



**Universidad de Jaén**

Facultad de Ciencias Experimentales

# **METODOLOGÍA FOTOGRAMÉTRICA INTEGRADA EN UN SISTEMA CAD PARAMÉTRICO Y APLICACIONES EN EL ÁMBITO DE LA BIOLOGÍA ANIMAL**

Autor:

**JUAN MANUEL MONTALVO GIL**

Directores:

**CONCEPCIÓN AZORIT CASAS**  
Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología

**MIGUEL ÁNGEL RUBIO PARAMIO**  
Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos

Fecha: 05/06/2024

ISBN:  
Licencia CC

**RUJJA**





**Universidad de Jaén**

Escuela de Doctorado

**Facultad de Ciencias Experimentales**

*Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología*

PROGRAMA DE DOCTORADO

EN

CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA TIERRA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**METODOLOGÍA FOTOGRAMÉTRICA INTEGRADA  
EN UN SISTEMA CAD PARAMÉTRICO Y  
APLICACIONES EN EL ÁMBITO DE LA BIOLOGÍA ANIMAL**

Memoria presentada por

**Juan Manuel Montalvo Gil**

para optar la Grado de Doctor

Jaén, 2024

Vº Bº de los Directores:

Dra. Concepción Azorit Casas

*Departamento de Biología Animal,  
Biología Vegetal y Ecología*

Dr. Miguel Ángel Rubio Paramio

*Departamento de Ingeniería Gráfica,  
Diseño y Proyectos*



La presente Tesis Doctoral se ha realizado dentro del Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología de la Tierra y del Medio Ambiente de la Universidad de Jaén (línea de investigación: Ecología, Biología Animal y Biología Vegetal), bajo la tutorización y dirección de la Dra. Concepción Azorit Casas (Área de conocimiento de Zoología del Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología. PAI-RNM-175 Biodiversidad y Desarrollo Sostenible) y la codirección del Dr. Miguel Ángel Rubio Paramio (Área de conocimiento de Expresión Gráfica en la Ingeniería del Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos. PAI-TIC-159 Investigación y Desarrollo en Ingeniería Gráfica, Diseño Industrial y SIG).

El doctorando es miembro del grupo de investigación RNM-175 Biodiversidad y Desarrollo Sostenible. La investigación ha sido financiada con ayudas al Grupo de Investigación RNM-175 "Biodiversidad y Desarrollo Sostenible" del Plan Propio de la Universidad de Jaén, a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) Comisión Europea y de la Consejería de Innovación Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía (PAIDI2020 Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación- Fondos FEDER 2014-2020), así como, con el Proyecto PID2022-1426610B-I00 (TRACKINGIS-DEER) de la Convocatoria de Generación de Conocimiento 2022 del Ministerio de Ciencia e Innovación, España, y con la colaboración del Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN), del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, España.

Los principales resultados de investigación han sido publicados en revistas de impacto internacional:

Rubio-Paramio MA, Montalvo-Gil JM, Ramírez-Garrido JA, Martínez-Salmerón D, Azorit C (2016) An interactive photogrammetric method for assessing deer antler quality using a parametric Computer-Aided Design system (Interactive Photogrammetric Measure Method). *Biosystems Engineering* 150, 54–68.

Índice de impacto (ISI): 2.044

Índice de impacto (SCI): 0,722

Cuartil (SCI): Q1

doi:[10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012)

Montalvo-Gil JM, Azorit C, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2022) A new method for quantifying the asymmetry of biological elements by means of a photogrammetric technique using a parametric computer-aided design system. *Symmetry* 14, 2296.

Índice de impacto (ISI): 2.94

Índice de impacto (SCI): 0,483

Cuartil (SCI): Q2

doi:[10.3390/sym14112296](https://doi.org/10.3390/sym14112296)

Montalvo-Gil JM, Azorit C, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2024) A new methodology, based on a CAD system, for evaluating partial and global asymmetries in deer antlers from hunting quality assessment data. *Symmetry* 16, 785.

Índice de impacto (ISI): 2.20

Índice de impacto (SCI): 0,485

Cuartil (SCI/ISI): Q2

doi:[10.3390/sym16070785](https://doi.org/10.3390/sym16070785)

Montalvo-Gil JM, Azorit C, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2024) Three 3D graphics engineering technologies for fallow deer antlers characterization in ecology and management approaches. *Discover Applied Sciences*.

*(enviado: en revision)*

También han sido comunicados en Jornadas y Congresos Internacionales de referencia:

Montalvo-Gil JM, Rubio-Paramio MA, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C (2017). Metodología fotogramétrica integrada en un sistema CAD paramétrico y aplicaciones para el estudio de la cuerna del ciervo. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Gijón, (España).

*(primer premio a la mejor comunicación)*

Montalvo-Gil JM, Rubio-Paramio MA, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C (2019). Restitución especial a partir de dos fotografías y aplicación biológica para el estudio de la cuerna del gamo. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Logroño, (España).

Montalvo-Gil JM, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C, Rubio-Paramio MA (2023). Metodología para la estimación de la asimetría del ciervo rojo ibérico a partir de su caracterización CAD. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Cádiz, (España).

## AGRADECIMIENTOS

La presente tesis surgió de la colaboración establecida entre dos departamentos de la universidad de Jaén ante la necesidad y demandas surgidas en el departamento de Biología. El interés de Concepción Azorit surgió de la posibilidad de digitalizar la cuerna de cérvidos para realizar análisis en la estimación de biomarcadores. En el departamento de Ingeniería Gráfica se creó una línea de trabajo con el objetivo de definir la caracterización digital de la cuerna del ciervo en un modelo digital en 3D preciso. Dicho modelo-3D se debería obtener, a partir de, pocos datos iniciales, en condiciones desfavorables como son las jornadas de monterías de caza y con un equipamiento asumible económicamente sin exigencia de laboratorios o ambientes controlados.

El equipo de trabajo, liderado por Miguel Ángel Rubio del departamento de Ingeniería Gráfica, consiguió definir una metodología fotogramétrica en la cual, a partir de pocos datos, sólo dos fotografías, consigue la restitución espacial de la cuerna de cérvidos representada en ellas. El resultado es un modelo-3D que representa la estructura axial de la cuerna.

A mis directores, Concha Azorit y Miguel Ángel Rubio expresar mi agradecimiento, por su apoyo, motivación y dedicación en el desarrollo de esta Tesis Doctoral. Gracias por los ánimos recibidos para superar los momentos de frustración y bloqueo que se presentan durante esta andadura.

Gracias a María, mi querida compañera de vida por su apoyo en este laborioso camino y comprensión durante mis ausencias. A mis hijas Silvia e Irene que cada cierto tiempo me preguntaban si 'me quedaba mucho para terminar el trabajo de los cuernos de los ciervos', demandando más atenciones para compartir con ellas.

Gracias a mis hermanos, especialmente a mi hermana Adela por sus momentos de compañía y balsámicos consejos que tanto me han aportado.

Gracias a mis amigos más directos, a los que me gustaría ver con más frecuencia, Manolo, Jose, Miguel Ángel, Javier, Ricardo, Alberto, Pedro, Meli, Mario por sus ejemplos de vida.

A mis compañeros del departamento de Ingeniería Gráfica de la universidad de Jaén por sus apoyos y colaboraciones: de nuevo a Miguel Ángel, por el cariño y la dedicación aportada diariamente, en lo laboral y en lo personal, a Javier siempre dispuesto a ayudar y a sus buenos consejos, a Diego y a Jose por su alegría y optimismo que hacen que tu trabajo diario sea enriquecedor y motivante, a Antonio, Jorge, Federico, Bartolomé, Daniel, Manuel, Julio, Cristina, Emilio, Ignacio.

Gracias a los que ya no están y que tengo siempre presentes...



# ÍNDICE

RESUMEN / ABSTRACT.....	21
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	35
CAPÍTULO II: OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	45
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA GENERAL .....	51
1. Metodologías para la Caracterización digital de la cuerna en un Modelo-3D .....	51
1.1. Método Fotogramétrico Bi-Foto .....	51
1.2. Escáner-3D de ‘luz estructurada’ .....	59
1.3. Fotogrametría Multi-imagen SfM ( <i>Structure from Motion</i> ) .....	63
1.4. Modelado CAD a partir de la estructura axial de la cuerna (Bi-Foto-CAD) .....	68
2. Aplicaciones Biológicas.....	72
2.1. Valoración de la Calidad Cinegética.....	72
2.1.1. Sobre el Modelo-3D ‘sólido’ .....	76
2.1.2. Sobre el Modelo-3D ‘axial’ .....	78
2.2. Metodologías para la estimación Asimetrías .....	81
2.2.1. Método-1. Segmentos que unen pares de puntos homólogos afines .....	81
2.2.2. Método-2. Rasgos estructurales de la cuerna.....	86
2.2.3. Comparación de ambas Metodologías .....	92
2.3. Determinación del Volumen. Cuerna del Gamo .....	93
2.3.1. Estudio de la Precisión de los modelos-3D obtenidos con diferentes tecnologías .....	96
2.4. Tipología del modelo-3D en base a la aplicación biológica implementada .....	98

<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....</b>	<b>105</b>
Un método fotogramétrico interactivo para evaluar la calidad de la cuerna del ciervo usando un sistema de diseño asistido por ordenador paramétrico. ....	106
Un nuevo método para cuantificar la asimetría de elementos biológicos mediante una técnica fotogramétrica que utiliza un sistema paramétrico de diseño asistido por ordenador. ....	129
Una nueva metodología, basada en un sistema CAD, para evaluar las asimetrías parciales y globales de las cuernas de ciervo, a partir de datos de evaluación de la calidad cinegética. ....	148
Tres tecnologías de ingeniería gráfica 3D para la caracterización de la cuerna del gamo en enfoques aplicados a ecología y gestión. ....	162
 <b>CAPÍTULO V: DISCUSIÓN GENERAL .....</b>	 <b>191</b>
 <b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES .....</b>	 <b>199</b>
 <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	 <b>205</b>
 <b>ANEXOS .....</b>	 <b>221</b>
1. Artículos publicados en Revistas científicas.....	221
2. Comunicaciones presentadas en Congresos. ....	315

# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Esquema general de las tareas y procesos de la investigación.	25
Fig. 2	Relaciones entre los puntos espaciales y rayos proyectivos sobre los puntos representados en las dos fotografías.	52
Fig. 3	Trayectoria de la incidencia de rayos sobre el plano de la fotografía. a) Objeto real. b) Posición de la lente de la cámara. c) Fotografía (a escala reducida e invertida).	52
Fig. 4	Imágenes homólogas en planos paralelos adaptadas a la dirección de la proyección de rayos. a) Imágenes homólogas no invertidas. b) Objeto real. c) Posición de la lente de la cámara (centro de homología). d) Imágenes homólogas invertidas.	53
Fig. 5	Situación elegida para el método. El objeto espacial (a) está situado entre el centro de homología (b) y una fotografía con imagen no invertida (c). El objeto espacial 3D queda representado a una escala menor y proporcional a la imagen de la fotografía.	53
Fig. 6	Panel con la representación de la referencia métrica situado detrás de la cuerna (rectángulo de 594x420 mm).	54
Fig. 7	Línea (s) perpendicular al plano de la fotografía.	54
Fig. 8	Pirámide espacial para la obtención del centro de homología (V).	55
Fig. 9	Situación de la referencia métrica sobre las aristas laterales de la pirámide. Centro de homología de la primera fotografía.	55
Fig. 10	Situación de la referencia métrica sobre las aristas laterales de la pirámide. Centro de homología de la segunda fotografía.	56
Fig. 11	Creación de la escena virtual. Coincidencia de las referencias métricas espaciales en las dos fotografías. Posiciones de la cámara de cada fotografía.	56
Fig. 12	Obtención de la localización espacial de un punto mediante la intersección de rayos del punto representado en ambas fotografías.	57
Fig. 13	Modelo-3D de 'estructura axial' de la cuerna del ciervo.	58
Fig. 14	Modelo-3D de 'volumen' de la cuerna del ciervo.	58
Fig. 15	Datos de partida para el estudio de asimetría.	59

Fig. 16	Escáner de <i>EinScan Pro 2X</i> en laboratorio sobre trípode, previo a la toma de datos.	60
Fig. 17	Escáner de luz estructurada y esquema correspondiente a su principio de funcionamiento.	60
Fig. 18	Patrón de luz estructurada sobre la cuerna del gamo y visualizada en la interfaz del software.	61
Fig. 19	Optimización de la malla: limpieza y relleno de agujeros.	62
Fig. 20	Nivel de detalle del modelo-3D optimizado y cerrado de la cuerna con y sin textura.	62
Fig. 21	Modelo-3D final obtenido después de aplicar los procesos de optimizado.	63
Fig. 22	Situación del objeto.	64
Fig. 23	Distribución espacial del barrido de fotografías sobre el objeto.	65
Fig. 24	Fases del modelado.	65
Fig. 25	Resultados calibración de la cámara.	66
Fig. 26	Identificación de puntos conocidos.	66
Fig. 27	Restricciones métricas.	67
Fig. 28	<i>Bounding box</i> .	67
Fig. 29	Modelo-3D obtenido.	68
Fig. 30	Partes principales de la cuerna.	69
Fig. 31	Fibras medias de la cuerna.	69
Fig. 32	Estructura de la cuerna.	70
Fig. 33	Estructura y perímetros de la cuerna.	70
Fig. 34	Eje central de la vara y de la pala.	70
Fig. 35	Curvas extremas del contorno de la pala.	70

Fig. 36	Secciones transversales de la estructura de la pala.	70
Fig. 37	Modelo-3D de la vara central y de la pala.	71
Fig. 38	Estructura y modelo-3D de la punta luchadera.	71
Fig. 39	Enlace de las puntas principales con la vara central.	71
Fig. 40	Estructura de la roseta.	71
Fig. 41	Modelo-3D de la roseta.	71
Fig. 42	Estructura de la punta lateral.	71
Fig. 43	Modelo-3D de la punta lateral.	71
Fig. 44	Modelo-3D de la cuerna.	72
Fig. 45	Elementos geométricos de la estructura de la cuerna del ciervo, tenidos en cuenta para la valoración cinegética: (1) Vara central. (2) Punta Luchadera. (3) Punta central o Candil. (4) Roseta. (5-6) (7-8) Perímetros secciones transversales. (10) Envergadura.	73
Fig. 46	Elementos geométricos de la estructura de la cuerna del gamo, tenidos en cuenta para la valoración cinegética: (1) Vara central. (2) Luchadera. (3) Longitud Pala. (4) Ancho Pala. (5) Roseta. (6-7) (8-9) Perímetros secciones transversales. (12) Envergadura.	74
Fig. 47	Caracterización digital en modelo-3D de la cuerna del gamo: versiones de 'estructura axial' y de 'modelo3D sólido'. Elementos geométricos de la cuerna considerados para la valoración de la calidad cinegética.	74
Fig. 48	Elementos de la cuerna considerados para la valoración cinegética sobre el 'modelo-3D sólido'.	77
Fig. 49	Trayectorias y perímetros consideradas sobre la superficie de la estructura de la cuerna para la valoración cinegética.	78
Fig. 50	Estructura espacial de las partes relevantes de la cuerna necesarias para la 'valoración cinegética'.	79
Fig. 51	Método fotogramétrico Bi-Foto que restituye espacialmente puntos representados en dos fotografías mediante el cruce de rayos proyectivos.	80
Fig. 52	Elementos de la cuerna y puntos considerados para la valoración de la asimetría.	82
Fig. 53	Estimación del valor de asimetría por 'longitud'.	83

Fig. 54	.....	83
Cálculo para determinar el valor de asimetría por 'longitud'.		
Fig. 55	.....	84
Estimación del valor de asimetría por 'perpendicularidad'.		
Fig. 56	.....	84
Cálculo para determinar el valor de asimetría por 'perpendicularidad'.		
Fig. 57	.....	86
Definición del plano de simetría.		
Fig. 58	.....	87
Cuerna del ciervo representada por dos fotografías y modelo-3D con la estructura axial y secciones transversales.		
Fig. 59	.....	87
Elementos geométricos de la cuerna considerados para el estudio: vara central, puntas luchaderas, puntas candiles y secciones transversales.		
Fig. 60	.....	88
Rasgos geométricos de la estructura de la cuerna considerados para la estimación de asimetrías parciales (IAP).		
Fig. 61	.....	89
Elemento estructural de la cuerna considerado y valores métricos para el cálculo del valor de (IAP).		
Fig. 62	.....	91
Esquema general de la metodología propuesta.		
Fig. 63	.....	96
Modelo-3D 'sólido' de la cuerna obtenidos por diferentes técnicas.		
Fig. 64	.....	98
Superposición y comparación de modelos-3D.		
Fig. 65	.....	107
Los principales métodos utilizados para obtener modelos-3D en el campo de la Morfometría Geométrica y la evaluación de la calidad de la cornamenta evaluación de la calidad de la cornamenta. Hemos marcado el ámbito y los métodos utilizados en este estudio.		
Fig. 66	.....	112
Elementos a medir en la homologación de trofeos: 1: Longitud de la vara principal, 2: Longitud de las puntas luchaderas, 3: Longitud de las puntas candiles, 4: Perímetro de las rosetas, 5: Perímetros de determinadas secciones de la cuerna. 6: Máxima separación interna entre las dos ramas.		
Fig. 67	.....	113
Puntos espaciales ( $P_i$ ) y sus rayos a partir de dos planos fotográficos (Foto 1, Foto 2).		
Fig. 68	.....	114
Coordenadas en el caso de dos cámaras.		
Fig. 69	.....	114
Rayos de incidencia sobre el plano de una fotografía. a) Objeto real; b) posición del objetivo de la cámara; y c) fotografía (reducida en escala e invertida).		
Fig. 70	.....	115
El objeto (a) se sitúa entre el centro de homología (b) y una imagen fotográfica no invertida (c). La imagen fotográfica se situará detrás del objeto y será mayor que éste.		

