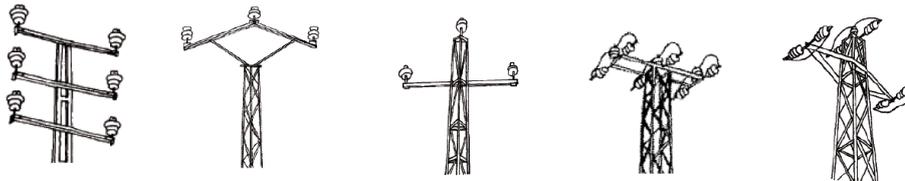
Se realizó un análisis de regresión simple para analizar el efecto de la envergadura alar sobre el riesgo de electrocución. Se utilizó la envergadura media de cada especie como variable independiente (Hume, 2007), y el número de aves muertas como variable dependiente.

Se aplicó un test de Chi Cuadrado para analizar la peligrosidad según el tipo de apoyo. Para ello se elaboró una tabla de contingencia donde las frecuencias observadas fueron los números totales de aves muertas en cada tipo de apoyo, y las frecuencias esperadas fueron los números totales de apoyos de cada tipo (bajo la hipótesis nula que asume una mortalidad proporcional a la frecuencia de aparición de los apoyos). Debido a la gran diversidad de tipos de apoyos (hasta 29 tipos diferentes), esta última variable se redujo a 4 categorías: apoyos con cables por encima de la zona de posada del ave, apoyos con cables por debajo de la zona de posada, apoyos con derivaciones y apoyos con transformador (Figura 2). La zona de posada es el lugar de la cruceta donde se posa el ave, que suele ser el travesañ superior en el caso de las aves grandes como las rapaces (Ferrer, 2012).

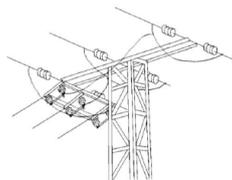
CABLES SUSPENDIDOS POR DEBAJO DE LA ZONA DE POSADA



CABLES POR ENCIMA DE LA ZONA DE POSADA



DERIVACIONES



TRANSFORMADOR

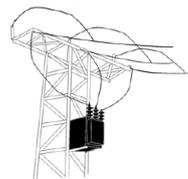


Figura 2: Clasificación de los tipos de apoyos eléctricos.

Se comparó el número de aves muertas en los apoyos según la propiedad de los tendidos (propietarios particulares o compañías eléctricas) mediante un test de Chi Cuadrado. Los valores esperados de aves muertas se calcularon a partir de los números totales de apoyos clasificados según su propietario. Además, se realizó otro test de Chi Cuadrado para comparar si la tipología de los de los apoyos variaba según la propiedad de la línea. En los análisis relacionados con la propiedad de los tendidos se excluyeron los apoyos de titularidad desconocida, de modo que en estos análisis el tamaño muestral se redujo de 2618 apoyos a 952.

Por último, se realizó un modelo lineal generalizado (regresión logística) para tratar de identificar los factores ambientales y de diseño de los apoyos que determinan la electrocución de aves. En el modelo (distribución binomial, función logit), se establecieron como variable dependiente la mortalidad (presencia o ausencia de cadáver), y como variables independientes el tipo de apoyo (clasificación de las 4 categorías previamente nombradas), la cobertura de arbolado (expresada en porcentaje) y una variable del uso principal del suelo. La última variable

se obtuvo a partir de los tipos de hábitat de la capa Corine Land Cover (Corine Land Cover, 2012), facilitada por el Ministerio de Fomento. Dicha clasificación reconoce un elevado número de tipos de uso del suelo, que fueron posteriormente reducidos a 3 clases de uso de suelo: urbano, natural o agrícola. Para cada uno de los apoyos se obtuvo el tipo de uso de suelo predominante en un radio de 50 metros alrededor del apoyo. La variable de cobertura de arbolado se calculó a partir del Mapa Forestal de España (1997-2006, de escala 1:50000), a partir del campo "Fracción de cabida de cubierta arbórea", que indica valores entre 0 y 100 % del porcentaje de suelo cubierto por estrato arbóreo, en un radio de 50 metros alrededor del apoyo.

Se exploró la posibilidad de realizar modelos similares para especies individuales. Sin embargo, el tamaño de muestra limitado, incluso en las especies con mayor número de aves muertas (ratonero común, búho real o milano real), no permitió obtener modelos robustos.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados en R commander (Fox y Bouchet-Valat, 2019) y en STATISTICA 7.0 (Statsoft, Tulsa, OK).

