

Memoria para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados

# Aplicaciones de la telemetría por satélite al estudio de la ecología de rapaces

Alvaro Soutullo

Estación Biológica Terra Natura.

IU CIBIO. Universidad de Alicante.

Director Dr. Vicente Urios Moliner

Programa de Doctorado: "Biodiversidad: gestión y conservación de las especies y sus hábitats".



## RESUMEN

La aplicación de la tecnología satelital al estudio de animales silvestres ha generado una revolución en los estudios de ecología y comportamiento de rapaces. En España, la aplicación de esta tecnología al estudio de la dispersión juvenil del águila real (*Aquila chrysaetos*) y la migración del aguilucho cenizo (*Circus pygargus*) ha permitido conocer aspectos hasta ahora desconocidos de la biología de esas dos especies. Entre ellos, los cambios en los patrones de uso del espacio que tienen lugar a lo largo del primer año de dispersión del águila real y sus patrones de actividad diarios, y las rutas de migración y los sitios de residencia fuera de Europa de una población de aguiluchos cenizos que se reproduce en el NE de España. El potencial de la información recabada es enorme ya que hasta ahora sólo se ha avanzado en la descripción de aspectos básicos de estos procesos.

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas tres décadas la aplicación de la tecnología satelital al seguimiento de rapaces ha revolucionado el estudio de su ecología y comportamiento, permitiendo monitorear individuos de forma permanente a lo largo de todo el globo, y estudiar en detalle aspectos de su biología imposibles de abordar previamente (Berthold et al., 1995; Fuller et al., 1995; Meyburg et al., 1995a,b, 1998; Higuchi et al., 1996; Guan & Higuchi, 2000; Hake et al., 2001, 2003; Kjellén et al., 2001; Kenward, 2001; McGrady et al., 2003; Ganusevich et al., 2004; Jiguet & Villarubias, 2004; Cadahía et al., 2005; Judas et al., 2006; Soutullo et al. 2006a,b,c, en prensa). Aunque inicialmente restringida a estudios de grandes vertebrados, avances recientes permiten su utilización con animales de menos de 300 g (Soutullo et al., en prensa).

Para el monitoreo de animales silvestres, el sistema de seguimiento por satélites más usado es el sistema Argos. Este utiliza información que envían los transmisores (PTTs) adosados a los individuos estudiados para calcular la posición de los mismos. Como la exactitud con la que la posición es estimada varía, el sistema asigna a cada estimación una categoría (LC) que refleja la exactitud nominal de la misma (Fancy et al., 1989; Keating et al., 1991; Kenward, 2001; Vincent et al., 2002). Son varios los factores que afectan la exactitud de las localizaciones, incluyendo la altura del PTT, la velocidad con la que se mueven, la estabilidad de la frecuencia del mensaje enviado por lo mismos (que es afectada por cambios en la temperatura), el número y la distribución de los mensajes recibidos por el satélite al pasar cerca de un PTT, la distancia del PTT a la ruta del satélite, y errores propios del satélite al estimar su posición (Keating et al. 1991). Cuanto más pequeño un transmisor, más expuesto está a cambios en temperatura, y por lo tanto más probable es que el error en la estimación de la posición sea mayor (Vincent et al.,

2002). La situación es aún peor cuando los PTTs están adosados a rapaces que cambian frecuentemente de velocidad y altura (Keating et al., 1991).

El reciente desarrollo de nuevos transmisores con GPS incorporado ha permitido sin embargo un incremento significativo en la exactitud de las localizaciones obtenidas. Mientras que los PTTs convencionales utilizan el efecto Doppler para calcular la posición del transmisor a medida que un satélite Argos se acerca o aleja del mismo (Fancy et al., 1989; Hays et al., 2001), los PTTs con GPS utilizan la red de satélites GPS para estimar su posición, y sólo utilizan el sistema Argos para enviar esa información a los centros de procesamiento de datos, permitiendo así estimaciones de la posición con errores inferiores a los 10 m (Soutullo et al., en prensa).

Además, los transmisores con GPS tienen la ventaja de que permiten elegir el número de localizaciones que se quiere obtener cada día, permitiendo un seguimiento muy detallado (e.g., segundo a segundo) de los animales estudiados (e.g., Weimerskirch et al. 2002), y que es independiente de la calidad y la frecuencia de las localizaciones de Argos. De hecho, esto los hace particularmente útiles en zonas como Europa o áreas con fuertes interferencias electromagnéticas, que perjudican el desempeño del sistema Argos (Soutullo et al., en prensa).

Sin embargo, mientras que los transmisores con GPS más pequeños pesan 30 g y no pueden ser utilizados con animales de menos de 1000g de peso, los transmisores convencionales más pequeños no superan los 9.5 g, permitiendo su uso en especies de menos de 300 g de peso. Esto implica que mientras que sólo unas 500 especies de aves pueden ser monitoreadas con PTTs con GPS, más del triple puede ser estudiadas con transmisores convencionales (Soutullo et al., en prensa).

Aquí presentamos los resultados del seguimiento de dos especies en el extremo de ese continuo: el águila real (*Aquila chrysaetos*), que puede superar los 4 kg de peso, y el aguilucho

cenizo (*Circus pygargus*), que raramente supera los 350 g. Desde el año 2002 hemos utilizado la telemetría satelital para monitorear la dispersión juvenil del águila real en España (Soutullo et al., 2006a,b,c), y la migración del aguilucho cenizo (Limiñana et al., enviado). La presente memoria es un resumen de los aportes que hemos realizados hasta la fecha al conocimiento de estos aspectos de la biología de esas dos especies.

### *Dispersión águila real*

El águila real es una rapaz monógama, con una amplia distribución paleártica (Cramp & Simmons, 1980). La primera reproducción tiene lugar alrededor del cuarto o quinto año de vida (Brown & Amadon, 1968). Las parejas permanecen en el mismo territorio todo el año, y en general ponen dos huevos por temporada reproductiva. La incubación lleva unos 43 a 45 días, y las parejas suelen tener más de un nido que utilizan de forma alternativa año a año (Beecham & Kochert, 1975). Los pollos abandonan el nido unos 60 a 80 días después de eclosionar (Watson, 1997). La vida de esta especie en el período comprendido entre el momento en que abandonan el territorio parental, y el momento en que ingresan a la población reproductiva es todavía un misterio (Walker, 1987; Watson 1997). La mayor parte de la información disponible se basa en el estudio de unos pocos animales seguidos mediante radiotelemetría (e.g., Bahat, 1992; Haller, 1994, 1996; Grant & McGrady, 1999; O'Toole et al., 1999) y algunos estudios de recuperación de anillas (e.g., Fremming, 1980; Steenhof et al., 1984; Watson, 1997). Los estudios realizados en España mediante telemetría satelital aportan algunos de los primeros datos disponibles para la especie sobre su comportamiento durante los primeros meses de la dispersión juvenil, incluyendo información sobre los patrones de actividad diaria (Soutullo et al., 2006a,b,c).

### *Migración aguilucho cenizo*

El aguilucho cenizo es una especie migratoria que se reproduce en Europa y Asia occidental, y pasa el invierno en el África sub-Sahariana (Cramp & Simmons, 1980; Clarke, 1996). Es una de las pocas especies de rapaces completamente migratorias, sin ninguna superposición entre las áreas utilizadas durante la estación reproductiva y el resto del año (Clarke, 1996). Si bien se considera que las poblaciones que se reproducen en Europa occidental pasan el invierno en África occidental, no existe información precisa sobre los sitios de invernada de estas poblaciones. Hasta la fecha la mayoría de los estudios sobre los movimientos migratorios de esta especie se basan en observaciones de campo (Bernis, 1980; Finlayson, 1992; Shirihai & Christie, 1992) o en datos de recuperación de anillas (ver García & Arroyo, 1998 por una revisión). Los estudios realizados en España constituyen el primer reporte detallado de los movimientos realizados por la especie durante la migración otoñal (Limiñana et al., enviado).

## METODOS

### *Dispersión águila real*

Entre Junio de 2002 y Julio de 2004 se capturaron 13 crías de águila real en la Comunidad Valenciana, la Región de Murcia y Cataluña. Los pollos fueron capturados en los nidos, pesados y medidos, y se les colocó un transmisor satelital (PTT) antes de volver a colocarlos en los nidos. También se tomaron muestras de sangre para sexarlos con el método descrito por Griffiths et al. (1998). Se utilizaron tres tipos de transmisores: cuatro PTT-100 de 45 g, cinco PTT-100 solares de 50 g (uno fue recuperado en el campo y reutilizado), y tres Argos/GPS PTT-100 solares de 70g. Los transmisores fijados en 2002 se programaron con un ciclo de 8 hs. encendidos y 120 hs. apagados, todos los demás con un ciclo de 16 y 56 hs., respectivamente. El peso del equipo nunca superó el 2.5% del peso de los juveniles ( $1.81\% \pm 0.29$ ,  $n = 13$ ), por debajo del 3% sugerido por Kenward (2001) para minimizar los efectos del peso extra sobre los movimientos de los individuos. Los pollos fueron marcados alrededor de los 50 días de edad, ya que a esa edad prácticamente han alcanzado el tamaño adulto, pero el riesgo de que abandonen el nido es mínimo (Watson, 1997).

