

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE VETERINARIA**  
**TRABAJO DE FIN DE GRADO EN VETERINARIA**



**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN EN 3D DEL ESQUELETO DEL PIGARGO  
EUROPEO (*HALIAEETUS ALBICILLA*)**

Lucía Bendito Buhles

Madrid, 2024

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE VETERINARIA**  
**TRABAJO DE FIN DE GRADO EN VETERINARIA**



**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN EN 3D DEL ESQUELETO DEL PIGARGO  
EUROPEO (*HALIAEETUS ALBICILLA*)**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DEL GRADO EN VETERINARIA**

**AUTOR:** Lucía Bendito Buhles

**BAJO LA DIRECCIÓN DE**

**TUTOR(ES):** Luis Revuelta Rueda y Andrea Miguel Batuecas

Departamento de Fisiología Sección Departamental de Fisiología Animal

Madrid, 2024

**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN EN 3D DEL ESQUELETO DEL PIGARGO  
EUROPEO (*HALIAEETUS ALBICILLA*)**

**AUTORA:**

Fdo: Lucía Bendito Buhles

**TUTOR(ES):**

Fdo: Luis Revuelta Rueda

Fdo: Andrea Miguel Batuecas

**DEPARTAMENTO DE FISIOLÓGÍA SECCIÓN DEPARTAMENTAL DE  
FISIOLÓGÍA ANIMAL:**

Fdo: Director(a):

En Madrid, a 17 de enero 2024

**CERTIFICADO DE PERMISOS  
DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

El profesor Luis Revuelta Rueda, tutor 1 del Trabajo Fin de Grado y Andrea Miguel Batuecas, tutora 2 del Trabajo de Fin de Grado (TFG) titulado ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN EN 3D DEL ESQUELETO DEL PIGARGO EUROPEO (*HALIAEETUS ALBICILLA*), realizado por la alumna Lucía Bendito Buhles

CERTIFICA (marcar la casilla que corresponda):

- Que el TFG no ha requerido autorización del Comité de Ética
- Que el TFG no ha requerido autorización para uso de datos
- Que dispone de la autorización del Comité de Ética con número de registro \_\_\_\_\_
- Que dispone del permiso para uso de datos (adjuntar el documento acreditativo)

De lo que informo a la Comisión de TFG para permitir el depósito del trabajo y su posterior evaluación

En Madrid a 17 de enero de 2024

Fdo. (tutor/a 1)

Fdo. (tutor/a 2)

# ÍNDICE

1. Resumen.....	1
1. Abstract .....	2
2. Introducción .....	3
2.1. Osteología Aviar .....	3
2.1.1. Características de los huesos en aves .....	3
2.1.2. Huesos de la cabeza y tronco .....	3
2.1.3. Huesos del miembro torácico .....	4
2.1.4. Huesos del miembro pelviano .....	4
2.2. Identificación de aves rapaces mediante restos óseos .....	5
2.2.1. Importancia de la identificación de cadáveres de aves rapaces .....	5
2.2.2. Estudio de huesos por características cuantitativas .....	6
2.2.3. Estudio de huesos por características cualitativas .....	7
2.3. El Pigargo Europeo ( <i>Haliaeetus Albicilla</i> ) .....	8
2.3.1. Características de la especie .....	8
2.3.2. Presencia histórica del Pigargo Europeo en España.....	10
2.3.3. El proyecto Pigargo .....	11
2.4. Modelos 3D .....	12
2.4.1. Tipos de modelo 3D .....	12
2.4.2. Aplicaciones de modelos 3D .....	13
3. Justificación y Objetivos.....	15
4. Material y Métodos .....	16
4.1. Animales objeto de estudio.....	16
4.2. Virtualización en 3D a partir de imágenes obtenidas con escáner .....	16
4.3. Obtención de imágenes con TAC .....	18
4.4. Virtualización en 3D a partir de imágenes DICOM .....	18

4.5.	Toma manual de medidas .....	19
4.6.	Repositorio virtual .....	19
4.7.	Toma virtual de medidas.....	19
4.8.	Toma de superficies y volúmenes.....	19
4.9.	Impresión 3D .....	20
5.	Resultados .....	21
5.1.	Modelos 3D virtuales.....	21
5.1.1.	Modelos 3D virtuales obtenidos con escáner de luz estructurada.....	21
5.1.2.	Modelos 3D virtuales obtenidos mediante TAC y procesados con 3D Slicer....	21
5.2.	Uso de los modelos 3D para docencia.....	22
5.3.	Características cuantitativas: valores obtenidos .....	23
5.3.1.	Medidas de los huesos de Pigargo Europeo .....	23
5.3.2.	Volúmenes y Superficies de los huesos de Pigargo Europeo .....	23
5.4.	Modelos 3D impresos .....	24
6.	Discusión.....	25
7.	Conclusiones .....	33
7.	Conclusions.....	34
8.	Bibliografía .....	35
9.	Anexos .....	40
	ANEXO I: Referencias para la toma de medidas de huesos de aves rapaces .....	40

## 1. RESUMEN

El empleo de modelos 3D en docencia y en medicina veterinaria se ha visto incrementado en los últimos años, resultando muy útil en la comprensión de la anatomía. Por otro lado, en el ámbito de protección y conservación de aves rapaces resulta vital el conocimiento de la osteología específica de cada especie para la identificación de restos óseos y el control de poblaciones, siendo el modelaje 3D una posible herramienta útil para llevar a cabo este propósito.

Con este estudio se buscaba obtener una serie de modelos 3D virtuales y físicos para caracterizar el esqueleto del Pigargo Europeo (*Haliaeetus albicilla*), una especie de ave rapaz amenazada y recientemente reintroducida en España, dentro de un cuadro de innovación docente y conservación de fauna autóctona. Los modelos 3D virtuales y físicos se pueden emplear para la enseñanza y aprendizaje de la anatomía tanto de forma presencial como a distancia. Por otro lado, la caracterización de cada hueso permite conocer mejor a esta especie, pudiendo utilizarse además como herramienta de identificación de cadáveres de ejemplares.

Para la obtención de modelos anatómicos virtuales se utilizaron dos ejemplares de Pigargo Europeo y se emplearon dos técnicas de modelado 3D: por un lado, un escáner de luz estructurada y por otro, el Software 3D Slicer para segmentar imágenes DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) obtenidas por Tomografía Axial Computarizada TAC. Ambas técnicas dieron lugar a modelos 3D virtuales de cada hueso de interés en formato *.STL* que se subieron a la plataforma Sketchfab (<https://sketchfab.com/>) para su visualización, incluyendo puntos de referencia y medidas de cada hueso, tomadas con la misma aplicación. Esas mismas medidas se tomaron de nuevo en uno de los ejemplares a mano, con un calibrador digital, para comparar las herramientas de medida, así como la exactitud del modelo 3D. Además de los modelos virtuales, se obtuvieron modelos 3D físicos impresos de los huesos de uno de los ejemplares.

Este trabajo permitió comprender la utilidad de los modelos 3D virtuales e impresos en docencia para el estudio de la anatomía, su posible uso en conservación de especies amenazadas y, además, sirvió para comparar dos técnicas de modelado 3D y caracterizar el esqueleto de un ave rapaz nueva en España.

**Palabras clave:** Pigargo Europeo, modelos 3D, conservación, docencia, huesos.

## 1. ABSTRACT

The use of 3D models in teaching and veterinary medicine has increased during the last years, proving to be very useful in the understanding of anatomy. In the fields of protection and conservation of birds of prey, knowing the specific osteology of each species is vital for the identification of skeletal remains and population control, being 3D modeling a useful tool to carry out this purpose.

The aim of this study was to obtain a series of virtual and physical 3D models to characterize the skeleton of the White-Tailed eagle (*Haliaeetus albicilla*), an endangered bird of prey species recently reintroduced in Spain, as a way of exploring new ways of improving and innovating education and wildlife conservation. Indeed, virtual and physical 3D models can be used for teaching and learning anatomy both in person and remotely. On the other hand, the characterization of each bone allows a better understanding of this species and can also be used as a tool for the identification of skeletal remains.

To obtain virtual anatomical models, two specimens of White-Tailed eagle were studied and two 3D modeling techniques were employed: on the one hand, a structured light scanner and on the other, the 3D Slicer Software to segment DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) images obtained by CT (Computed Axial Tomography). Both techniques resulted in virtual 3D models of each bone of interest in *.STL* format that were uploaded to the Sketchfab platform (<https://sketchfab.com/>) for visualization, including landmarks and measurements of each bone. Those same measurements were taken again on one of the specimens by hand, with a digital caliper, to compare the measurement tools as well as the accuracy of the 3D model. In addition to the virtual models, physical 3D printed models of the bones of one of the specimens were obtained.

This work helped understanding the usefulness of 3D virtual and printed models in teaching and learning anatomy, their possible use in conservation of endangered species, as well as it served to compare two 3D modeling techniques and to characterize the skeleton of a new species of bird of prey in Spain.

**Key words:** White-Tailed eagle, 3D models, conservation, teaching, bones.

## **2. INTRODUCCIÓN**

### **2.1.OSTEOLOGÍA AVIAR**

#### **2.1.1. Características de los huesos en aves**

Las especies pertenecientes a la clase Aves presentan una serie de adaptaciones en sus sistemas y aparatos que les diferencian de los mamíferos aportándoles la capacidad de volar (Kaiser, 2007). Desde hace 150 millones de años, estas especies han evolucionado con el objetivo de aprovechar recursos no alcanzables para animales cuadrúpedos como alimentarse de los árboles más altos o colonizar lugares únicamente accesibles volando (König *et al.*, 2016).

El sistema esquelético está formado por un conjunto de estructuras cuya función principal es la locomoción (Kaiser, 2007). El tejido óseo es no laminar durante el desarrollo embrionario y, por remodelación ósea, se reemplaza por hueso laminar, pudiendo ser compacto o esponjoso de tal forma que el hueso laminar compacto forma la cortical de los huesos y el hueso laminar esponjoso forma el hueso medular (Reznikov *et al.*, 2014).

En comparación con el esqueleto de los mamíferos, las aves presentan un número de huesos menor, ya que algunos están fusionados (König & Liebich, 2020). Ciertos huesos, como el fémur y el húmero están neumatizados, es decir, en vez de médula ósea tienen cámaras de aire conectadas a los sacos aéreos, lo que les proporciona liviandad (Dyce *et al.*, 2011). Además, una serie de trabéculas óseas cruzan la cavidad medular aportándoles fuerza, resistencia y tendencia a astillarse en caso de fracturas (O'Malley, 2007).

#### **2.1.2. Huesos de la cabeza y tronco**

Denominamos esqueleto axial al conjunto de huesos que forman el cráneo y la columna vertebral (Kaiser, 2007).

El cráneo de las aves está formado por un conjunto de huesos neumatizados y fusionados en las primeras etapas de crecimiento, a pesar de ello, podemos dividir los huesos del cráneo en nasal, frontal, parietal, cuadrado y occipital (König *et al.*, 2016). El hueso occipital tiene un solo cóndilo, permitiendo una mayor amplitud de movimiento de la articulación entre el cráneo y la primera vértebra cervical en comparación con los mamíferos (König & Liebich, 2020). En la porción más rostral del cráneo, los huesos maxilares y mandibulares conforman la base ósea del pico, además, las aves presentan grandes órbitas y un tabique interorbitario fino (König *et al.*, 2016).

El tronco está formado por la columna vertebral, las costillas y el esternón (Dyce *et al.*, 2011). La columna vertebral se divide en cuatro tramos: porción cervical, porción torácica, el hueso sinsacro y porción caudal (Kaiser, 2007).

Las vértebras cervicales son largas y sus superficies articulares muy móviles dando lugar a un cuello largo, sigmoideo y flexible. A continuación de las vértebras cervicales, en algunas especies, las primeras vértebras torácicas se fusionan en su porción rostral formando el hueso notario (O'Malley, 2007). Las últimas vértebras torácicas se fusionan con las vértebras lumbares y las primeras vértebras caudales formando el hueso sinsacro, que sirve de apoyo a la cintura pelviana (Harcourt-Brown, 2023). Por último, las vértebras caudales en su porción más caudal se fusionan formando el hueso pigostilo (Dyce *et al.*, 2011).

Las aves presentan entre siete y nueve pares de costillas. (O'Malley, 2007). El esternón se caracteriza por la presencia de una proyección medial alargada llamada la carina o quilla, que constituye el lugar de inserción de los músculos más importantes para el vuelo: los pectorales (König *et al.*, 2016).

### **2.1.3. Huesos del miembro torácico**

La cintura escapular en las aves está compuesta por la fúrcula, que es la estructura resultante de la fusión de las clavículas en su porción distal. Estas están unidas en su extremo proximal al coracoides y a la escápula formando la cavidad glenoidea donde se articula la cabeza del húmero (Dyce *et al.*, 2011). En su porción distal, los cóndilos del húmero articulan con el cúbito y el radio (König *et al.*, 2016).

En las aves, el radio y el cúbito son dos huesos largos de longitud similar que se encuentran paralelos el uno al otro, estando el cúbito caudal al radio (O'Malley, 2007). Proximalmente se articulan entre sí con el húmero y distalmente ambos articulan con el carpo (König *et al.*, 2016).