RESULTADOS

Aves muertas por electrocución

Se encontró un total de 212 aves muertas por electrocución, pertenecientes a 6 órdenes diferentes (Tabla 1). El 70,75 % de las víctimas eran Accipitriformes. Las especies con mayor frecuencia de mortalidad fueron el busardo ratonero (31,60 % de las electrocuciones), el milano real (9,43 %) y el búho real (9,43 %). Les siguieron el buitre leonado (6,6 %), el águila imperial ibérica (5,19 %) y el águila de Bonelli (4,25 %). Los córvidos y las palomas conformaron el 4,72 % de las muertes. En total, 14 de las 22 especies están incluidas en el Anexo I de la Directiva Aves (79/409/CEE). Un total de 138 apoyos (5,3 % del total de apoyos muestreados) fueron responsables de las muertes detectadas. En la mayoría de los apoyos con mortalidad, el número de aves encontradas fue de un individuo, pero en algunos apoyos se encontraron hasta 6 aves.

Efecto de la envergadura en el riesgo de electrocución

No se observó ningún efecto de la envergadura alar sobre el número de aves electrocutadas ($F_{1,20} = 0,019$, $p = 0,89$, $R^2 = 0,00098$). Incluso eliminando al busardo ratonero del análisis, que acumula bastantes más muertes que cualquiera de las otras especies, los resultados no fueron significativos ($F_{1,19} = 1,19$, $p = 0,29$, $R^2 = 0,06$).

Tabla 1: Frecuencia de aparición de aves electrocutadas en los apoyos de los tendidos eléctricos según especie y orden (2017-2019).

| Orden | Especies | Nº de ejemplares muertos |
|-----------------|---|--------------------------|
| Ciconiiformes | Cigüeña blanca (<i>Ciconia ciconia</i>) | 3 |
| Accipitriformes | Buitre leonado (<i>Gyps fulvus</i>) | 14 |
| | Buitre negro (<i>Aegypius monachus</i>) | 2 |
| | Águila real (<i>Aquila chrysaetos</i>) | 1 |
| | Culebrera europea (<i>Circaetus gallicus</i>) | 5 |
| | Águila calzada (<i>Hieraetus pennatus</i>) | 3 |
| | Águila de Bonelli (<i>Aquila fasciata</i>) | 9 |
| | Águila imperial ibérica (<i>Aquila adalberti</i>) | 11 |
| | Milano real (<i>Milvus milvus</i>) | 20 |
| | Milano negro (<i>Milvus migrans</i>) | 6 |
| | Busardo ratonero (<i>Buteo buteo</i>) | 67 |
| | Halcón abejero (<i>Pernis apivorus</i>) | 1 |
| | Gavilán común (<i>Accipiter nisus</i>) | 5 |
| | Azor común (<i>Accipiter gentilis</i>) | 6 |
| Falconiformes | Cernícalo vulgar (<i>Falco tinnunculus</i>) | 8 |
| | Halcón peregrino (<i>Falco peregrinus</i>) | 1 |
| | Esmerejón (<i>Falco columbarius</i>) | 1 |
| Columbiformes | Paloma torcaz (<i>Columba palumbus</i>) | 4 |
| Strigiformes | Búho real (<i>Bubo bubo</i>) | 20 |
| Passeriformes | Urraca (<i>Pica pica</i>) | 3 |
| | Corneja (<i>Corvus corne</i>) | 1 |
| | Cuervo (<i>Corvus corax</i>) | 2 |
| | Especie desconocida | 19 |
| | Total | 212 |

Efecto del tipo de apoyo en el riesgo de electrocución

El número de aves electrocutadas varió notablemente según la tipología de los apoyos (Chi Cuadrado = 106,9; g.l. = 3; $p < 0,001$). Los tipos de apoyos más peligrosos fueron aquellos que presentaban los cables por encima de la zona de posada (causantes del 65,94 % de las muertes), seguidos por los apoyos con cables por debajo de la zona de posada (12,32 %) y los apoyos con derivaciones (12,32 %) y por último aquellos con presencia de transformador (9,42 %) (Tabla 2).

Si consideramos el número de apoyos de cada tipo, los apoyos con cables por debajo de la zona de posada, los más comunes (n = 1171), fueron los menos peligrosos, porque sólo el 1,45 % de ellos estuvo relacionado con la muerte de algún ave. Los más peligrosos fueron los apoyos con cables por encima (n = 749), ya que el 12,15 % de ellos provocó alguna muerte por electrocución. Le siguieron, en cuestión de peligrosidad, los apoyos con transformador (n = 259, 5,02 %) y los apoyos con derivaciones (n = 439, 3,87 %).