Las localizaciones fueron obtenidas a través del sistema Argos y los individuos seguidos hasta el 30 de octubre de 2004. Para los análisis se descartaron las localizaciones en LCs B y aquellas en LCs 0 y A que no eran plausibles desde el punto de vista biológico (Hays et al., 2001). A efectos de estudiar el desarrollo temporal del proceso de dispersión juvenil se dividió el primer año de vida en "meses" de 30 días de duración, comenzando a partir de la fecha en que cada individuo alcanzó los 60 días de edad (asumiendo que el marcaje se realizó exactamente el día 50). Para cada localización obtenida se calculó la "distancia al nido" (D), y la distancia media



(Dm) en cada período (“mes”). Para cada individuo se realizaron ANOVAs de Kruskal-Wallis para evaluar si existen diferencias entre meses en Dm, y el test de Games-Howell (Zar, 1999) para realizar todas las comparaciones entre dos meses. Para los individuos para los que había datos disponibles para todo el primer año de vida también se calculó la distancia máxima al nido (DMax) y la edad a la que alcanzaron esa distancia. Para evaluar si existen diferencias entre sexos en DMax y la edad a la que alcanzaron DMax se utilizó el test de Mann-Whitney.

También se calculó el tamaño del mínimo polígono convexo (MCPM) incluyendo todas las localizaciones de cada “mes”, su centroide, el porcentaje de superposición con el MCPM del mes anterior, la distancia entre centroides consecutivos (DC), el tamaño del mínimo polígono convexo incluyendo todas las localizaciones registradas hasta la fecha (MCPAc), y el incremento en el MCPAc respecto al del mes anterior ( $\Delta$ MCPAc). Todos estos cálculos fueron realizados en Arcview utilizando las extensiones Animal Movement (Hooge & Eichenlaub, 1997), Xtools y Geoprocessing. Para estudiar si existen diferencias entre meses y sexos, y entre sexos dentro del mismo mes (i.e., interacciones) en estas variables se realizaron ANOVAs de medidas repetidas utilizando el programa STATISTICA (con los meses como factores intra-sujetos). Todos los demás análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS. Nuevamente, para los individuos para los que había datos disponibles para todo el primer año de vida se calculó el mínimo polígono convexo incluyendo todas las localizaciones registradas en el año (MCPT). Para evaluar si existen diferencias entre sexos en MCPT se utilizó el test de Mann-Whitney.

Por último, para estimar la fecha de comienzo de la dispersión juvenil se calculó el coeficiente de variación de D (DCV) para cada “mes”, y se usó la fecha del registro más central del “mes” en que DCV fue máximo para determinar la edad al comienzo de la dispersión (AO) de cada individuo. Para la descripción de los patrones de actividad diaria se utilizaron sólo los datos de

los transmisores con GPS. Como los movimientos previos a la dispersión se restringen a una pequeña área alrededor del nido (e.g., Walker, 1987; Haller, 1996; Watson, 1997), sólo se analizaron localizaciones obtenidas una vez comenzada la dispersión juvenil. Con ellas se calculó la distancia media cubierta en una hora, y a lo largo de todo el día. La primera fue estimada como la distancia en línea recta entre dos localizaciones obtenidas con una hora de diferencia. La distancia recorrida a lo largo del día se estimó como la distancia entre los dos puntos más alejados registrados en un mismo día. Para evitar subestimaciones excesivas para calcular esta última sólo se utilizó información de días en la que al menos tres localizaciones fueron obtenidas, al menos una durante el período de máxima actividad diaria. Ambas distancias son sin embargo subestimaciones de la distancia real recorrida en esos períodos. Se utilizó el test de Kruskal-Wallis para analizar diferencias en las distancias recorridas en una hora a lo largo del día. Para este análisis y el análisis de las distancias recorridas en un día y la frecuencia de movimientos de diferente longitud se utilizaron todos los datos sin diferenciar entre individuos.

#### *Migración aguilucho cenizo*

Entre Mayo y Junio de 2006 se capturaron 10 aguiluchos cenizos (seis machos y cuatro hembras) en una zona de cría en la provincia de Castellón (ver Limiñana et al., 2006a,b y Soutullo et al., 2006d por detalles sobre el área de estudio y la población). Los individuos fueron sexados, pesados y anillados, y se les colocó un transmisor PTT-100 solar de 9.5 g. Para los primeros tres meses de operación los transmisores se programaron con un ciclo de 6 hs. encendidos y 16 hs. apagados. Para el resto del período de estudio se programaron con un ciclo de 10 y 56 hs., respectivamente. Las localizaciones se obtuvieron a través del sistema Argos, y los individuos fueron seguidos hasta el 17 de Octubre de 2006. Los datos fueron administrados a través del programa STAT (Coyne & Godley, 2005). Sólo se utilizaron localizaciones en LCs 3, 2,

1 y 0. Las posiciones obtenidas con menos de una hora de diferencia de la localización previa fueron desechadas.

El comienzo de la migración se determinó en base a un cambio abrupto en el patrón de movimientos de los individuos durante la fase premigratoria (Limiñana et al., en prep.). Para estimar la fecha del final de la migración se utilizaron regresiones por partes ("breakpoint regressions"; Neter et al., 1985), utilizando todos los datos obtenidos a partir del día de comienzo de la migración. Las regresiones se realizaron utilizando el programa Statistica, todos los demás análisis con el programa SPSS. Se calcularon dos puntos de quiebre utilizando la siguiente regresión:

$$\text{Fecha} = \text{Constante} + \text{Pendiente1} * \text{Distancia} + \text{Pendiente2} * (\text{Distancia} - \text{Quiebre1}) * (\text{Distancia} > \text{Quiebre1}) + \text{Pendiente3} * (\text{Distancia} - \text{Quiebre2}) * (\text{Distancia} > \text{Quiebre2})$$

Con "fecha" indicando el día del año en el que se obtuvo la localización, "distancia" indicando la distancia entre la posición correspondiente y el sitio de marcaje. "Distancia > Quiebre" asume un valor de 1 o 0 dependiendo de si la desigualdad es verdadera o falsa, respectivamente. Los otros parámetros se estimaron utilizando el método "Quasi"-Newtoniano, con una mejora en la función de pérdida  $<0.0001$  como criterio de convergencia y  $(\text{observado-predicho})^2$  como función de pérdida. Como valores iniciales para "Constante", "Quiebre1" y "Quiebre2" se asignaron la fecha de comienzo de la migración, 1250 y 2500, respectivamente. Para estos últimos, los valores corresponden aproximadamente a la distancia desde el sitio de marcaje a los límites norte y sur de desierto del Sahara. Se consideró como fecha de fin de la migración el primer día que los individuos fueron localizados a una distancia del sitio de marcaje mayor al segundo punto de quiebre.

Con estos datos se calcularon la duración de la migración, la distancia cubierta durante la misma, la distancia media (distancia/duración) y máxima (distancia entre localizaciones obtenidas con una diferencia de aproximadamente 24 hs.) recorrida en un día, la distancia recorrida en una hora (considerando sólo localizaciones obtenidas con menos de cuatro horas de diferencia), y la altura sobre el terreno a la que fueron localizados. Esto último se calculó restando a la altitud calculada por el GPS para cada localización, la altura del terreno. La altura del terreno se obtuvo del modelo digital del terreno de Google Earth ([earth.google.com](http://earth.google.com)). Finalmente, realizamos regresiones lineales y cuadráticas entre “velocidad” (distancia/hora) y la hora del día para explorar si existen diferencias en la “velocidad” a la que vuelan los individuos a distintas horas del día.

## RESULTADOS

### *Dispersión águila real*

La mayor parte de los individuos se alejó progresivamente del nido durante el primer año de vida (Fig. 1). Las diferencias en la distancia media al nido a lo largo del año ( $\chi^2 = 66.8$ ,  $df = 10$ ,  $P < 0.0001$ ) probablemente reflejan diferentes etapas de la ontogenia de las águilas reales (Tabla 1). La distancia máxima al nido (DMax) osciló entre los 57.7 y 184.3 km (Tabla 2), y fue considerablemente mayor ( $Z = 1.77$ ,  $n = 7$ ,  $P = 0.077$ ) en hembras ( $138.5 \pm 44.5$  km) que en machos ( $70.8 \pm 14.0$  km). Sin embargo, no se observaron diferencias entre sexos en la edad a la que la alcanzaron (machos:  $329 \pm 32$  días, hembras:  $312 \pm 20$  días;  $Z = 1.06$ ,  $n = 7$ ,  $P = 0.29$ ; Tabla 2). Los valores indican media  $\pm$  desvío típico.