Fig. 71 .....	115
Referencia métrica de dimensiones conocidas detrás de la cornamenta (panel rectangular de 594 x 420 mm).	
Fig. 72 .....	116
a) Zona rectangular de la fotografía y línea $s$ perpendicular al plano de la fotografía; b) Rayos piramidales para determinar el centro de homología $V$ .	
Fig. 73 .....	117
Referencia métrica, en verdadera magnitud, dentro de la pirámide. a) Centro de homología de la primera fotografía; b) Centro de homología de la segunda fotografía.	
Fig. 74 .....	117
a) Coincidencia del rectángulo de referencia en las dos fotografías. b) Obtener la localización espacial de un elemento en la intersección de las radiaciones del elemento tomadas en las dos fotografías.	
Fig. 75 .....	118
Obtención de la posición real de una serie de puntos y de la línea de contorno que pasa por ellos. a) Trazado de rayos desde los dos centros de homología de ambas fotografías; b) Localización de los puntos de las curvas en las fotografías; c) Se obtiene la curva en verdadera magnitud que pasa por los puntos de intersección de los dos trazados de rayos.	
Fig. 76 .....	119
a) estructura axial de la vara central de la cuerna que pasa por un conjunto de puntos. Estos puntos son los centros de un conjunto de círculos. b) modelo-3D de la vara central de la cuerna generada mediante un volumen barrido que pasa por todos los círculos.	
Fig. 77 .....	119
Creación de las puntas de la cuerna mediante nuevos ejes axiales, círculos y volúmenes de barrido.	
Fig. 78 .....	120
a) El alisado de las superficies en la zona de arranque de las puntas. b) La roseta en el punto de arranque de la vara central.	
Fig. 79 .....	120
a) Modelo-3D completo de la cuerna. b) Eje axial y círculos transversales de la vara central. c) Ejes y círculos transversales de las puntas.	
Fig. 80 .....	121
a) Escenografía de trazado de rayos para obtener la ubicación de los puntos relevantes para la creación del modelo-3D. b) Creación del modelo-3D a partir del conjunto de puntos. c) Modelo-3D que oculta el trazado de rayos.	
Fig. 81 .....	126
a) Superposición del modelo-3D CAD virtual sobre la cuerna derecha real fotografiada. b) Superposición de los puntos obtenidos por el método de medición CMA y el modelo-3D obtenido mediante el método Bi-Foto.	
Fig. 82 .....	136
Datos iniciales Datos iniciales: Dos fotografías y el modelo-3D de la estructura de la cuerna.	
Fig. 83 .....	136
Elementos de la cuerna a medir: puntos homólogos.	

Fig. 84 .....	139
Primer método para obtener el plano de simetría (4 puntos).	
Fig. 85 .....	139
Segundo método para obtener el plano de simetría (1 punto).	
Fig. 86 .....	140
Tercer método para obtener el plano de simetría (2 puntos).	
Fig. 87 .....	142
Parámetros geométricos para el cálculo de $(AI)_L$ y $(AI)_P$ .	
Fig. 88 .....	154
Cuerna de ciervo representada por dos fotografías y un modelo-3D de su estructura axial y secciones transversales.	
Fig. 89 .....	155
Elementos geométricos de la cuerna considerados para el estudio: vara central, puntas luchaderas, puntas candiles y secciones transversales. Longitudes consideradas (derecha e izquierda) en el rasgo estructural considerado (punta luchaderas) para la estimación de su valor (IAP) (Índice de asimetría parcial).	
Fig. 90 .....	169
Superposición y comparación de modelos-3D.	
Fig. 91 .....	169
Superposición de modelos-3D: obtenidos por 'escáner-3D' y por 'SfM'.	
Fig. 92 .....	170
Superposición y comparación de modelos-3D: con 1 mm de tolerancia.	
Fig. 93 .....	171
Superposición de modelos-3D: obtenidos por 'escáner' y por 'Bi-Foto-CAD'.	
Fig. 94 .....	171
Superposición y desviaciones entre los modelos-3D.	
Fig. 95 .....	172
Comparación de modelos-3D: con tolerancia de 1 mm.	

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 .....	90
Pesos de cada rasgo estructural de la cuerna para el cálculo de (IAP).	
Tabla 2 .....	90
Proceso de cálculo de (IAG) ' <i>Índice de Asimetría Global</i> '.	
Tabla 3 .....	99
Grado de idoneidad del tipo de dato en función al tipo de aplicación biológica a implementar.	
Tabla 4 .....	124
Resultados estadísticos para la primera muestra de 14 trofeos de cuernas. (longitudes de las puntas luchaderas, puntas del candil, varas centrales y separación interna máxima, utilizando los tres métodos -Cinta, CAD, CMA-, y perímetros en las tres posiciones definidas por el proceso de homologación, utilizando dos métodos -Cinta, CAD-).	
Tabla 5 .....	124
Resultados estadísticos para la segunda muestra de 15 trofeos de cuernas. (longitudes de las puntas luchaderas, puntas del candil, varas centrales y separación interna máxima, y perímetros en las tres posiciones definidas por el proceso de homologación, utilizando dos métodos -Cinta, CAD-). En este segundo caso, la medición con cinta fue realizada por operadores profesionales de una sesión de homologación oficial.	
Tabla 6 .....	125
Comparativa de resultados obtenidos por los tres métodos. (dv) indica la desviación estándar que cuantifica la cantidad de variación para los valores de los distintos métodos en cada ciervo: un valor bajo de (dv) indica que los valores tienden a estar cerca de la media y para ser tenidos en cuenta en el proceso de valoración de la calidad cinegética.	
Tabla 7 .....	125
Medias de puntuación de calidad cinegética, para cada una de las muestras, del modelo real de las cuernas y de su caracterización en modelo-3D.	
Tabla 8 .....	141
Primera serie de mediciones para obtener el IA (sin tener en cuenta los puntos de la corona).	
Tabla 9 .....	142
Segunda serie de mediciones para obtener el IA (teniendo en cuenta los puntos de la corona).	
Tabla 10 .....	143
Resumen de resultados para los valores de IA y de calidad cinegética.	
Tabla 11 .....	156
Proceso de cálculo de (IAP) y de (IAG).	
Tabla 12 .....	156
Resultados de 'IAP' y de 'IAG' en cuernas caracterizadas en 'modelo-3D CAD'.	
Tabla 13 .....	160
Resultados de 'IA' (Mét-1) y (Mét-2) con cuerna en 'Modelo-3D CAD'.	

Tabla 14 .....	170
Diferencias entre los puntos de la cuerna de los modelos 3D: A-(escáner-3D) y B-(SfM).	
Tabla 15 .....	172
Diferencias entre los puntos de la cuerna de los modelos 3D: A-(escáner-3D) y C-( Bi-Foto-CAD).	
Tabla 16 .....	176
Diferencias entre puntos de los dos modelos-3D (A-B) y resultados estadísticos.	
Tabla 17 .....	176
Diferencias entre puntos de los dos modelos-3D (A-C) y resultados estadísticos.	
Tabla 18 .....	178
Mediciones sobre el modelo-3D y sobre el modelo físico realizadas con cinta métrica.	
Tabla 19 .....	179
Resultados de la valoración cinegética para la muestra de 15 gamos: medición 'Bi-Foto-CAD' y con 'Cinta métrica'.	
Tabla 20 .....	181
Medias de puntuación de calidad cinegética, para los ítems cuantificables, del modelo físico de las cuernas del gamo y de su caracterización en 'modelo-3D axial'.	
Tabla 21 .....	182
Mediciones sobre el modelo-3D 'sólido' y sobre el modelo físico.	

**RESUMEN / ABSTRACT**



## RESUMEN / ABSTRACT

En esta investigación dos campos científicos que no guardan muchas similitudes como son la biología y la ingeniería gráfica, se unen para trabajar de forma transversal y conjunta en el estudio de la cuerna de cérvidos, ciervos y gamos, ya que es de interés en el ámbito de la biología conocer el estado de desarrollo de esta y su morfología. Podría denominarse la 'bioingeniería' como la disciplina científica que utiliza conocimientos interdisciplinarios para resolver problemas y crear herramientas que permitan mejorar el estado de conocimiento y relaciones entre variables que intervienen en las estructuras de elementos biológicos animales.

El estado de la cuerna va a proporcionar un 'biomarcador' que resulta del efecto de otras influencias y condicionantes, factores internos o externos a los que ha estado sometido el ejemplar. Factores internos como la genética, la edad o el grado de salud del ejemplar son influyentes. Otros, externos, básicamente en cuanto a las condiciones del ambiente y estado nutricional en el que se ha desarrollado este, como el grado de pluviometría, abundancia de pastos para su alimento, relaciones con otras especies, itinerarios y recorridos realizados para la búsqueda de alimento, y otros que puedan influenciar en el nivel de estrés del animal.

Para el caso de ciervos y gamos analizados en la presente investigación, el elemento biológico en el que se centra el estudio es su cuerna. Para estas especies, al ir renovándolas anualmente, el estado de ésta va a representar la muestra indicativa de las condiciones internas y/o externas a las que ha estado sometido el animal en ese último periodo de crecimiento de la cornamenta. La cuerna en su último año de desarrollo puede estar expuesta a una serie de alteraciones que, en función de estas, permiten detectar las causas que las provocaron, como las condiciones ambientales y factores que influyeron en su desarrollo y crecimiento. Dichos factores repercuten en el grado de desarrollo y tamaño de la cuerna en cuanto a medidas geométricas: longitudes de sus puntas, envergadura y perímetros de partes relevantes de la 'vara central'. La cuantía geométrica de las partes estructurales de la cuerna va a determinar su valor de calidad cinegética, que, en base a un baremo oficial establecido, se representa en una puntuación concreta. Las puntuaciones altas, van a corresponder a denominaciones de medallas, oro, plata o bronce, que definen a las cuernas de gran desarrollo y tamaño.

Entre las diferentes variables que caracterizan el estado de la cuerna es relevante la consideración de la asimetría que se presenta en los elementos estructurales de sus dos ramas. Al representar la cuerna una estructura bilateral y teóricamente simétrica, podrán detectarse en esta alteraciones, defectos bilaterales o asimetrías entre sus elementos o rasgos geométricos de su estructura, que podrán estar relacionados con otras causas, variables o factores bióticos o abióticos a los que haya estado expuesto el ejemplar.

Una tercera característica de interés que se puede presentar en la cuerna es su densidad; esta representa el grado de compacidad o esponjosidad de la cuerna, pudiendo reflejar, a modo de biomarcador integrador, el grado de condición corporal del animal, de su alimentación y de su genética.

En el ámbito de la biología va a ser relevante estudiar el 'estado geométrico' de la estructura de la cuerna representando éste el 'marcador' o el efecto de las diferentes causas internas o ambientales que hayan provocado dicho estado en la cuerna.

Los estudios analíticos realizados tradicionalmente tienen la limitación de trabajar con muestras de reducido tamaño, de procedencias muy concretas y con condiciones de manipulación muy específicas. Así, por ejemplo, realizar valoraciones de cuernas de su calidad cinegética como trofeos de caza, quedaba casi limitado a trabajar con cuernas procedentes de jornadas de caza, previamente seleccionadas por el propietario del trofeo, y después de su manipulación y preparación como trofeo en talleres de taxidermia. Con esta limitación realizar estudios más exhaustivos y generalizados a muestras de mayor tamaño es difícil. Estudios sobre poblaciones en localizaciones y periodos concretos permiten obtener unos resultados de mayor rango y con mayor fiabilidad, de forma que las correlaciones de los 'biomarcadores' estudiados con otras variables de influencia van a ser más consistentes.

Estos estudios, realizados con muestras de gran tamaño, son posibles en base a que el dato de partida sea relativamente fácil de obtener, de caracterizar con precisión y con las propiedades precisas en su definición, para permitir su aplicabilidad en posteriores análisis biológicos: por un lado, la determinación de tamaños en valoraciones de calidad cinegética, y por otro, la estimación de las desviaciones y comparaciones de puntos homólogos entre distintos rasgos geométricos de la cuerna para realizar estimaciones del valor de asimetría parcial sobre ellos o en la totalidad de la cuerna.

Dicha caracterización va a ser posible, aplicando metodologías gráficas, para definir digitalmente la cuerna en un modelo-3D, en dos variantes diferentes. Un primer tipo va a definir la 'estructura alámbrica axial' de la cuerna, representada por los ejes medios de los rasgos de su estructura: de la 'vara central' y de las puntas principales, 'luchaderas' y 'candiles' para el ciervo, y de la 'vara central', punta 'luchadera', y longitud y ancho de la 'pala' para el gamo. La segunda tipología consiste en un modelo-3D 'sólido', de volumen, donde se detalla su geometría de forma precisa, permitiendo establecer análisis descriptivos de definición de su morfología y la estimación de su volumen que, junto con la masa, determine su densidad.

Los procesos aplicados para la obtención de dichas caracterizaciones tridimensionales de la cuerna han consistido en la aplicación de una metodología de restitución fotogramétrica, la cual, a partir de dos fotografías, tomadas desde dos localizaciones diferentes y en la cuales aparece una referencia métrica rectangular, se van a restituir espacialmente los puntos relevantes de la

estructura de la cuerna hasta conseguir finalmente la definición tridimensional de esta. La descripción de esta metodología, su validación y los resultados obtenidos se detallan en ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)). Con este procedimiento se ha conseguido definir espacialmente la estructura axial de las cuernas del ciervo y del gamo, y sobre dicho dato de partida realizar estimaciones sobre el grado de calidad cinegética y sobre la posible existencia de asimetría en partes relevantes de esta.