El esqueleto de la mano se encuentra fusionado dando lugar a únicamente dos huesos en el carpo: el carporradial y el carpocubital. La fila distal de huesos del carpo se encuentra fusionada con el extremo proximal del metacarpo, formando el carpometacarpo (Dyce *et al.*, 2011). Las aves suelen presentar tres dedos con una o dos falanges en función del número de dedo y de la especie (O'Malley, 2007).

### **2.1.4. Huesos del miembro pelviano**

La cintura pelviana o pelvis, se caracteriza por la fusión del isquion, el ilion y el pubis, unido a su vez al sinsacro.

Además de formar la pelvis, la unión de estos huesos da lugar al acetábulo el cual se articula con la cabeza del fémur formando la articulación coxofemoral (Harcourt-Brown, 2023).

El fémur es uno de los huesos más robustos del esqueleto aviar que, en reposo, se encuentra prácticamente en un eje horizontal, paralelo al suelo (Kaiser, 2007). Las aves poseen una articulación entre el antitrocanter de la pelvis y el trocánter del fémur: ambos elementos se articulan cuando la extremidad está en posición de estación, bloqueando al fémur e impidiendo su abducción (Harcourt-Brown, 2023). Esta característica aporta gran equilibrio a las aves cuando se encuentran en estación o descansando sobre una de sus patas (O'Malley, 2007). Su extremo distal se articula con el tibiotarso así como con la fíbula o peroné y con la rótula (König *et al.*, 2016).

El tibiotarso es el resultado de la fusión de la tibia con la fila proximal de los huesos tarsales (Kaiser, 2007). En su porción lateral se encuentra articulada la fíbula o peroné, que en aves es un hueso poco desarrollado e incompleto distalmente (Dyce *et al.*, 2011). Proximalmente ambos articulan con el fémur y participan en la articulación de la rótula (O'Malley, 2007). Distalmente, el tibiotarso se articula con el tarsometatarso (König & Liebich, 2020).

El tarsometatarso recibe su nombre por resultar de la fusión de los huesos metatarsianos 2, 3 y 4 con los huesos de la fila distal del tarso (Harcourt-Brown, 2023). El primer metatarsiano está separado del tarsometatarso encontrándose libre (König *et al.*, 2016). En su extremidad proximal, el tarsometatarso se articula con el tibiotarso formando la articulación intertarsiana y en su extremidad caudal se articula con los dedos (Dyce *et al.*, 2011).

El número de dedos en el miembro pelviano es variable en función del grupo taxonómico, aunque lo más frecuente es la presencia de cuatro dedos, tres orientados hacia craneal y uno hacia caudal (Kaiser, 2007). El número de falanges varía en cada dedo, yendo de dos en el primer dedo hasta cinco en el cuarto (O'Malley, 2007).

## **2.2. IDENTIFICACIÓN DE AVES RAPACES MEDIANTE RESTOS ÓSEOS**

### **2.2.1. Importancia de la identificación de cadáveres de aves rapaces**

Los restos fósiles de aves aportan información sobre los nichos ecológicos en los que se asentaban, así como de la explotación de estos (Nabais *et al.*, 2023). Además, existen hallazgos arqueológicos de especies que no se han extinguido lo cual permite estudiar las posibles diferencias con los ejemplares actuales y comprender su evolución (Núñez-Lahuerta *et al.*, 2021).

Las aves rapaces son especies cuyo comportamiento trófico y lento desarrollo las hace más sensibles a las amenazas antropológicas y a la extinción. Las principales causas de mortalidad incluyen el cambio climático, colisión, sobreexplotación de su hábitat, bioacumulación de contaminantes, la caza directa y el envenenamiento (McClure *et al.*, 2018). En especies amenazadas resulta de vital importancia vigilar las variaciones de las poblaciones mediante el control de la supervivencia de los individuos (Krüger *et al.*, 2010) , así como la causa de muerte con el objetivo de corregir los factores de riesgo (García Matarranz, 2019). Una de las formas de identificar a las especies de aves es teniendo sus restos óseos, además, ciertas lesiones halladas en los huesos pueden revelarnos el origen del fallecimiento del individuo, por ejemplo, en caso de fracturas por colisión o enfermedades metabólicas que cursan con desmineralización ósea (Komosa *et al.*, 2018).

La identificación de aves rapaces por sus restos óseos se puede hacer por caracterización cuantitativa (tamaño) y cualitativa (morfología) de los mismos (García Matarranz, 2019).

### 2.2.2. Estudio de huesos por características cuantitativas

Los métodos de análisis de huesos de aves rapaces no se encuentran estandarizados, cada especialista toma las medidas de los huesos que crea más oportunos en función de su objetivo (Von den Driesch, 2004). A pesar de ello, los autores coinciden a menudo en una parte de los huesos que estudian, siendo los más frecuentemente estudiados el cráneo, el húmero, el radio, el cúbito, el fémur, el tibiotarso, el tarsometatarso, el esternón y el coxal (Bochenski & Tomek, 1999) (Singh *et al.*, 2015) (Figura 2.1). En algunos casos se añaden la escápula, el coracoides (Bochenski & Tomek, 1999) y el carpometacarpo (Gardner *et al.*, 2016), entre otros.



Figura 2.1 Colección de huesos más frecuentemente estudiados (1-coxal; 2-esternón; 3-cráneo; 4-tarsometatarso; 5-fémur; 6-tibiotarso; 7-húmero; 8-cúbito; 9-radio). Los huesos de esta imagen corresponden a un ejemplar de Buitre Negro (*Aegypius Monachus*).

Fuente: *Guía de identificación de rapaces ibéricas por restos óseos* (Víctor García Matarranz), publicada por el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO).

Los huesos estudiados en cada trabajo dependen de la disponibilidad de los mismos en el momento y en el lugar en el que se analizan, (Bochenski & Tomek, 1999) así como de la calidad de la muestra (Von den Driesch, 2004), por ejemplo, los huesos de las extremidades suelen ser los empleados en el estudio de restos óseos pues son los que mejor se conservan a la intemperie (Gardner *et al.*, 2016).

El estudio cuantitativo de los huesos puede tener objetivos distintos a la identificación de la especie, por ejemplo, se ha empleado para determinación de la masa corporal, ya que esta variable aporta mucha información acerca de la fisiología y la evolución de la especie (Field *et al.*, 2013), también se ha utilizado para asociar variaciones en el tamaño de ciertos huesos con adaptaciones evolutivas de cada especie (Singh *et al.*, 2015) o para diferenciar el esqueleto de aves filogenéticamente cercanas y difíciles de distinguir (Trail, 2017).

La toma de medidas anatómicas se realiza con instrumentos diseñados para ello como calibradores digitales (Field *et al.*, 2013), calibre “Pie de Rey” (Charuta *et al.*, 2005) o calibre “Vernier” de escala de nonio (Singh *et al.*, 2015) siempre con una precisión de 0,1 mm (Von den Driesch, 2004). Al igual que en la elección de los huesos que se van a estudiar, el tipo y la cantidad de medidas que se van a tomar en cada hueso depende del autor y objetivo del estudio. A pesar de ello, muchos coinciden en la medición de la longitud máxima de las muestras.

Además de la longitud, en algunos trabajos se mide la anchura de ciertos huesos, por ejemplo, en el cráneo, se corresponde con la distancia entre los dos procesos post-orbitales (Singh *et al.*, 2015), en la pelvis, se mide cómo la distancia entre los antitrocánter de cada lado (Bochenski & Tomek, 1999), en el esternón consiste en la distancia de un proceso craneolateral a otro (Singh *et al.*, 2015). Algunos autores toman medidas de las articulaciones, por ejemplo, el diámetro máximo de la cara articular del coracoides con el húmero (Field *et al.*, 2013) o el diámetro del acetábulo (Bochenski & Tomek, 1999).

### **2.2.3. Estudio de huesos por características cualitativas**

A la hora de identificar una especie por el tamaño de sus huesos podemos encontrarnos con ciertas dificultades, en numerosos casos la talla de algunos huesos se superpone entre especies. Por ello hay intervalos de medidas en los cuales un mismo hueso se clasificaría dentro de más de una especie, de ahí la importancia de tener otros métodos de caracterización de las muestras (Trail, 2017). Además, una ventaja de estudiar las características cualitativas es que no nos enfrentamos a los errores de medida por el uso de instrumentos métricos (Singh *et al.*, 2015).

El estudio de la morfología de huesos de aves se puede emplear para identificar el género o especie a la que corresponde un resto óseo (Kessler, 2015), estudiar la macroevolución de las especies (Bjarnason & Benson, 2021) y entender en qué las variaciones morfológicas permiten la adaptación de las especies al medio (Singh *et al.*, 2015).

El cráneo es un elemento cuyo aspecto permite fácilmente diferenciar entre aves rapaces y no rapaces (Trail, 2017). Algunas estructuras del cráneo que destacan por su variabilidad en función del género son la morfología y posición de las narinas y la forma del pico (García Matarranz, 2019). Algunas especies de águilas pueden diferenciarse por la morfología del septo interorbitario (si es completo o si es fenestrado) y por la forma de los procesos post-orbitales (puntiagudos o aplanados) (Trail, 2017). La mandíbula es un componente de la cabeza que presenta variaciones en la morfología de su porción rostral y rama mandibular, características de la familia taxonómica a la que corresponden (Kessler, 2015).

Otros huesos también poseen variaciones en su morfología: en el esternón, algunos aspectos que se pueden valorar son el desarrollo de la quilla (Singh *et al.*, 2015), la forma del pico del esternón (Bochenski & Tomek, 1999) y del borde caudal del esternón, así como la presencia o ausencia de fenestras (Trail, 2017). En el húmero, existen numerosas variaciones en su porción proximal: forma y profundidad de la *fossa tricipitalis*, (Bochenski & Tomek, 1999) o la proyección de la cresta bicipital, entre otras (Kessler, 2015). Este tipo de caracterizaciones morfológicas se han descrito y se emplean en los huesos mencionados así como en la escápula (Bjarnason & Benson, 2021), el coracoides (Trail, 2017), en todos los huesos del antebrazo (Charuta *et al.*, 2005), en el sinsacro y pelvis (Bjarnason & Benson, 2021), así como en los de la extremidad pelviana (Kessler, 2015; Trail, 2017).

### **2.3. EL PIGARGO EUROPEO (*HALIAEETUS ALBICILLA*)**

#### **2.3.1. Características de la especie**

El Pigargo Europeo es un ave rapaz del orden de las *Accipitriformes* y del género *Haliaeetus* dentro del cual encontramos dos subespecies: *H. a. albicilla* y *H. a. groenlandicus*, cuya población es pequeña y localizada en el extremo suroeste de Groenlandia (Acuerdo de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, 2018).

Se trata de la cuarta especie de águila más grande del mundo, llegando a pesar entre 4,5 kg el macho y 7,0 kg las hembras con una envergadura de hasta 2,5 metros. Los individuos jóvenes poseen un plumaje críptico marrón y blanco (Figura 2.2 B) que mudan anualmente hasta alcanzar la edad adulta en la cual los ejemplares se caracterizan por tener el cuerpo totalmente marrón, cabeza gris, pico amarillo y cola blanca (Figura 2.2 A) (Juste *et al.*, 2023).

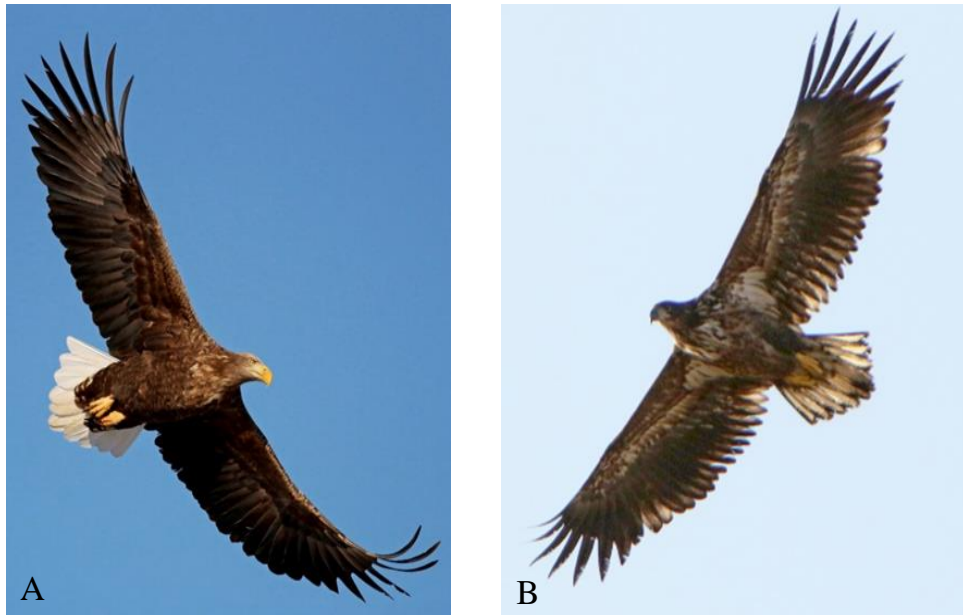


Figura 2.2: Pigargo Europeo adulto (A) y juvenil (B).