Asimismo, el área total explorada (MCPAc) aumentó con el tiempo (Fig. 2a;  $F_{9,27} = 3.98$ ,  $P = 0.003$ ), pero aunque en las hembras aumentó de forma más marcada en los últimos meses del año, no se observaron diferencias significativas entre sexos ( $F_{1,3} = 0.08$ ,  $P = 0.80$ ). Con excepción de un marcado incremento en Marzo, el incremento mensual ( $\Delta$ MCPAc) fue relativamente constante durante todo el año (Fig. 2b;  $F_{7,28} = 1.71$ ,  $P = 0.35$ ) y similar en ambos sexos ( $F_{1,4} = 1.72$ ,  $P = 0.26$ ; Tabla 2). Si bien el tamaño de las áreas utilizadas en un mes (MCPM) tendió a aumentar hacia el final del año, las diferencias tampoco fueron estadísticamente significativas (Fig. 2c;  $F_{9,18} = 1.30$ ,  $P = 0.30$ ), y el tamaño fue similar en ambos sexos ( $F_{1,2} = 0.31$ ,  $P = 0.63$ ). La superposición entre áreas utilizadas consecutivamente (OMCP) también fue similar en ambos sexos (Fig. 2d;  $F_{1,3} = 3.60$ ,  $P = 0.15$ ; Tabla 2) y se mantuvo relativamente constante a lo largo del año ( $F_{8,24} = 0.96$ ,  $P = 0.49$ ). En cambio, la distancia entre áreas usadas consecutivamente (DC) aumentó a lo largo del año (Fig. 2e;  $F_{9,18} = 5.73$ ,  $p < 0.001$ ;

Tabla 2) de forma similar en ambos sexos ( $F_{1,2} = 0.26$ ,  $P = 0.66$ ). En todos los casos las diferencias entre sexos dentro del mismos "mes" (i.e., interacciones) no fueron significativas ( $P > 0.48$ ).

Finalmente, aunque el área total explorada (MCPT) por las hembras a lo largo del año fue considerablemente mayor que la explorada por los machos, las diferencias no fueron estadísticamente significativas (área media  $\pm$  desvío típico para machos:  $3713 \pm 2586$  km<sup>2</sup>, hembras:  $10\ 652 \pm 7451$  km<sup>2</sup>;  $Z = 1.41$ ,  $n = 7$ ,  $P = 0.16$ ; Tabla 2). Probablemente esto refleja el pequeño tamaño de las muestras en la segunda mitad del año, donde las diferencias observadas fueron más evidentes. Además, probablemente también resulta de la gran variabilidad de los datos, que a su vez refleja grandes diferencias en el comportamiento individual, no asociadas al sexo.

El comienzo de la dispersión juvenil tuvo lugar alrededor del quinto mes de vida (Setiembre; Tabla 2). Sólo se confirmó la muerte de un individuo durante el periodo de estudio. Excluyendo los cinco individuos marcados en 2004 (que tenían unos seis meses al final del estudio), esto implica que 87.5% de los individuos monitoreados sobrevivieron al primer año de vida.

Finalmente, en los tres individuos marcados con transmisores con GPS se observaron diferencias a lo largo del día en el patrón de movimientos. Si bien se registraron movimientos de más de 20 km en una hora, 95% de los movimientos no excedieron los 9 km y 64% fueron de menos de 1 km (Fig. 3). Tanto los movimientos más largos como la mayor proporción de movimientos de larga distancia se centraron entre las 11 AM y las 6 PM, el pico de actividades diarias, con un abrupto descenso tras las 6 PM y ningún movimiento registrado después de las 9 PM (Fig. 3; Tabla 3).

Las distancias recorridas durante el pico de actividades varían ampliamente, con distancias medias de 2 a 6 km. Las distancias recorridas a lo largo de un día oscilaron entre los 0.1 y los 53.2 km; con una media de 14.0 km (desvío típico = 13.4; mediana = 9.1) y un 75% que no supera los 20 km (Fig. 4).

### *Migración aguilucho cenizo*

Al menos seis de los 10 individuos marcados completaron su migración desde sus áreas de cría en el NE de España hasta el África Occidental (tres machos y tres hembras). Si bien los seis cruzaron por el sur de España, es probable que no todos lo hayan hecho a través del Estrecho de Gibraltar (Fig. 5). Los aguiluchos siguieron rutas diferentes, y mientras algunos realizaron paradas de más de una semana, otros no se detuvieron más de uno o dos días en el mismo sitio (Fig. 6). La mayor parte de los movimientos se observaron durante la tarde, con un pico entre las 3 y las 8 PM, y ningún movimiento registrado entre las 8 PM y 5 AM (Fig. 7).

Para cada individuo la Tabla 4 muestra las fechas de comienzo y fin de la migración, la distancia total de la migración, las distancias máxima y promedio recorridas en una hora, la duración de la migración, la máxima distancia registrada al sitio de marcaje, y la altura promedio sobre el nivel del suelo a la que fueron localizados los individuos. En general, los aguiluchos fueron localizados cerca del suelo, con sólo un registro por encima de los 210 m (617 m), que fue obtenido inmediatamente después de pasar los Atlas. En general, la altitud registrada se ajusta estrechamente a la topografía del terreno, con los individuos bajando al nivel mar al cruzar el Mediterráneo (35° N), y subiendo hasta cerca de los 2000 m al cruzar los Atlas (Marruecos, 32-30° N).

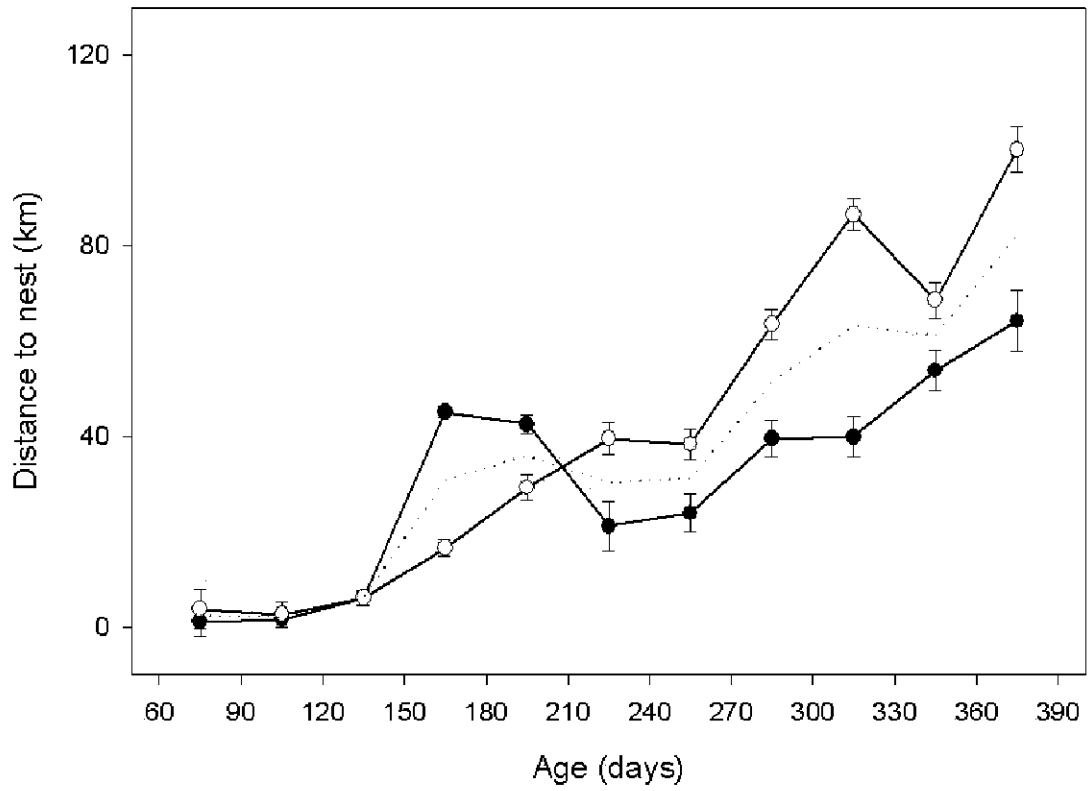


Figura 1. Alejamiento progresivo del nido de 13 águilas reales durante su primer año de vida. Los puntos negros indican distancias medias mensuales ( $\pm$  ET) para machos, y los puntos blancos distancias medias para hembras. La línea punteada indican los valores promedios considerando todos los individuos.



Tabla 1. Distancia media ( $\pm$  ET) al nido de 13 águilas reales durante su primer año de vida. En base a diferencias en la distancia al nido (test de Games-Howell,  $p > 0.05$ ) es posible distinguir cuatro fases distintas durante dicho período.