Tabla 2: Frecuencia de electrocución de aves según el tipo de apoyo del tendido eléctrico. Se indica el número de apoyos y entre paréntesis, el porcentaje del total.

| Tipología de apoyo | Apoyos con mortalidad | Apoyos sin mortalidad | Total de apoyos | Mortalidad respecto al total de apoyos mortales (%) |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---|
| Cables por encima | 91 (12,15 %) | 658 (87,85 %) | 749 | 65,94 |
| Cables por debajo | 17 (1,45 %) | 1154 (98,55 %) | 1171 | 12,32 |
| Derivaciones | 17 (3,87 %) | 422 (96,13 %) | 439 | 12,32 |
| Transformador | 13 (5,02 %) | 246 (94,98 %) | 259 | 9,42 |
| Total | 138 | 2480 | 2618 | 100 |

Influencia del tipo de propiedad de la línea eléctrica sobre la mortalidad de aves

La mortalidad es diferente según la propiedad de los tendidos (Chi Cuadrado = 11,535; g.l. = 1; $p < 0,05$). El número total de muertes fue mayor (n = 24) en tendidos particulares que en los tendidos pertenecientes a compañías (n = 21) (Tabla 3). Cuando se considera el número total de apoyos de cada una de los dos tipos de propiedad, las líneas de particulares resultaron más peligrosas, ya que un 8,25 % de los apoyos de tendidos de propiedad privada estuvieron envueltos en muertes de aves, mientras que en las líneas pertenecientes a compañías el porcentaje fue de un 3,18 %.

Tabla 3: Frecuencia de mortalidad de aves según el tipo de propiedad de la línea eléctrica. Se indica el número de apoyos y entre paréntesis, el porcentaje del total.

| Propiedad de la línea | Apoyos con mortalidad | Apoyos sin mortalidad | Total de apoyos | Mortalidad respecto al total de apoyos mortales (%) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---|
| Compañía | 21 (3,18 %) | 640 (96,82 %) | 661 | 46,67 |
| Particular | 24 (8,25 %) | 267 (91,75 %) | 291 | 53,33 |
| Total | 45 (4,73 %) | 907 (95,27 %) | 952 | 100 |

Hay una diferencia notable en las tipologías de apoyo entre tendidos particulares y tendidos de compañías (Chi Cuadrado = 301,36, g.l. = 3, $p < 0,001$). Los apoyos con cables por debajo de la zona de posada suponen el 65,96 % de los postes de tendidos pertenecientes a compañías (Tabla 4), mientras que los apoyos con cables por encima sólo suponen el 5,14 %. En los tendidos particulares, el 48,11 % de los apoyos presentan cables por encima, y el 26,8 % son apoyos con cables por debajo.

Tabla 4: Frecuencia de diferentes tipos de tendidos eléctricos según el tipo de propiedad de la línea eléctrica. Se indica el número de apoyos y entre paréntesis, el porcentaje del total.

| Tipología de apoyo | Compañía | Particulares | Total de apoyos | Apoyos de compañía respecto del total (%) | Apoyos de particulares respecto del total (%) |
|--------------------|---------------|---------------|-----------------|---|---|
| Cables encima | 34 (19,54 %) | 140 (80,46 %) | 174 | 5,14 | 48,11 |
| Cables debajo | 436 (84,82 %) | 78 (15,18 %) | 514 | 65,96 | 26,80 |
| Derivaciones | 148 (85,06 %) | 26 (19,94 %) | 174 | 22,40 | 8,93 |
| Transformador | 43 (47,78 %) | 47 (52,22 %) | 90 | 6,50 | 16,16 |
| Total | 661 (69,43 %) | 291 (30,57 %) | 952 | 100 | 100 |

Factores ambientales que influyen en la mortalidad de aves por electrocución

La regresión logística indica que las electrocuciones se asociaron positivamente a las tipologías de apoyo con cables por encima de la zona de posada y también aumentaron en los apoyos con derivaciones y con transformadores (Tabla 5, Figura 3). El tipo de uso del suelo no resultó significativo, aunque la mortalidad en los apoyos localizados en usos de tipo urbano fue nula (cuando eliminamos la categoría “urbano” del análisis, el uso del suelo resultó marginalmente significativo, con valores de electrocución mayores en medios agrícolas que en medios naturales)(Figura 4). La cobertura forestal también tuvo un efecto significativo y negativo sobre la electrocución de las aves, siendo mayor ésta en lugares con menor cobertura forestal (Figura 5). No hubo una interacción significativa entre el tipo de uso de suelo y la tipología del apoyo (Tabla 5).