Fuente: Laboratorio de Ornitología de Cornell ([https://ebird.org/species/whteag?siteLanguage=es\\_ES](https://ebird.org/species/whteag?siteLanguage=es_ES)).

Su esperanza de vida ronda los 40 años (desde 36 años en libertad hasta 42 en cautividad) alcanzando la madurez sexual entre los 4 y 5 años de vida (Krüger *et al.*, 2010). Los Pigargos Europeos son monógamos y ambos sexos incuban de 1 a 3 huevos durante alrededor de 38 días y, una vez eclosionados, los pollos permanecen con sus padres durante varios meses (Juste *et al.*, 2023).

Su comportamiento trófico se caracteriza por ser depredadores carnívoros (Krüger *et al.*, 2010) cuya dieta se compone principalmente de peces capturados a poca profundidad, secundariamente, de aves acuáticas y pequeños mamíferos en proporción variable (Juste *et al.*, 2023) y, en ocasiones, de carroña (Acuerdo de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, 2018).

Estas aves se localizan en medios forestales próximos a ecosistemas húmedos de agua salada como estuarios y marismas o de agua dulce como lagos y ríos (Juste *et al.*, 2023). Nidifican en grandes árboles, acantilados rocosos (Acuerdo de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, 2018) y con menos frecuencia en el suelo de pequeñas islas (Juste *et al.*, 2023).

La distribución geográfica actual de los Pigargos Europeos se extiende de Este a Oeste desde el extremo oriental de Asia hasta Alemania, Escocia, Irlanda e Islandia, en el Norte se extiende desde el Ártico a través de Siberia y en el Sur se localiza desde Croacia llegando a extenderse a áreas del este del Pacífico (Juste *et al.*, 2023).

### 2.3.2. Presencia histórica del Pigargo Europeo en España

El Pigargo Europeo ha adquirido una mayor importancia mediática en los últimos años en España ya que en junio de 2021 se puso en marcha un proyecto de reintroducción dirigido por la ONG “Grupo de Rehabilitación de la Fauna Autóctona y su Hábitat” (GREFA) (GREFA, 2021), ya que el Pigargo Europeo figura en el “Listado de especies extinguidas en todo el medio natural español” (Acuerdo de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, 2018). Aunque dicha especie se encuentre extinta, existen numerosos restos fósiles y hallazgos arqueológicos que demuestran la presencia del Pigargo Europeo en España (Juste *et al.*, 2023).

Los yacimientos arqueológicos más antiguos que evidencian la presencia del Pigargo Europeo en España son los encontrados en la Sima del Elefante en Atapuerca (Burgos) (Juste *et al.*, 2023). Para identificar estos restos óseos como pertenecientes a la especie *Haliaeetus Albicilla* se tuvieron en cuenta características cualitativas (morfológicas), que permitieron clasificar los huesos en el género *Accipitriformes* y características cuantitativas, comparando medidas tomadas de los restos con medidas de referencia de diversas especies, obteniendo como resultado que eran compatibles con las establecidas en *Haliaeetus Albicilla* (Núñez-Lahuerta *et al.*, 2021). En total existen 21 yacimientos con restos fósiles de Pigargo Europeo del Holoceno y Pleistoceno superior en la península ibérica, Baleares y Canarias. Todos estos se hallan principalmente en áreas costeras e islas, sin embargo, la falta de yacimientos en el centro peninsular no permite confirmar que no se asentaran también en esas zonas (Juste *et al.*, 2023).

Si avanzamos en el tiempo, nos encontramos con que existen 35 registros de la especie en los últimos 180 años que atestiguan de la observación y caza de la especie en las costas gallegas, región de Murcia, islas Berlengas (Portugal) e islas Cíes, entre otros. Estos registros permiten estipular que ya hacia el siglo XIX el Pigargo Europeo estaba al borde de la extinción en España. Existe una gran falta de información sobre el Pigargo Europeo en España durante los siglos anteriores y aunque no se puede determinar el momento exacto de su extinción en nuestro país, se sabe que la actividad humana fue la causa principal (colonización agraria y ganadera de territorios, modelación del paisaje y persecución de la especie) (Juste *et al.*, 2023).

La desaparición del Pigargo Europeo no es un evento que únicamente afectó a España: desde Groenlandia hasta el este de Siberia, previa y durante el siglo XX, las poblaciones de esta especie decayeron considerablemente, siendo en 1970 cuando se registraban los mínimos

históricos a nivel global (Juste *et al.*, 2023). Esta severa disminución de la población a nivel mundial fue el fruto de la persecución de la especie, la destrucción de su hábitat y la contaminación medioambiental (Evans *et al.*, 2009). En la actualidad, la causa de muerte más frecuente es el envenenamiento tanto intencionado como accidental (Komosa *et al.*, 2018).

### **2.3.3. El proyecto Pigargo**

El primer proyecto de reintroducción del Pigargo Europeo en Europa comenzó en 1975 en la isla de Ron, Escocia. A partir de entonces numerosos países tomaron la misma iniciativa con éxito: en 1992 Dinamarca, en 2005 Irlanda, en 2019 Reino Unido y en 2022 Francia, entre otros (Juste *et al.*, 2023) Gracias a los esfuerzos en Europa por recuperar a la especie, el número de parejas se encuentra actualmente entre 4.700 y 6.600 (Evans *et al.*, 2009), siendo Noruega el país con mayor cantidad de ejemplares (Juste *et al.*, 2023).

Los proyectos de reintroducción tienen un objetivo principal: alcanzar un estado de conservación favorable de especies de interés comunitario (Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, 2007). Se trata de una herramienta que favorece la biodiversidad, ayuda a la recuperación de ecosistemas dañados (Juste *et al.*, 2023) y además son una oportunidad para investigar la evolución de una población en recuperación y servir de modelo en futuros proyectos (Krüger *et al.*, 2010).

Para la reintroducción del Pigargo Europeo en España, el “Proyecto Pigargo” de GREFA realizó en un primer momento una fase experimental durante los años 2021 y 2022 para valorar si las aves se adaptaban correctamente al hábitat seleccionado, así como el impacto ecológico y socioeconómico local (GREFA, 2021). La localidad de Pimiango, en la costa oriental asturiana, fue el área elegida por ser apta para la liberación y posterior reproducción de los ejemplares (Juste *et al.*, 2023). Durante esta fase, se importaban pollos provenientes de Noruega, se aclimataban en una instalación de hacking hasta su desarrollo completo (Figura 2.3), se liberaban y se continuaban monitorizando (GREFA, 2021). Los resultados fueron exitosos: se liberaron 25 pigargos cuya mayoría fueron aptos para sobrevivir en libertad, sin perturbar las actividades antrópicas ni los ecosistemas locales (Juste *et al.*, 2023). A pesar de los buenos resultados en la primera etapa, el proyecto tuvo que frenarse porque el Principado de Asturias tomó la decisión de dejar de apoyarlo, y sin ese apoyo, no se pudo continuar liberando ejemplares. Por ello, actualmente el proyecto continúa parado y a la espera de reunirse con los representantes de Asturias con el objetivo de revertir la situación. A pesar de no liberar nuevos grupos de pigargos, los trabajadores del proyecto continúan con el

monitoreo y estudio de las 21 aves que han sobrevivido de entre las 25 liberadas durante la fase experimental (GREFA, 2023).



Figura 2.3: Instalación de hacking para aclimatación y monitorización de pollos de Pigargo Europeo localizada en Pimiango, Asturias.

*Fuente: Elaboración propia.*

## **2.4.MODELOS 3D**

### **2.4.1. Tipos de modelo 3D**

Los modelos 3D digitales permiten recrear un elemento real en una reproducción virtual manteniendo su apariencia, escala, dimensiones y textura. Para lograrlo, algunas técnicas se basan en el escaneo superficial del objeto de trabajo mediante escáneres de láser o por fotogrametría (Atik *et al.*, 2023). Otras consisten en el procesamiento de imágenes volumétricas 2D obtenidas con aparatos como la resonancia magnética o la tomografía computarizada (Bücking *et al.*, 2017).

El escáner láser de superficie es un método práctico, rápido y que permite modelar elementos de compleja estructura. Su funcionamiento depende del tipo de escáner, basándose en técnicas de triangulación como la “multi-stripe laser triangulation” (MLT), técnicas de medida de diferencia de fases o métodos de pulsación (Atik *et al.*, 2023). Mediante estos métodos el aparato mide la distancia a la que se encuentran las distintas partes del elemento, creando una nube de puntos que se procesan con softwares específicos en una malla y posteriormente añaden textura dando un aspecto más realista al modelo 3D (Bücking *et al.*, 2017). La fotogrametría es otra técnica de modelaje 3D de superficie que resulta más económica ya que consiste en la obtención, con softwares específicos, de una nube de puntos a partir de fotografías hechas a mano con cámaras digitales (Atik *et al.*, 2023).

En el caso del procesamiento de imágenes volumétricas obtenidas mediante imagen de resonancia magnética (IRM) o tomografía axial computarizada (TAC), se debe realizar, con

softwares específicos como *ITK Snap* o *Materialise* (Valverde, 2017), una segmentación de las imágenes, es decir, seleccionar y etiquetar las distintas regiones de las imágenes que queremos modelar. Tras seleccionar la estructura que queremos virtualizar, se lleva a cabo el mallado, la textura y toques finales que permiten refinar el modelo 3D (Bücking *et al.*, 2017).

Existen gran cantidad de programas de procesamiento de imágenes en modelos 3D de los cuales podemos destacar el 3D Slicer, ampliamente utilizado (Bücking *et al.*, 2017). Una vez obtenido el modelo 3D digital, se puede guardar en diversos formatos tales como *.STL*, *.OBJ*, *.GLTF* o *.PLY* (Rajas Fernández *et al.*, 2022).

Una vez obtenido el modelo 3D digital, se puede llevar a cabo la impresión de este. Las impresoras 3D construyen el objeto mediante el depósito por capas horizontales de un material específico (Kharat *et al.*, 2023). Los métodos de impresión 3D pueden estar basados en el empleo de rayos, consistiendo en el endurecimiento de un polímero sensible a la luz. Esta técnica se divide en estereolitografía (SLA), que emplea un láser UV, y en procesamiento digital de la luz (DLP), que emplea una pantalla proyectora (You *et al.*, 2022). Las impresoras 3D basadas en la extrusión del material funcionan mediante el uso de polímeros termoplásticos que se funden y se extruyen para ser depositados en la plataforma de impresión, a esta técnica se la denomina modelado por deposición fundida (FDM). Dentro de este grupo de impresoras FDM, destacamos las que emplean el ácido poliláctico (PLA) ya que son de las más utilizadas por su versatilidad y facilidad de uso (Kharat *et al.*, 2023).

#### **2.4.2. Aplicaciones de modelos 3D**

El empleo de modelos 3D digitalizados en los ámbitos de la enseñanza y las ciencias de la salud ha aumentado de manera importante desde 2019 a raíz de la pandemia de la COVID-19, pues la imposibilidad de asistencia presencial favoreció el mayor uso de estas técnicas (Barja-Ore *et al.*, 2023). En medicina, el modelaje 3D de elementos anatómicos tiene muchas ventajas: se utiliza para la impresión de prótesis personalizadas al paciente y la remodelación de tejidos blandos (You *et al.*, 2022). En cirugía permite un mejor conocimiento de la anatomía específica del paciente y ayuda a una mejor planificación previa en procedimientos complejos (Valverde, 2017). En docencia, el uso de estas técnicas innovadoras resulta a los estudiantes más atractiva y dinámica, pues les aporta mayor posibilidad de exploración y manipulación de los elementos (Barja-Ore *et al.*, 2023). Cabe destacar que las técnicas 3D se utilizan en muchos otros ámbitos: industria cinematográfica, arqueología, modelaje de áreas urbanas o estudios de ingeniería (Atik *et al.*, 2023).

Dentro del ámbito de protección y conservación de aves rapaces amenazadas, los modelos 3D de esqueletos de diversas especies se pueden emplear para servir de guía en la identificación de restos óseos. La página web de la Universidad Complutense de Madrid cuenta con un programa estadístico, Python, en el cual se pueden introducir medidas de diversos huesos y, con esa información, éste es capaz de identificar a qué especies de ave rapaz se aproxima más (<http://sdelanieta.pythonanywhere.com/>). En esa misma página se encuentran virtualizados en 3D los esqueletos de 26 aves rapaces ibéricas incluyendo medidas relevantes de cada hueso (<https://www.ucm.es/fisioanimvet/aves-rapaces>). A estas páginas puede entrar todo usuario con acceso a internet, facilitando la identificación de esqueletos por cualquier persona en cualquier lugar. Además, su empleo en docencia en veterinaria facilita la comprensión a los alumnos de la anatomía aviar ósea siendo un método de enseñanza innovador y complementario a los tradicionales (Rajas Fernández *et al.*, 2022). Por otro lado, los modelos 3D virtualizados e impresos permiten proteger los restos óseos originales del deterioro por manipulación pues el procesamiento de los mismos consta de técnicas no destructivas (Bibb & McKnight, 2022).