Edad (días)	Distancia (km)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
60-90	2.5 $\pm$ 2.6	xxx			
90-120	2.2 $\pm$ 1.6	xxx			
120-150	6.2 $\pm$ 1.0		xxx		
150-180	31.0 $\pm$ 1.1			xxx	
180-210	36.0 $\pm$ 1.7			xxx	
210-240	30.4 $\pm$ 3.1			xxx	
240-270	31.2 $\pm$ 2.5			xxx	
270-300	51.6 $\pm$ 2.5				xxx
300-330	63.3 $\pm$ 2.7				xxx
330-360	61.3 $\pm$ 2.8				xxx
360-390	82.3 $\pm$ 4.0				

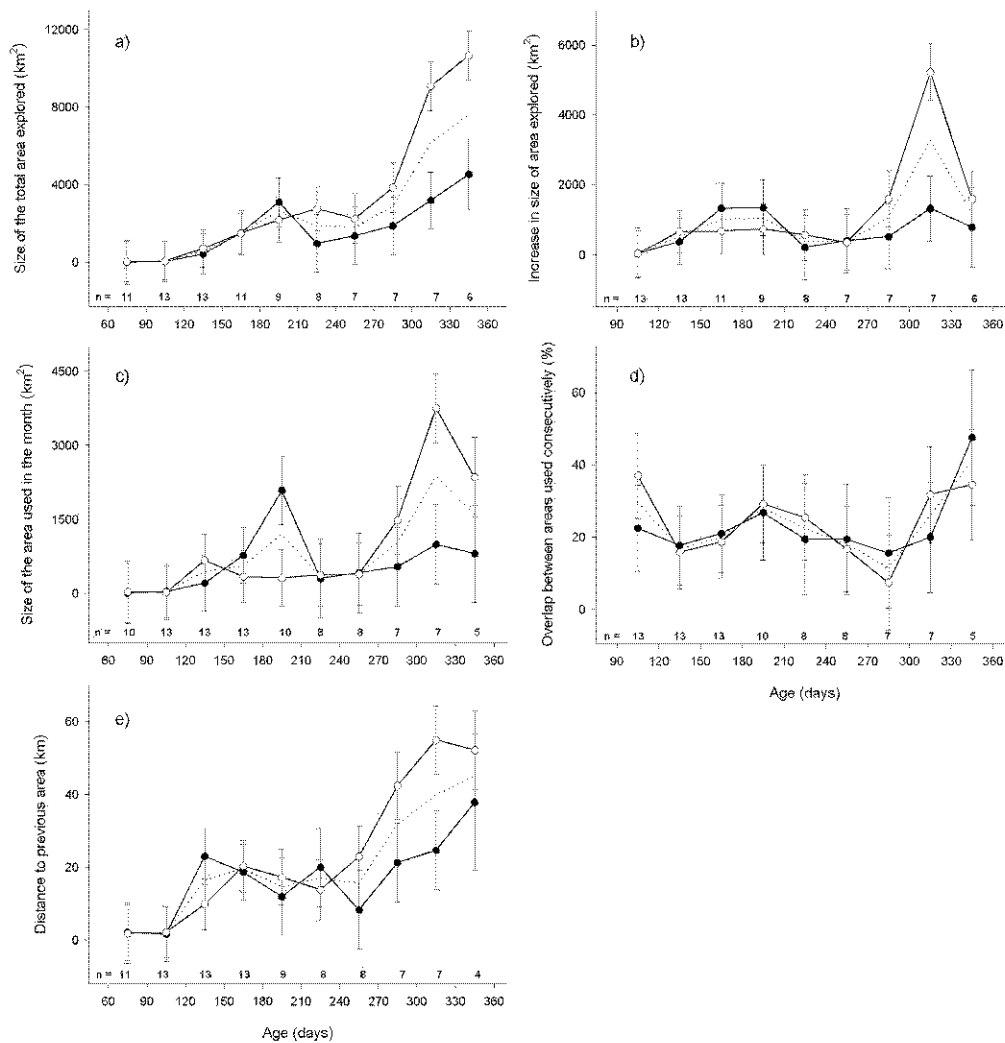


Figura 2. Dispersión de 13 águilas reales durante su primer año de vida. Se indican: a) cambios en el tamaño del mínimo polígono convexo incluyendo todas las localizaciones (MCPAc); b) el incremento mensual en el tamaño de ese polígono ( $\Delta$ MCPAc); c) el tamaño del polígono incluyendo todas las localizaciones registradas cada mes (MCPM); d) la superposición de esos polígonos con el polígono calculado para mes anterior (OMCP); y e) la distancia entre los centroides de dichos polígonos (DC). Los puntos negros indican los valores promedio ( $\pm$  ET) para los machos, los blancos indican dichos valores para las hembras, y la línea punteada el promedio de todos los individuos.

Tabla 2. Características de 13 águilas reales monitoreadas durante el primer año de vida mediante telemetría satelital. Se indican: sexo, peso y fecha de marcaje (a los 50 días de edad), la edad al comienzo de la dispersión, la máxima distancia registrada al nido (DMax), el tamaño total del área explorada durante todo el año (MCPT), el incremento promedio ( $\pm$  ET) en las áreas utilizadas en meses consecutivos ( $\Delta$ MCPPac), y el porcentaje de superposición (OMCP) entre ellas ( $\pm$  ET).

PTT Id.	Sexo	Peso (g)	Fecha de marcaje	Edad al comienzo de la Dispersión (días)	DMax (km)	MCPT (km <sup>2</sup> )	$\Delta$ MCPPac (km <sup>2</sup> )	OMCP (%)
34464	Macho	2925	11/06/02	75.5	69.23	6694	742 $\pm$ 240	27.2 $\pm$ 7.7
34465	Hembra	3400	12/06/02	153	174.75	16690	1854 $\pm$ 1019	15.3 $\pm$ 6.6
34466	Hembra	4025	10/06/02	128	136.99	3492	383 $\pm$ 340	27.4 $\pm$ 11.9
34472	Macho	3400	10/06/02	114	85.51	2371	291 $\pm$ 156	22.5 $\pm$ 7.7
34473	Hembra	3860	11/06/02	157	150.61	17466	1939 $\pm$ 1066	20.1 $\pm$ 7.3
34474	Hembra	3525	12/06/02	137	77.71	4959	551 $\pm$ 200	17.1 $\pm$ 5.2
34475	Macho	2900	27/05/02	140	57.73	2074	258 $\pm$ 161	31.7 $\pm$ 7.5
39706	Macho	2360	07/07/04	103	-	-	743 $\pm$ 613	4.8 $\pm$ 3.2
39714a	Hembra	3315	09/06/03	107	-	-	1195 $\pm$ 837	25.0 $\pm$ 15.7
39714b	Hembra	3300	09/06/04	-	-	-	22 $\pm$ 0	60.3 $\pm$ 8.5
49180	Macho	3310	08/06/04	103	-	-	195 $\pm$ 194	13.3 $\pm$ 6.8
49181	Macho	3000	09/06/04	137	130.95	-	2526 $\pm$ 1262	9.3 $\pm$ 8.1
49182	Hembra	3940	22/06/04	107.5	163.69	-	835 $\pm$ 762	36.9 $\pm$ 31.6