Tabla 5: Resultados del modelo lineal generalizado.

| | Wald. Stat. | p |
|-----------------------------|-------------|----------|
| Intercepto | 482,0 | < 0,001 |
| Cobertura arbórea (%) | 6,09 | 0,014 |
| Uso del suelo | 3,40 | 0,07 |
| Tipología de apoyo | 62,5 | < 0,0001 |
| Uso suelo x Tipología apoyo | 6,67 | 0,08 |

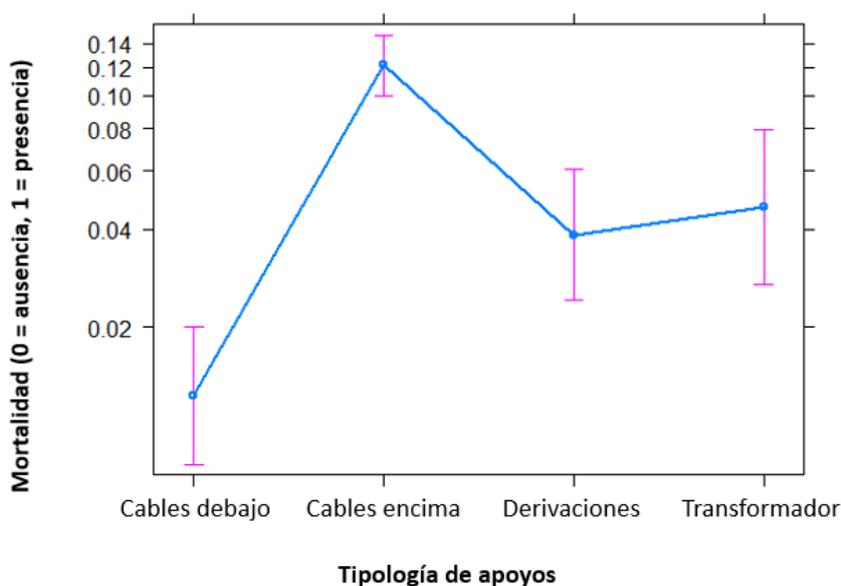


Figura 3: Mortalidad de aves según el tipo de apoyo.

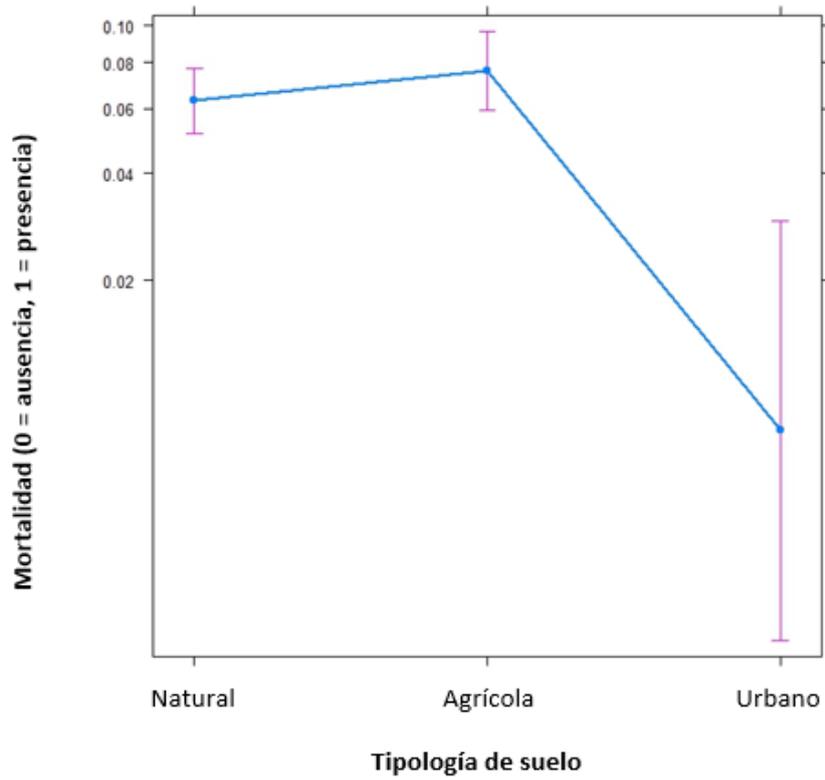


Figura 4: Mortalidad de aves según el tipo de uso de suelo.