### 3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Existen muy pocos estudios enfocados al esqueleto de las aves rapaces y más concretamente del Pigargo Europeo. La situación de esta ave sigue siendo muy frágil actualmente, pues el proyecto de reintroducción en la península ibérica liberó a los primeros ejemplares hace tan sólo tres años. Además, al frenarse su actividad de manera indefinida, el proyecto no puede avanzar: la importación de pollos de Noruega y por lo tanto su adaptación y liberación en territorio asturiano se ha bloqueado pues no está permitido sin el apoyo del Principado de Asturias. Por una parte, la información aportada por el estudio en 3D del esqueleto del Pigargo Europeo podría ayudar en la monitorización de los ejemplares que se han liberado. La publicación del modelo 3D en la página web de aves rapaces de la Universidad Complutense de Madrid y a la aplicación estadística Python, favorecería el que esta especie sea conocida por aquellos que todavía no han oído hablar de ella, desmitificando su papel de superdepredador y concienciando de la importancia de su reintroducción. Además, los estudiantes interesados por la anatomía aviar podrán consultar los modelos 3D, siendo una forma innovadora de docencia. Por otra parte, la toma de medidas de cada hueso serviría para la identificación de restos óseos encontrados en el campo, así como su diferenciación con los esqueletos de otras especies de aves rapaces ibéricas.

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar el esqueleto del Pigargo Europeo (*Haliaeetus albicilla*) mediante el modelaje y estudio en 3D de los huesos de ejemplares.

Los objetivos secundarios que se plantean son:

- Obtener modelos anatómicos virtuales de los huesos de Pigargo Europeo (*Haliaeetus albicilla*) y subirlos a la página web <https://www.ucm.es/fisioanimvet/aves-rapaces> dónde se encuentran embebidos en el repositorio online Sketchfab.
- Establecer métodos de virtualización para modelos 3D.
- Tomar las medidas en cada hueso planteadas por Víctor García Matarranz en la *Guía de identificación de rapaces ibéricas por restos óseos* publicada por el MITECO, para añadirlas a la aplicación Python.
- Proponer un método de medición virtual de restos óseos.
- Comparar las medidas tomadas en cada hueso de distintos ejemplares.
- Imprimir en 3D el modelo virtualizado.

## **4. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **4.1. ANIMALES OBJETO DE ESTUDIO**

Para llevar a cabo el estudio del esqueleto del Pigargo Europeo se utilizaron dos ejemplares de la especie. Al primero, un esqueleto completo cedido por el profesor Juan Francisco Pastor Vázquez de la Universidad de Valladolid Madrid, se le denominará “Ejemplar 1”. Los restos óseos de este animal se encontraban en el Zoo-Aquarium de Madrid, al cual llegó en 2008. Se desconocen los datos referentes al sexo, así como a la causa de muerte y la edad exacta, aunque se sabe que se trataba de un adulto.

Al segundo animal estudiado, se le denominará “Ejemplar 2”. En este caso se estudió el esqueleto completo del ave a partir de un TAC que se le realizó tras ingresar en GREFA con sospecha y posterior confirmación de Aspergilosis. Se trataba de una hembra de aproximadamente 2 años, proveniente de Noruega y liberada tras su recuperación en Ribadeveba, Asturias.

### **4.2. VIRTUALIZACIÓN EN 3D A PARTIR DE IMÁGENES OBTENIDAS CON ESCÁNER**

Para la virtualización en 3D con escáner de luz estructurada los huesos que se utilizaron fueron: húmero, cúbito, radio, esternón, coxal, tibiotarso y tarsometatarso del Ejemplar 1. Este aparato consta de una plataforma circular giratoria, una placa de calibrado, un trípode y un escáner con dos cámaras que se conecta al ordenador y a la placa giratoria.

Para virtualizar en 3D cualquier elemento, primero hay que calibrar el escáner ya que este proceso permite que el escaneo sea de la mayor calidad y precisión posible. Al abrir el software EXScan S\_v3.1.2.0. Ink para empezar a escanear, automáticamente se despliega la pestaña de calibración, indicando que se debe colocar la placa de calibrado en el centro de la plataforma giratoria de tal forma que ambas cámaras del escáner la capten. Esta placa tiene por un lado una serie de puntos en distintas posiciones que permite al escáner posicionarse en el espacio para la toma de imágenes y por el otro lado es totalmente blanca. Al comenzar a calibrar, el aparato toma una captura de la placa colocada con los puntos tal y cómo nos indica el software, después se le da una vuelta de 90° a la placa y se hace una segunda captura. Para terminar el calibrado se vuelve a girar la placa 90°, haciendo una última captura (Figura 4.1). Tras esto se hace un segundo calibrado de blancos que permite mejorar la textura (color) del modelo. Para ello se emplea la herramienta de balance de blancos, poniendo esta vez en la plataforma giratoria la placa del lado que es blanco y sin puntos (Figura 4.2).

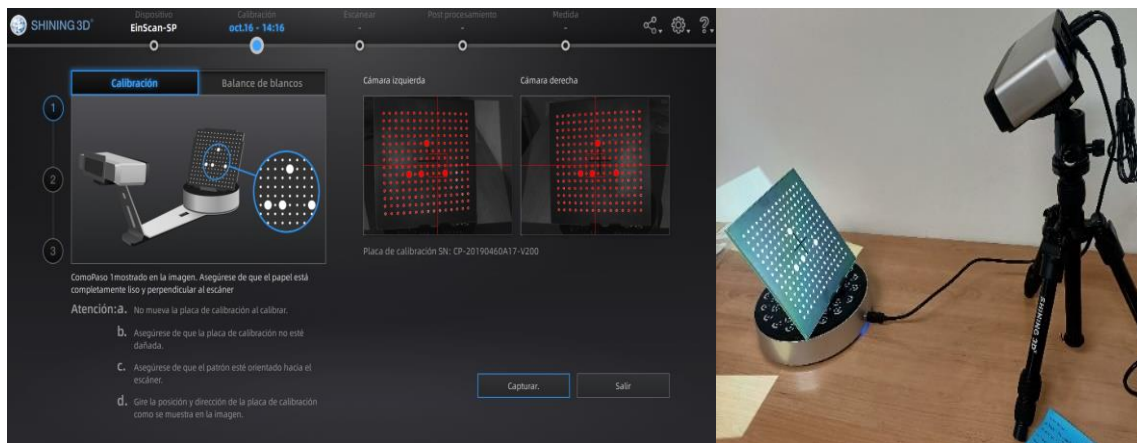


Figura 4.1 Realización del calibrado del escáner EinScan SP.

*Fuente: Elaboración propia.*

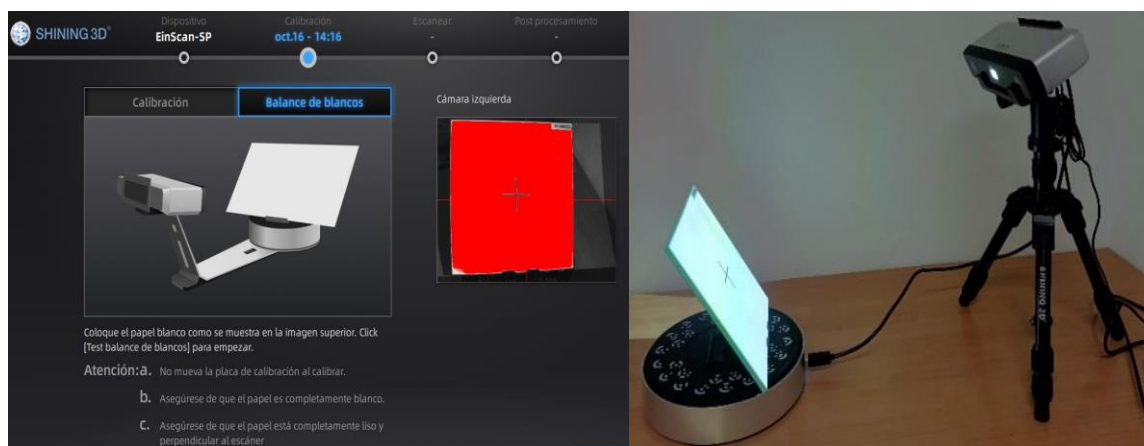


Figura 4.2 Realización del balance de blancos del escáner EinScan SP.

*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez finalizado el calibrado se comenzó con el escaneo de los huesos uno por uno (Figura 4.3). Para ello se posicionaba el hueso en el centro de la placa giratoria y se modificaba la distancia entre la placa y el escáner hasta que se pudiese observar el hueso centrado en ambas cámaras. Una vez hecho esto comenzaba el escaneo: se seleccionaron 25 giros de la plataforma en torno a sus 360° en cada posición que se ponía el hueso. Tras cada escaneo se empleó la herramienta de selección para delimitar el elemento que se quería guardar. Una vez que se obtenía el hueso completo escaneado correctamente, se llevaba a cabo el mallado mediante la herramienta de “modelo de malla estanco” por la cual el software rellenaba automáticamente los espacios e imperfecciones. Finalmente se generaba el archivo 3D en formatos *STL*, *PLY*, *.OBJ* y *.ASC*.

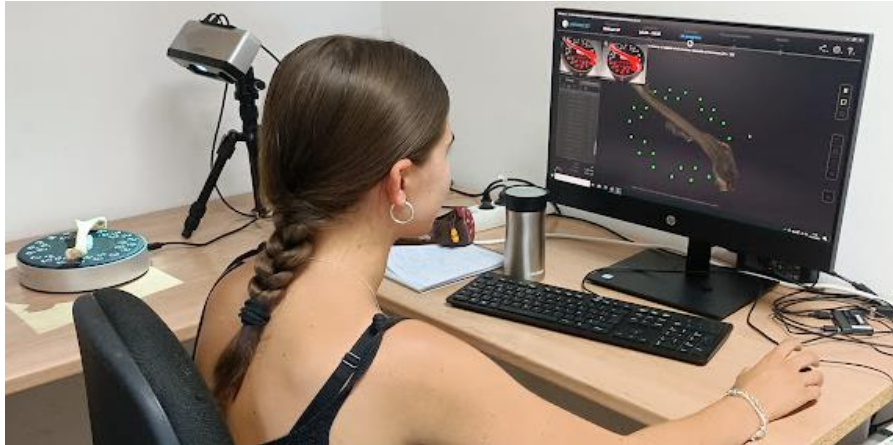


Figura 4.3: Escaneo con EinScan SP del húmero del ejemplar 1 para su virtualización en 3D.

*Fuente: Elaboración propia.*

### **4.3. OBTENCIÓN DE IMÁGENES CON TAC**

Para el estudio del esqueleto del Pigargo Europeo se virtualizó el cráneo del Ejemplar 1 y el esqueleto completo del Ejemplar 2 a partir de imágenes DICOM obtenidas por tomografía axial computarizada (TAC).

En el caso del cráneo del Ejemplar 1 se realizó un TAC de cobertura parcial, para el cual se empleó un equipo de rayos X multifunción (*modelo Multivet, Sedecal, Madrid*), ubicado en el servicio de diagnóstico por imagen del Hospital Clínico Veterinario Complutense (HCVC), con el cual se pueden realizar estudios de radiografía digital directa, radiografía digital dinámica y tomografía computarizada. Para llevar a cabo un TAC, el equipo emplea una tecnología denominada “topología de CBCT (Cone-Beam CT)”, esta se basa en el escaneo de la zona a explorar con un haz cónico de Rayos X, generando una imagen 2D a partir de la cual se puede realizar una reconstrucción en 3D. Al realizar el TAC se emplea una ventana (WW/WL) por defecto para ir visualizando el volumen reconstruido.

En el caso del Ejemplar 2, los profesionales veterinarios de GREFA tomaron la decisión de realizarle un TAC convencional para confirmar un diagnóstico de aspergilosis en el servicio de Diagnóstico por Imagen del Hospital Veterinario ERVET con un *Toshiba Aquilion 64 CT Scanner*. El archivo DICOM generado fue cedido a la Universidad Complutense de Madrid posteriormente para la virtualización y caracterización de los huesos.

### **4.4. VIRTUALIZACIÓN EN 3D A PARTIR DE IMÁGENES DICOM**

Para virtualizar las imágenes en formato DICOM se empleó el software 3D Slicer con el cual se pueden seleccionar los diversos segmentos de interés para la reconstrucción tridimensional de las estructuras. Para comenzar con la segmentación se cargaron los archivos DICOM en el

software, pudiendo visualizarse en cuatro planos: sagital, axial, coronal y 3D. Por cada hueso del esqueleto se creó un segmento empleando la herramienta *Segment Editor*. Dentro de *Segment Editor* se utilizaron diversas técnicas para delimitar la estructura de interés. En primer lugar, se empleó la herramienta *Threshold*, la cual selecciona las estructuras encontradas dentro del rango de intensidades que se desee. Una vez aplicado *Threshold* quedaba un segmento más o menos exacto el cual se perfeccionaba primero recortando grandes zonas en todos los cortes que no correspondían a la estructura de interés con la herramienta *Scissors*. Por último, se delimitaba precisamente el segmento en cada plano con las herramientas *Paint* y *Erase* actuando únicamente sobre el corte en el que se emplean o actuando sobre varios cortes activando la opción *Sphere Brush*. Una vez seleccionado el segmento, se aplicaba un *Smoothing* directamente en la vista 3D, herramienta que elimina cualquier ruido o imperfección en el modelo final, mejorando la textura y superficie del modelo. Una vez finalizado el proceso, se procedía a guardar el segmento en formato *.SEG* y a exportar el modelo 3D en formato *.STL*.