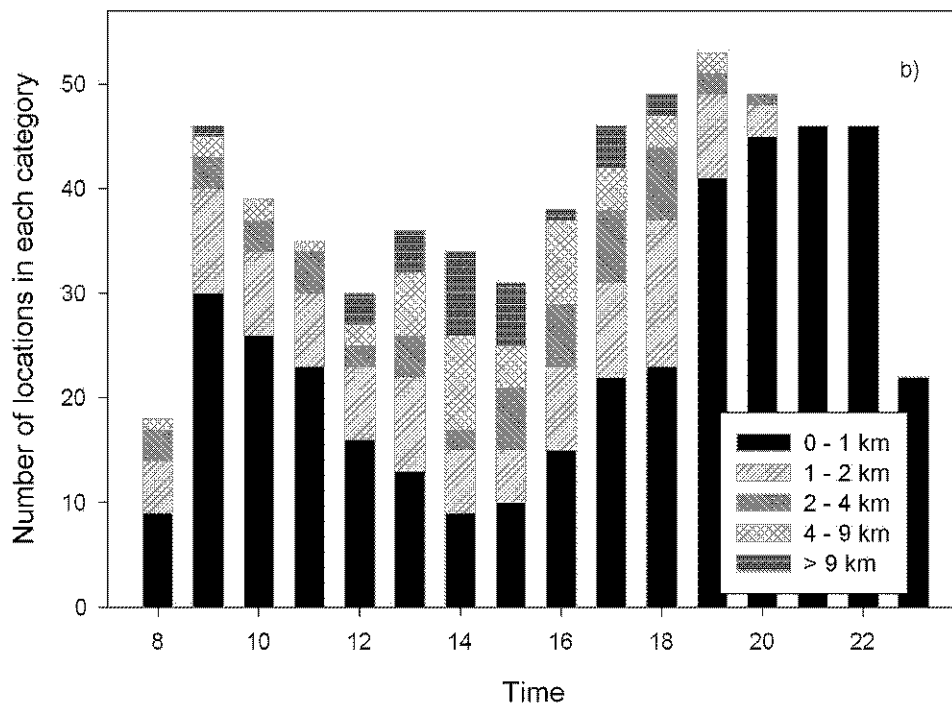
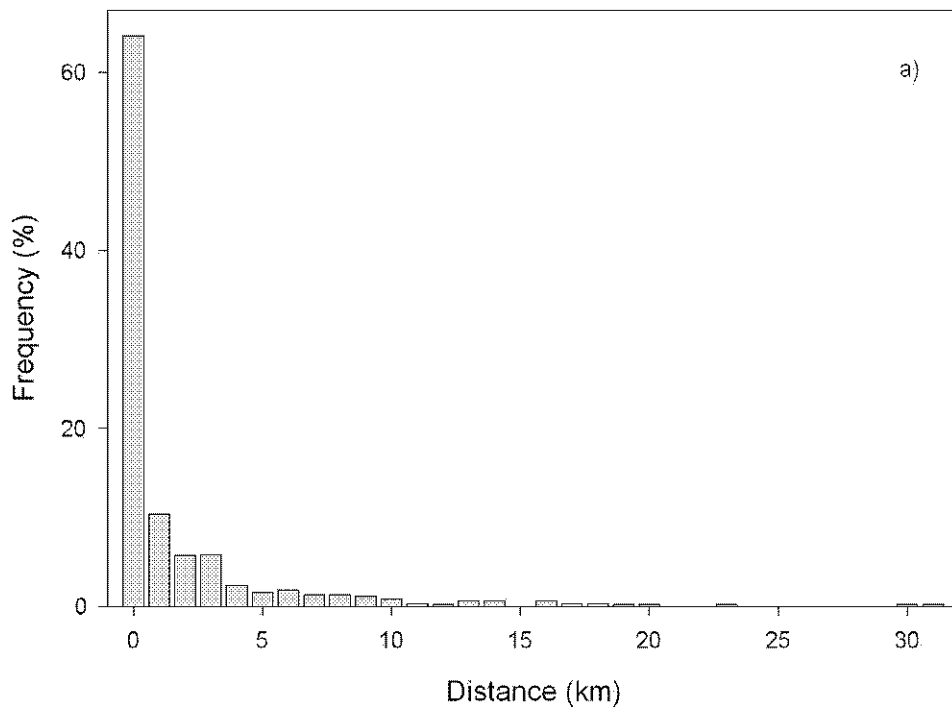


Figura 3. Movimientos diarios de tres águilas reales: a) Frecuencia de movimientos de diferente longitud en una hora (n = 618); b) Frecuencia de movimientos de diferente longitud a lo largo del día.

Tabla 3. Diferencias en las distancias recorridas en una hora por tres águilas reales a lo largo del día.

Hora	Macho N = 34		Macho N = 484		Hembra N = 100	
	Media $\pm$ DT	Min - Max	Media $\pm$ DT	Min - Max	Media $\pm$ DT	Min - Max
8	-	-	1.4 $\pm$ 1.5	0.0 – 4.8	10.0	-
9	0.3 $\pm$ 0.4	0.0 – 0.6	1.8 $\pm$ 3.3	0.0 – 19.0	0.7 $\pm$ 0.8	0.0 – 2.3
10	0.0	-	1.2 $\pm$ 1.7	0.0 – 8.6	0.4 $\pm$ 0.5	0.1 – 1.1
11	2.2 $\pm$ 2.4	0.5 – 3.8	1.1 $\pm$ 1.4	0.0 – 6.6	0.1 $\pm$ 0.1	0.0 – 0.2
12	7.3 $\pm$ 2.3	5.7 – 8.9	2.2 $\pm$ 3.7	0.0 – 14.3	5.9 $\pm$ 10.0	0.1 – 23.6
13	3.4 $\pm$ 2.8	1.0 – 6.4	3.6 $\pm$ 4.5	0.0 – 18.1	4.7 $\pm$ 5.6	0.0 – 13.1
14	9.8 $\pm$ 6.3	4.7 – 16.8	5.7 $\pm$ 5.3	0.0 – 17.8	5.7 $\pm$ 7.5	0.0 – 16.9
15	13.2	-	5.6 $\pm$ 8.9	0.0 – 31.5	5.4 $\pm$ 4.4	0.0 – 10.5
16	17.7	-	3.0 $\pm$ 3.1	0.0 – 9.6	2.0 $\pm$ 2.8	0.0 – 8.0
17	1.9 $\pm$ 2.2	0.4 – 3.5	2.7 $\pm$ 3.9	0.0 – 16.0	3.6 $\pm$ 4.7	0.0 – 14.3
18	5.4 $\pm$ 9.3	0.0 – 19.4	1.4 $\pm$ 1.5	0.0 – 6.5	4.3 $\pm$ 5.8	0.2 – 20.2
19	0.6 $\pm$ 1.0	0.0 – 2.0	0.9 $\pm$ 1.8	0.0 – 8.6	0.8 $\pm$ 1.2	0.0 – 3.7
20	0.2 $\pm$ 0.2	0.0 – 0.5	0.5 $\pm$ 0.8	0.0 – 3.5	0.3 $\pm$ 0.2	0.0 – 0.5
21	0.0 $\pm$ 0.0	0.0 – 0.0	0.1 $\pm$ 0.1	0.0 – 0.6	0.1 $\pm$ 0.3	0.0 – 0.9
22	0.0	-	0.0 $\pm$ 0.0	0.0 – 0.0	0.0 $\pm$ 0.0	0.0 – 0.0
23	0.0	-	0.0 $\pm$ 0.0	0.0 – 0.0	0.0 $\pm$ 0.0	0.0 – 0.0

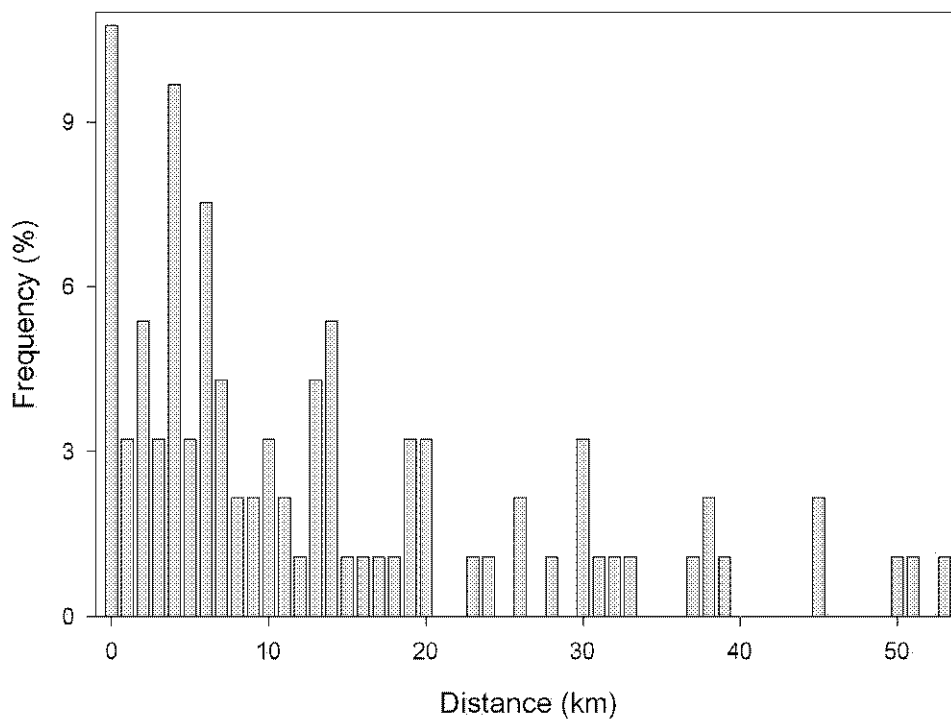


Figura 4. Distancias recorridas por tres águilas reales en un día (n = 93).