La segunda tipología que caracteriza en 3D la cuerna, consiste en un modelo-3D 'sólido' de volumen. Este se define a partir de su estructura axial y de las formas perimetales que corresponden a diferentes secciones transversales en lugares relevantes de la 'vara central', de las puntas 'luchaderas', 'candiles' y de la 'corona'. A partir del dato de la estructura de perfiles de la cuerna junto con la aplicación de las herramientas propias de modelado tridimensional de una aplicación informática CAD, *SolidWorks*, se va a obtener el modelo-3D de volumen. Las herramientas de modelado tridimensional, consisten en 'barridos', 'recubrimientos' de perfiles y 'redondeos' de aristas, consiguiendo definir un modelo-3D de volumen de la cuerna. La precisión obtenida para la cuerna del ciervo es alta, pero para la del gamo, debido a la complejidad geométrica de su 'pala' y de sus puntas perimetales, no se alcanza la precisión deseada. Para su definición como modelo-3D se deben realizar una serie de supuestos en su geometría que aporten continuidad, pero a la vez provocan desviaciones sobre la geometría real de la cuerna, consiguiendo finalmente un modelo-3D aproximado de la cuerna. Para la definición precisa de la cuerna del gamo, mediante un modelo-3D de volumen, se deben implementar otras tecnologías que aporten mayor precisión, como el 'escáner-3D' o la fotogrametría multi-imagen SfM (*Structure From Motion*). Estas tres tecnologías describen y se implementan para la caracterización de la cuerna del gamo en un modelo-3D. También se realiza un estudio de los grados de precisión y de idoneidad de cada modelo-3D en base al tipo de aplicación biológica al que vaya destinado. Todo ello se describe en ([Montalvo-Gil et al. 2024b](#)).

En la presente investigación se presentan metodologías para caracterizar digitalmente la cuerna de cérvidos, que permitan posteriormente, a partir de dicho dato, realizar análisis biológicos en cuanto a estimar el grado de calidad cinegética y de asimetría en rasgos geométricos relevantes de la cuerna.

Sobre la caracterización digital de la cuerna, en forma de estructura axial, se utiliza ésta para estimaciones del grado de calidad cinegética, evaluando las longitudes de partes de la estructura en sus 'puntas' y perímetros. El modelo-3D sólido también permite su implementación para realizar estudios de calidad cinegética, pero no es lo más apropiado por ser más laboriosa su obtención.

La validación de la precisión del modelo-3D de estructura axial se realiza comparando los resultados obtenidos con aquellos obtenidos con otros métodos como la medición directa con

cinta métrica, realizada por personal autorizado, sobre las superficies del modelo real de la cuerna, y sobre aquellos obtenidos con la tecnología CMA (*Coordinate Measuring Arm*), brazo articulado que mediante un palpador situado en su extremo, guarda las coordenadas de los puntos que contactan sobre la superficie del objeto, demostrando finalmente la adecuada precisión del modelo-3D de estructura axial para su implementación. Con dicha validación se demuestra, por un lado, que el dato del modelo-3D digital de partida es fiable y muy próximo al modelo real de la cuerna. Por otro, que los valores de las mediciones métricas realizadas sobre el modelo digital son también muy próximos a los obtenidos por el personal homologador sobre el modelo físico de la cuerna, durante el proceso de estimación del valor de calidad cinegética de ésta en su homologación como trofeo de caza.

La metodología se valida con los resultados preliminares obtenidos, en los tamaños muestrales medios utilizados. Posteriormente se podrán realizar análisis con tamaños de muestras más grandes, estudios sobre poblaciones, que permitan establecer correlaciones, con mayor grado de significancia, con aquellas variables y condicionantes externos y del entorno en las que se hayan desarrollado éstas.

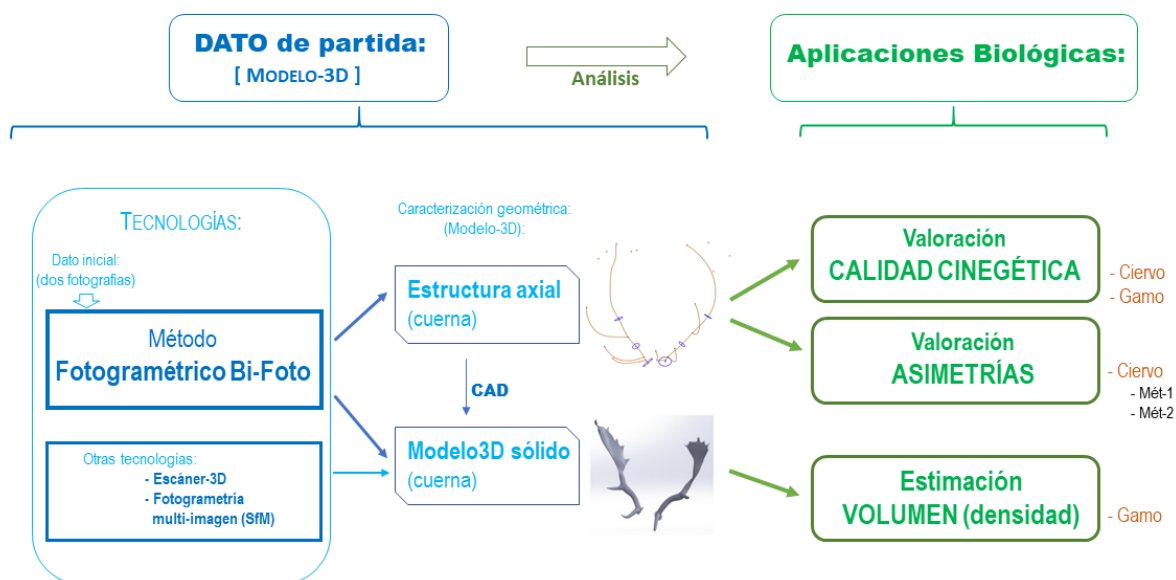
Otro tipo de análisis realizado es el de asimetrías, evaluando el grado de desviación que tienen las partes bilaterales de las ramas de la cuerna del ciervo entre ellas. Se han propuesto dos metodologías para su evaluación. En la primera, aplicable solo sobre el modelo digital de la cuerna, se estiman los puntos de arranque y extremos de las puntas principales, obteniendo previamente su localización espacial, utilizando el método fotogramétrico 'Bi-Foto', de ambas ramas de la cuerna. Posteriormente se consideran los segmentos que unen cada punto de un lado de la cuerna sobre su punto homólogo o afín correspondiente del otro lado. Sobre dichos segmentos, se estima la asimetría o defecto que representan la pareja de puntos afines en función a dos criterios de 'longitud' y de 'perpendicularidad' que tengan estos referidos a un 'plano de simetría' referenciado sobre puntos relevantes del cráneo del ejemplar. La descripción de la metodología y de los resultados preliminares obtenidos se han publicado en ([Montalvo-Gil et al. 2022](#)).

Una segunda metodología propuesta [Montalvo-Gil et al. 2024a](#) evalúan el grado de asimetría aprovechando las mediciones realizadas en la valoración de la calidad cinegética de la cuerna. En este, que no utiliza un plano de simetría, se estiman los valores de desviación métrica de los rasgos geométricos afines de cada rama de la cuerna, cuantificando un valor de asimetría parcial para cada uno de ellos. También aporta un valor de asimetría global para toda la cuerna ponderando los valores de asimetría parcial en función al peso que representan.

Este método permite su aplicabilidad, tanto para el modelo físico como para el modelo-3D de la cuerna. Para este último es necesaria la representación de su estructura axial para permitir la medición de las longitudes y perímetros de los rasgos geométricos considerados. Presenta la

ventaja, en la cual, a partir de las mismas mediciones realizadas, va a permitir cuantificar el valor de dos 'biomarcadores' de forma conjunta: el valor de la calidad cinegética y el de sus asimetrías parciales o global. Los valores de asimetría parcial para los diferentes rasgos evaluados, van a permitir abordar otros estudios que establezcan relaciones entre ellos y sobre el valor global o incluso inferir con cuestiones de tipo ecológico relacionadas con el ejemplar. Los resultados preliminares de asimetrías, global para toda la cuerna o parciales para para los rasgos considerados, se podrán comparar con las valoraciones de su calidad cinegética. De dicha comparación se obtienen relaciones y convergencias entre el tamaño y desarrollo de la cuerna con el grado de asimetría. Ejemplares con altas puntuaciones, de medallas, en calidad cinegética obtienen valores bajos de asimetrías. Cuernas de gran desarrollo geométrico aparente presentan una gran armonía en las dos ramas de su cornamenta.

De forma esquemática se presentan las tareas y procesos realizados en el desarrollo del trabajo de investigación que forman parte de la presente Tesis Doctoral (**Fig. 1**).



**Fig. 1.** Esquema general de las tareas y procesos de la investigación.

1. Se define el dato de partida, la cuerna de cérvidos, mediante su caracterización en un modelo en tres dimensiones alámbrico, aplicando una metodología de restitución fotogramétrica propuesta.

Esta consiste en conseguir la definición espacial en 3D de la geometría de la cuerna mediante la restitución espacial de esta representada en dos fotografías.

El dato de partida es la cuerna de ciervo y gamo y se caracteriza en un modelo digital en tres dimensiones, modelo-3D, en dos versiones: como 'estructura axial' o como modelo de volumen 'sólido'.

2. Los datos digitales de la cuerna se utilizan en diferentes aplicaciones biológicas.
  - El modelo-3D de 'estructura axial' se utiliza para las aplicaciones biológicas:
    - Valoración de la 'calidad cinegética', para el ciervo y para el gamo.
    - Estudio de 'asimetría', aplicando dos metodologías propuestas.
  - El modelo-3D 'sólido' se aplica en la determinación del volumen de la cuerna del gamo, dato necesario para determinar la densidad.

## ABSTRACT

In this research, two scientific fields that do not have many similarities, biology and graphic engineering, come together to work transversally and jointly in the study of the antlers of cervids, deer and fallow deer, which is of interest in the field of biology to know the state of development of this and its morphology. 'Bioengineering' could be called the scientific discipline that uses interdisciplinary knowledge to solve problems and create tools to improve the state of knowledge and relationships between variables involved in the structures of animal biological elements.

The state of the horn will provide a 'biomarker' that results from the effect of other influences and conditioners, internal or external factors to which the animal has been subjected. Internal factors such as genetics, age or the degree of health of the animal are influential. Others, external, basically in terms of the environmental conditions and nutritional state in which the animal has developed, such as the degree of rainfall, abundance of pasture for its food, relationships with other species, itineraries and routes taken in search of food, and others that may influence the level of stress of the animal.

In the case of the deer and fallow deer analysed in this research, the biological element on which the study focuses is the antler. For these species, as they are renewed annually, the state of the antlers will represent the indicative sample of the internal and/or external conditions to which the animal has been subjected during the last period of antler growth.

The antler in its last year of development can be exposed to a series of alterations which, depending on these, allow us to detect the causes that provoked them, such as the environmental conditions and factors that influenced its development and growth. These factors have repercussions on the degree of development and size of the antler in terms of geometric measurements: lengths of its tines and wingspan, perimeters of relevant parts of the 'main beam'. The geometric size of the structural parts of the antler will determine its hunting quality value, which, on the basis of an officially established scale, is represented by a specific score. High scores will correspond to medal denominations, gold, silver or bronze, which define the antlers of great development and size.

Among the various parameters that can be studied in the antler, it is relevant to consider the asymmetry that is present in the structural elements of both branches of the antlers. As the antler represents a bilateral and theoretically symmetrical structure, alterations, bilateral defects or asymmetries between its elements or geometric traits of its structure may be detected, which may be related to other causes, variables or biotic or abiotic factors to which the specimen has been exposed.

A third characteristic of interest that may be present in the antler is its density; this represents the degree of compactness or sponginess of the antler, which may reflect, as an integrative biomarker, the degree of body condition of the animal, its diet and its genetics.

In the field of biology, it will be relevant to study the 'geometric state' of the antler structure, which represents the 'marker' or the effect of the different internal or environmental causes that have provoked this state in the antler.

Analytical studies traditionally carried out have the limitation of working with small samples, from very specific origins and with very specific handling conditions. Thus, for example, assessing the hunting quality of antlers as hunting trophies was almost limited to working with antlers from hunting days, previously selected by the owner of the trophy, and after their handling and preparation as trophies in taxidermy workshops. With this limitation, it is difficult to carry out more exhaustive and generalised studies on larger samples. Studies on populations in specific locations and periods allow us to obtain results of greater range and with greater reliability, so that the correlations of the 'biomarkers' studied with other influential variables will be more consistent.

These studies, carried out with large sample sizes, are possible on the basis that the starting data is relatively easy to obtain, to characterise accurately and with the precise properties in its definition to allow its applicability in subsequent biological analyses: size determination in hunting quality assessments, estimation of the deviations of homologous points together with comparisons between different geometric traits of the antler for estimates of the degree of partial asymmetry for each of them or total asymmetry for the whole antler.

This characterisation will be in the form of a CAD 3D-model, so that the antler will be defined in two ways, the first defined by its 'axial wire structure' represented by the axes of the 'main beam' and the main tines, 'eye tines' and 'trez tines' for the red deer, and 'main beam', 'eye tine', and length and width of the 'palm' for the fallow deer. The second typology is by means of a solid 3D-model, where its geometry is precisely detailed, allowing descriptive analyses to be established to define its morphology and estimate the volume, which together with the mass, determines the value of its density.

The processes applied to obtain these three-dimensional characterisations of the antler consisted of the application of a photogrammetric restitution methodology, which, based on two photographs taken from two different locations and in which a rectangular metric reference appears, the relevant points of the antler structure are spatially restituted until the three-dimensional definition of the antler is finally obtained. The description of this methodology, its validation and the results obtained are detailed in ([Rubio-Paramio \*et al.\* 2016](#)). With this procedure, it has been possible to spatially define the axial structure of the antlers of red deer

and fallow deer, and on the basis of this initial data to estimate the degree of hunting quality and the possible existence of asymmetry in relevant parts of the antler.

The second typology, which characterises the antler in 3D, consists of a solid volume 3D-model. This is defined on the basis of its axial structure and the perimeter shapes that correspond to different cross-sections in relevant places of the 'main beam', the 'eye tines', 'trez tines' and the 'crown'. From the data of the profile structure of the antler together with the application of the three-dimensional modelling tools of a CAD application, *SolidWorks*, the volume 3D-model will be obtained. The three-dimensional modelling tools basically consist of 'sweeps', 'overlays' of profiles and 'roundings' of edges, managing to define a volume 3D-model of the antler. The precision obtained for the antler of the deer is high, but for the antler of the fallow deer, due to the geometric complexity of its 'palm' and its spellers tines of the palm, the desired precision is not achieved. For its definition as a 3D-model, a series of assumptions must be made in its geometry that provide continuity, but at the same time cause deviations from the real geometry of the antler, finally achieving an approximate 3D-model of the antler. For the precise definition of the antler of the fallow deer, by means of a volume 3D-model, other technologies must be implemented that provide greater precision, such as 3D-scanning or SfM (*Structure from Motion*) multi-image photogrammetry. These three technologies are described and implemented for the characterisation of the antler of fallow deer in a 3D-model. A study is also made of the degrees of precision and suitability of each 3D-model according to the type of biological application for which it is intended. This is described in ([Montalvo-Gil et al. 2024b](#)).

In this research we present methodologies to digitally characterise the antler of cervid antlers and, based on this data, to carry out biological analyses to estimate the degree of hunting quality and asymmetry in relevant geometric traits of the antler.

The digital characterisation of the antler, in the form of an axial structure, is used to estimate the degree of hunting quality, evaluating the lengths of parts of the structure in its 'tines' and perimeters. The solid 3D-model can also be used for hunting quality studies, but it is not the most appropriate because it is more laborious to obtain.

