

# Consecuencias aerodinámicas que se deducen de la biometría del ala de la Pardela balear (*Puffinus mauretanicus*)

Juan Carlos ÁLVAREZ, José MESEGUER y Angel PÉREZ

## SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA  
NATURAL DE LES BALEARS

Álvarez, J.C., Meseguer, J. y Pérez, A. 2004 Consecuencias aerodinámicas que se deducen de la biometría del ala de la Pardela balear (*Puffinus mauretanicus*). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 47: 81-87. ISSN 0212-260X. Palma de Mallorca.

El espesor del borde de ataque de un perfil de ala determina el tipo de entrada en pérdida del perfil, y por consiguiente su comportamiento en condiciones de máxima sustentación. En este artículo se determinan, bajo el punto de vista de la entrada en pérdida, las diferentes zonas que pueden ser identificadas en las alas de la Pardela balear (*Puffinus mauretanicus*), y se analizan los posibles comportamientos de entrada en pérdida de esas zonas en función del espesor relativo de los perfiles. Por último se describen los mecanismos de hipersustentación existentes en las alas y se explica su funcionamiento.

**Palabras clave:** aerodinámica, álula, mecanismos hipersustentadores, *Puffinus mauretanicus*, *Pardela balear*.

SOME AERODYNAMIC CONSEQUENCES DERIVED FROM THE BIOMETRY OF THE WINGS OF THE BALEAR SHEARWATER (*Puffinus mauretanicus*). The thickness of the leading edge of an airfoil drives the airfoil stalling, therefore thickness strongly affects airfoil performances, mainly those related with maximum lift. Regarding stalling phenomena, in this paper the different characteristic zones existing in the wings of the Balear shearwater (*Puffinus mauretanicus*) are identified. The different stalling behaviour, depending on the airfoil thickness, are analysed. Finally, high-lift devices existing in avian wings are described, and their effect on wing stalling are explained.

**Keywords:** aerodynamic, alula, high lift devices, *Puffinus mauretanicus*, *Balear shearwater*.

CONSEQUÈNCIES AERODINÀMIQUES QUE SE DEDUEIXEN DE LA BIOMETRIA DE L'ALA DE LA BALDRITXA BALEAR (*Puffinus mauretanicus*). L'espessor de la vorera d'atac d'un perfil d'ala determina el tipus d'entrada en pèrdua del perfil, i per consegüent el seu comportament en condicions de màxima sustentació. En aquest article se determinen, sota el punt de vista de l'entrada en pèrdua, les diferents zones que poden ser identificades a les ales de la Baldrítixa balear (*Puffinus mauretanicus*), i s'analitzen els possibles comportaments d'entrada en pèrdua d'aquestes zones en funció de l'espessor relatiu dels perfils. Per últim, se descriuen els mecanismes d'hipersustentació existents a les ales i s'explica el seu funcionament.

**Paraules clau:** aerodinàmica, àlula, mecanismes hipersustentadors, *Puffinus mauretanicus*, *Baldrítixa balear*.

Juan Carlos ALVAREZ<sup>1,2,3</sup>, José MESEGUER<sup>1</sup>, Angel PÉREZ<sup>3</sup>; <sup>1</sup>IDR/UPM, E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid.; <sup>2</sup>C.E.A. Los Llanillos, San Lorenzo de El Escorial, Madrid; <sup>3</sup>SEO-Sierra de Guadarrama, El Escorial, Madrid.

Recepció del manuscrit: 3-ago-04; revisió acceptada: 30-des-04.

## Introducción

Las alas de las aves son dispositivos sustentadores muy complejos que deben satisfacer requisitos estructurales y aerodinámicos de muy diversa índole. Las características geométricas de los perfiles que conforman las alas (espesor y curvatura) cambian a lo largo de la envergadura, y como la entrada en pérdida de los perfiles

depende, entre otros, de estos parámetros, es de esperar que el comportamiento del ala en situaciones de pérdida sea diferente de una zonas a otras según varíe el espesor y, en menor medida, la curvatura.