#### **4.5. TOMA MANUAL DE MEDIDAS**

La toma manual de medidas en milímetros (mm) se llevó a cabo mediante el empleo de un calibrador digital y siguiendo las pautas de medida para cada hueso propuestas en la *Guía de identificación de rapaces ibéricas por restos óseos* de Víctor García Matarranz (Anexo I).

#### **4.6. REPOSITORIO VIRTUAL**

Tras obtener los modelos tridimensionales de cada hueso en formato *.STL* y *.OBJ*, se procedió a subirlos al repositorio online Sketchfab (<https://sketchfab.com/>) para su visualización, así como para la toma de medidas virtuales y para añadirlos posteriormente a la página web de la Universidad Complutense de Madrid: <https://www.ucm.es/fisioanimvet/pigargo-europeo-haliaeetus-albicilla-1c>.

#### **4.7. TOMA VIRTUAL DE MEDIDAS**

Para la toma de medidas virtuales con Sketchfab se empleó primero la herramienta *Edit 3D settings* con la cual, en cada hueso, se indicaron los mismos puntos de referencia utilizados en la toma manual de medidas. Después, se utilizó la herramienta *Measurements* (<https://labs.sketchfab.com/experiments/measurements/>) obteniendo la medida en milímetros entre dos puntos de referencia señalados.

#### **4.8. TOMA DE SUPERFICIES Y VOLÚMENES**

Para la obtención de los valores de superficie en  $\text{cm}^2$  y volumen en  $\text{cm}^3$  de cada hueso de interés se utilizaron herramientas disponibles en los Software empleados para el modelaje 3D.

En el caso de los modelos 3D virtualizados con escáner de luz estructurada, tras el mallado se abrió la ventana de *medidas* en la cual, tras seleccionar la totalidad del modelo, el programa calculaba tanto el área de superficie como su volumen. Por otro lado, para los huesos virtualizados con 3D Slicer, se empleó una herramienta denominada *Segment Statistics*, la cual calcula diversos valores del segmento creando una tabla, entre los cuales se encuentran la superficie y el volumen.

#### 4.9. IMPRESIÓN 3D

Para la impresión de los modelos 3D se empleó una impresora Artillery Sidewinder X2, la cual emplea la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM). Se utilizó PLA+ como material para llevar a cabo las impresiones. Antes de imprimir los modelos virtuales, se segmentó cada archivo *.STL* con el Software Ultimaker Cura para ajustar los parámetros de impresión (temperatura, tipo de base, tipo de andamios entre otros) (Figura 4.4 A) con el objetivo de imprimir modelos 3D con la menor cantidad de andamios posible pero los suficientes para que se mantenga la estabilidad de la impresión hasta el final de esta. Una vez finalizado este paso, se calibró la impresora: este proceso permite que la placa de impresión tenga el mismo nivel en todo su recorrido, permitiendo una impresión regular (Figura 4.4 B).



Figura 4.4: (A) Ejemplo de posibles andamios y base para la impresión de fémur de Pigargo Europeo y (B) calibración de la impresora 3D Artillery Sidewinder X2.

*Fuente: Elaboración propia.*

## 5. RESULTADOS

### 5.1. MODELOS 3D VIRTUALES

Las técnicas empleadas para la virtualización de los huesos de Pigargo Europeo permitieron generar modelos 3D realistas y válidos para la toma virtual de medidas de interés descritas en el Anexo I.

#### 5.1.1. Modelos 3D virtuales obtenidos con escáner de luz estructurada

Para la obtención de modelos 3D mediante escáner de luz estructurada se llevó a cabo el escaneo y virtualización del esternón, coxal, húmero, cúbito, radio, fémur, tibiotarso, fíbula y tarsometatarso del Ejemplar 1 (Figura 5.1). Para los huesos de las extremidades se utilizaron los del lado derecho del animal salvo el tarsometatarso que por deterioro se tuvo que coger el del lado izquierdo.



Figura 5.1: Modelos 3D virtuales de los huesos del Ejemplar 1 obtenidos con escáner de luz estructurada y visualizados en Sketchfab (1-esternón; 2-coxal; 3-húmero; 4-cúbito; 5-radio; 6-fémur; 7-tibiotarso; 8-fíbula; 9-tarsometatarso).

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 5.1.2. Modelos 3D virtuales obtenidos mediante TAC y procesados con 3D Slicer

Para la obtención de modelos 3D mediante procesamiento de imágenes DICOM, una vez cargado en 3D Slicer el archivo de trabajo, se creó y exportó un segmento por cada hueso de interés mediante el uso de las diversas herramientas del programa. En este caso se virtualizaron todos los huesos de interés del Ejemplar 2: cráneo, esternón, coxal, húmero, cúbito, radio, fémur, tibiotarso y tarsometatarso (Figura 5.2) y el cráneo del Ejemplar 1 (Figura 5.3). Al igual que en el caso anterior, se emplearon los huesos del lado derecho del animal en las extremidades.



Figura 5.2: Modelos 3D virtuales de los huesos del Ejemplar 2, obtenidos por procesamiento de imágenes DICOM con 3D Slicer y visualizados con Sketchfab (1-cráneo; 2-esternón; 3-coxal; 4-húmero; 5-cúbito; 6-radio; 7-fémur; 8-tibiotarso y fíbula; 9-tarsometatarso).

*Fuente: Elaboración propia.*



Figura 5.3: Modelo virtual del cráneo del Ejemplar 1, obtenido por procesamiento de imágenes DICOM con 3D Slicer y visualizado con Sketchfab.

*Fuente: Elaboración propia.*

## 5.2.USO DE LOS MODELOS 3D PARA DOCENCIA

Todos los modelos virtualizados de los huesos del Ejemplar 1 y Ejemplar 2 se subieron a la página web de la Universidad Complutense de Madrid (<https://www.ucm.es/fisioanimvet/pigargo-europeo-haliaeetus-albicilla-1c>), abierta a todo usuario con acceso a internet y a la cual también se puede acceder a través de un código QR (Figura 5.4). Para su visualización se empleó el repositorio virtual Sketchfab (<https://sketchfab.com/>), en el cual se incluyeron las estructuras de interés para la toma de medidas y los valores de estas.



Figura 5.4: Código QR de acceso al repositorio virtual.

### 5.3. CARACTERÍSTICAS CUANTITATIVAS: VALORES OBTENIDOS

#### 5.3.1. Medidas de los huesos de Pigargo Europeo

Las distintas medidas de interés (Tabla 5.1) se tomaron manualmente con un calibrador digital en los huesos del Ejemplar 1 y virtualmente en ambos pigargos con la herramienta *Measurement* de Sketchfab, una vez subidos los archivos 3D. Todas las mediciones se realizaron según la guía de medición mostrada en el Anexo I.

Tabla 5.1: Medidas manuales y virtuales de los huesos de interés en los ejemplares de Pigargo Europeo.

HUESO	MEDIDAS (mm) Ejemplar 1		MEDIDAS (mm) Ejemplar 2
	Manuales (calibrador digital)	Virtuales (Sketchfab)	Virtuales (Sketchfab)
Cráneo (longitud)	127,0	127,5	138,9
Cráneo (anchura)	60,2	60,2	64,7
Esternón	139,4	138,1	160,8
Húmero	213,8	214,1	247,3
Cúbito	247,6	246,2	281,3
Radio	236,2	236,8	268,6
Coxal (longitud)	97,1	96,8	123,8
Coxal (anchura)	55,9	55,1	60,6
Fémur	116,7	116,6	136,5
Tibiotarso	161,8	161,4	188,1
Tarsometatarso	95,0	95,6	110,0

#### 5.3.2. Volúmenes y Superficies de los huesos de Pigargo Europeo

Para la obtención de los volúmenes y superficies (Tabla 5.2) de cada hueso se emplearon las herramientas de medida disponibles en el propio software de Ein Scan SP en el caso del Ejemplar 1 y con la herramienta *Segment Statistics* de 3D Slicer en el caso del Ejemplar 2.

Tabla 5.2: Volúmenes y áreas de superficie de los huesos de interés de Pigargo Europeo.

HUESO	Resultados Ejemplar 1 (Ein Scan SP)		Resultados Ejemplar 2 (3D Slicer)	
	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Superficie (cm <sup>2</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Superficie (cm <sup>2</sup> )
Cráneo*	54,4	196,5	81,9	278,3
Esternón	27,6	254,0	60,8	333,9
Húmero	54,7	152,0	82,3	198,3
Cúbito	27,0	97,6	35,0	121,0
Radio	8,5	53,0	10,4	63,8
Coxal	47,7	229,0	79,5	358,0
Fémur	20,8	64,5	30,7	120,2
Tibiotarso	17,3	72,5	31,6	127,9
Tarsometatarso	8,7	48,0	14,2	61,1

\*El volumen y superficie del cráneo del Ejemplar 1 fueron calculados con 3D Slicer pues el modelo 3D se obtuvo a partir de imágenes DICOM.

#### 5.4.MODELOS 3D IMPRESOS

Se llevó a cabo la impresión en 3D de todos los modelos 3D virtualizados con el escáner de luz estructurada Ein Scan SP del Ejemplar 1, así como del cráneo del mismo ejemplar, virtualizado con 3D Slicer a partir del TAC que se le realizó en el Hospital Clínico Veterinario Complutense.



Figura 5.5: Modelos 3D impresos de los huesos del Ejemplar 1 (1-coxal; 2-esternón; 3-cráneo; 4-fémur; 5-tibiotarso; 6-fíbula; 7-tarsometatarso; 8-húmero; 9-cúbito; 10-radio).

*Fuente: Elaboración propia.*

## 6. DISCUSIÓN

El empleo de técnicas 3D ha sufrido un aumento importante desde 2019 en docencia y salud (Barja-Ore *et al.*, 2023). Su uso en medicina, así como veterinaria permite modelar la anatomía específica de cada paciente, dando lugar a una planificación quirúrgica y tratamientos más exactos (da Silveira *et al.*, 2021). En el ámbito de la educación, los modelos 3D permiten un aprendizaje de la anatomía en mayor profundidad por la posibilidad de observar la interacción de las estructuras en el espacio (Bücking *et al.*, 2017), el tamaño de las mismas (Valverde, 2017) y mejoran el interés del alumno por la posibilidad de manipulación y exploración autónoma (Barja-Ore *et al.*, 2023).

Las aves rapaces son especies generalmente vulnerables a la acción humana y muchas de ellas se encuentran en peligro de extinción (McClure *et al.*, 2018). La identificación de sus restos óseos es de gran ayuda para conocer las causas de muerte y para proteger a las poblaciones afectadas (García Matarranz, 2019). El Pigargo Europeo es una especie amenazada y recientemente reintroducida en España, por ello resulta crucial estudiar los comportamientos de la población introducida, así como el número de animales que mueren y las causas para valorar su adaptación al medio (Juste *et al.*, 2023). La obtención de modelos 3D virtuales e impresos de huesos de Pigargo Europeo, además de cumplir con un objetivo pedagógico para la enseñanza de la osteología aviar de forma innovadora, se puede emplear en la monitorización de los ejemplares introducidos. En caso de encontrar un esqueleto de ave rapaz en el campo, para reconocerlo, se debe incluir dentro de las distintas especies posibles al Pigargo Europeo, siendo de mayor importancia formar a los profesionales más implicados en este tipo de actividades como los guardas forestales.

Se pueden emplear diversas técnicas para obtener un modelo 3D virtual: escáner de luz estructurada, fotogrametría y procesamiento de imágenes obtenidas con TAC, IRM o ecografía (Atik *et al.*, 2023; You *et al.*, 2022; Valverde, 2017).

En el caso del empleo de imágenes médicas, existen diversas ventajas y limitaciones para tener en cuenta. El uso de imágenes obtenidas por ultrasonidos es poco frecuente y se limita a ciertos tejidos específicos como las válvulas cardíacas (Valverde, 2017). Por otro lado, el TAC es una herramienta precisa para el estudio de estructuras de densidades extremas tales como el hueso (alta densidad) y el pulmón (baja densidad) mientras que la IRM resulta de gran utilidad para el estudio de tejidos blandos con gran precisión, empleando distintos tonos de grises dentro de un mismo órgano (Bücking *et al.*, 2017). Además, la IRM es una herramienta

de diagnóstico por imagen más lenta y cara que el TAC, empleándose con mayor frecuencia en medicina humana. Por ello, existe una mayor disponibilidad de aparatos de TAC que de IRM en el ámbito de la medicina veterinaria (Lux *et al.*, 2017).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se decidió emplear las imágenes DICOM de un TAC para la realización de modelos 3D virtuales de los huesos del Ejemplar 2 así como del cráneo del Ejemplar 1, ya que el modelo de este obtenido con el escáner carecía de detalles en ciertas estructuras profundas. Cabe destacar que un parámetro que influye en la calidad del modelo 3D virtualizado es el grosor de cortes seleccionado al realizar el TAC: cuánto más finos sean los cortes, menor pérdida de información y consecuentemente, el resultado final será más exacto (Ford & Decker, 2014). Los TAC empleados para la segmentación de los huesos de Pigargo Europeo tenían cortes de grosor distinto, siendo de 0,145mm x 0,145mm x 0,145mm los del cráneo del Ejemplar 1 y de 0,3mm x 0,888mm x 0,888mm los del Ejemplar 2. Esto se puede ver reflejado en el resultado final de los modelos 3D virtualizados: el cráneo del Ejemplar 1 presenta superficies más lisas y estructuras más detalladas (Figura 6.1 A) que en el caso del Ejemplar 2, que, por falta de información, ciertas áreas, como los cornetes nasales, aparecen ausentes o completas por defecto (Figura 6.1 B).