Validation of the accuracy of the 3D-model of axial structure is carried out by comparing the results obtained with those obtained with other methods such as direct measurement with a tape measure, carried out by authorised personnel, on the surfaces of the real model of the antler, and with those obtained with CMA (*Coordinate Measuring Arm*) technology, an articulated arm which, by means of a probe located at its end, stores the coordinates of the points that contact the surface of the object, finally demonstrating the adequate accuracy of the 3D-model of axial structure for its implementation. This validation demonstrates, on the one hand, that the data from the initial digital 3D-model is reliable and very close to the real model, and on the other hand, that the results obtained in the metric measurements taken on the digital model

are also very close to those taken by the homologating personnel on the real model in the process of estimating the hunting quality value of the antler as a hunting trophy.

The methodology is validated with the preliminary results obtained in the average sample sizes used. Subsequently, analyses can be carried out with larger sample sizes, studies on populations, which allow correlations to be established, with a greater degree of significance, with those variables and external and environmental conditioning factors in which this has been developed.

Another type of analysis carried out is that of asymmetries, evaluating the degree of deviation of the bilateral parts of the two branches of the antler from each other. Two methodologies have been proposed for its evaluation. In the first one, applicable only on the digital model of the antler, the starting and end points of the main tines are estimated, previously obtaining their spatial location using the bi-photo photogrammetric method, of both branches of the antler. Subsequently, the segments joining each point on one side of the antler to its corresponding homologous or related point on the other side are considered. On these segments, the asymmetry or defect represented by the pair of related points is estimated according to two criteria of 'length' and 'perpendicularity' that these have in reference to a 'plane of symmetry' referenced to relevant points of the skull of the specimen. The description of the methodology and the preliminary results obtained have been published in ([Montalvo-Gil et al. 2022](#)).

A second proposed methodology [Montalvo-Gil et al. 2024a](#) evaluate the degree of asymmetry using measurements made in the assessment of antler hunting quality. In this study, which does not use a symmetry plane, the metric deviation values of the related geometric traits of each antler branch are estimated, quantifying a partial asymmetry value for each of them. It also provides a global asymmetry value for the whole antler by weighting the partial asymmetry values according to the weight they represent.

This method allows its applicability, both for the physical model and for the 3D-model of the antler. For the latter, it is necessary to characterise its axial structure to allow the measurement of the lengths and perimeters of the geometric traits considered. It has the advantage that, from the same measurements, it is possible to quantify the value of two 'biomarkers' together: the value of the hunting quality and that of its partial or global asymmetries. The values of partial asymmetry for the different traits evaluated will allow other studies to be carried out to establish relationships between them and on the global value, or even to infer ecological questions related to the specimen. The preliminary results of asymmetries, global for the whole antler or partial for the considered structural traits of the antler, can be compared with the hunting quality evaluations. From this comparison, relationships and convergences between the size and development of the antler and the degree of asymmetry are obtained. Specimens with high medal scores for hunting quality have low values for asymmetry. Antlers with a large apparent geometrical development show a great harmony in the two branches of their antlers.

The tasks and processes carried out in the development of the research work that make up this Doctoral Thesis are presented in schematic form (**Fig. 1**).

1. The starting data, the deer antler, is defined by means of its characterization in a three-dimensional wireframe model, applying a proposed photogrammetric restitution methodology.

This consists of achieving the 3D-spatial definition of the antler geometry by means of the spatial restitution of the antler represented in two photographs.

The starting data is the antler of deer and fallow deer and is characterized in a three dimensions digital CAD 3D-model, in two versions: as an 'axial structure' or as a 'solid' 3D-model.

2. Digital antler data are used in different biological applications.
  - The 'axial structure 3D-model' is used for biological applications:
    - 'hunting quality' assessment, for deer and fallow deer.
    - Study of 'asymmetry', applying two proposed methodologies.
  - The 'solid 3D-model' is applied to determine the volume of fallow deer antlers, which is necessary to determine the density of the antlers.



# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**



## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la biología es de gran interés la cuantificación del grado de desarrollo y de disposición de la geometría de elementos biológicos, como es el caso de las cornamentas en los cérvidos. Dichas valoraciones van a permitir cuantificar una serie de biomarcadores y efectos que se puedan relacionar con causas y factores de influencia.

Los resultados de dichos estudios realizados sobre diferentes partes de la anatomía del ejemplar pueden ser de diversa índole: estudios de las pezuñas, del tamaño de la oreja, de su masa corpórea, etc. Los resultados más relevantes ofrecidos proceden de análisis realizados sobre la cabeza del ejemplar, estudios de molares para determinar su edad y sobre todo es la cuerna el apéndice sobre el cual se podrá obtener más información en función del estado de ésta.

En especies ungulados, en los bóvidos: cabras, ovejas y toros, sus astas son permanentes y con estructuras y material óseo diferentes al de otras especies ungulados como en el caso de los cérvidos: ciervos, gamos y corzos, donde la cornamenta se renueva anualmente (Goss 1983; Bubenik y Bubenik 1990; Geist 1998). En los cérvidos es de especial interés en el campo de la biología, en concreto el estudio del estado de la cuerna, ya que ésta representa una estructura bilateral de cierta complejidad geométrica. Debido a que, en estas especies animales ungulados, ciervos y gamos, la cuerna es una estructura que se renueva anualmente y al estar sometida a la acción de distintas variables y condicionantes que han influido en el ejemplar, su estado puede predecir cuáles de ellos y en qué medida han actuado. El estado de la cuerna va a definir una serie de caracteres o variables, denominados 'biomarcadores' que, en función de su valor, predigan las condiciones expuestas en el devenir del ejemplar durante el último periodo de renovación de la cuerna.

Sobre la cuerna se podrán realizar distintos estudios en base a determinar su tamaño y grado de desarrollo, cuantificando el grado de calidad cinegética realizada oficialmente en procesos de homologación como trofeos de caza. Por otro lado, se podrán realizar estudios de asimetría entre los rasgos geométricos de la estructura de ambas ramas de la cuerna, determinando el grado de continuidad y convergencia de los lados de esta sobre un hipotético plano de simetría de referencia; la mayor parte de estudios de asimetría en vertebrados se realiza sin considerar un plano de referencia.

Otro tipo de estudio es estimar su densidad, determinando previamente su volumen, que junto con su masa va a proporcionar dicho valor. El valor de la densidad va a indicar el grado de esponjosidad de la cuerna, determinando la fortaleza ósea del ejemplar y su grado de salud general y, por otro lado, detectar el estado de las condiciones ambientales en el último periodo de desarrollo de la cuerna.

Por todo ello, son necesarias nuevas herramientas, tecnologías y metodologías que, de forma precisa, permitan describir y cuantificar las variables que definen el estado geométrico y físico de la cuerna.

Actualmente se siguen utilizando, en el ámbito biológico, herramientas de medición por contacto clásicas, pero se van incorporando progresivamente nuevas técnicas, como el escáner-3D, la fotogrametría-3D multi-imagen y la caracterización del elemento de estudio en modelos-3D precisos.

La máquina de medición (CMA) (*Coordinate Machine Arm*) se suele utilizar para la obtención de las coordenadas de los puntos de la superficie del elemento analizado. Es una tecnología precisa y fácil de implementar en laboratorios y ambientes controlados. Se ha utilizado para estudiar huesos de geometrías complejas, simios y humanos (Lockwood *et al.* 2002; Harvati 2003), mandíbulas (Nicholson y Harvati 2006), o regiones craneofaciales (Kimmerle *et al.* 2008). También se utilizó la tecnología CMA para, a partir de las coordenadas de los puntos, obtener la definición tridimensional de la estructura de la cuerna, siendo esta la base para estudios de morfometría (Martínez-Salmerón 2014). En los primeros resultados obtenidos en esta investigación, se midieron las longitudes de los rasgos estructurales sobre el modelo físico de la cuerna del ciervo con una máquina *CMA Microscribe* (Rubio-Paramio *et al.* 2016). La información obtenida se utilizó tanto para el proceso de estimación de la calidad cinegética como para la validación de la precisión del modelo-3D digital obtenido por restitución fotogramétrica.

El escáner-3D representa una nueva técnica que permite la digitalización de coordenadas con eficacia, recogiendo una gran cantidad de puntos en las superficies del elemento medido con precisión para definir finalmente el modelo-3D que lo represente. Son variadas las aplicaciones que consideran esta tecnología: en aplicaciones de biometría (Fortin *et al.* 2007) para definir la geometría de la superficie del cuerpo humano, en la definición de la forma humana para la creación de maniqués (Wang 2005), en estudios de morfometría geométrica del cráneo (Kimmerle *et al.* 2008) y en procesos de ingeniería inversa y de diseño industrial (Yu y Peng 2007; Korosec *et al.* 2010; Panchetti *et al.* 2010). Esta técnica se ha utilizado para la caracterización de la cuerna del gamo en un modelo-3D 'sólido', una estructura de geometría más compleja que la del ciervo, con el objetivo de determinar el valor de su volumen (Montalvo-Gil *et al.* 2024b). Debido a que el modelo-3D obtenido con esta técnica tiene gran precisión, éste se ha utilizado para evaluar el grado de precisión de los modelos-3D de la cuerna del gamo obtenidos con las tecnologías de fotogrametría multi-imagen (SfM) (*Structure from Motion*) y por modelado CAD a partir del dato del modelo-3D axial obtenido por restitución fotogramétrica a partir de dos fotografías (Bi-Foto-CAD).

En cuanto a los inconvenientes de estas técnicas, tanto el escáner-3D como el CMA tienen altos costes de equipamiento y sólo permiten su implementación en laboratorios o entornos

controlados y su utilización en el campo es limitada. En los estudios de la cuerna del ciervo deben realizarse normalmente fuera del laboratorio y requieren una toma de datos de poco tiempo por cuerna. Estos suelen obtenerse en el campo o en una jornada de caza, el número de ejemplares suele ser elevado y las condiciones difíciles. Por ello, ambos métodos no son adecuados.

Otra tecnología relevante es la fotogrametría-3D. Es frecuente representar el elemento de estudio en modelos-3D a partir de un gran número de fotografías del objeto, tomadas desde diferentes "puntos de vista". Esta presenta gran flexibilidad, bajo coste y reducido equipamiento. Son numerosas las aplicaciones con esta técnica: en la definición de la topografía del terreno (Baltsavias 1999; Liu *et al.* 2012), en edificios (Alves y Bartolo 2006; Ordóñez *et al.* 2008; Golparvar-Fard *et al.* 2011; Bhatla *et al.* 2012), estructuras metálicas y barcos (Veldhuis y Vosselman 1998; Koelman 2010; Sánchez *et al.* 2012), aplicaciones dentales (Shigeta *et al.* 2013) y en la representación de elementos biológicos con diferentes fines (Chin-Hung *et al.* 2007; Fortin *et al.* 2007; Shigeta *et al.* 2013).

Una de las desventajas de la fotogrametría-3D multi-imagen es la necesidad de procesos posteriores de edición, mediante software, requeridos para definir la geometría del objeto con precisión, debido a las imperfecciones que aporta la nube de puntos presentada inicialmente (Yan *et al.* 2006; Panchetti *et al.* 2010; Golparvar-Fard *et al.* 2011; Ramos y Santos, 2011). Otra limitación es que la caracterización de la cuerna en un modelo-3D exige tomar muchas fotografías, pero las situaciones reales no suelen permitir tomar más de dos o tres fotos por ejemplar.

Solventar estos problemas implica que, a partir de pocas fotografías se consiga la definición geométrica del objeto de estudio, generalmente mediante un modelo-3D, que será la base de partida para otros análisis posteriores. La técnica de modelado CAD 3D se ha utilizado ampliamente para crear piezas anatómicas humanas (modelado bio-CAD) y obtener huesos y órganos para la fabricación de moldes y prototipos (Sun *et al.* 2005; Kurazume *et al.* 2009), o en la planificación quirúrgica y la evaluación de patologías óseas (Minns *et al.* 2003). También se han utilizado modelos CAD paramétricos en el diseño de componentes corporales para sustituir elementos lesionados (Li *et al.* 2009). Rubio-Paramio *et al.* 2012 definen modelos virtuales de cuernas reales para calcular el volumen y la densidad, en sustitución del método menos práctico basado en el principio de Arquímedes. Obtiene el modelo-3D mediante CAD a partir de las coordenadas de puntos de la estructura de la cuerna, obtenidas a partir de las proyecciones de ésta sobre los tres planos perpendiculares de un triedro considerado.

La definición digital de la cuerna en 3D, con la precisión adecuada, requiere de una toma de datos rápida, con poca información y en condiciones desfavorables en el campo. Se propone una metodología versátil y precisa para estudiar la morfología de la cuerna que utiliza pocos puntos

de referencia y un número reducido de fotografías por ejemplar. Para ello, se recrea una escena fotogramétrica de la cuerna dentro de un entorno de diseño asistido por ordenador (CAD) en 3D. El método propuesto en el presente estudio [Rubio-Paramio et al. 2016](#) desarrollan una técnica proyectiva de fotogrametría dentro de un CAD 3D paramétrico. Se reproduce una escena tridimensional paramétrica virtual, atravesada por rayos proyectivos. Esta escena es fácilmente modificable a un nuevo modelo gracias a la parametrización del trazado de rayos vinculado a las fotografías. Por ello, el principal objetivo del estudio ha sido desarrollar y aplicar un método fotogramétrico, basado en tecnología CAD 3D paramétrica, que sólo requiere dos fotografías por ejemplar. El reducido número de fotografías va a permitir el estudio del estado de las cuernas de ejemplares en tamaños muestrales grandes.

La cuerna de cérvidos, caracterizada mediante un modelo-3D preciso, que represente la estructura axial de los rasgos geométricos de esta o el volumen de toda ella, constituye el dato de partida para realizar posteriores análisis biológicos, que determinen el estado de biomarcadores de interés, como la calidad cinegética y los grados de defecto bilateral o asimetrías presentes en las dos ramas de la cuerna.

El estado de la cuerna tras la renovación anual representa un biomarcador relevante que podrá relacionarse con los factores de influencia a los que ha estado sometido el ejemplar. La función de la cuerna como carácter sexual secundario y con propiedades biomecánicas adaptadas a la lucha durante el periodo de celo, se ven afectadas por factores ambientales, e incluso se ha observado que el año de nacimiento es un factor determinante para la futura calidad de la cuerna del individuo ([Azorit et al. 2002a](#)).

Una de estas alteraciones es definida por varios autores como "asimetría fluctuante" (AF), que representa aquellas desviaciones aleatorias en el desarrollo simétrico de ciertos rasgos de estructuras bilaterales ([Ludwig 1932](#); [Van Valen 1962](#)). Estudios sobre la asimetría fluctuante (AF) se realizaron en especies de invertebrados, vertebrados inferiores y aves ([Valentine et al. 1973](#); [Govind y Pearce 1986](#); [Møller 1992](#)). La mayoría de los estudios que se han realizado sobre la estimación del grado de asimetría en especies de ungulados, como el alce (*Alces alces*) ([Solberg and Sæther 1993](#)), el gamo (*Dama dama*) ([Stenström 1998](#); [Putman et al. 2000](#)), el reno (*Rangifer tarandus*) ([Markusson y Folstad 1997](#)), y el ciervo (*Cervus elaphus hispanicus*) ([Mateos et al. 2008](#)), así como corzos (*Capreolus capreolus*) ([Pélabon y Van Breukelen 1998](#)), tratan de estimar la relación de la AF con el estrés del animal causado por condiciones ambientales adversas. El estudio de la AF en la cuerna del ciervo ibérico, dado que ésta se renueva anualmente, puede ser un buen indicador de la calidad individual y del grado de estrés ambiental que ha sufrido el ejemplar durante su desarrollo ([Mateos et al. 2008](#)).