Si esto es así, como la entrada en pérdida de los perfiles es más gradual y predecible, y por ende más controlable, conforme aumenta el espesor relativo, es de esperar también que los meca-

Ave	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	Media
$L_{max}$	392	373	391	392	389	382	398	394	386	394	389
$L_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$L_2$	76	77	72	76	70	73	72	71	78	71	74
$L_3$	152	151	146	155	146	149	153	148	153	145	150
$L_4$	214	201	193	207	195	203	207	201	207	199	203
$L_5$	303	287	292	300	292	293	303	298	297	297	296
$T_1$	15	14	16	17	17	15	14	17	16	18	16
$T_2$	12	9	9	10	9	9	9	9	9	9	9
$T_3$	9	8	9	8	8	8	8	8	7	8	8
$T_4$	6	6	6	6	5	5	6	6	6	6	6
$T_5$	3	3	4	3	3	3	3	3	3	4	3
$c_1$	97	95	95	96	95	92	97	94	95	90	95
$c_2$	96	86	105	93	90	81	86	94	93	95	92
$c_3$	94	86	96	87	89	89	89	87	88	89	89
$c_4$	86	81	82	91	82	84	87	84	85	83	85
$c_5$	74	74	61	82	70	76	78	69	74	71	73
$t_1$	0.14	0.14	0.17	0.18	0.18	0.16	0.14	0.18	0.17	0.20	0.17
$t_2$	0.13	0.11	0.09	0.11	0.10	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10
$t_3$	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09
$t_4$	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
$t_5$	0.04	0.04	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04

**Tabla 1.** Magnitudes medidas en las alas: longitud total del ala,  $L_{max}$ , distancias desde la raíz del ala a las diferentes secciones de medida,  $L_i$ , espesores máximos,  $T_i$ , cuerdas,  $c_i$ , y espesores relativos,  $t_i = T/c_i$ , en las distintas secciones de medida. Todas las longitudes están expresadas en milímetros.

**Table 1.** Magnitudes measured in the wings of birds: total wing length,  $L_{max}$ , distances from wing root to the different sections of measure,  $L_i$ , maximum thickness,  $T_i$ , wing chords,  $c_i$ , and relative thickness  $t_i = T/c_i$  at the different sections of measure.

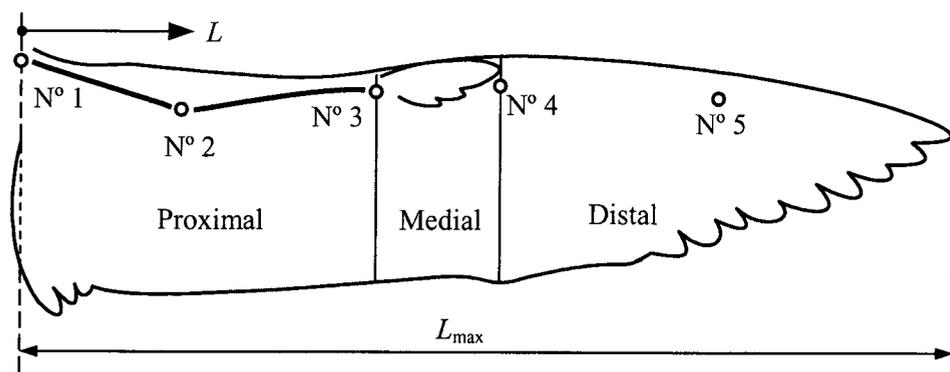


Fig. 1. Esquema de ala de *Puffinus mauretanicus* con indicación de las diferentes zonas, del sistema de coordenadas empleado y de los puntos o secciones de medida.

Fig. 1. Picture of a *Puffinus mauretanicus* wing showing the different sections, the coordinates system adopted and the sections of measure.

nismos existentes en las distintas partes del ala para retrasar o limitar la entrada en pérdida sean diferentes según la zona considerada. Por esta razón parece ser de gran interés aerodinámico conocer la distribución de espesor a lo largo de la envergadura del ala para explicar el proceso de entrada en pérdida de las alas de las aves (aunque sólo sea en el caso del vuelo estacionario).