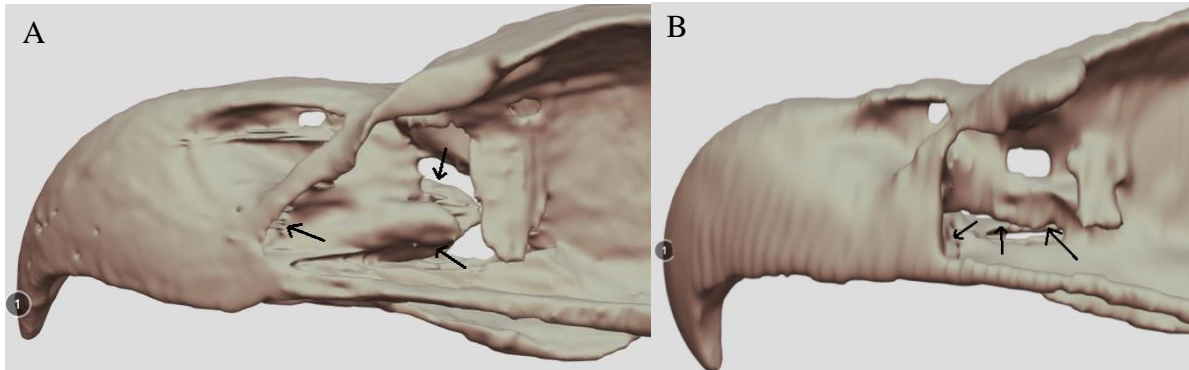


Figura 6.1: Comparación entre los cornetes nasales (indicados con flechas) en los modelos virtualizados del Ejemplar 1 (A) y del Ejemplar 2 (B).

*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez obtenida la imagen médica, se debe procesar para la obtención del segmento de interés virtualizado. Para ello, existen gran variedad de softwares disponibles: Seg3D, 3D Slicer, InVesalius, ITK-Snap e ImageJ entre otros (Bücking *et al.*, 2017). Para la segmentación de los archivos DICOM empleados en el estudio, se decidió utilizar 3D Slicer ya que se trata de una aplicación fácil de utilizar, económica y novedosa, con gran cantidad de herramientas para seleccionar los elementos de interés con precisión e incluso para la toma de medidas (You *et al.*, 2022). A pesar de tener muchas ventajas, el uso de 3D Slicer para

segmentar elementos puede ser un proceso largo y para el cual se requieren ciertos conocimientos en anatomía (Bücking *et al.*, 2017). Para la obtención de modelos 3D virtuales a partir de imágenes DICOM, el tiempo dedicado a la segmentación fue variable en función del hueso. En huesos lisos y con una cortical gruesa, como es el caso del fémur, el tibiotarso o el húmero, la herramienta *Threshold* fue de gran utilidad para delimitar con bastante exactitud el hueso, al no tener una gran gama de densidades (Figura 6.2 A). Sin embargo, en huesos con una cortical fina y muchas trabéculas, como el coxal o el cráneo, se les tuvieron que aplicar más cambios para completar el área de interés con herramientas como *Paint* y *Erase* principalmente (Figura 6.2 B).

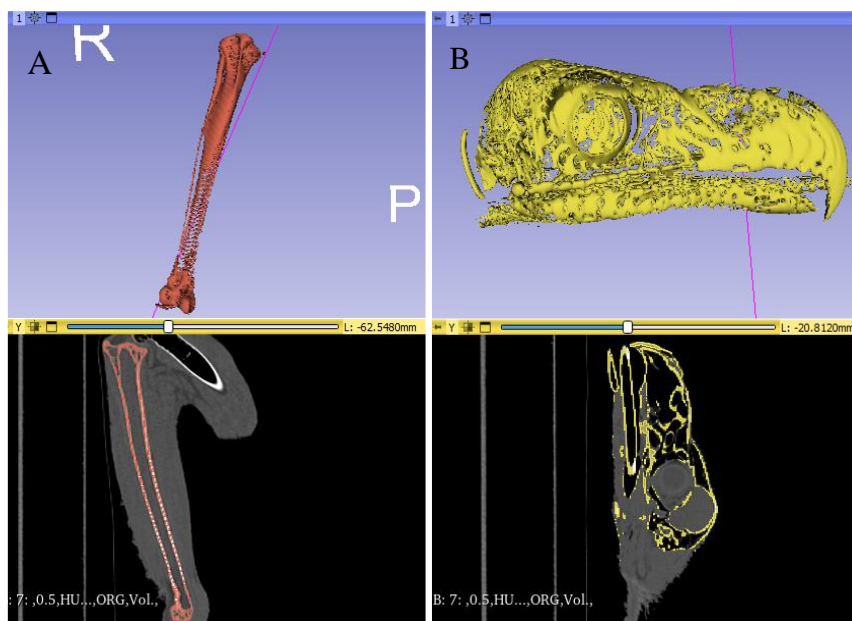


Figura 6.2: Comparación entre el uso de *Threshold* en 3D Slicer para la segmentación de tibiotarso (A) y cráneo (B). Se observa que en el tibiotarso la herramienta realiza una segmentación bastante exacta del hueso mientras que el cráneo presenta una mayor falta de información.

*Fuente: Elaboración propia.*

Es posible obtener modelos 3D sin imágenes médicas mediante técnicas de escaneo de superficie. El escáner de luz estructurada es un aparato que permite obtener modelos 3D de forma rápida y económica por escaneo del objeto de estudio en diversas posiciones (Atik *et al.*, 2023). La velocidad de obtención de modelos 3D por escaneo de los huesos del Ejemplar 1 fue variable en función del hueso: con tan sólo dos escaneos se obtenían los de pequeño tamaño, como el tarsometatarso, o los que presentaban dos caras distintas como el esternón o el coxal. Sin embargo, en huesos muy largos que no cabían en el campo de visión de las cámaras, como el radio, el húmero o el tibiotarso, necesitaban hasta 4 o 5 escaneos.

En todo caso, siempre fue más rápida la obtención de modelos 3D virtuales con Ein Scan SP que por segmentación con 3D Slicer.

A pesar de no obtener información del interior del objeto de estudio (como en el TAC) el empleo de tecnologías de escaneo de superficie permite replicar con precisión la estructura externa del elemento que queremos modelar, ya que únicamente captan la información superficial del mismo. La precisión y calidad de la superficie externa del modelo 3D es mejor cuando se utilizan escáneres de superficie que imágenes DICOM de TAC (Villa *et al.*, 2017). En el caso de los modelos 3D del Ejemplar 1, obtenidos con el escáner de luz estructurada Ein Scan SP, se puede observar que la textura y superficie es homogénea, lisa y continua (Figura 6.3 A), mientras que en los modelos 3D del Ejemplar 2 obtenidos por procesamiento de imágenes DICOM, la superficie es menos continua con áreas “escalonadas” (Figura 6.3 B) muy llamativas y poco representativas del hueso real. Este hecho se puede atribuir también a la menor resolución del TAC del Ejemplar 2 (Ford & Decker, 2014). Además, el escáner de luz estructurada también replica el color del objeto escaneado, dando lugar a una textura similar al hueso original en los modelos 3D frente a los obtenidos por TAC, cuyo color se selecciona en 3D Slicer dentro de una paleta de opciones.



Figura 6.3: Comparación entre modelos 3D virtuales de tarsometatarso obtenidos por escáner (A) y por TAC (B).  
Imágenes visualizadas en Sketchfab.

*Fuente: Elaboración propia.*

Los modelos anatómicos virtuales tienen gran importancia en docencia de forma complementaria a los métodos tradicionales de enseñanza (Rajas Fernández *et al.*, 2022).

Permiten el estudio de la anatomía a distancia, incentivando el aprendizaje autónomo del alumno y, además, se trata de una herramienta económica. La virtualización de modelos anatómicos no solamente permite su visualización en 3D en el programa de elección, sino que también se puede emplear para señalar estructuras de interés y tomar medidas con el objetivo de completar el modelo con información relevante (da Silveira *et al.*, 2021). Sketchfab fue el programa seleccionado para la visualización de los modelos virtuales con el cual se pudo anotar los puntos de interés para la posterior toma de medidas, también realizadas con Sketchfab (<https://labs.sketchfab.com/experiments/measurements/>). En el ámbito de la docencia, estas medidas pueden ayudar al alumno a comprender las dimensiones de cada hueso, siendo su objetivo principal el uso de las medidas para conservación de aves rapaces amenazadas.

Dentro del cuadro de protección de especies vulnerables, se han estandarizado intervalos de medida para cada hueso y cada especie de interés, permitiendo la identificación de restos óseos por sus medidas (García Matarranz, 2019). Teniendo en cuenta que el Pigargo Europeo es una especie recientemente reintroducida en España (Juste *et al.*, 2023), parece de gran importancia conocer también las medidas de interés de cada hueso para la identificación de esqueletos que puedan aparecer en el campo. De esta manera, se tomaron medidas en nuestro caso con los modelos 3D virtuales con Sketchfab en ambos ejemplares y también a mano con un calibrador digital en el Ejemplar 1, aprovechando la disponibilidad de los restos óseos originales y permitiendo comparar ambas técnicas de medición. En los resultados de la Tabla 5.1 podemos constatar que la diferencia de valores entre las medidas tomadas a mano y las tomadas con Sketchfab del Ejemplar 1 es de décimas de mm, siendo ambas técnicas fiables siempre y cuando se respeten los puntos de referencia. Esto también nos indica que la virtualización de los huesos se ha hecho correctamente, pues las dimensiones y distancias entre estructuras se han mantenido iguales a los restos óseos originales. Por otro lado, comparando las medidas virtuales de ambos ejemplares, y sabiendo que ambos son adultos, constatamos que todos los huesos del Ejemplar 2 son de mayor tamaño que en el Ejemplar 1. Este hallazgo podría ser un argumento a favor de clasificar al Ejemplar 1 como de sexo masculino, teniendo en cuenta que se conoce el sexo femenino del Ejemplar 2 y que, generalmente en la especie, las hembras son de mayor tamaño que los machos (Juste *et al.*, 2023). Además de medir distancias entre estructuras en cada hueso, se decidió completar su caracterización con el registro de los volúmenes y superficies que se pueden observar en la Tabla 5.1. Parece importante destacar que los volúmenes y superficies de todos los huesos del

Ejemplar 1 son menores a los del Ejemplar 2. Esto cuadra ya que el Ejemplar 1 es de menor tamaño, siendo sus huesos más pequeños y consecuentemente, el volumen y la superficie que ocupan en el espacio es igualmente inferior a los huesos del Ejemplar 2.

Al igual que los modelos virtuales, la impresión en 3D de modelos anatómicos es una herramienta que aporta grandes ventajas al emplearse en docencia y en medicina veterinaria y humana (Rajas Fernández *et al.*, 2022). A diferencia del modelo virtual, el modelo impreso permite el contacto y manipulación directo del mismo resultando más atractivo para los estudiantes. Además, estos objetos son duraderos, detallados y reducen la necesidad de uso de cadáveres (da Silveira *et al.*, 2021). Los modelos impresos de huesos de Pigargo Europeo resultaron ser de gran calidad y con alto grado de detalle: quedaron plasmadas todas las estructuras características de cada hueso, cómo la cresta cnemialis (Figura 6.4 A) y el epicóndilo lateral del fémur (Figura 6.4 B), las áreas de inserción de las costillas en el esternón (Figura 6.5), las placas palatinas (Figura 6.6 A) y etmoidales en el cráneo (Figura 6.6 B) y las áreas de inserción de las plumas remeras en el cúbito (Figura 6.7), entre otros. Sin embargo, al tratarse de una impresora FDM, fue necesario añadir estructuras de soporte cómo una base y andamios para estabilizar el modelo a lo largo de la impresión. Por ello, los modelos 3D impresos presentaban áreas irregulares en los lugares donde se encontraban los andamios, siendo necesario llevar a cabo un limado de las piezas y consecuentemente una mayor dedicación de tiempo a cada modelo.