Las metodologías para los estudios de asimetría en cérvidos deberían ser más rigurosas, basándose en el estudio de aquellos rasgos particulares de la cuerna que representen las causas

de la inestabilidad del desarrollo, provocando así la asimetría en las dos ramas de la cuerna (Krapinec *et al.* 2022). Algunos autores destacan la importancia de orientar los estudios de asimetría hacia el análisis de rasgos geométricos particulares de la cuerna, así Palmer y Strobeck 2003, Van Dongen 2006 y Mateos *et al.* 2008 establecen valores parciales de asimetría en rasgos diferenciales de la cuerna, permitiendo detectar y relacionar aquellos rasgos más expuestos al estrés, de forma que, los resultados concluyentes sean más rigurosos en los estudios realizados sobre la inestabilidad del desarrollo de la cuerna.

Así, numerosos autores han estudiado el grado de asimetría, no como un valor compuesto, sino en varios rasgos diferenciales de la estructura de la cuerna, desde unos pocos Solberg y Sæther 1993, Pélabon y van Breukelen 1998 y Putman *et al.* 2000, hasta un gran número Kruuk *et al.* 2003, Bartoš y Bahbouh 2006 y Bartoš *et al.* 2007. Los estudios que ofrecen un valor global de asimetría compuesto para toda la cuerna son menos frecuentes (Mateos *et al.* 2008; Baker y Hoelzel 2013). Las metodologías tradicionales se han basado en evaluaciones parciales de la asimetría de algunos rasgos concretos del elemento biológico estudiado y no en evaluaciones globales de la asimetría de toda la estructura. Esto se debe a la dificultad de realizar las mediciones necesarias, con la precisión adecuada, en todos los rasgos que forman la estructura de la cuerna, para permitir la definición de un valor global de asimetría.

En la presente tesis se presentan dos metodologías para estimar el grado de defecto o asimetría existente entre las dos ramas de la cuerna del ciervo.

En una primera, Montalvo-Gil *et al.* 2022 estiman un valor de asimetría total para toda la cuerna, determinado por el grado de asimetría de puntos ‘homólogos’ de la cuerna, básicamente puntos de inicio y extremos de las puntas de la cuerna, con sus correspondientes puntos ‘afines’, evaluados sobre un plano de simetría vinculado al cráneo del ejemplar.

En la segunda metodología, Montalvo-Gil *et al.* 2024a amplían este estudio sobre diferentes rasgos geométricos de la estructura de la cuerna. En este caso no se requiere, como en casi la totalidad de los análisis de asimetrías, la definición de un plano de simetría como referencia. El grado de defecto bilateral se estima midiendo las diferencias métricas de cada rasgo estructural considerado, perteneciente a cada rama de la cuerna, con respecto a su valor aritmético medio. El algoritmo utiliza las mismas mediciones que se consideran en la evaluación del biomarcador de calidad cinegética (Llanes-Borrero 2013), es decir, con los mismos valores es posible evaluar ambos biomarcadores. También permite estimar un valor global de asimetría para toda la cuerna. Con los valores de asimetrías parciales se obtiene finalmente un valor ponderado global de asimetría para toda la estructura de la cuerna. Para el análisis se utiliza como dato de entrada, la caracterización de la cuerna en un modelo-3D de su estructura axial.

Una tercera aplicación biológica consiste en la estimación de otro biomarcador relacionado con el estado de la cuerna, la estimación de su volumen que determine finalmente la densidad. El

valor de la densidad se relaciona con el tamaño de la cuerna y su grado de mineralización (Chen *et al.* 2009) y puede detectar su estado nutricional durante su crecimiento. Para estimar la densidad se requiere valorar previamente el volumen. Miller *et al.* 1985 estimaron el volumen de la cuerna utilizando el método de Arquímedes, pero esta metodología puede causar deterioros de la cuerna en la preparación del proceso. Landete-Castillejos *et al.* 2007, 2010 y Estévez *et al.* 2008 ponen de manifiesto la dificultad de estimar tanto el valor del volumen como de la masa de la cuerna.

La caracterización de la cuerna mediante un modelo-3D preciso va a permitir la estimación del valor de su volumen. Rubio-Paramio *et al.* 2012 proponen una metodología CAD que define un modelo-3D, inicialmente de la estructura axial de la cuerna y posteriormente del volumen mediante modelado CAD. Este se obtiene con el dato de las coordenadas de puntos, obtenidos sobre las proyecciones en tres planos, de los ejes de sus elementos estructurales de cuernas de ciervo procedentes de desmogues. Obtenido el modelo-3D 'sólido' se determina el volumen y la densidad a partir del valor de la masa. Este método se valida comparándolo con la técnica hidrostática de Arquímedes.

En esta tesis se presenta una metodología para estimar la densidad de la cuerna del gamo a partir de su modelo-3D preciso. Este va a proporcionar el dato de su volumen, y con el valor de su masa, se podrá cuantificar su densidad. El valor de la masa de la cuerna se podrá determinar en cuernas procedentes de talleres de taxidermia, generalmente seleccionadas por los propietarios por su alta calidad cinegética aparente. Para estudios más genéricos realizados sobre poblaciones, de una localización y periodo concreto, se podrán realizar sobre 'desmogues'. En este caso, al disponer en pocos casos de las dos ramas de la cuerna, el valor del volumen de ésta se estima sobre la rama de la cuerna disponible. Para el caso de trofeos, el valor de la masa de la cuerna se determina a partir del peso total de ésta restando el peso del cráneo, que se podrá estimar en función del tamaño de cráneos y deshechos de los talleres de taxidermia.

También se presentan y se comparan diferentes tecnologías que tienen por objetivo la caracterización gráfica y precisa de la cuerna del gamo, mediante modelos-3D (Montalvo-Gil *et al.* 2024b). Se valoran los recursos necesarios y el grado de precisión que se obtiene en la obtención del modelo-3D en cada una de las tecnologías consideradas: escáner-3D, fotogrametría-3D multi-imagen SfM (*Structure from Motion*) y modelado CAD a partir de la estructura axial CAD obtenida por restitución fotogramétrica a partir de dos fotografías. Se discute, en base a los recursos y necesidades requeridas para la definición del modelo-3D de cada una de las tecnologías, la aplicación biológica concreta más adecuada a la que se destine cada tipo de modelo-3D: en valoraciones de calidad cinegética, en estimaciones de asimetrías o de cuantificación del volumen.

Los diferentes estudios realizados en la presente tesis, se realizan sobre muestras de ejemplares procedentes de jornadas de caza y de sesiones de valoración de la calidad cinegética para la homologación como trofeos de caza, de diferentes cotos de caza del Parque Natural de la Sierra de Andújar en el sur de España.

En este entorno, actividades económicas de gran relevancia, aparte de la agricultura y de la turística, que se ha incrementado en los últimos años, tanto en grandes capitales como en turismo rural, es la actividad cinegética. Ésta supone tradicionalmente una actividad de creciente relevancia económica para la zona, representando las especies de ciervo, gamo y jabalí las más predominantes, cuyos trofeos representan el principal reclamo. Otra actividad económica derivada de esta es la industria carnicera, que procesa y comercializa la carne de caza, en productos directos, o procesados ofrecidos en establecimientos turísticos de restauración. Al representar la actividad cinegética un recurso socioeconómico para zonas marginales económicamente, debe gestionarse esta adecuadamente para permitir su sostenibilidad y continuidad, de forma que se garantice el potencial crecimiento de las especies cinegéticas, la protección de estas y de su entorno. Los ingresos por la caza repercuten a muchos sectores como: empleos para personal en el medio rural, tasas e impuestos, licencias, armas, materiales, perros, talleres de taxidermia, infraestructuras turísticas, textos y publicaciones periódicas, etc.

El principal objetivo y reclamo en la caza mayor a día de hoy en España es el trofeo. Por tanto, resulta de interés para los cazadores valorar de forma oficial el grado de calidad cinegética de dichos trofeos para su archivo y clasificación. Aparte del estudio individual de las cuernas de ejemplares concretos, es de interés en el campo de la biología realizar estudios más genéricos, sobre muestras significativas que, dependiendo del estado de los 'biomarcadores' de las cuernas analizadas, permitan inferir sobre otras variables en las que se haya relacionado la población.

Por ello, es importante que la tipología y precisión de los datos de partida permita dichos estudios. Es en estos casos donde se produce una transversalidad entre dos áreas de conocimiento diferentes, la ingeniería gráfica y la biología, de forma que tengan un elemento común de estudio, provocando que, la interdisciplinariedad entre ellas trabajando de forma conjunta en ecología aplicada, ofrezca una solución eficiente y unos resultados significativos.

En el caso concreto del presente estudio es donde intervienen las técnicas de ingeniería gráfica para caracterizar y definir el modelo real de la cuerna en forma de modelo digital en tres dimensiones, representado tanto en las modalidades de estructura axial de los ejes medios de las partes de su estructura geométrica, o como modelo-3D de volumen que describa su geometría completa.

El elemento de conexión entre ambas disciplinas, la ingeniería y la biología, es la definición de la geometría del dato de partida, el modelo-3D de la cuerna, que se utiliza para análisis posteriores. La ingeniería gráfica y la biología trabajan de forma conjunta en definir un dato de interés para

ambas, de forma que, la biología recibe el dato demandado, un modelo-3D digital preciso, que la ingeniería gráfica es capaz de ofrecer aplicando distintas tecnologías en base a la tipología del análisis biológico a realizar.

**CAPÍTULO II**  
**OBJETIVOS E HIPÓTESIS**



## CAPÍTULO II: OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### Hipótesis de partida

Se pretende validar la hipótesis general, de que:

1. La fotogrametría integrada dentro de un sistema CAD paramétrico permite la caracterización de elementos biológicos en modelos digitales tridimensionales.
2. Los elementos biológicos, representados en modelos-3D, se pueden implementar en análisis de tipo métrico en aplicaciones de la biología animal.

La demostración de la hipótesis, vendrá dada en función del grado de cumplimiento de los objetivos planteados.

### Objetivo general:

El **objetivo general** de la presente tesis doctoral es **caracterizar con precisión la cuerna de cérvidos: ciervo y gamo, digitalmente en forma de modelo-3D, de forma que, permita su implementación en análisis biológicos de valoración de la calidad cinegética, de asimetrías y de volumen.**

La cuerna se definirá en forma de tipologías de modelos-3D de 'estructura axial' y 'sólido', representando este el dato de entrada para posteriores análisis biológicos con resultados fiables y próximos a los obtenidos en el modelo real de la cuerna.

Para alcanzar este objetivo general, se definen otros objetivos específicos que permiten su consecución:

### Objetivo específico I:

**Desarrollo de una nueva metodología fotogramétrica que permita la restitución espacial fotogramétrica de los objetos representados en solo dos fotografías.**

Estará integrado en un sistema CAD paramétrico y solo necesitará utilizar dos fotografías, tomadas desde diferentes puntos de vista, para obtener la localización espacial de los puntos representados en ellas mediante el cruce de rayos proyectivos. Va a permitir la representación tridimensional espacial de la cuerna caracterizada por su estructura axial.

### Objetivo específico II:

**Validación de la metodología fotogramétrica estimando la precisión del modelo-3D 'axial' de la cuerna obtenido.**

El modelo-3D alámbrico que caracteriza la cuerna obtenido mediante la restitución espacial fotogramétrica, estará representado por los ejes de su estructura geométrica. Estos se utilizan

para la valoración de la calidad cinegética en el proceso oficial de homologación como trofeos de caza mayor en España, mediante la cuantificación métrica de dichos elementos estructurales de la cuerna. La validación de la metodología fotogramétrica va a consistir en evaluar el grado de precisión del modelo-3D digital con respecto al modelo real. Para ello se comparará el grado de aproximación de los valores métricos realizadas sobre el modelo-3D digital, realizadas sobre las diferentes partes de su estructura, sobre aquellos realizados sobre el modelo real de la cuerna y sobre el modelo caracterizado con la tecnología CMA (*Coordinate Measurement Arm*).

#### Objetivo específico III:

##### **Implementación del ‘modelo-3D axial’ de la cuerna en aplicaciones biológicas para estimar la calidad cinegética.**

Una vez validada la precisión del modelo-3D axial, que caracteriza la estructura axial de la cuerna del ciervo y del gamo, ésta se puede utilizar como dato de partida para evaluar la calidad cinegética.

- Los resultados de estos objetivos específicos I, II y III, se describen en las publicaciones (ver Anexos I-II):

Rubio-Paramio, M.A., Montalvo-Gil, J.M., Ramírez-Garrido, J.A., Martínez-Salmerón, D., Azorit, C. (2016). An interactive photogrammetric method for assessing deer antler quality using a parametric Computer-Aided Design system (*Interactive Photogrammetric Measure Method*). *Biosystems Engineering* 150, 54–68.

doi: [10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012)

Montalvo-Gil JM, Rubio-Paramio MA, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C (2017). Metodología fotogramétrica integrada en un sistema CAD paramétrico y aplicaciones para el estudio de la cuerna del ciervo. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Gijón, (España). (*primer premio a la mejor comunicación*).

#### Objetivo específico IV:

##### **Desarrollo de dos nuevas metodologías para la valoración del grado de asimetrías, parciales y globales, en rasgos geométricos de la cuerna del ciervo.**

Se presentan dos metodologías destinadas a evaluar los defectos bilaterales que se pueden presentar en diferentes rasgos geométricos de la estructura de la cuerna, proporcionando datos de asimetrías parciales entre ellos o un valor global de asimetría para toda la cuerna. Las dos metodologías se podrán aplicar sobre el modelo-3D ‘axial’ y uno de ellos también sobre el modelo físico de la cuerna aprovechando las mediciones realizadas en la estimación de la calidad cinegética. Los resultados preliminares obtenidos podrán permitir detectar la consistencia de las relaciones entre los ‘biomarcadores’ de asimetría con los de calidad cinegética.

- Los resultados de este objetivo específico IV, se describen en la publicación (ver Anexos I-II):

Montalvo-Gil JM, Azorit C, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2022). A new method for quantifying the asymmetry of biological elements by means of a photogrammetric technique using a parametric computer-aided design system. *Symmetry* 14, 2296.

doi:[10.3390/sym14112296](https://doi.org/10.3390/sym14112296)

Montalvo-Gil JM, Azorit C, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2024a). A new methodology, based on a CAD system, for evaluating partial and global asymmetries in deer antlers from hunting quality assessment data. *Symmetry* 16, 785.

doi:[10.3390/sym16070785](https://doi.org/10.3390/sym16070785)

Montalvo-Gil JM, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C, Rubio-Paramio MA (2023). Metodología para la estimación de la asimetría del ciervo rojo ibérico a partir de su caracterización CAD. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Cádiz, (España).

#### Objetivo específico 5:

**Caracterización de la cuerna del gamo mediante un ‘modelo-3D sólido’ utilizando diferentes tecnologías. Estudio de su precisión y adecuación en base a la tipología del análisis biológico a implementar.**

La cuerna del gamo debido a la complejidad geométrica que representa su ‘pala’ presenta dificultades para su caracterización mediante un modelo-3D ‘sólido’ utilizando técnicas de modelado CAD tradicionales. Por ello, se utilizan otras tecnologías para su caracterización, el ‘escáner-3D’ y la ‘fotogrametría-3D multiimagen’ SfM (*Structure From Motion*). Posteriormente se evalúa el grado de precisión geométrica de cada modelo-3D en los tres modelos obtenidos. Finalmente se estudia cuál es el tipo de modelo-3D, cada uno con sus condiciones y materiales particulares utilizados en su definición, más apropiado a implementar como dato de partida en base a la tipología de la aplicación biológica al que vaya destinado: la evaluación de la calidad cinegética, la valoración de asimetrías o la cuantificación del volumen/densidad de la cuerna.