## Método

Para determinar los parámetros de mayor interés aerodinámico del ala se ha establecido un método de biometría específico en el que se miden los espesores máximos,  $T$ , de diferentes perfiles prefijados del ala, así como la distancia de los mismos,  $L$ , a un cierto origen de coordenadas, y la cuerda,  $c$ , de cada uno de estos perfiles. Siguiendo este método se han medido las alas de diez especímenes de *Puffinus mauretanicus*, habiéndose medido las magnitudes señaladas en cinco perfiles de cada ejemplar, y habiéndose elegido las situaciones de los perfiles de medida coincidentes con las posiciones de las principales articulaciones del ala: hombro, codo y muñeca, y también el extremo de los dedos y un punto intermedio de las primarias situado entre esta última sección y el extremo más distal de éstas. A partir de estas medidas se ha determi-

nado el espesor relativo ( $t = T/c$ ) para cada una de las secciones determinadas.

Hay que señalar que los datos han sido tomados únicamente en alas derechas (comprobando que no estuviesen dañadas) y solamente en animales con plena capacidad de vuelo. Además, en la campaña de medida han sido desestimados todos los individuos que no eran adultos o que presentaban signos de muda. El sexo de los especímenes no ha sido tenido en cuenta, ya que las diferencias entre ambos sexos no parecen ser significativas (Cramp y Simmons, 1977; CMA/GB, 1997; Mayaud, 1932)

Para la obtención de las medidas se ha seguido un procedimiento en parte coincidente con el empleado habitualmente para obtener la superficie alar (Pennycuik, 1989). Para ello se sobrepone el ala del ave extendida sobre una hoja de papel cuadrículado, marcándose la proyección del ala sobre el plano de la hoja de papel. La superficie y las cuerdas se obtienen de esta proyección, por lo que es muy importante no presionar el ala para no deformar su curvatura natural. Posteriormente, se presiona el ala hasta que queda totalmente extendida sobre el plano, marcándose entonces en el papel las posiciones de las secciones de medida.

Sobre las siluetas así obtenidas de las formas en planta de las alas se miden las cuerdas,  $c$ , trazando rectas transversales, perpendiculares en

cada punto de medida al eje longitudinal máximo del ala. Este eje se traza de modo que sea razonablemente paralelo al borde de ataque del ala, al menos hasta el punto N° 4 (Fig. 1). También sobre las siluetas se miden las distancias desde el origen de coordenadas hasta las distintas secciones de medida.

Para medir los espesores máximos en cada sección se ha utilizado un calibre modificado para aumentar la superficie de contacto. Los puntos de medida están situados en zonas de articulaciones de huesos (salvo en el caso del punto N° 5, situado en las primarias), ya que lo que se pretende es medir siempre sobre superficies que presenten una cierta rigidez. Así pues, las magnitudes medidas y los puntos de inspección han sido

Magnitudes:

Longitud,  $L$ : es la distancia desde la axila hasta el punto que identifica la sección en cuestión; en el caso del primer punto esta medida es nula ( $L_1 = 0$ ), ya que el origen de las medidas es la propia axila.

Espesor máximo,  $T$ : se mide en el borde de ataque, procurando no comprimir las plumas y los tejidos.

Cuerda,  $c$ : es la anchura total del ala en la sección de medida considerada.

Puntos o secciones de medida (véase la Fig. 1 y la tabla 1, donde se resumen las magnitudes medidas):

- N° 1: hombro; inserción del ala con el tórax.
- N° 2: codo; articulación del húmero con radio-ulna.
- N° 3: articulación carpal.
- N° 4: extremo digital.
- N° 5: plumas primarias; este punto es intermedio entre el punto N° 4 y el extremo más distal de las plumas primarias.

A su vez, y obediendo a factores anatómicos y estructurales, el ala ha sido dividida en tres regiones básicas, tal como se indica en la Fig. 1:

- Proximal: esta zona está comprendida entre los puntos N° 1 y N° 3. Incluye toda la zona del brazo y antebrazo (húmero, radio-ulna). En esta parte del ala la principal superficie sustentadores está formada por las plumas secundarias. El borde de ataque está formado por el tendón

que une la articulación carpal con el músculo correspondiente en el hombro (Tensor patagii)