Figura 6.4: Indicaciones de la cresta cnemialis (A) y epicóndilo lateral (B) del fémur en modelo 3D impresos de Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*

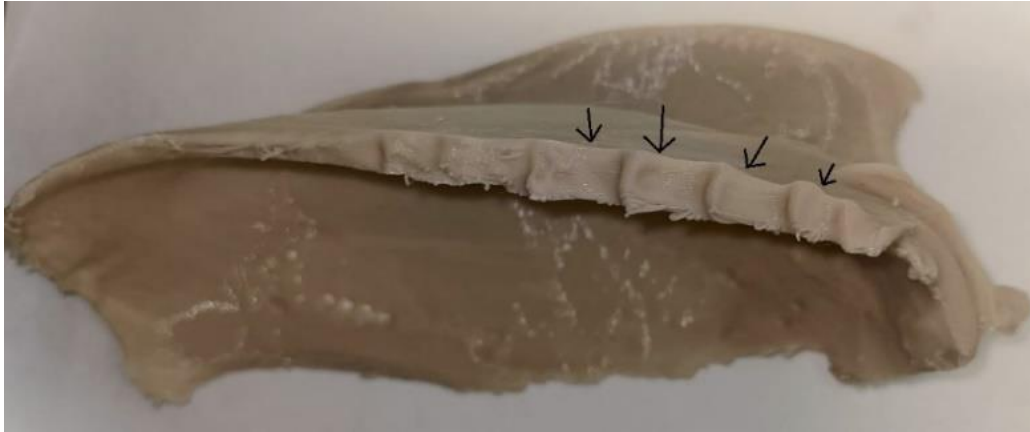


Figura 6.5: Indicaciones de las áreas de inserción de las costillas en el esternón en modelo 3D impreso de Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*

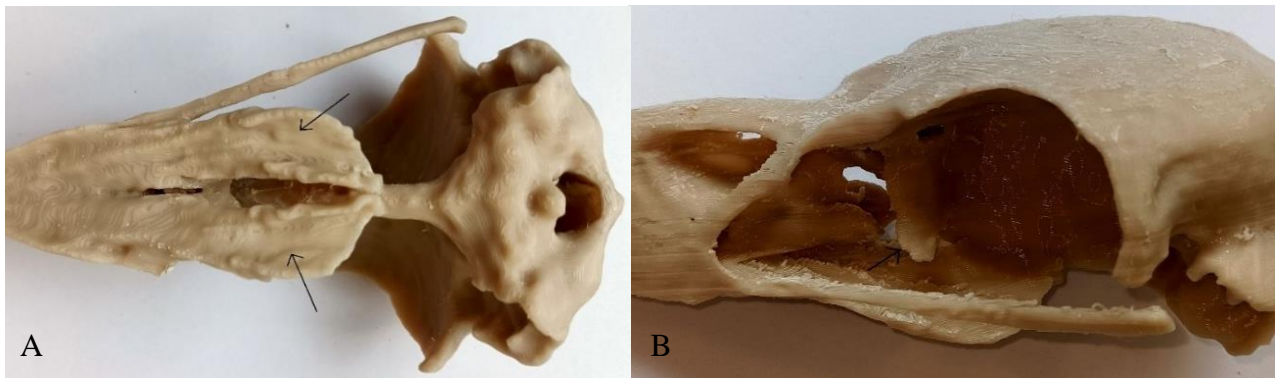


Figura 6.6: Indicaciones de las placas palatinas (A) y placas etmoidales (B) en el cráneo en modelo 3D impreso de Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*

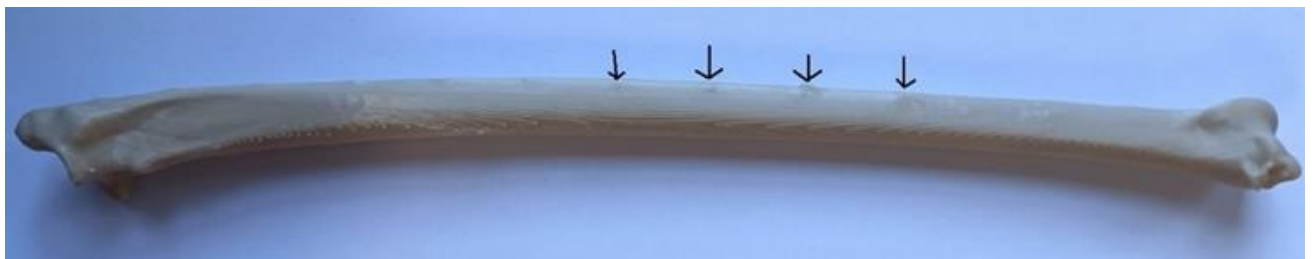


Figura 6.7: Indicaciones de las áreas de inserción de las plumas remeras en el cúbito en modelo 3D impreso de Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*

Todos los modelos 3D virtualizados y embebidos en Sketchfab, así como imágenes de todos los modelos impresos se subieron a la página web de la Universidad Complutense de Madrid

(<https://www.ucm.es/fisioanimvet/aves-rapaces>), creando un nuevo apartado para el Pigargo Europeo entre todas las especies que ya se han caracterizado previamente (<https://www.ucm.es/fisioanimvet/pigargo-europeo-haliaeetus-albicilla-1c>).

Esto permite la visualización de los modelos por cualquier usuario con acceso a internet de forma gratuita y rápida, siendo útil su uso como herramienta docente innovadora para el estudio de la osteología aviar, en el ámbito de la investigación también resulta importante: en estudios de aves rapaces y de anatomía, o como herramienta de identificación de restos óseos (Rajas Fernández *et al.*, 2022). Cabe destacar que uno de los objetivos planteados fue añadir las medidas obtenidas a la base de datos de la herramienta estadística Python asociada a la página web de la Universidad Complutense de Madrid (<https://sdelanieta.pythonanywhere.com/>), que predice a qué especie podría pertenecer uno o varios restos óseos según sus medidas. De esta manera, a la hora de identificar un resto óseo por sus medidas, se tendría en cuenta también las medidas del Pigargo Europeo. Lamentablemente esto no fue posible ya que el número de ejemplares estudiado era demasiado pequeño ( $n=2$ ) para establecer rangos de medida para la especie. Se trató de tener una base de datos mayor a través de la obtención de medidas de numerosos esqueletos de Pigargo Europeo presentes en el Museo Sueco de Historia Natural de Estocolmo, pero no se pudo llevar a cabo por problemas en las instalaciones de este, que imposibilitaron el acceso a los restos óseos.

## **7. CONCLUSIONES**

1. La creación de una base de datos de modelos 3D de huesos de Pigargo Europeo de acceso libre a cualquier usuario permite divulgar, concienciar y participar en la conservación de especies amenazadas por ser una herramienta de ayuda a la hora de identificar restos óseos.
2. El empleo de modelos 3D virtuales e impresos de huesos de Pigargo Europeo en docencia y conservación de especies es atractivo, práctico e innovador.
3. El modelado 3D de huesos de Pigargo Europeo es posible a partir de imágenes DICOM así como mediante un escáner de luz estructurada, presentando cada técnica ventajas e inconvenientes.
4. Las medidas de los huesos del Pigargo Europeo, sean tomadas de forma manual o virtual, permite caracterizar los huesos de la especie.
5. La impresión de modelos 3D de huesos de Pigargo Europeo, por tecnología FDM con PLA+ permite obtener modelos anatómicos óseos con precisión, duraderos y con alto grado de detalle.
6. La caracterización del esqueleto de Pigargo Europeo se puede emplear posteriormente como una herramienta de identificación de la especie.

## **7. CONCLUSIONS**

1. Creating a database of 3D models of the White-tailed eagle bones freely accessible to any user allows to disseminate, raise awareness and participate in the conservation of endangered species as a tool to help in the identification of skeletal remains.
2. Using 3D virtual and printed models of the White-Tailed eagle bones in teaching and species conservation is attractive, practical, and innovative.
3. 3D modeling of the skeleton of the White-Tailed eagle is possible using DICOM images as well as structured light scanner, each technique having advantages and disadvantages.
4. The measurements of the White-Tailed eagle bones, whether taken manually or virtually, are a way of characterizing the species.
5. 3D printed White-Tailed eagle bone models with FDM technology using PLA+ are accurate, durable, and highly detailed.
6. The characterization of the skeleton of the White-Tailed eagle can later be used as a tool to identify this species.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Atik, M. E., Duran, Z., Yanalak, M., Seker, D. Z., & Ak, A. (2023). 3D modeling of historical measurement instruments using photogrammetric and laser scanning techniques. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 30, Artículo e00286. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00286>
2. Barja-Ore, J., Liñan-Bermudez, A., & Mayta-Tovalino, F. (2023). Visibility, impact and collaboration in scientific production on virtual reality in medical education (2017-2022). *Educacion Medica*, 24(5), Article e100831. <https://doi.org/10.1016/j.edumed.2023.100831>
3. Bibb, R., & McKnight, L. (2022). Identification of bird taxa species in ancient Egyptian mummies: Part 2, a qualitative evaluation of the utility of CT scanning and 3D printing. *Journal of Archaeological Science*, 46, Artículo e103668. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103668>
4. Bjarnason, A., & Benson, R. B. J. (2021). A 3D geometric morphometric dataset quantifying skeletal variation in birds. *MorphoMuseum*, 7(1), Artículo e125. <https://doi.org/10.18563/journal.m3.125>
5. Bochenski, Z. M., & Tomek, T. (1999). Identification of Bones of Galliform Hybrids. *Journal of Archaeological Science*, 27(8), 691-698. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0488>
6. Bücking, T. M., Hill, E. R., Robertson, J. L., Maneas, E., Plumb, A. A., & Nikitichev, D. I. (2017). From medical imaging data to 3D printed anatomical models. *PLOS ONE*, 12(5), Artículo e0178540. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178540>
7. Charuta A., Bartyze, B. J., Karbowicz, M., & Kobryń, H. (2005). Morphology and morphometry of the antebrachial skeleton and bones of hand of the domestic pekin duck. *Veterinarija ir Zootechnika*, 29(51), 26-30. <https://vetzoo.lsmuni.lt/data/vols/2005/29/pdf/charuta.pdf>
8. Da Silveira, E. E., da Silva Lisboa Neto, A. F., Carlos Sabino Pereira, H., Ferreira, J. S., Dos Santos, A. C., Siviero, F., da Fonseca, R., & de Assis Neto, A. C. (2021). Canine Skull Digitalization and Three-Dimensional Printing as an Educational Tool for Anatomical Study. *Journal of Veterinary Medical Education*, 48(6), 649-655. <https://doi.org/10.3138/jvme-2019-0132>

9. Dyce, K. M., Sack, W. O., & Wensing, C. J. G. (2011). *Anatomía Veterinaria* (4). Manual Moderno
10. Evans, R. J., Wilson, J. D., Amar, A., Douse, A., Maclennan, A., Ratcliffe, N., & Whitfield, D. P. (2009). Growth and demography of a re-introduced population of White-tailed Eagles *Haliaeetus albicilla*. *IBIS*, *151*(2), 244-254. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2009.00908.x>
11. Field, D. J., Lynner, C., Brown, C., & Darroch, S. A. F. (2013). Skeletal Correlates for Body Mass Estimation in Modern and Fossil Flying Birds. *PLOS ONE*, *8*(11), Artículo e82000. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082000>
12. Ford, J., & Decker, S. (2014). It's all in the Details: The effect of CT slice thickness on 3D modeling for forensic analysis. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, *2*(2), 103. <https://doi.org/10.1016/j.jofri.2014.02.027>
13. García Matarranz, V. (2019). *Guía de identificación de rapaces ibéricas por restos óseos* (3). Centro de publicaciones Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y medio Ambiente
14. Gardner, E. E., Walker, S. E., & Gardner, L. I. (2016). Palaeoclimate, environmental factors, and bird body size: A multivariable analysis of avian fossil preservation. *Earth-Science Reviews*, *162*, 177-197. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.001>
15. GREFA. (2021, noviembre 25). Preguntas y respuestas sobre el Proyecto Pigargo. <https://www.grefa.org/proyectosgrefa/preguntas-y-respuestas-sobre-el-proyecto-pigargo.html>
16. GREFA. (2023, julio 20). Nota de prensa: El Proyecto Pigargo sigue adelante tras más de dos años de actividad. <https://www.grefa.org/noticias/94-notas-de-prensa/4321-nota-de-prensa-el-proyecto-pigargo-sigue-adelante.html>
17. Harcourt-Brown, N. (2023). *Birds of Prey: Anatomy, radiology, and clinical conditions of the pelvic limb*. Zoological Educational Network.
18. Juste, L., Álvarez, E., Gil, A., Peragón, I., & Rodríguez, B. (2023). *Estudio de viabilidad de la reintroducción del pigargo europeo (Haliaeetus albicilla) en la cornisa cantábrica*. GREFA.
19. Kaiser, G. W. (2007). *The Inner Bird: Anatomy and Evolution*. UBC Press.
20. Kessler, J. (2015). Osteological guide of songbirds from Central Europe. *Ornis Hungarica*, *23*(2), 62-155. <https://doi.org/10.1515/orhu-2015-0016>