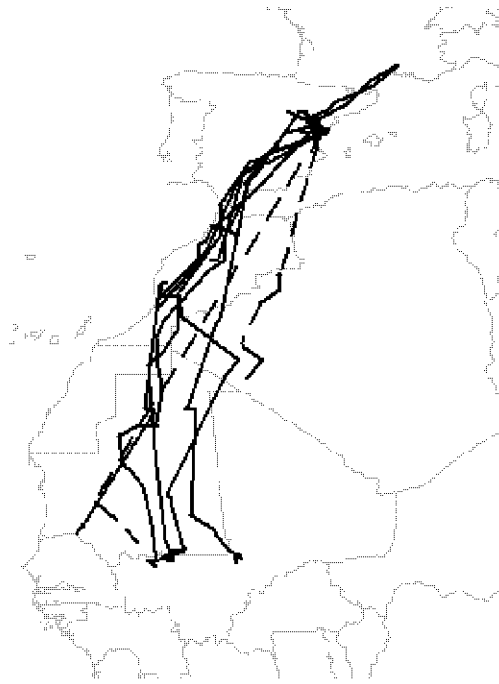


Figura 5. Rutas migratorias de ocho aguiluchos cenizos seguidos mediante telemetría satelital durante la migración otoñal.

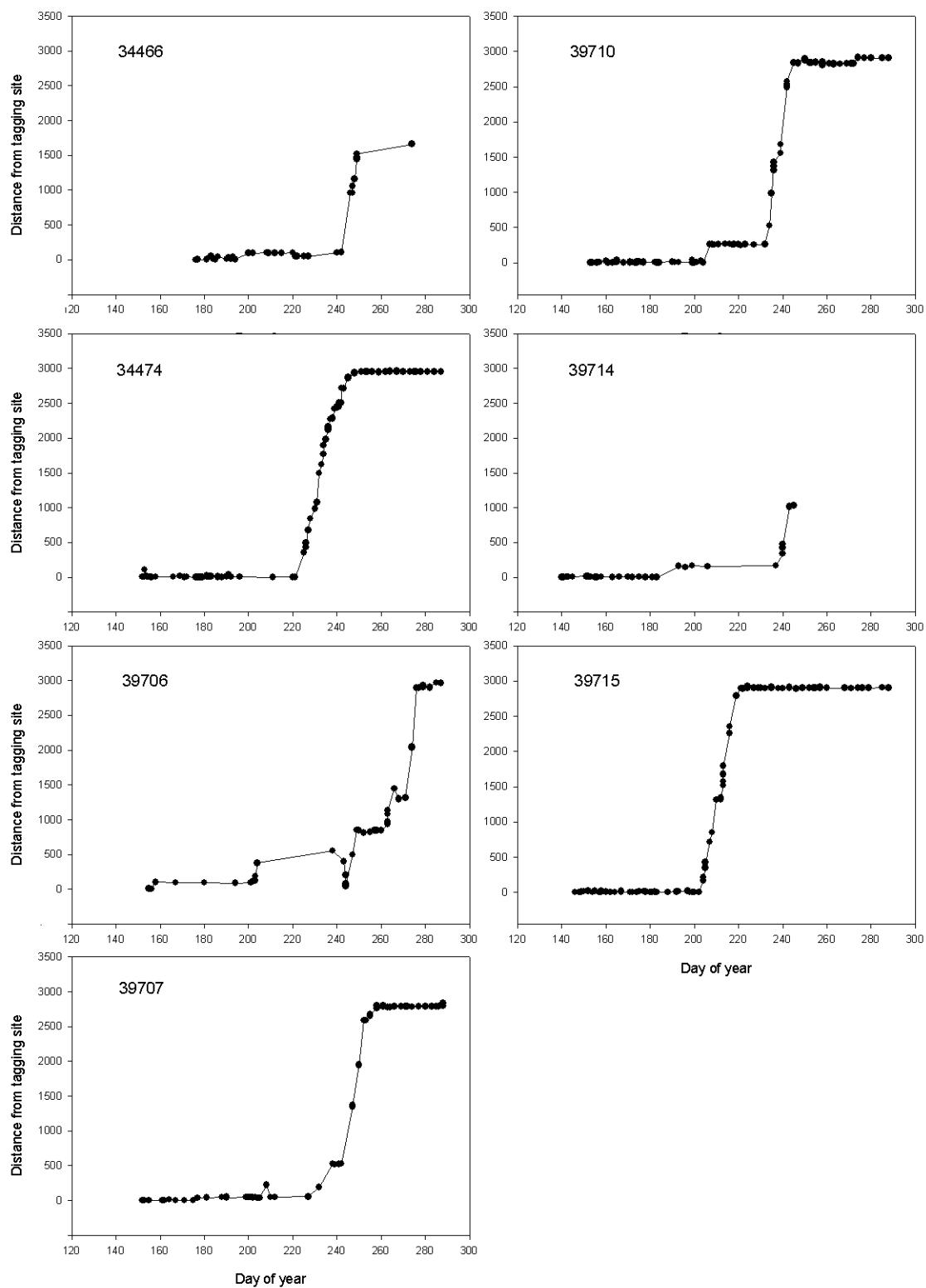


Figura 6. Alejamiento progresivo del sitio de marcaje de siete aguiluchos cenizos durante la migración otoñal.



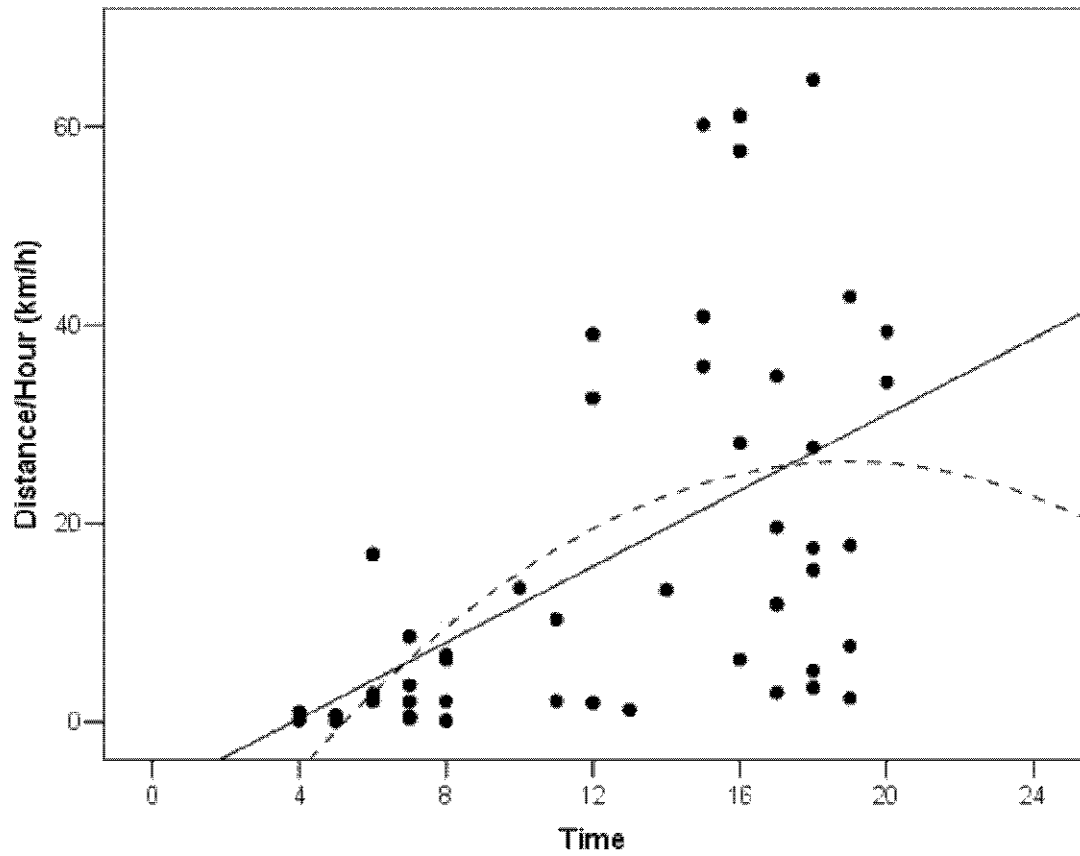


Figura 7. Variación a lo largo del día (distancia/hora =  $-7.31 + 1.92 \cdot \text{hora}$ ,  $F_{1,46} = 18,41$ ,  $p < 0.0001$ ,  $R^2 = 0.286$ ; distancia/hora =  $-23.74 + 5.27 \cdot \text{hora} - 0.14 \cdot \text{hora}^2$ ,  $F_{2,45} = 9,88$ ,  $p < 0.0001$ ,  $R^2 = 0.305$ ) en la velocidad de vuelo de cinco aguiluchos cenizos durante la migración.

Tabla 4. Duración y distancias recorridas durante la migración otoñal de ocho aguiluchos cenizos seguidos mediante telemetría satelital. Se indican valores promedio  $\pm$  DT.