- Los resultados de este objetivo específico V, se describen en la publicación (ver Anexos I-II):

Montalvo-Gil JM, Rubio-Paramio MA, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C (2019). Restitución especial a partir de dos fotografías y aplicación biológica para el estudio de la cuerna del gamo. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Logroño, (España).

Montalvo-Gil JM, Azorit C, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2024b). Three 3D graphics engineering technologies for fallow deer antlers characterization in ecology and management approaches. *Discover Applied Sciences*. (enviado: en revisión).



**CAPÍTULO III**  
**METODOLOGÍA GENERAL**



## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA GENERAL

Se describen a continuación las diferentes metodologías aportadas, en la caracterización de la cuerna del ciervo y del gamo en modelos-3D, y las aplicaciones biológicas a las cuales se destinan (Fig. 1):

- Metodologías:

- Restitución fotogramétrica, a partir de dos fotografías que caracteriza la cuerna en un modelo-3D 'axial' (Bi-Foto).
- Escáner-3D de 'luz estructurada'.
- Fotogrametría-3D Multi-imagen (SfM) (*Structure from Motion*).
- Modelado CAD a partir de su estructura axial (Bi-Foto-CAD).

- Aplicaciones biológicas:

- Valoración de la calidad cinegética.
- Metodologías de estimación de las asimetrías, parcial y global, de la cuerna.
- Determinación del volumen.

### 1. METODOLOGÍAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DIGITAL DE LA CUERNA EN UN MODELO-3D

#### 1.1. MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO 'BI-FOTO'

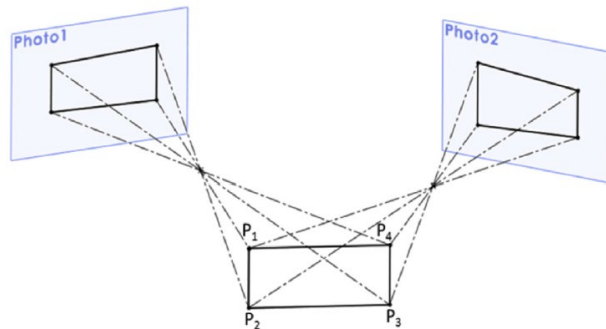
Se ha desarrollado una herramienta fotogramétrica, integrada en un sistema CAD paramétrico variacional, que utiliza dos fotografías, de forma que permite la restitución espacial de los puntos representados en ellas. El objetivo perseguido es la representación espacial de los puntos de la cuerna, del ciervo y del gamo, representados en dos fotografías mediante su restitución fotogramétrica.

El principio básico de la metodología propuesta es la aplicación de los principios de la fotografía dentro del entorno de la aplicación CAD, utilizando las propias herramientas de definición geométrica que posee para definir una escena virtual, y dentro de ella, los puntos en el espacio representados en las fotografías.

El fundamento del método se basa en que el punto representado en al menos dos fotografías, puede ser localizado con precisión en el espacio por medio de la intersección matemática de las líneas espaciales convergentes.

Los elementos que intervienen para la localización de las coordenadas en 3D del punto estudiado, son el centro de proyección o posición de la cámara y el punto representado en la fotografía. La ubicación espacial del punto, estará sobre la línea recta que une dichos elementos.

La determinación de la ubicación de un punto, se obtiene a través de la intersección de dos o más líneas rectas. Por tanto, cada punto debe aparecer en al menos dos fotografías (Fig. 2).



**Fig. 2.** Relaciones entre los puntos espaciales y rayos proyectivos sobre los puntos representados en las dos fotografías.

El método fotogramétrico a desarrollar, consiste en la representación de toda la estructura de rayos proyectivos de los puntos a localizar en el espacio dentro del entorno del sistema CAD.

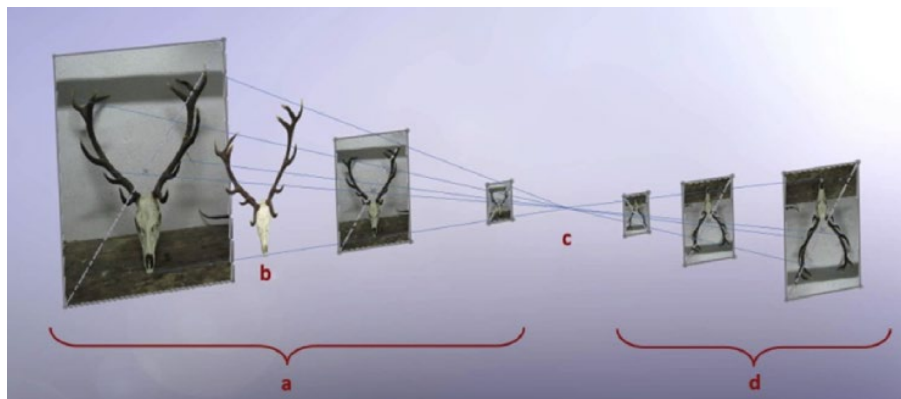
Para la localización espacial de un punto, se debe disponer de al menos dos fotografías realizadas desde diferentes puntos de vista. El fundamento del sistema se basa en que en las dos fotografías se identifican puntos idénticos.

Los principios de la fotografía, definen a la imagen representada de forma invertida y a una escala menor que la del objeto real, quedando el foco de la lente de la cámara entre ambos elementos (Fig. 3).



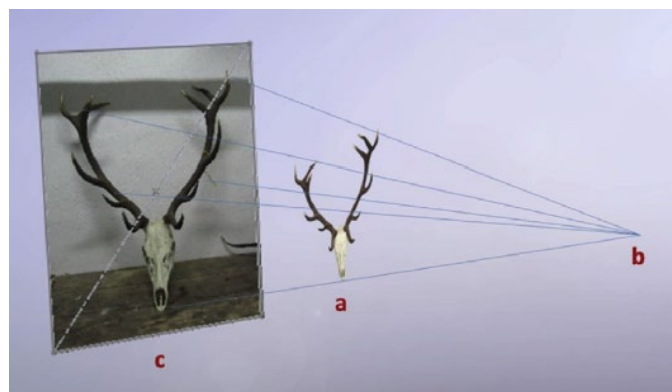
**Fig. 3.** Trayectoria de la incidencia de rayos sobre el plano de la fotografía.  
a) Objeto real. b) Posición de la lente de la cámara. c) Fotografía (a escala reducida e invertida).

Para que la imagen no aparezca invertida, se establece una homología, de forma que el objeto representado aparezca en planos situados entre la cámara y el objeto real, o en otro caso por detrás del objeto real (Fig. 4).



**Fig. 4.** Imágenes homólogas en planos paralelos adaptadas a la dirección de la proyección de rayos.  
 a) Imágenes homólogas no invertidas. b) Objeto real. c) Posición de la lente de la cámara (centro de homología).  
 d) Imágenes homólogas invertidas.

La solución adoptada para obtener imágenes no invertidas, es situar al objeto real 3D buscado entre su imagen representada y la posición de la cámara, quedando representado a una escala menor pero proporcional a la imagen de la fotografía (**Fig. 5**).



**Fig. 5.** Situación elegida para el método. El objeto espacial (a) está situado entre el centro de homología (b) y una fotografía con imagen no invertida (c). El objeto espacial 3D queda representado a una escala menor y proporcional a la imagen de la fotografía.

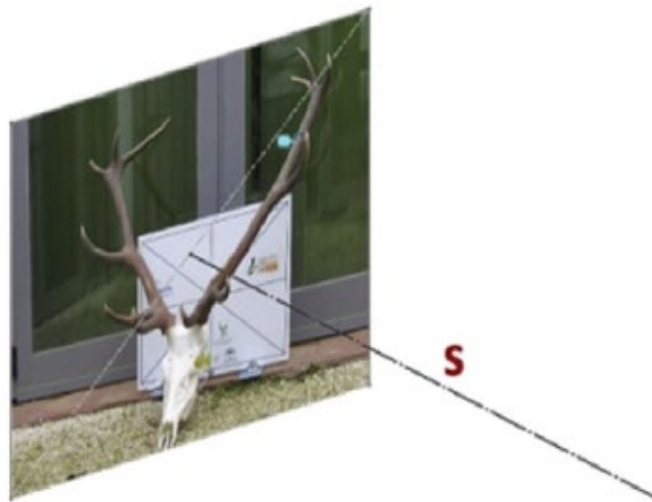
Otro elemento clave es la utilización de una referencia métrica de geometría y dimensiones conocidas, que esté representada en las fotografías. Su función es establecer las posiciones de los elementos intervinientes de la escena fotogramétrica, como la posición de la cámara, y en base a ella, la posición espacial de los puntos de la fotografía (**Fig. 6**).

Para la referencia métrica se utiliza un panel con la representación de un rectángulo, cuyas dimensiones son las de un formato DIN-A2 (594x420 mm), de forma que las cuatro esquinas aparezcan representadas en la fotografía.



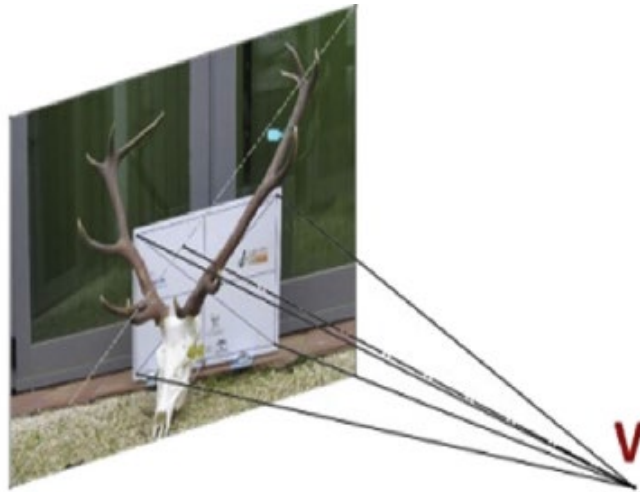
**Fig. 6.** Panel con la representación de la referencia métrica situado detrás de la cuerna (rectángulo de 594x420 mm).

Esos cuatro puntos permitirán establecer la posición exacta del punto de vista (posición de la cámara) de cada fotografía. Para ello, dentro del escenario virtual desarrollado en el software CAD-3D, se traza una línea perpendicular al plano de la fotografía desde su centro (Fig. 7).



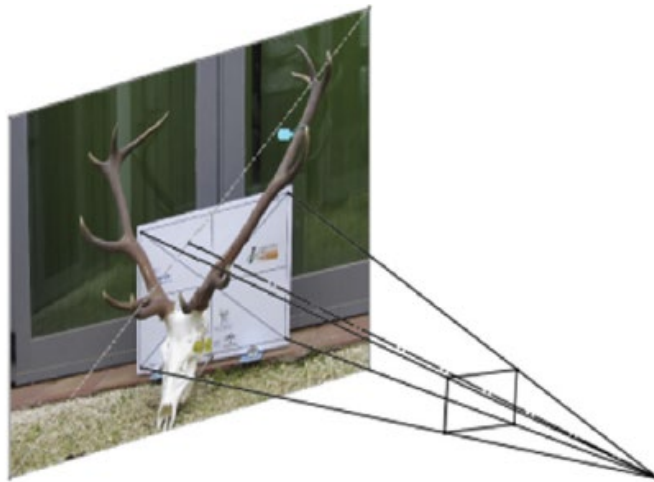
**Fig. 7.** Línea (s) perpendicular al plano de la fotografía.

El extremo de esta línea, será el punto de vista (V), el origen de la radiación (centro de homología). Se construye una pirámide sobre una base poligonal de cuatro lados coincidiendo con el plano de la fotografía. Su eje es la línea (s) y su vértice, el punto (V) buscado (Fig. 8). La pirámide tiene cuatro aristas laterales que se unen en el vértice del eje perpendicular. Las cuatro esquinas de la base de la pirámide coinciden respectivamente con las cuatro esquinas de la referencia métrica representada en la fotografía. La posición del punto de vista de la fotografía o el vértice de la pirámide (V), todavía no ha sido definida ni, por tanto, la altura de la pirámide.



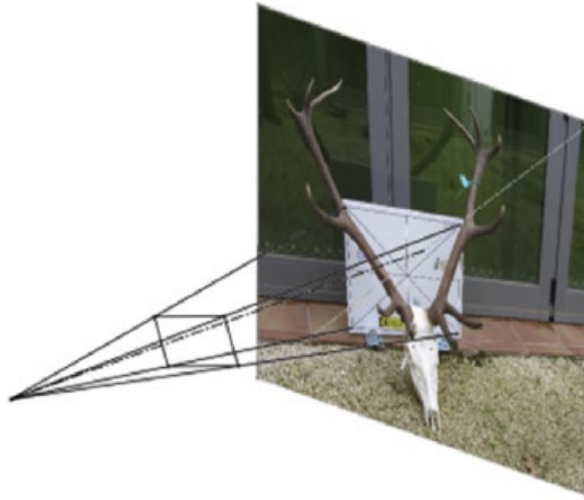
**Fig. 8.** Pirámide espacial para la obtención del centro de homología (V).

Para determinar la posición del origen de radiación es necesario hacer coincidir en las aristas laterales de la pirámide, los vértices de un rectángulo que mida el mismo valor que el de la referencia métrica (594x420 mm). Con ello el sistema CAD, al ser paramétrico variacional, mueve el vértice de la pirámide a lo largo de la línea perpendicular (s) y fija su posición, resolviéndose el problema geométrico. La posición del vértice corresponde a la posición exacta de la cámara sobre la cual fue tomada la fotografía (**Fig. 9**).



**Fig. 9.** Situación de la referencia métrica sobre las aristas laterales de la pirámide.  
Centro de homología de la primera fotografía.

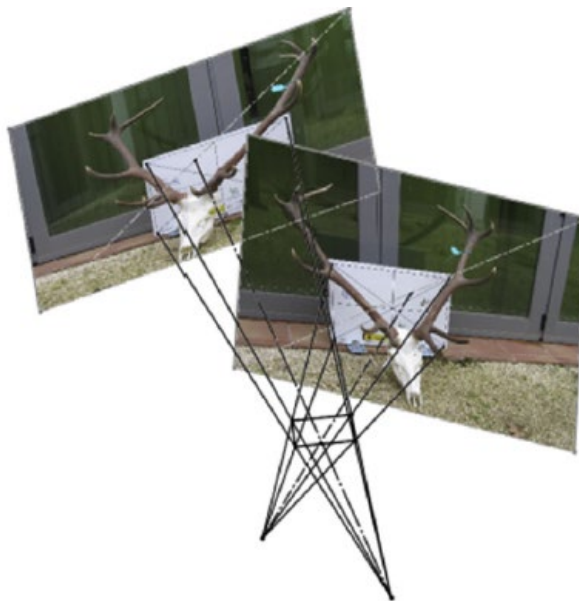
El mismo proceso se repite para la segunda fotografía, creando una nueva pirámide enlazada a la referencia de la fotografía, y obteniendo la posición de la cámara (**Fig. 10**).



**Fig. 10.** Situación de la referencia métrica sobre las aristas laterales de la pirámide.  
Centro de homología de la segunda fotografía.