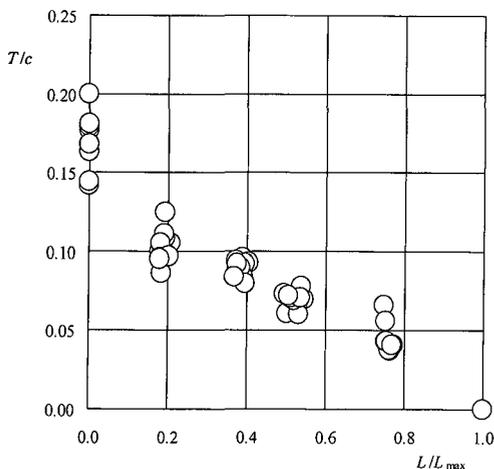
- Medial: formada por el conjunto de las articulaciones carpales y todos los huesos de la mano y dedos. Está provista de un cierto movimiento de rotación por lo que puede cambiar el plano de la superficie de las primarias (región distal) con respecto al resto del ala. Es en esta zona donde está situada y ejerce su influencia el álula.

- Distal: está formada por las plumas primarias desde su inserción en los huesos de los dígitos hasta el extremo más alejado del ala (borde marginal). Es fundamentalmente una zona formada por las plumas primarias sobrepuestas unas sobre otras de forma que impidan el paso del aire de intradós a extradós, salvo por las ranuras que algunas especies presentan en los extremos de las alas.

## Resultados y discusión

Algunos aspectos del proceso de entrada en pérdida de las alas de las aves en vuelo estacionario han sido ya explicados en otras publicaciones (Álvarez *et al.*, 1997; 2001). Con relación a los perfiles, conviene recordar que la pérdida de sustentación de un perfil se origina por el desprendimiento de la capa límite en el extradós, y que este proceso se puede presentar de diversas maneras dependiendo fundamentalmente del espesor relativo de los perfiles, que, como se ha definido, es la relación entre el espesor máximo del perfil,  $T$ , que se presenta cerca del borde de ataque, y la cuerda,  $c$ . En función de este parámetro ( $t = T/c$ ) se llaman perfiles gruesos a aquellos en los que esta relación está por encima de 0.12, medios aquellos cuyo espesor relativo oscila entre 0.07 y el valor anterior, y delgados los que presentan un espesor relativo inferior a 0.07.

Los perfiles gruesos entran en pérdida progresivamente. Al aumentar el ángulo de ataque la capa límite del extradós del perfil se va debilitando debido a los gradientes adversos de presión, cada vez mayores, y debido al rozamiento con la superficie del ala; el desprendimiento se inicia por el borde de salida del perfil y la zona desprendida va aumentando gradualmente, des-



**Fig. 2.** Variación del espesor relativo del ala en las distintas secciones de medida,  $t = T/c$ , con la distancia a la axila del ave,  $L$ , adimensionalizada con la longitud total del ala,  $L_{max}$ .

**Fig. 2.** Variation within the relative thickness in the different sections of measure,  $t = T/c$ , related to the distance to armpit,  $L$ , and to the total wing length,  $L_{max}$ .

plazándose el punto de desprendimiento hacia el borde de ataque conforme el ángulo de ataque sigue creciendo. La pérdida de sustentación comienza a ser significativa cuando la porción de capa límite desprendida supera la mitad de la cuerda del perfil (que es cuando se alcanza el máximo valor del coeficiente de sustentación). Los perfiles gruesos son bastante tolerantes a la pérdida, admitiendo ángulos de ataque bastante grandes (del orden de  $20^\circ$  o más) antes de que la sustentación comience a disminuir.

Los perfiles medios suelen entrar en pérdida súbitamente. Esto se explica teniendo en cuenta que en estos perfiles a un cierto ángulo de ataque, todavía pequeño, la capa límite se desprende muy cerca del borde de ataque, volviéndose a adherir casi inmediatamente. De este modo se forma una burbuja de recirculación en el extradós, en las proximidades del borde de ataque. Según aumenta el ángulo de ataque esta burbuja se desplaza hacia el borde de ataque, hacia una zona del extradós de mayor curvatura, lo que dificulta que la capa límite se readhiera.

Sobrepasado un cierto valor del ángulo de ataque ( $15^\circ$  podría ser un valor típico) la readherencia no se produce, la burbuja de recirculación explota y la pérdida de sustentación se produce bruscamente.