PTT-Id	Sexo	Comienzo de la migración (día del año)	Duración de la migración (días)	Final de la migración (día del año)	Distancia max. al sitio de marcaje (km)	Distancia de la migración (km)	Distancia recorrida por día (km/día)	Distancia por hora (km/h; max. en paréntesis)	Altitud sobre el terreno (m)
34466	H	244	-	-	1660	-	-	-	-
34474	M	223	25	248	2969	2927.82	117.11	11.56 $\pm$ 17.13 (61.08)	54.56 $\pm$ 47.49
39706	H	245.5	28.5	274	2968	2846.88	93.34	12.01 $\pm$ 13.68 (40.85)	61.26 $\pm$ 35.24
39707	H	244.5	10.5	255	2833	2147.72	204.54	15.52 $\pm$ 15.22 (39.05)	79.88 $\pm$ 47.92
39710	M	234.5	10.5	245	2924	2301.86	219.22	31.53 $\pm$ 25.77 (64.73)	97.18 $\pm$ 173.41
39711	H	-	-	-	2866	-	-	-	-
39714	M	238.5	-	-	1029	-	-	-	-
39715	M	206	13	219	2924	2367.12	182.09	25.19 $\pm$ 21.47 (57.53)	43.46 $\pm$ 28.64
Media $\pm$ DT		233.7 $\pm$ 14.5	17.5 $\pm$ 8.5	248.2 $\pm$ 19.8		2518.28 $\pm$ 347.4	163.26 $\pm$ 55.2		

## DISCUSION

El uso de la telemetría por satélite ha permitido estudiar en detalle aspectos muy poco conocidos del comportamiento de dos rapaces europeas que mantienen importantes poblaciones en la Península Ibérica. Entre la información novedosa generada a través de dichos estudios destacan por un lado los cambios observados en el uso del espacio durante los primeros meses de la dispersión juvenil de las águilas reales, las distancias a las que se alejan de la población natal durante dicho período, y los patrones de actividad que muestran a lo largo del día, y por otro, información relativa a las rutas migratorias de los aguiluchos que se reproducen en el NE de España, las características de los movimientos migratorios (distancias recorridas, sitios de descanso, velocidades y alturas a las que se desplazan y variaciones en dichos parámetros a lo largo del día), y la identificación de los sitios de residencia durante la temporada no reproductiva.

Los estudios realizados también han permitido evaluar el nivel de exactitud de los datos obtenidos mediante telemetría por satélite (Soutullo et al., en prensa) y desarrollar metodologías estándar para el análisis de este tipo de datos (Soutullo et al., 2006a; Limiñana et al., enviado). Ambos aspectos son particularmente relevantes porque si bien el uso de la tecnología satelital permite obtener información sobre los desplazamientos en áreas remotas, tiene la desventaja de que dicha información no es cotejable con observaciones de campo, y por lo tanto las inferencias derivadas de este tipo de estudios se basan exclusivamente en el análisis de los patrones espaciales de las localizaciones. Esto hace que sea imprescindible el uso de métodos y criterios explícitos para el cálculo de los distintos parámetros de interés, de forma de disminuir la subjetividad de las interpretaciones y permitir comparaciones entre estudios.

Si bien los estudios realizados hasta la fecha han permitido recopilar información sumamente valiosa sobre el comportamiento de las dos especies estudiadas, el potencial de los datos obtenidos es enorme, ya que hasta ahora sólo se ha avanzado en aspectos descriptivos de la biología de estas especies. Con la información disponible es posible abordar, por ejemplo, el estudio de los efectos de la heterogeneidad ambiental sobre los patrones de movimiento durante la dispersión juvenil de las águilas reales, y sus consecuencias sobre la dinámica de sus poblaciones en España. La conectividad entre parches es un proceso clave en la dinámica de poblaciones estructuradas espacialmente porque permite la interacción entre subunidades espaciales y la colonización de parches desocupados. A su vez, la conectividad es el resultado de la interacción entre procesos comportamentales y la heterogeneidad de la matriz. El uso de datos satelitales permite el desarrollo de modelos de simulación para reconstruir los eventos de dispersión, que pueden ser contrastados con modelos de dispersión basados en movimientos al azar (paseos aleatorios), y análisis de autocorrelación de los hábitats de dispersión (Revilla et al., 2004), y de esta forma comprender mejor los factores ambientales y las decisiones comportamentales que subyacen a los patrones de movimiento observados, y por lo tanto, los efectos de cambios en el ambiente sobre las poblaciones.

También es posible identificar y caracterizar las áreas de dispersión utilizadas durante la dispersión juvenil y sus relaciones con las áreas utilizadas por otras especies de rapaces como el águila imperial o el águila-azor perdicera. La identificación de estas áreas constituye un elemento clave para el diseño de estrategias de conservación para estas dos especies en la Península Ibérica (Ferrer, 2001; Balbontin, 2005; Penteriani et al., 2005), y el análisis de la distancia entre áreas de dispersión puede ayudar a comprender los patrones observados de agregación de juveniles y sus estrategias de dispersión (Ferrer, 1993; Penteriani et al., 2006), así

como a la identificación de aquellos lugares cuya declaración como zona protegida podría contribuir a evitar posibles declives poblacionales (Penteriani et al., 2005).

Por último, la información satelital permite la caracterización de los sitios de invernada y las áreas de cría de la población de aguiluchos cenizos que se reproduce en la provincia de Castellón. También permite evaluar si los individuos retornan cada año a las mismas áreas de cría y la magnitud del intercambio de individuos con otras poblaciones reproductivas de Europa. Esta información es clave para el desarrollo de estrategias de conservación y manejo que integren las necesidades de esta especie en las dos zonas que utilizan durante su ciclo anual, y para comprender en profundidad los procesos y las presiones que ponen en riesgo la persistencia de sus poblaciones en Europa.

En resumen, el potencial de la telemetría por satélite para estudios de ecología de la dispersión, dinámica de poblaciones, forrajeo, uso de hábitat y competencia en rapaces es enorme, y hasta la fecha sólo se han realizado los primeros aportes en esa dirección. La aplicación de esta tecnología al estudio de estos procesos redundará sin lugar a dudas en importantes avances en nuestra comprensión de la biología de estas especies, y por lo tanto en nuestra capacidad de implementar estrategias de gestión y de conservación más eficientes.

## AGRADECIMIENTOS

A Vicente Urios, Rubén Limiñana, Luis Cadahía, Asunción Menargues, Miguel Gallardo, Miguel Ferrer y Pascual López por su amistad, su apoyo y su colaboración durante estos tres años. Al Aeropuerto de Castellón por brindarme una beca de investigación sobre la Biología del Aguilucho Cenizo en la Comunidad Valenciana, que me ha permitido dedicarme a la investigación durante este tiempo. A los profesores y amigos con los que aprendí a hacer ciencias.

## REFERENCIAS

- Bahat, O. 1992. Post-fledging movements of Golden Eagles *Aquila chrysaetos homeyeri* in the Negev Desert, Israel, as determined by radio-telemetry. In Priede, I.G. & Swift, S.M. (eds.) *Wildlife Telemetry*: 612-621. Chichester: Ellis Horwood Ltd.
- Balbontin, J. 2005 Identifying suitable habitat for dispersal in Bonelli's eagle: An important issue in halting its decline in Europe. *Biological Conservation* 126: 74-83
- Beecham, J.J. & Kochert, M. 1975. Breeding biology of the Golden Eagle in southwestern Idaho. *Wilson Bull.* 87: 506-513.
- Bernis, F. 1980. La migración de las aves en el Estrecho de Gibraltar, Vol. 1. Aves planeadoras. Madrid: Universidad Complutense.
- Berthold, P., Nowak, E. & Querner, U. 1995. Satelliten-Telemetrie eines Zugvogels von Mitteleuropa bis in das südafrikanische Winterquartier eine Fallstudie am Weis-storch (*Ciconia ciconia*). *J.Orn.* 136: 73-76.
- Brown, L.H. & Amadon, D. 1968. Eagles, hawks, and falcons of the world. McGraw-Hill, New York.
- Cadahía, L., Urios, V. & Negro, J.J. 2005. Survival and movements of satellite tracked Bonelli's Eagles during their first winter. *Ibis.* 147: 415-419.
- Clarke, R. 1996. Montagu's Harrier. Chelmsford: Arlequin Press.
- Cramp, S. & Simmons, K.E.L. 1980. Handbook of the birds of Europe, the Middle East and North Africa - vol. 2. Oxford University Press, Oxford.
- Fancy, S.G., Pank, K.R., Whitten, K.R. & Regelin, W.L. 1989. Seasonal movements of caribou in arctic Alaska as determined by satellite. *Can. J. Zool.* 67: 644-650.
- Ferrer, M. 1993. Reduction of hunting success and settlement strategies in young Spanish imperial eagles. *Animal Behavior* 45: 406-408.