21. Kharat, V. J., Singh, P., Sharath Raju, G., Kumar Yadav, D., Satyanarayana.Gupta, M., Arun, V., Hussein Majeed, A., & Singh, N. (2023). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.033>
22. Komosa, M., Włodarek, J., Frąckowiak, H., Zdun, M., Charuta, A., Gogulski, M., & Mizera, T. (2018). Osseous Pathological Changes in the White-Tailed Eagle (*Haliaeetus albicilla*) in its Central European Habitat. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(2), 701-708. <https://doi.org/10.15244/pjoes/85223>
23. König, H. E., Korbelt, R., & Liebich, H.-G. (2016). *Avian Anatomy: Textbook and colour Atlas*. 5M Books Ltd.
24. König, H. E., & Liebich, H.-G. (2020). *Veterinarian Anatomy of domestic animals (7)*. Thieme Publishing Group.
25. Krüger, O., Grünkorn, T., & Struwe-Juhl, B. (2010). The return of the white-tailed eagle (*Haliaeetus albicilla*) to northern Germany: Modelling the past to predict the future. *Biological Conservation*, 143(3), 710-721. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.12.010>
26. Ley 42/2007, de 13 de diciembre, por la cual se establece el régimen jurídico básico de la conservación, uso sostenible, mejora y restauración del patrimonio natural y de la biodiversidad. *Boletín Oficial del Estado*, 299, de 14 de diciembre de 2007. <https://www.boe.es/eli/es/l/2007/12/13/42>
27. Lux, C. N., Culp, W. T. N., Johnson, L. R., Kent, M., Mayhew, P., Daniaux, L. A., Carr, A., & Puchalski, S. (2017). Prospective comparison of tumor staging using computed tomography versus magnetic resonance imaging findings in dogs with nasal neoplasia: a pilot study. *Veterinary Radiology & Ultrasound: The Official Journal of the American College of Veterinary Radiology and the International Veterinary Radiology Association*, 58(3), 315-325. <https://doi.org/10.1111/vru.12486>
28. McClure, C. J. W., Westrip, J. R. S., Johnson, J. A., Schulwitz, S. E., Virani, M. Z., Davies, R., Symes, A., Wheatley, H., Thorstrom, R., Amar, A., Buij, R., Jones, V. R., Williams, N. P., Buechley, E. R., & Butchart, S. H. M. (2018). State of the world's raptors: Distributions, threats, and conservation recommendations. *Biological Conservation*, 227, 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.08.012>
29. Nabais, M., Pimenta, C., & Zilhão, J. (2023). Human-bird interaction in last Interglacial Iberia: A combined approach using skeletal part analysis, bone surface

- modification, bird ethology and ethnography. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 49, Artículo e104023. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.104023>
30. Núñez-Lahuerta, C., Galán, J., Cuenca Bescós, G., & Huguet, R. (2021). Birds from Sima Del Elefante, Atapuerca, Spain: Palaeoecological implications in the oldest human bearing levels of the Iberian Peninsula. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia* 127(2), 453-484. <https://doi.org/10.13039/501100003329>
31. O'Malley, B. (2007). *Anatomía y fisiología clínica de los animales exóticos: Estructura y función de mamíferos, aves, reptiles y anfibios*. Servet.
32. Rajas Fernández, M., Viñarás Abad, M., & Ventura Salom, B. (2022). *Aprende a enseñar e investigar en comunicación*. Editorial Fragua.
33. Resolución de 1 de agosto de 2018 de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente, por la que se publica el Acuerdo de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente en relación al Listado de especies extinguidas en todo el medio natural español. *Boletín Oficial del Estado*, 195, de 13 de agosto de 2018.
34. Reznikov, N., Shahar, R., & Weiner, S. (2014). Bone hierarchical structure in three dimensions. *Acta Biomaterialia*, 10(9), 3815-3826. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.05.024>
35. Singh, N. S., Bamon, I., Dixit, A. S., & Sougrakpam, R. (2015). Structural variations and their adaptive significances in the bones of some migratory and resident birds. *The Journal of Basic & Applied Zoology*, 70, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.jobaz.2015.06.003>
36. Trail, P. W. (2017). Identifying Bald Versus Golden Eagle Bones: A Primer for Wildlife Biologists and Law Enforcement Officers. *Journal of Fish and Wildlife Management*, 8(2), 596-610. <https://doi.org/10.3996/042017-JFWM-035>
37. Valverde, I. (2017). Impresión tridimensional de modelos cardíacos: Aplicaciones en el campo de la educación médica, la cirugía cardíaca y el intervencionismo estructural. *Revista Española de Cardiología*, 70(4), 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2016.09.043>
38. Villa, C., Flies, M. J., & Jacobsen, C. (2017). Forensic 3D documentation of bodies: Simple and fast procedure for combining CT scanning with external photogrammetry data. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, 10, 47-51. <https://doi.org/10.1016/j.jofri.2017.08.003>
39. Von den Driesch, A. (2004). *A guide for the measurement of animal bones from archaeological sites*. Peabody Museum of Archaeology & Ethnology, U.S.

40. You, Y., Niu, Y., Sun, F., Huang, S., Ding, P., Wang, X., Zhang, X., & Zhang, J. (2022). Three-dimensional printing and 3D slicer powerful tools in understanding and treating neurosurgical diseases. *Frontiers in Surgery*, 9, Artículo 1030081. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.1030081>

## 9. ANEXOS

### ANEXO I: Referencias para la toma de medidas de huesos de aves rapaces

Para tomar las distintas medidas anatómicas en cada hueso, se necesitan dos puntos de referencia. A continuación, apuntamos para cada hueso los puntos de referencia para obtener su longitud y/o anchura junto con imágenes de los huesos estudiados que ilustran las medidas de referencia.

- Longitud del cráneo: desde el extremo del pico hasta la protuberancia cerebelar (Figura 9.1).
- Ancho del cráneo: desde el proceso post-orbital derecho hasta el proceso post-orbital izquierdo (Figura 9.1).
- Longitud del esternón: desde el extremo craneal hasta el punto medio de la cresta distal midiendo por la zona ventral (Figura 9.2).
- Longitud del coxal: del extremo craneal al extremo caudal del sinsacro (Figura 9.3).
- Ancho del coxal: desde la cresta dorsolateral del ilion derecha a la izquierda (Figura 9.4).
- Longitud del fémur: desde la cresta trocanteral hasta el cóndilo lateral (Figura 9.5).
- Longitud del tibiotarso: desde la creta cnemialis hasta el cóndilo medial (Figura 9.6).
- Longitud del tarsometatarso: desde la prominencia intercondilar hasta la tróclea media (Figura 9.7).
- Longitud del húmero: desde la cabeza del húmero hasta el cóndilo ventral (Figura 9.8).
- Longitud del cúbito: desde el olécranon hasta el extremo distal del cúbito (Figura 9.9).
- Longitud del radio: desde el extremo proximal hasta el extremo distal del radio (Figura 9.9).



Figura 9.1: Indicaciones para medir la longitud (amarillo) y anchura (rojo) del cráneo de Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*

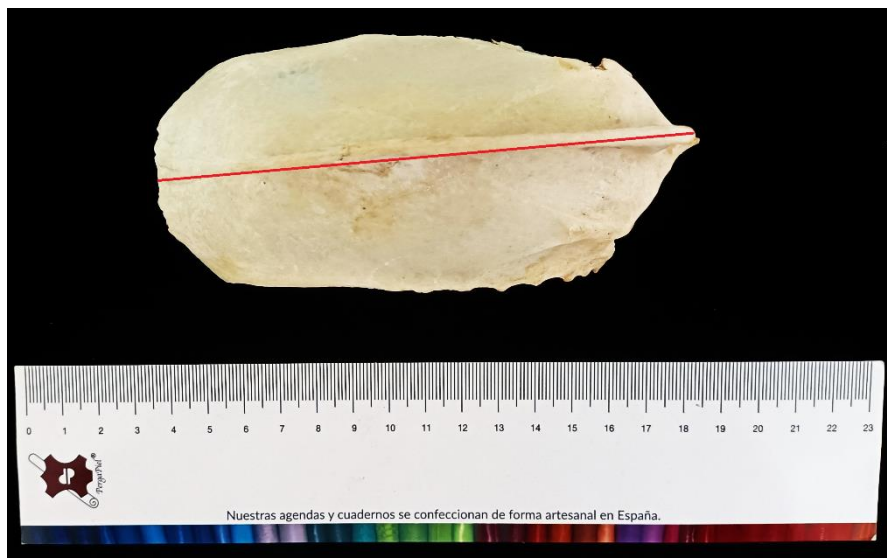


Figura 9.2: Indicación para medir la longitud del esternón de Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*



Figura 9.3: Indicación para medir la longitud del coxal en Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*

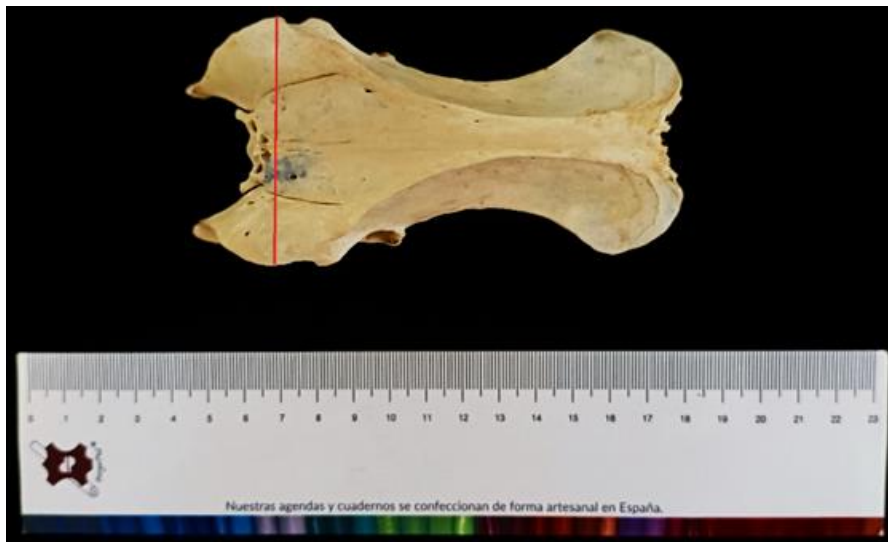


Figura 9.4: Indicación para medir la anchura del coxal en Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*

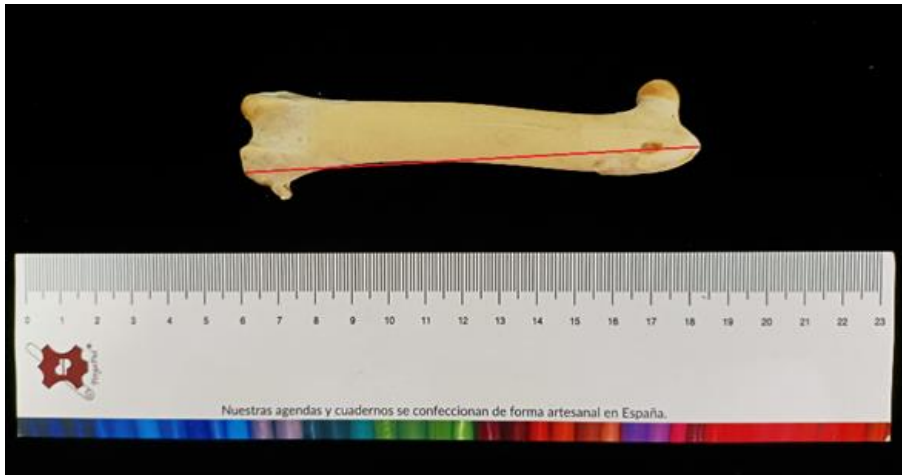


Figura 9.5: Indicación para medir la longitud del fémur en Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*



Figura 9.6: Indicación para medir la longitud del tibiotarso en Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*



Figura 9.7: Indicación para medir la longitud del tarsometatarso en Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*



Figura 9.8: Indicación para medir la longitud del húmero en Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*

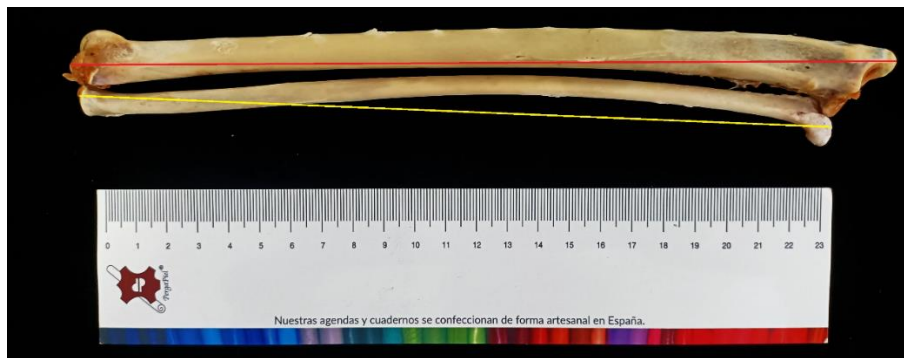


Figura 9.9: Indicaciones para medir la longitud del cúbito (rojo) y del radio (amarillo) de Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*



Figura 9.10: Indicaciones para medir la longitud del carpometacarpo de Pigargo Europeo.

*Fuente: Elaboración propia.*