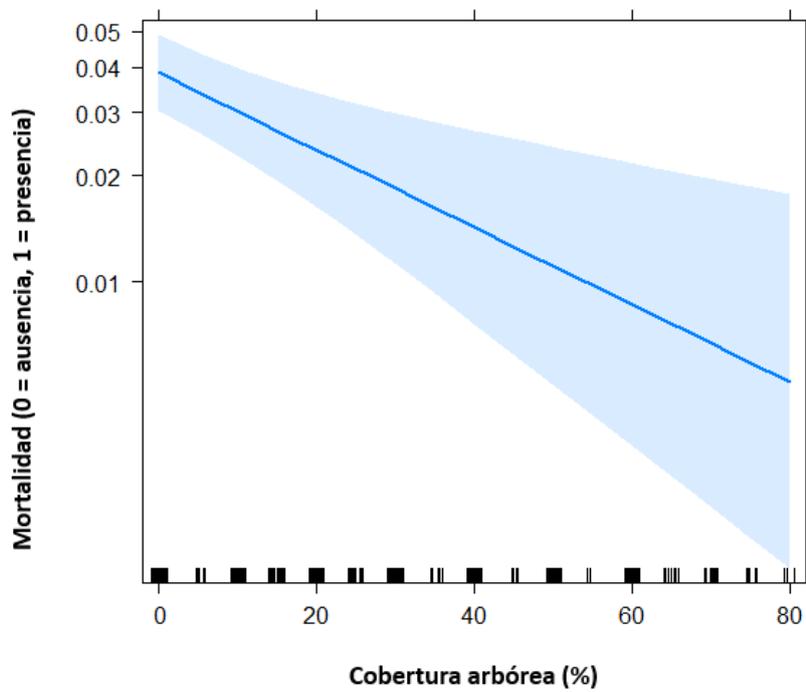


Figura 5: Mortalidad de aves según la cobertura arbórea (%).

DISCUSIÓN

Efectos biológicos que influyen en el riesgo de electrocución

Los resultados muestran que los tendidos eléctricos siguen causando un gran número de muertes de aves por electrocución (Tabla 1), a pesar de la entrada en vigor hace unos diez años del Real Decreto 1432/2008 que establecía criterios para la reducción de la mortalidad de aves asociada a los tendidos. Esto resulta especialmente preocupante si atendemos a la identidad de las especies afectadas, principalmente rapaces, y varias de ellas con estados de conservación desfavorables.

A pesar de que en el presente trabajo los muestreos se dirigieron prioritariamente a zonas con tendidos eléctricos de mayor riesgo, los números siguen siendo elevados. No olvidemos que los datos que se recogen son estimas a la baja, ya que el número de muertes es mayor debido a la desaparición de cadáveres a causa de los carroñeros, que causa que un gran número de víctimas pase desapercibido (en concreto, el 30% de los cadáveres suele desaparecer 2 días después de la muerte, y las aves pequeñas corren más riesgo de desaparecer antes y en mayor magnitud que las aves más grandes (Ponce et al., 2010)).

Entre las especies afectadas por la electrocución, destaca bastante por encima del resto el busardo ratonero, con el mayor número de muertes registrado. Se trata de una de las rapaces más abundantes de la mitad norte de la península ibérica (Madroño et al., 2004). Asimismo, se ven afectadas 3 especies incluidas en la categoría “en peligro” en el Libro Rojo de las aves de España (Madroño et al., 2004): el milano real (20 ejemplares muertos), el águila de Bonelli (9 muertos) y el águila imperial ibérica (11 muertos).

En este estudio, se obtuvo que la envergadura alar no ejerce un efecto significativo en el riesgo de electrocución. Hay que tener en cuenta que este resultado puede estar influido por el bajo tamaño muestral de algunas especies (Tabla 1), y que existen otros factores biológicos en juego, como el comportamiento de cada especie (Bevanger, 1994). Por ejemplo, el hábito de posada condiciona la frecuencia de uso de los apoyos (Janss, 2000): las águilas y las cigüeñas hacen un uso continuado de los apoyos, ya sea para cazar, alimentarse, descansar o nidificar, lo que explica el número elevado de víctimas; mientras, las aves que se alimentan o crían en el suelo corren un menor riesgo de electrocución. Otro factor, que no se ha considerado en el presente estudio, es el comportamiento gregario: las aves gregarias sufren mayor riesgo de electrocución debido a la alta concentración de individuos y la competencia por los lugares de percha en los apoyos (Lehman et al., 2007).

Efecto del diseño de los apoyos sobre el riesgo de electrocución

El diseño de los apoyos influye en el riesgo de electrocución (Figura 2) (Olendorff et al., 1981; Ferrer et al., 1991). Según se había predicho, el tipo de apoyos que provocó un mayor número de muertes es el que presenta cables por encima de la zona de posada del ave (Tabla 2), al haber un mayor riesgo de contacto con los conductores. En el extremo opuesto, el tipo de apoyo menos peligroso es el que presenta cables por debajo de la zona de posada (Ferrer et al., 1991; Bevanger, 1994; Janss y Ferrer, 2001; Ferrer, 2012). Este último tipo de diseño es el más utilizado por las compañías eléctricas (Janss y Sánchez, 1994). Los apoyos con derivaciones también son peligrosos para las aves de mediana y gran envergadura, debido a la cantidad de elementos conductores que presentan, lo que supone un incremento de la probabilidad de contacto. Por su parte, los transformadores suponen un riesgo elevado de electrocución para aves de cualquier envergadura cuando los conductores no están aislados (Guzmán y Castaño, 1998; Garrido y Martín, 2015).