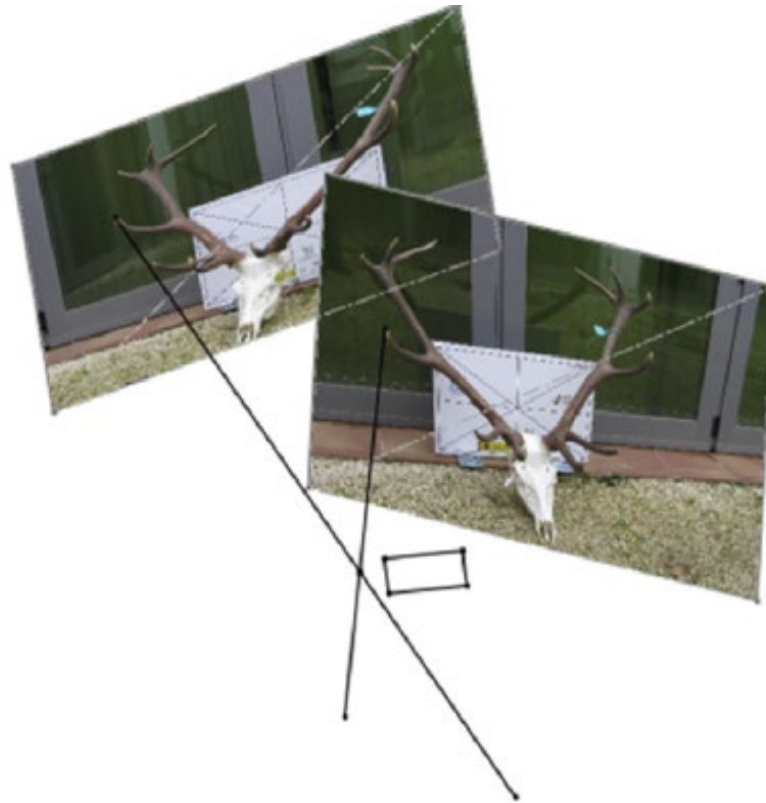
Una vez determinadas las posiciones de las cámaras para las dos fotografías, se crea una escena virtual que contiene las posiciones de los dos puntos de vista con dos haces de rayos proyectivos partiendo desde cada posición de la cámara, pasando a través de la referencia métrica real 3D y terminando en el plano de la fotografía (**Fig. 11**).

La referencia métrica rectangular, es el elemento común a ambos haces en el espacio. Se crea la escena virtual donde se hacen coincidir las referencias métricas 3D de ambas fotografías, que servirá de base para la definición en el espacio de los puntos representados en las fotografías. Por tanto, el sistema formado por dos sistemas proyectivos de trazado de rayos, permite la reconstrucción de los elementos representados en las fotografías.



**Fig. 11.** Creación de la escena virtual. Coincidencia de las referencias métricas espaciales en las dos fotografías.  
Posiciones de la cámara de cada fotografía.

El procedimiento para localizar un punto en el espacio, representado en dos fotografías, consiste en trazar un rayo desde el punto de vista de una fotografía hasta tocar al punto representado en ella. Al repetir esto con la segunda fotografía, haciendo tocar el rayo con el mismo punto representado en ella, se comprueba que el punto espacial donde ambos rayos intersectan, es la posición real espacial del punto representado en ambas fotografías (Fig. 12).

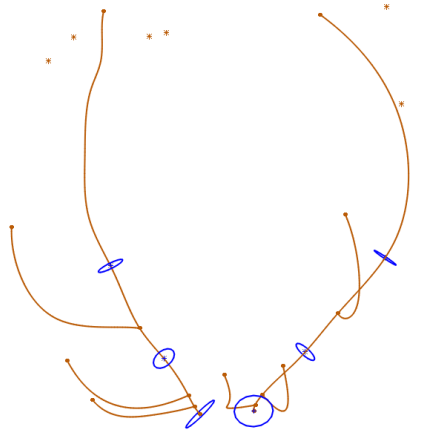


**Fig. 12.** Obtención de la localización espacial de un punto mediante la intersección de rayos del punto representado en ambas fotografías.

Con este procedimiento se podrán restituir en el espacio distancias significativas entre puntos representados en las fotografías y, por otro lado, obtener los perfiles y trayectorias relevantes del elemento para su definición en 3D.

Para el caso de la presente investigación, se aplicará a:

1. La caracterización de la cuerna de cérvidos, (ciervos y gamos) en uno modelo digital en tres dimensiones 3D CAD que representa la estructura axial de ésta, mediante la localización espacial de aquellos puntos relevantes (homólogos) de su estructura geométrica (Fig. 13).



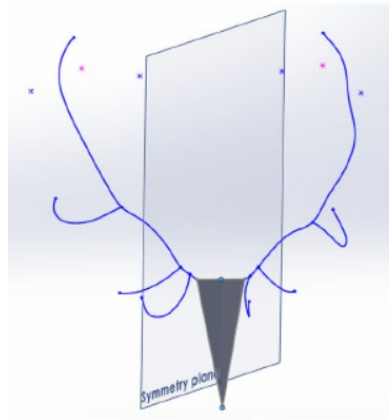
**Fig. 13.** Modelo-3D de 'estructura axial' de la cuerna del ciervo.

2. La medida de distancias relevantes de los elementos de la estructura de las cuernas de cérvidos (ciervos y gamos) para la valoración cinegética de ésta.
3. La obtención de perfiles y trayectorias necesarias para la definición del modelo-3D de la cuerna mediante técnicas de modelado CAD tradicional; este será la base de otros análisis posteriores, como el volumen de la cuerna, la densidad de esta, descripción geométrica, estudios morfométricos, etc (**Fig. 14**).



**Fig. 14.** Modelo-3D de 'volumen' de la cuerna del ciervo.

4. Al estudio de la asimetría de la cuerna, en una primera propuesta metodológica, tomando los puntos extremos de las puntas, como son las luchaderas, las contraluchaderas, los candiles y los centros geométricos de la corona del ciervo. En una segunda metodología se consideran y comparan las desviaciones en las distancias de los elementos de ambas ramas de la cuerna que se utilizan para la valoración de la calidad cinegética (**Fig. 15**).



**Fig. 15.** Datos de partida para el estudio de asimetría.

## 1.2. ESCÁNER-3D DE 'LUZ ESTRUCTURADA'.

Se describe la metodología de obtención del modelo-3D de la cuerna del gamo mediante la tecnología de escáner-3D de luz estructurada. El dato de partida inicial es el modelo físico de la cuerna y el escáner-3D ofrece como resultado un modelo-3D de nube de puntos, de forma que se define en cada uno de ellos, el valor de sus coordenadas espacial ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) y los valores de su textura mediante los valores de color (RGB). Finalmente mediante software de procesamiento de conversión de formatos, el modelo-3D de nube de puntos se convierte a un modelo-3D de superficie formado por su malla, y finalmente éste se convierte, mediante un proceso de segmentación, a un modelo 'sólido' de topología reconocible, en un modelo-3D 'sólido'.

Las ventajas que proporciona un modelo-3D 'sólido' es que sobre él se pueden determinar sus propiedades físicas, realizar secciones transversales, y conseguir medir longitudes de trayectorias de puntos sobre su superficie. Para estudios futuros, se podrán realizar análisis más avanzados, simulaciones mecánicas, de forma que, asignando un material a la cuerna que se adecúe a su material óseo y las solicitaciones de cargas, poder realizar estudios del comportamiento tensional de la cuerna y de morfología geométrica.

La técnica de referencia utilizada para la documentación geométrica de la cuerna de gamo ha sido el 'Escáner de Luz Estructurada'. El equipo de última generación utilizado ha sido el *EinScan Pro 2X* (Fig. 16). Consiste en un escáner de mano, compacto y fácil de usar cuya característica principal radica en su rapidez y precisión, que mejora significativamente la eficiencia durante el escaneado.

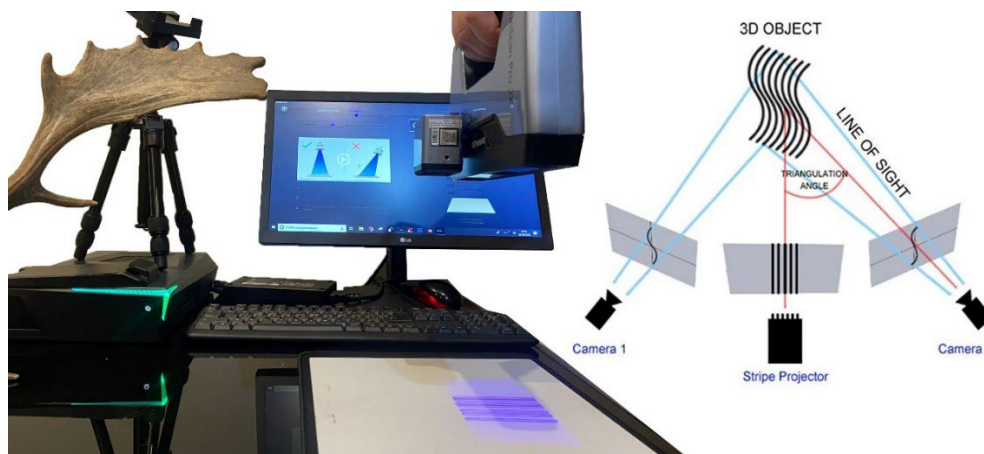
Dada la precisión de esta técnica se propone obtener un modelo tridimensional de referencia y comparar su geometría y volumetría con otros modelos-3D obtenidos por otras tecnologías.



**Fig. 16.** Escáner de *EinScan Pro 2X* en laboratorio sobre trípode, previo a la toma de datos.

El escáner realiza la toma de datos sin contacto y de una manera activa ya que incide una radiación inocua sobre el objeto de estudio. El escáner utilizado es de corto alcance debido a que necesita estar cerca de la superficie de escaneado entre 0,5 y 1 m. de distancia y cuenta con tres elementos claramente diferenciados: un proyector, varias cámaras geométricas y otra de texturas.

La técnica del escáner consiste en la obtención del modelo-3D mediante el principio de triangulación basado en la medición mediante luz estructurada. El escáner-3D captura directamente la información geométrica tridimensional del objeto de estudio mediante sensores que se basan en luces artificiales con proyección de patrones y luz codificada (Rioux *et al.* 1987; Besl 1988). Este principio consiste en proyectar un patrón de luz bidimensional como una cuadrícula en la superficie de la cuerna del gamo (Fig.17). A continuación, sus sensores analizan la deformación del patrón producida por la geometría del objeto y una cámara capta la citada forma y calcula la distancia.



**Fig. 17.** Escáner de luz estructurada y esquema correspondiente a su principio de funcionamiento.

El proceso comienza con la calibración del equipo antes de la toma de datos, la obtención en un primer paso de una nube de puntos para definir posteriormente una “malla” de superficie texturizada que finalizará con la obtención de un modelo-3D virtual ‘sólido (Remondino y El-Hakim 2006).

Tanto la toma de datos como el posterior proceso de edición se realizan en gabinete en varios procesos, utilizando el mismo software *EinScan Pro-3.7.3.0*.

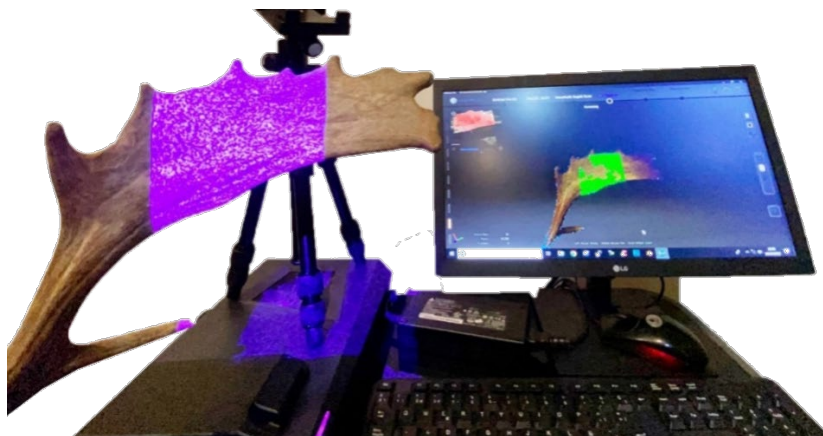
Los pasos realizados se presentan a continuación:

- 1- Calibrado (Calibración geométrica, HD, White Balance).
- 2- Configuración del modo de escaneado.
- 3- Captura de datos.
- 4- Limpiado, optimizado y cerrado de malla.

Fase-1: El proceso de calibración es semiautomático y se basa en regular la precisión geométrica del escáner y de los parámetros de luz para la obtención fiable de la geometría del modelo-3D y del color real de este. Para ello se utilizan paneles con patrones de geometría conocida.

Fase-2: El escáner cuenta con varios modos de escaneo de forma que se aplique cada uno de ellos a la geometría y el tamaño del objeto a reproducir. En nuestro caso, se ha decidido realizar el escaneo en ‘modo rápido a mano’ ya que las características geométricas de la cuerna permiten una fácil alineación entre las varias capturas realizadas, se forma que se garantice así el correcto digitalizado 3D de la cuerna.

Fase-3: Captura de datos: El escáner se ha de mover con cuidado y lentamente alrededor de la cuerna hasta cubrir toda su superficie ya que la alineación es semi-automática entre las superficies capturadas; hubo pérdidas en la alineación asociada a movimientos bruscos y al no mantener la distancia adecuada a la superficie de la cuerna. Para corregir estos problemas, la visualización simultánea en pantalla de los resultados durante la captura de datos facilita el escaneado haciéndolo más rápido y eficiente (Fig. 18).



**Fig. 18.** Patrón de luz estructurada sobre la cuerna del gamo y visualizada en la interfaz del software.

El equipo utilizado destaca por su alta precisión en el ‘modo de trabajo manual’, opción elegida para nuestro caso, consiguiendo una precisión sub-milimétrica de 0.05 mm. En cuanto a la resolución de los datos obtenidos para el modelo-3D se han obtenido distancias entre puntos de 0,25 mm obteniendo como resultado una malla en bruto de 7.254.322 triángulos. Esta configuración ha permitido la obtención de detalles finos destacando cierto relieve en la superficie de la cuerna.

En relación a la textura de la cuerna, se ha decidido obtenerla ya que puede ser de gran ayuda para identificar puntos fácilmente reconocibles por el pigmento que posee la cuerna objeto de estudio.

Fase-4: Limpiado, optimizado y cerrado de malla: Obtenida la representación tridimensional de la cuerna en una primera malla en bruto, se realizan procesos posteriores de edición que consisten en el optimizado de la malla (**Fig. 19**) y a procesos de limpieza y de relleno de agujeros de forma que se consiga un modelo-3D continuo y cerrado, así como su texturizado. El optimizado de malla ha reducido el número de triángulos en 6.134.900 (**Fig. 20**).



**Fig. 19.** Optimización de la malla: limpieza y relleno de agujeros.



**Fig. 20.** Nivel de detalle del modelo-3D optimizado y cerrado de la cuerna con y sin textura.

Finalmente, el modelo-3D optimizado (**Fig. 21**) se exporta a un formato de archivo (STL, OBJ, PLY, ASC, 3MF y P3), de forma que facilite la operatividad con otros softwares CAD.



**Fig. 21.** Modelo-3D final obtenido después de aplicar los procesos de optimizado.

### 1.3. FOTOGRAMETRÍA MULTI-IMAGEN SfM (*STRUCTURE FROM MOTION*)

Dentro del estudio del análisis métrico y volumétrico de las cuernas de gamo, se hace necesario poder comparar resultados obtenidos con distintas tecnologías, siendo relevante disponer de un método contrastado que sirva de referencia. Una de ellas es la fotogrametría-3D *SfM* (*Structure from Motion*) que permite la obtención de mallas precisas de objetos de la realidad a partir de fotografías obtenidas con cámaras convencionales (no métricas). Esto permitirá obtener características métricas de los objetos fotografiados, en este caso las cuernas de gamo.

El objetivo es obtener una malla precisa geoméricamente de la cuerna del gamo que permita posteriormente el estudio del volumen. Es relevante determinar el grado de precisión que se obtenga con esta técnica a efectos de considerar sus resultados como de referencia; para ello se consideran valores métricos entre puntos de alguna zona relevante del objeto y éstas se incluirán en el procesado posterior como dato restrictivo, de forma que, el software proporcione valores de error.