Por último, la entrada en pérdida de los perfiles delgados se caracteriza porque a ángulos de ataque pequeños se desarrolla una burbuja de recirculación en el extradós, causada por el desprendimiento, también próximo al borde de ataque, y la posterior readherencia corriente abajo de la capa límite. Esta burbuja va aumentando de tamaño conforme aumenta el valor del ángulo de ataque, desplazándose el punto de readherencia hacia el borde de salida, de modo que cuando el ángulo de ataque es tal que el punto de cierre de la burbuja alcanza el borde de salida la readherencia ya no es posible y se produce una disminución brusca de la sustentación.

Estos mecanismos de entrada en pérdida explican el comportamiento bidimensional de los perfiles. El caso tridimensional, como es un ala real, es todavía más complejo, pues en un ala, además de efectos de barrido lateral de capa límite, coexisten distintos tipos de perfiles, lo que dificulta las explicaciones basadas únicamente en tipos puros de entrada en pérdida como los descritos.

En las alas de las aves se pueden identificar distintos sistemas de control de capa límite cuya finalidad es retrasar la entrada en pérdida al crecer el ángulo de ataque, aumentando en consecuencia el valor del coeficiente de sustentación máximo. Los sistemas de control presentes en las alas de las aves identificados por diversos autores son los siguientes:

- Cobertoras: estas plumas situadas sobre las plumas secundarias actúan de forma pasiva, despegándose del ala debido a las fuerzas de succión en el extradós cuando el ángulo de ataque alcanza un cierto valor (Von Holst y Kuchemann, 1942; Muller, 1997; Shyy, Berg y Ljungqvist, 1999). Su función parece ser fijar el punto de desprendimiento de la capa límite y frenar por tanto el avance de la zona de corriente desprendida, que recorre el extradós desde el borde de salida hacia el borde de ataque en los perfiles gruesos.

- **Álula:** funciona como el dispositivo hipersustentador empleado en las aeronaves, conocido en inglés como *slat*. El álula controla el flujo de aire en el extradós del ala (Storer, 1948; Savile, 1956; Von Holst y Küchemann, 1492), suavizando los gradientes de presión adversos y retardando de forma muy efectiva el desprendimiento (Álvarez *et al.*, 2001). En algunas especies (*Pica pica*), la primera primaria es significativamente más corta que el resto de sus homólogas pudiendo cumplir una función similar a la del álula en regiones más distales que ésta.

- **Primarias:** la disposición de estas plumas en los extremos más alejados del ala del ave permite la aparición de ranuras entre las mismas (Savile, 1956; Von Holst y Küchemann, 1942). Se ha sugerido que estas ranuras tienen como finalidad permitir que parte del flujo de aire que corre por el intradós pase al extradós del ala evitando que la capa límite se desprenda, controlando la entrada en pérdida de los perfiles delgados. Sin embargo esta disposición de las plumas en el borde del ala es susceptible de otra explicación aerodinámica más clara, ya que una configuración ranurada, al menos en el vuelo de planeo, disminuye la resistencia inducida asociada a la formación de la estela de torbellinos corriente abajo del ala, al suavizar la intensidad de los torbellinos marginales (Storer, 1948; Tucker, 1993).

En el caso de las alas de las aves parece existir una adaptación entre el espesor relativo de los perfiles y los mecanismos de hipersustentación, que como se ha visto varían de unas partes a otras del ala. En efecto, de las medidas obtenidas (Fig. 2) se puede apreciar que los perfiles situados cerca de la raíz del ala son relativamente gruesos, lo cual es necesario por razones estructurales. Esta región corresponde a la zona proximal del ala y es donde están las cobertoras, de modo que la zona del ala en cuestión quedaría protegida de la entrada en pérdida (o al menos del avance progresivo de la zona desprendida) a través de las cobertoras que, según lo ya descrito, controlan la entrada en pérdida que comienza por el borde de salida.