Influencia del tipo de propiedad de la línea eléctrica sobre la mortalidad de aves

De acuerdo con lo que se había predicho, el tipo de propiedad del apoyo puede influir en la probabilidad de mortalidad (Tabla 3). La mayoría de las muertes se registraron en apoyos de propiedad particular (53,33 %) (Tabla 3), a pesar de que este tipo de apoyos representa sólo el 30,57 % de los 952 apoyos analizados en este estudio. Además, el porcentaje de apoyos con presencia de mortalidad es más alto en tendidos de propiedad particular (8,25 %), que en apoyos de tendidos pertenecientes a compañías eléctricas (3,18 %). Esto parece estar relacionado con el hecho de que los apoyos que presentan cables por encima de la zona de posada, la tipología de apoyos más peligrosa, son los predominantes en los apoyos de propiedad particular (80,46 %) (Tabla 4). En contraste, los apoyos con cables por encima de la zona de posada son sólo el 19,54 % de los apoyos pertenecientes a compañías eléctricas.

Este hecho tiene serias implicaciones en términos de conservación, ya que estaría indicando que, mientras que las compañías eléctricas seleccionan tipologías de apoyo menos peligrosas o están haciendo mayores esfuerzos para realizar correcciones y sustituciones de apoyos de tipología peligrosa por aquellos más seguros (Ferrer, 2012), todavía queda mucho por hacer en las líneas particulares. Éstas últimas suelen construirse con recursos económicos limitados y, además, gran parte de estos tendidos se hallan en situación irregular, ya que no se someten a las inspecciones trienales establecidas por el Real Decreto 337/2014 (Pérez-García, 2014; Moreno, 2018), hecho que puede desembocar en sanciones. Por otro lado, la financiación

estatal de ayudas para la corrección de tendidos, establecida por el Real Decreto 264/2017, se halla estancada, y el coste de las correcciones no suele ser asumible para los particulares.

Por lo tanto, es necesario que se lleven a cabo acciones específicas para poder realizar medidas de corrección en tendidos particulares y así reducir su peligrosidad. Esto pasa por el seguimiento y corrección de estos apoyos, pero también puede incluir una línea de financiación continua para ayudar o incentivar a los propietarios a modificar los apoyos peligrosos. Asimismo, también hace falta realizar más estudios acerca de la gestión de este tipo de tendidos y comprobar si esta situación, con predominancia de apoyos de diseño peligroso y con ausencia de revisiones periódicas, se repite en otras regiones.

Factores ambientales que influyen en la mortalidad por electrocución de aves

El modelo de riesgo obtenido indica que el diseño de los apoyos y la cobertura arbórea ejercen un efecto significativo en el riesgo de electrocución de las aves. Asimismo, los apoyos con los cables por encima de la zona de posada resultaron ser los más peligrosos para las aves, seguidos por las derivaciones y los transformadores. Además, el riesgo de electrocución resultó mayor en apoyos situados en ambientes con baja cobertura forestal. Esto último, unido al valor casi significativo del uso del suelo (a pesar de haberse simplificado mucho esta variable) indica que el hábitat también tiene un efecto en la probabilidad de electrocución. El hábitat determina en gran medida la frecuencia de uso de los apoyos (Mañosa, 2001). En zonas donde el número de posaderos naturales (principalmente árboles) es menor, las aves que habitan en estos ambientes abiertos usarán con mayor frecuencia los apoyos para cazar, alimentarse y nidificar, lo que incrementa las probabilidades de sufrir una electrocución (Ferrer et al., 1991; Guzmán y Castaño, 1998).

El efecto de las características del hábitat sobre el riesgo de electrocución no es fácil de discernir. En algunos estudios, se apunta a una menor mortalidad de aves en zonas cultivadas (Guzmán y Castaño, 1998), debido a la presencia humana y la baja disponibilidad de presas. En otros estudios, se observa una mayor mortalidad de aves en zonas de cultivos y con baja cobertura forestal (Hernández-Lambraño et al., 2018). Mientras, otros autores encuentran una mayor mortalidad en áreas con gran cobertura de vegetación y proximidad a núcleos urbanos (Guil et al., 2011). Este contraste podría deberse a que las especies tienen requerimientos de hábitat y hábitos alimenticios diferentes. De este modo, el uso del suelo no parece ser un buen predictor del riesgo de electrocución en los tendidos eléctricos. No obstante, es importante señalar que el número de tipos de uso del suelo empleado en el presente estudio se redujo de forma muy

notable a sólo tres categorías, lo que podría limitar la capacidad predictiva de esta variable. Por otro lado, la medida de uso del suelo empleada (50 m alrededor del apoyo), podría no estar identificando procesos a mayor escala. Por ejemplo, varias especies de rapaces utilizan áreas de campeo que alternan zonas arboladas (donde localizan sus nidos o donde sitúan sus dormitorios) con zonas abiertas (pastizales, cultivos herbáceos y de cereales) donde cazan. Este tipo de configuraciones espaciales no se detectarían en la medida tomada en el presente estudio, que asignó el uso del suelo de los apoyos a una escala mucho menor (50 m alrededor del apoyo).