- Ferrer, M. 2001. The Spanish Imperial Eagle. Barcelona: Lynx edicions.
- Finlayson, C. 1992. Birds of the Strait of Gibraltar. London: T. & A. D. Poyser.
- Fremming, O.R. 1980. Kongeørn i Norge. Viltrapport. 12: 1- 63.
- Fuller, M.R., Seegar, W.S. & Howey, P.W. 1995. The use of satellite systems for the study of bird migration. Israel J. Zool. 41: 243-252.
- Ganusevich, S.A., Maechtle, T.L., Seegar, W.S., Yates, M.A., McGrady, M.J., Fuller, M., Schueck, L., Dayton, J. & Henny, C.J. 2004. Autumn migration and wintering areas of Peregrine Falcons *Falco peregrinus* nesting on the Kola Peninsula, northern Russia. Ibis 146: 291–297.
- García, J.T. & Arroyo, B.E. 1998. Migratory movements of Montagu's Harriers *Circus pygargus*: a review. Bird Study 45: 188-194.
- Grant, J.R. & McGrady, M.J. 1999. Dispersal of golden eagles *Aquila chrysaetos* in Scotland. Ringing and Migration 19: 169-174.
- Griffiths, R., Double, M.C., Orr, K. & Dawson, R.J.G. 1998. A DNA test to sex most birds. Mol. Ecol. 7: 1071-1075.
- Guan, H.-L. & Higuchi, H. 2000. Review on satellite tracking of migratory birds and its prospect. Zoological Research 21: 412–415.
- Hake, M., Kjellén, N. & Alerstam, T. 2001. Satellite tracking of Swedish Ospreys *Pandion haliaetus*: autumn migration routes and orientation. J. Avian Biol. 32: 47–56.
- Hake, M., Kjellén, N. & Alerstam, T. 2003. Age-dependent migration strategy in honey buzzards *Pernis apivorus* tracked by satellite. Oikos 103: 385–396.
- Haller, H. 1994. Der Steinadler *Aquila chrysaetos* als Brutvogel im schweizerischen Alpenvorland: Ausbreitungstendenzen und ihre populations - ökologischen Grundlagen. Der Ornithologische Beobachter 91: 237–254.



- Haller, H. 1996. Der Steinadler in Graubünden. Langfristige Untersuchungen zur Populationsökologie von *Aquila chrysaetos* im Zentrum der Alpen. Der Ornithologische Beobachter Beiheft 9: 1-167.
- Hays, G.C., Åkesson, S., Godley, B.J., Luschi, P. & Santidrian, P. 2001. The implications of location accuracy for the interpretation of satellite - tracking data. *Anim. Behav.* 61: 1035-1040.
- Higuchi, H.; Ozaki, K.; Fijita, G.; Minton, J.; Ueta, M.; Soma, M.; Mita, N. 1996. Satellite tracking of White-naped crane migration and the importance of the Korean demilitarized zone. *Conservation Biology* 10(3): 806-812.
- Hooge, P.N. & Eichenlaub, B. 1997. Animal movement extension to Arcview. Ver. 1.1. Alaska Science Center - Biological Science Office, U.S. Geological Survey, Anchorage.
- Jiguet, F. & Villarubias, S. 2004. Satellite tracking of breeding black storks *Ciconia nigra*: new incomes for spatial conservation issues. *Biological Conservation* 120: 153–160.
- Judas, J., Combreau, O., Lawrence, M., Saleh, M., Launay, F. & Xingy, G. 2006. Migration and range use of Asian Houbara Bustard *Chlamydotis macqueenii* breeding in the Gobi desert, China, revealed by satellite tracking. *Ibis* 148: 343–351.
- Keating, K.A., Brewster, W.G. & Key, C.H. 1991. Satellite telemetry: performance of animal-tracking systems. *J. Wildlife Manage.* 55: 160-171.
- Kenward, R.E. 2001. A manual for wildlife radio tagging. Academic Press, London.
- Kjellén, N., Hake, M. & Alerstam, T. 2001. Timing and speed of migration in male, female and juvenile Ospreys *Pandion haliaetus* between Sweden and Africa as revealed by field observations, radar and satellite tracking. *J. Avian Biol.* 32: 57–67.
- Limiñana, R., Soutullo, A. & Urios, V. enviado. First description of the autumn migration of Montagu's Harriers tracked by satellite telemetry. *Ibis*.

- Limiñana, R., Soutullo, A., Urios, V. & Surroca, M. 2006a. Vegetation height selection in Montagu's Harriers *Circus pygargus* breeding in a natural habitat. *Ardea* 94 (2): 280–284.
- Limiñana, R., Surroca, M., Miralles, S., Urios, V. & Jiménez, J. 2006b. Population trend and breeding biology of Montagu's Harrier *Circus pygargus* in a natural vegetation site in northeast Spain. *Bird Study* 53 (2): 126-131.
- McGrady, M.J., Ueta, M., Potapov, E., Utekhina, I., Masterov, V., Ladyguine, A., Zykov, V., Cibor, J., Fuller, M. & Seegar, W.S. 2003. Movements by juvenile and immature Steller's Sea Eagles *Haliaeetus pelagicus* tracked by satellite. *Ibis* 145: 318–328.
- Meyburg, B.-U., Scheller, W. & Meyburg, C. 1995a. Zug und Überwinterung des Schreiadlers *Aquila pomarina*: Satellitentelemetrische Untersuchungen. *J. Orn.* 136: 401–422.
- Meyburg, B.-U., Eichaker, X., Meyburg, C. & Paillat, P. 1995b. Migrations of an adult spotted eagle tracked by satellite. *Brit. Birds* 88: 357–361.
- Meyburg, B.-U., Meyburg, C. & Barbraud, J.-C. 1998. Migration strategies of an adult Short-toed Eagle *Circaetus gallicus* tracked by satellite. *Alauda* 66: 39–48.
- Neter, J., Wasserman, W., & Kutner, M. H. 1985. Applied linear statistical models: Regression, analysis of variance, and experimental designs. Homewood, IL: Irwin.
- O'toole, L.T., Kennedy, P.L., Knight, R.L. & McEwen, L.C. 1999. Postfledging behavior of Golden Eagles. *Wilson Bull.* 111: 472-477.
- Penteriani, V., Otalora, F., Sergio, F. & Ferrer, M 2005. Environmental stochasticity in dispersal areas can explain the 'mysterious' disappearance of breeding populations. *Proc. R. Soc. B* 272: 1265–1269.
- Penteriani, V., Fortuna, M.A., Melian, C.J., Otalora, F. & Ferrer, M. 2006. Can prey behaviour induce spatially synchronic aggregation of solitary predators? *Oikos* 113: 497-505.

- Revilla, E., Wiegand, T., Palomares, F., Ferreras, P. & Delibes, M. 2004. Effects of Matrix Heterogeneity on Animal Dispersal: From Individual Behavior to Metapopulation-Level Parameters. *American Naturalist* 164: E130-E153.
- Shirihai, H. & Christie, D.A. 1992. Raptor migration in Eilat. *Brit. Birds* 85: 141–186.
- Soutullo, A., Cadahía, L., Urios, V., Ferrer, M. & Negro, J.J. en prensa. Accuracy of lightweight satellite telemetry: a case study in Iberian Peninsula. *Journal of Wildlife Management*.
- Soutullo, A., Urios, V. & Ferrer, M. 2006a. How far away in an hour? - daily movements of juvenile Golden Eagles (*Aquila chrysaetos*) tracked with satellite telemetry. *Journal of Ornithology* 147(1): 69–72.
- Soutullo, A., Urios, V., Ferrer, M. & Peñarrubia, S.G. 2006b. Dispersal of Golden Eagles *Aquila chrysaetos* during their first year of life. *Bird Study* 53 (3): 258–264.
- Soutullo, A., Urios, V., Ferrer, M. & Peñarrubia, S.G. 2006c. Post-fledging behaviour in Golden Eagles: onset of the juvenile dispersal and progressive distancing from the nest. *Ibis* 148 (2): 307–312.
- Soutullo, A., Limiñana, R., Urios, V., Surroca, M. & Gill, J.A. 2006d. Density-dependent regulation of population size in colonial breeders: Allee and buffer effects in the migratory Montagu's harrier. *Oecología* 149 (3): 543-552.
- Steenhof, K., Kochert, M.N. & Moritsch, M.Q. 1984. Dispersal and migration of Southwestern Idaho Raptors. *J. Field Ornithol.* 55: 357-368.
- Vincent, C., McConnel, B.J., Fedak, M.A. & Ridoux, V. 2002. Assessment of Argos location accuracy from satellite tags deployed on captive grey seals. *Mar. Mammal Sci.* 18: 301-322.
- Walker, D.G. 1987. Observations on the post-fledging period of the Golden Eagle *Aquila chrysaetos* in England. *Ibis* 129: 92-96
- Watson, J. 1997. *The Golden Eagle*. T&AD Poyser. London.

Weimerskirch, H., Bonadonna, F., Bailleul, F., Mabile, G., Dell'omo, G., & H. Lipp. 2002. GPS tracking of foraging albatrosses. *Science* 295: 1259.

Zar, J.H. 1999. *Biostatistical analysis*. (4th edn.). New Jersey: Prentice Hall.