Los perfiles de espesores medios están en la zona medial, región que abarca el álula y que presenta los perfiles más conflictivos, con entra-

das en pérdidas más bruscas. Como se ha dicho el álula actúa fundamentalmente en la zona próxima al borde de ataque, suavizando los gradientes de presión adversos, por lo que resulta más efectiva en perfiles que presentan picos de succión muy acusados cerca del borde de ataque del ala, tal es el caso de los perfiles con espesores medios y delgados. Además, la acción del álula evita que progrese la pérdida a lo largo de la envergadura, hacia la raíz del ala.

Los perfiles más delgados, los de menor espesor relativo, están dispuestos en la zona distal, cubriendo la parte del ala formada exclusivamente por las plumas primarias. Esta zona no parece estar equipada con mecanismos de hipersustentación, pero conviene resaltar que la mayor parte de la sustentación generada por el ave está concentrada en las partes proximal y medial, habiéndose sugerido que la función principal de la parte distal es la generación de tracción durante las fases de aleteo del vuelo (Ward-Smith, 1984), además del ya mencionado papel del borde marginal del ala en la disminución de la resistencia inducida en el vuelo de planeo.

Así pues, el ala presenta un gradiente de espesores que hace pensar que no entra en pérdida de la misma forma y al mismo tiempo a lo largo de toda su extensión, ya que los espesores van decreciendo en función de la lejanía al tórax. Es probable que la entrada en pérdida ocurra en sentido inverso: al aumentar el ángulo de ataque se inicia la pérdida en las partes más distales y conforme sigue aumentando el ángulo de ataque la zona en pérdida va avanzando progresivamente hacia regiones con perfiles más gruesos, si bien este fenómeno se ve dificultado tanto por la existencia de dispositivos hipersustentadores estratégicamente distribuidos en el ala (álula y cobertoras), como por la propia distribución de espesor a lo largo de la envergadura del ala (los perfiles son tanto más gruesos cuanto más cerca de la raíz del ala).

## Agradecimientos

El presente trabajo no se podría haber llevado a cabo sin la ayuda y colaboración de Miguel

McMinn, G.O.B. (*Grup Balear d'Ornitologia i Defensa de la Naturalesa, Balears*), del personal de GREFA (Grupo de Recuperación de la fauna Autóctona, Madrid), Maria del Mar López Ramos y de Francisco José Cantos.

## Bibliografía

- Alvarez, J.C., Meseguer, J.; Meseguer, E. y Pérez, A. 2001. On the role of the alula in the steady flight of birds. *Ardeola*, 48: 161-173.
- Alvarez J.C., Pérez, A. y Meseguer, J. 1997. Biometría de la Pardela cenicienta (*Calonectris diomedea*) y del Paíño común (*Hydrobates pelagicus*) para el estudio de su aerodinámica y vuelo. *Anuari Ornitològic de les Balears*, 12: 17-27.
- Cramp, S. y Simmons, K.E.L. 1977. *The birds of the Western palearctic*. Oxford University Press, Oxford.
- CMA/GB, Conselleria de Medi Ambient, Govern Balear 1997. *Biología y conservación de la Pardela balear "Puffinus mauretanicus"*. Documents Tècnics de Conservació, 2: 7-9.
- Mayaud, N. 1932. Considerations sur la morphologie et la systematique de quelques Puffins. *Alauda*, IV: 41-78.
- Muller, W. 1997. Aerodynamic function of wing covert feathers: are they a safety device?. V International Congress of Vertebrate Morphology. Bristol.
- Pennycuik, C. 1989. *Bird flight performance*. A practical calculation manual Oxford University Press. Oxford.
- Savile, D.B.O. 1956. Adaptive evolution in the avian wing. *Evolution*, 11: 212-224.
- Shyy, W., Berg, M. y Ljungqvist, D. 1999. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicle. *Progress in Aerospace Sciences*, 35: 455-505.
- Storer, J.H. 1948. *The flight of birds*. Cranbook Institute of Science, Bulletin No.28, Michigan.
- Tucker, V.A. 1993. Gliding birds: reduction of induced drag by wing tip slots between the primary feathers. *Journal of Experimental Biology*, 180: 285-310.
- Von Holst, E. y Kùchemann, D. 1942. Biological and aerodynamical problems of animal flight. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 46: 39-56.
- Ward-Smith, J.A. 1984. *Biophysical aerodynamics and the natural environment*. John Wiley & Sons, Chichester.