CONCLUSIÓN

En resumen, la mortalidad de aves por electrocución en tendidos sigue siendo un problema preocupante, especialmente por los efectos que tiene sobre varias especies, principalmente de rapaces con estados de conservación desfavorable (p.e., águila imperial, águila de Bonelli, milano real). El 5,3 % de los apoyos estudiados causaron alguna víctima, siendo el diseño del apoyo el principal factor que determina la mortalidad por electrocución. Los tipos de apoyo con cables por encima de la zona de posada son los más peligrosos, seguidos de aquellos tipos con un número de cables elevado (derivaciones y transformadores). Asimismo, la probabilidad de electrocución aumentó en las zonas con menor cobertura arbórea.

Resulta especialmente interesante, en términos de gestión, el hecho de que los tendidos eléctricos de propiedad particular parecen revestir un mayor riesgo de electrocución (debido a que sus diseños frecuentemente incluyen tipologías con los cables por encima de la zona de posada). En este sentido, es importante que la Administración considere dirigir los esfuerzos de conservación a la renovación o modificación de estos apoyos. En definitiva, es importante seguir realizando seguimientos continuos del impacto de los tendidos eléctricos sobre las aves debido a que siguen siendo un factor de mortalidad no natural y afectan a especies consideradas en peligro.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bayle, P. (1999). Preventing birds of prey problems at transmission lines in western Europe. *Journal of Raptor Research*, 33(1), 43-48.
2. Bevanger, K. (1994). Bird interactions with utility structures: collision and electrocution, causes and mitigating measures. *Ibis*, 136(4), 412-425.
3. Bevanger, K. (1998). Biological and conservation aspects of bird mortality caused by electricity power lines: a review. *Biological conservation*, 86(1), 67-76.
4. Carrete, M., Sánchez-Zapata, J. A., Martínez, J. E., Sánchez, M. Á., & Calvo, J. F. (2002). Factors influencing the decline of a Bonelli's eagle *Hieraetus fasciatus* population in southeastern Spain: demography, habitat or competition? *Biodiversity & Conservation*, 11(6), 975-985.
5. CORINE Land Cover, (2012). Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE), Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.
6. Ferrer, M., de la Riva, M., & Castroviejo, J. (1991). Electrocution of raptors on power lines in southwestern Spain. *Journal of Field Ornithology*, 62(2), 181-190.
7. Ferrer, M. & Negro, J. J. (1992). Tendidos eléctricos y conservación de aves en España. *Ardeola*, 39(2): 23-27.
8. Ferrer, M. (2012). Aves y tendidos eléctricos. *Del conflicto a la solución*. Endesa SA y Fundación Migres, Sevilla.
9. Forrester, J. A., Leopold, D. J., & Hafner, S. D. (2005). Maintaining critical habitat in a heavily managed landscape: effects of power line corridor management on Karner blue butterfly (*Lycaeides melissa samuelis*) habitat. *Restoration Ecology*, 13(3), 488-498.
10. Fox, J. & Bouchet-Valat, M. (2019). Rcmdr: R Commander. R package version 2.5-2.
11. Garrido, J. R. & Martín, J. (2015). Identificación de tendidos eléctricos peligrosos. En: Manual para la protección legal de la biodiversidad para los agentes de la autoridad ambiental en Andalucía. I. Fajardo, J. Martín y A. Ruiz (coordinadores). Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía. Sevilla.
12. González L. M., Margalida, A., Mañosa, S., Sánchez, R., Oria, J., Molina, J. I., Caldera, J., Aranda, A. & Prada, L. (2007). Causes and spatio-temporal variations of non-natural mortality in the vulnerable Spanish Imperial Eagle (*Aquila adalberti*) during a recovery period. *Oryx*, 41(4), 495-502.
13. Guil, F., Fernández-Olalla M., Moreno-Opo, R., Mosqueda, I., Gómez, M. E., Aranda, A., Arredondo, A., Guzmán, J., Oria, J., González, L.M. & Margalida, A. (2011). Minimising

- Mortality in Endangered Raptors Due to Power Lines: The Importance of Spatial Aggregation to Optimize the Application of Mitigation Measures. *PLoS ONE*, 6(11).
14. Guzmán, J. & Castaño, J. P. (1998). Electrocutación de rapaces en líneas eléctricas de distribución en Sierra Morena Oriental y Campo de Montiel. *Ardeola*, 45(2), 161-169.
 15. Haas, D., Nipkow M., Fiedler, G., Schneider, R., Haas, W. & Schürenberg, B. (2005). *Protecting Birds from Powerlines: Convention on the Conservation of European Wildlife and Habitats (Bern Convention)* (Vol. 140). Council of Europe Publishing.
 16. Harness, R. E. & Garrett, M. (1999). Effectiveness of perch guards to prevent raptor electrocutions. *Journal of the Colorado Field Ornithologists*, 33(4), 215–220.
 17. Hernández-Lambraño, R. E., Sánchez-Agudo, J. Á., & Carbonell, R. (2018). Where to start? Development of a spatial tool to prioritise retrofitting of power line poles that are dangerous to raptors. *Journal of Applied Ecology*, 55(6), 2685-2697.
 18. Hume, R. (2007). *Guía de campo de las aves de España y de Europa*. Ediciones Omega.
 19. Infante, O. & Peris, S. (2003). Bird nesting on electric power supports in northwestern Spain. *Ecological Engineering*, 20(4), 321-326.
 20. Janss, G. F. & Sánchez, J. (1994). Análisis de impactos de líneas eléctricas sobre la avifauna. 1eras Jornadas CODA sobre el impacto de los tendidos eléctricos en la avifauna. Coordinadora de Organizaciones de Defensa Ambiental. Madrid.
 21. Janss, G. F. (2000). Avian mortality from power lines: a morphologic approach of a species-specific mortality. *Biological Conservation*, 95(3), 353-359.
 22. Janss, G. F. & Ferrer, M. (2001). Avian electrocution mortality in relation to pole design and adjacent habitat in Spain. *Bird Conservation International*, 11(1), 3-12.
 23. Lehman, R. N., Kennedy, P. L., & Savidge, J. A. (2007). The state of the art in raptor electrocution research: a global review. *Biological conservation*, 136(2), 159-174.
 24. López-López, P., Ferrer, M., Madero, A., Casado, E., & McGrady, M. (2011). Solving man-induced large-scale conservation problems: the Spanish imperial eagle and power lines. *PLoS One*, 6(3).
 25. Loss, S. R., Will, T., & Marra, P. P. (2014). Refining estimates of bird collision and electrocution mortality at power lines in the United States. *PLoS One*, 9(7).
 26. Madroño, A., González, C. & Atienza, J. C. (2004). *Libro Rojo de las aves de España*. Dirección General para la Biodiversidad-SEO/BirdLife. Madrid. 452 pp.
 27. Mañosa, S. (2001). Strategies to identify dangerous electricity pylons for birds. *Biodiversity & Conservation*, 10(11), 1997-2012.

28. Moleón, M., Bautista, J., Garrido, J. R., Martín-Jaramillo, J., Ávila, E. & Madero, A. (2007). Correcting power lines in dispersal areas of Bonelli's eagles: potential positive effects on the raptor community. *Ardeola*, 54(2), 319–325.
29. Moreno, S. (2018). La responsabilidad medioambiental y sancionadora por las electrocuciones de avifauna protegida. *Gabilex: Revista del Gabinete Jurídico de Castilla-La Mancha*, (15), 113-260.
30. Negro, J. J. & Ferrer, M. (1995). Mitigating measures to reduce electrocution of birds on power lines: a comment on Bevanger's review. *Ibis*, 137, 423-424.
31. Olendorff, R. R., Miller, A. D. & Lehman, R. N. (1981). *Suggested practices for raptor protection on power lines: The state of the art in 1981*. Raptor Research Report No. 4. Utah: Raptor Research Foundation.
32. Pérez-García, J. M. (2014). *Modelos predictivos aplicados a la corrección y gestión del impacto de la electrocución de aves en tendidos eléctricos* (Tesis doctoral. Universidad Miguel Hernández, Elche). 166 pp.
33. Pérez-García, J. M., Botella, F. & Sánchez-Zapata, J. A. (2015). Modelos predictivos aplicados a la corrección y gestión del impacto de la electrocución en tendidos eléctricos sobre las aves. *Revista Catalana d'Ornitologia*, 31, 61-83.
34. Ponce, C., Alonso, J. C., Argandoña, G., García Fernández, A., & Carrasco, M. (2010). Carcass removal by scavengers and search accuracy affect bird mortality estimates at power lines. *Animal Conservation*, 13(6), 603-612.
35. Prinsen, H. A. M, Boere, G. C., Pires, N. & Smallie, J. J. (2011). *Review of the conflict between migratory birds and electricity power grids in the African-Eurasian region*. CMS Technical Series No. 20, AEW Technical Series Nº. 20, Bonn, Germany.
36. Soria, M. A. & Guil, F. (2017). Primera aproximación general al impacto provocado por la electrocución de aves rapaces: incidencia sobre las aves e impacto económico asociado, presentado en 7º Congreso Forestal Español, Plasencia.
37. StatSoft (2004). STATISTICA (data analysis software system), versión 7. Tulsa, OK, USA.
38. Tragsatec (2014). Estudio de integración de necesidades de financiación impuestas por el R.D. 1432/2008, con el mecanismo previsto a través de un Plan de Impulso al Medio Ambiente. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Ministerio Para la Transición Ecológica, Gobierno de España. 128 pp.
39. Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499.