En la implementación de esta técnica, en cuanto a la toma de datos y en las tareas del proceso, conviene tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Iluminación:** la luz que predomine en la escena es algo fundamental ya que marca claramente las condiciones de las tomas de cámara. Se considera necesario no usar luz artificial, sobre todo no hacer las tomas con flash. Es mejor considerar una luz homogénea que no produzca sombras acentuadas y que no marque diferencias importantes en las zonas iluminadas sobre las que no lo están. En el caso planteado de definición de la cuerna del gamo no existen problemas de brillos

sobre el objeto dada su naturaleza, pero en caso de que se puedan aparecer, se intenta evitarlos o atenuarlos.

- La cámara: Dada su importancia, es recomendable una cámara réflex, a ser posible con un objetivo fijo, ya que se considera necesario no modificar la distancia focal durante las tomas de las fotografías. Este tipo de cámara, aparte de la calidad ofrecida, destaca por la posibilidad de manejo en modo manual donde se permiten configurar distintos parámetros como, la velocidad del obturador, la sensibilidad, la apertura del diafragma, etc., que van a incidir en la calidad de la imagen y, por tanto, en la precisión del objeto tridimensional que se obtenga.

- La escena o lugar de toma: Es relevante elegir el lugar adecuado para la toma de fotografías. Es adecuado un lugar en un entorno exterior para tener luz natural, con un día nublado preferiblemente o a una hora del día donde el sol no incida directamente sobre el objeto analizado. La escena se prepara de manera que el soporte que sujete el objeto de estudio no introduzca ruido en el objeto, evitando tediosas tareas posteriores de edición de la malla.

En base a los condicionantes expuestos, se usó una cámara réflex de la marca *Olympus*, con un objetivo de focal variable 28-80, manteniéndolo durante toda la exposición en 35 mm. Las fotografías se realizaron en una terraza no expuesta al sol, y el objeto estudiado se colocó sobre una peana traslúcida (**Fig. 22**).



**Fig. 22.** Situación del objeto.

Otro aspecto importante en el proceso de la toma de fotografías es asegurarnos que éstas cubren totalmente el objeto que se desea estudiar, cuidando que entre imágenes sucesivas se produzca un solapamiento de al menos un 60%. En el caso estudiado se tomaron 32 fotografías distribuidas en un barrido circular de dos vueltas manteniendo una distancia constante alrededor del objeto, según se aprecia en la imagen (**Fig. 23**).

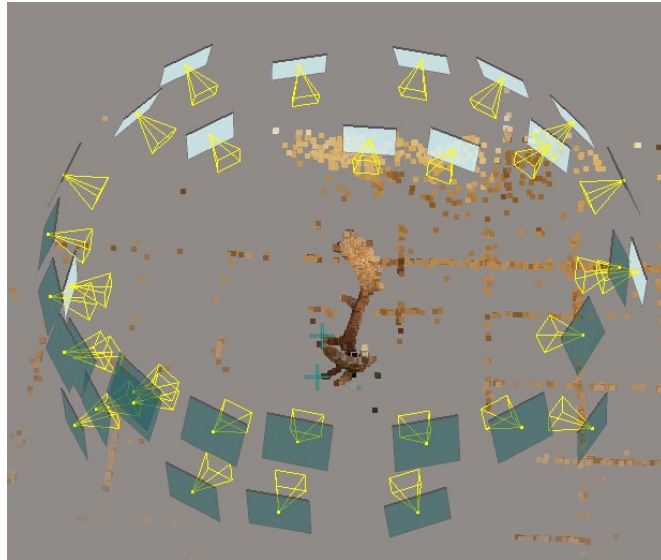


Fig. 23. Distribución espacial del barrido de fotografías sobre el objeto.

Una vez realizadas las tomas, comenzamos el procesado de las mismas con el software de *Bentley ContextCapture*. Las tareas que realiza éste son:

- Identificación del bloque de fotografías y parámetros de la cámara.
- Identificación de puntos de control y restricciones métricas.
- Aerotriangulación.
- Reconstrucción del modelo.
- Visualización.



Fig. 24. Fases del modelado.

En la primera fase se incorporan las fotografías al software y este se encarga de reconocer las propiedades de la cámara con la que se han realizado, permitiendo identificar, dentro del registro de su base de datos de modelos de cámaras, algunos parámetros necesarios para la siguiente fase (Fig. 25).

Name:	OLYMPUS IMAGING CORP. E-500								
Model type:	Perspective								
Image dimensions:	3264x2448 pixels								
Sensor size:	17.3 mm								
Number of photos:	32								
<b>Calibration Results</b>									
	Focal Length [mm]	Focal Length Equivalent 35 mm [mm]	Principal Point X [pixels]	Principal Point Y [pixels]	K1	K2	K3	P1	P2
Previous Values	25.00	52.02							
Optimized Values	23.96	49.86	1639.45	1209.21	-0.1378	0.1192	-0.0983	0	0
Difference Previous / Optimized	-1.04	-2.16							

Fig. 25. Resultados calibración de la cámara.

A continuación, se procede a identificar algunos puntos del objeto en los cuales se conoce con precisión la distancia geométrica entre ellos. En el caso analizado se han marcado los extremos de las puntas luchaderas (Fig. 26).

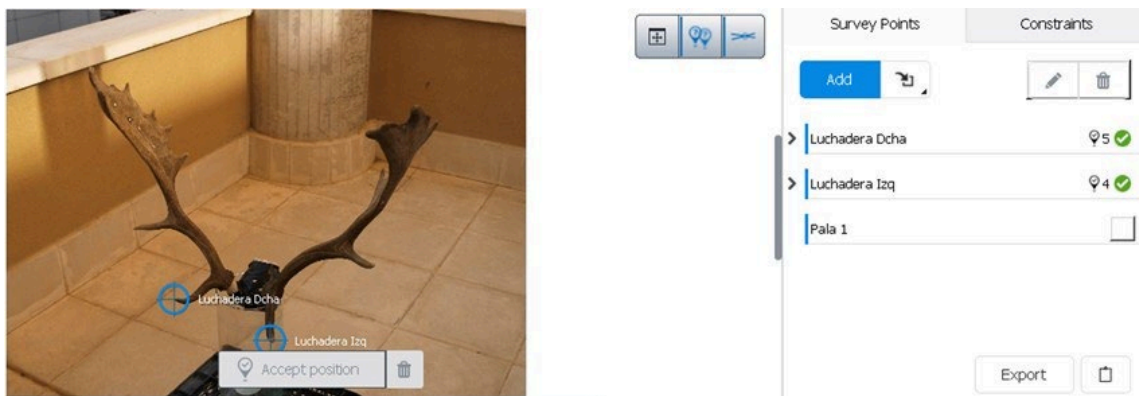


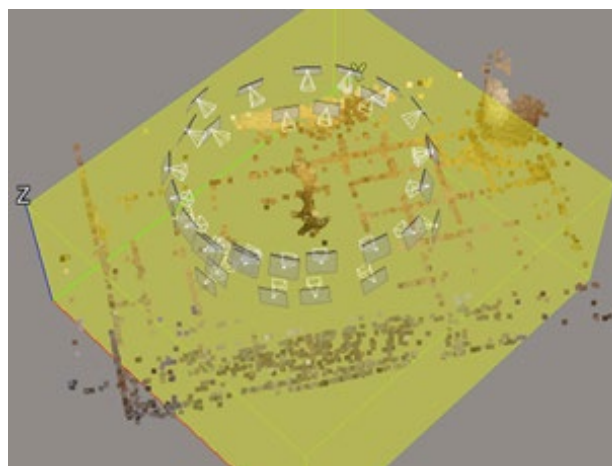
Fig. 26. Identificación de puntos conocidos.

Este proceso, denominado ‘constricción de escala’ (Fig. 27), define condiciones impuestas sobre puntos representativos de la cuerna, antes de realizar la ‘aerotriangulación’, con el objetivo de adecuar el escalado del modelo-3D resultante a su tamaño real.

**Fig. 27.** Restricciones métricas.

La fase de *'aerotriangulación'* consiste básicamente en un proceso automático de reconocimiento de miles de puntos en fotos comunes. Esto permite la obtención necesaria de los parámetros de deformación de la cámara utilizada y, por tanto, la obtención de las posiciones espaciales de los puntos con precisión. Seguidamente en la siguiente fase, el software se encarga de reconstruir espacialmente el objeto, triangulando la malla espacial con todos los puntos procesados y asignando las texturas sobre las caras de las mallas.

Antes de llevar a cabo la reconstrucción del modelo conviene concretar qué elementos espaciales se desean obtener exactamente ya que en las imágenes también aparece mucho ruido; elementos espaciales que están representados en el entorno de la imagen y que no interesan, de forma que se eviten posteriormente tediosos procesos de edición y limpieza. Para ello, el software dispone de una herramienta, denominada *'Bounding Box'* (Fig. 28), consistente en una caja modificable en la que se permiten seleccionar o desechar los elementos espaciales del entorno a reconstruir.



**Fig. 28.** Bounding box.

Finalmente, una vez reconstruido el objeto se puede visualizar el resultado del modelo-3D obtenido (Fig. 29). Éste se va a representar el dato de entrada en los análisis biológicos que se realicen posteriormente.



Fig. 29. Modelo-3D obtenido.

#### 1.4. MODELADO CAD A PARTIR DE LA ESTRUCTURA AXIAL DE LA CUERNA (BI-FOTO-CAD)

Inicialmente se define la estructura o esqueleto de la cuerna, un modelo-3D 'axial' obtenido mediante el método de restitución fotogramétrica a partir de dos fotografías (Rubio-Paramio *et al.* 2016). Éste representa la fibra central o el eje de la vara central y de las puntas principales. Dicha estructura espacial pasa por puntos característicos de la geometría de la cuerna, llamados homólogos (landmarks), como son el punto de inicio de la vara central con la roseta, los puntos de inicio de las puntas principales, luchadera y candil con la vara central, los puntos centrales y extremos de las puntas centrales, el punto de inicio de la pala, los puntos de la vara central localizados entre las puntas principales y el arranque de la pala, el punto central de la pala, y el punto superior de la escotadura más alta de la pala.

Una vez conseguida toda la estructura del esqueleto de la cuerna, se aplican las herramientas propias de un software CAD de modelado en 3D (*SolidWorks*) para la obtención del modelo-3D CAD.

Básicamente se obtienen volúmenes sólidos de la "vara central", de las "puntas principales" y de la "pala", a través de la definición previa de contornos que reproducen las secciones transversales en diferentes localizaciones relevantes de la cuerna. El comando del software *SolidWorks*

“recubrir” es el utilizado para obtener el volumen a partir de las diferentes secciones transversales consideradas.

La definición 3D de las “puntas laterales” de la pala, se realiza con superficies, a través de la definición de la forma de los perfiles laterales y de las secciones transversales, inferior y superior.

Con esos cuatro perfiles, se forma una superficie cerrada, que posteriormente se convierte en sólido y se une al volumen previo del sólido de la ‘pala’. El comando del software *SolidWorks* “superficie limitante” es el utilizado para obtener las superficies de las ‘puntas laterales’ de la pala.

Para la obtención del modelo-3D de la cuerna del gamo, se modelan por separado cada una de las diferentes partes de la cuerna (Fig. 30), (Fig. 31): ‘vara central’ y ‘pala’, puntas principales: ‘luchadera’ y ‘candil’. Enlace de uniones”, ‘roseta’ y ‘puntas laterales de la pala’.

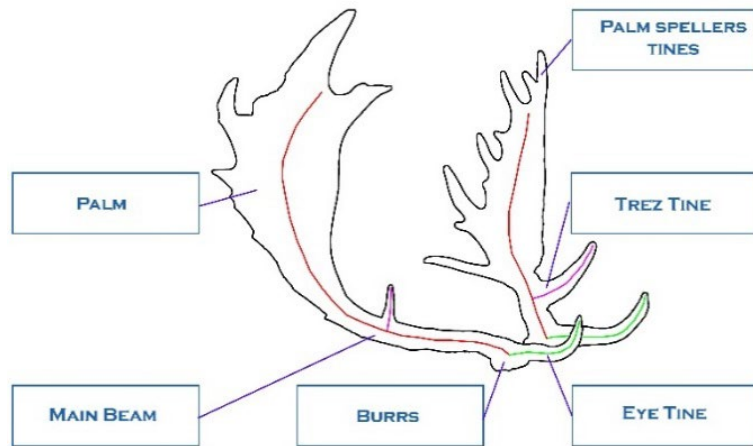


Fig. 30. Partes principales de la cuerna.

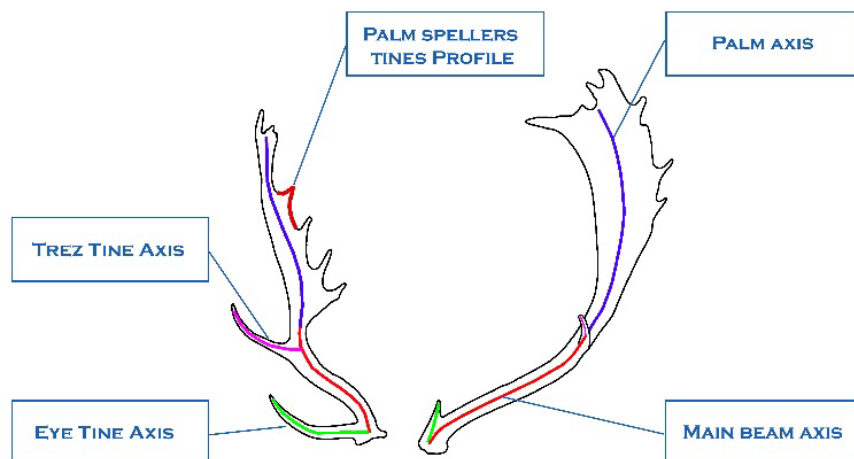
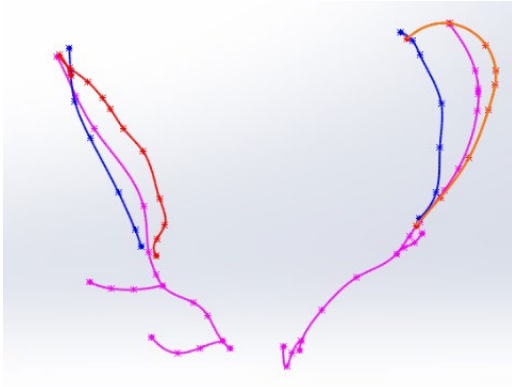


Fig. 31. Fibras medias de la cuerna.

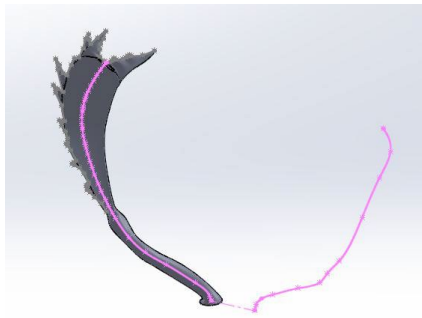
El proceso de modelado, se describe en las figuras (Figs. 32-43).



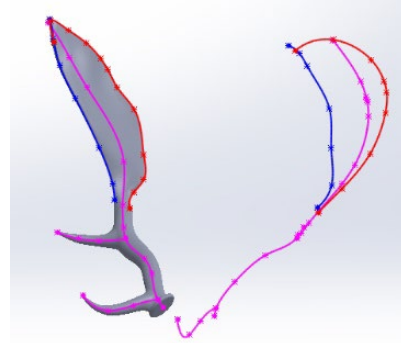
**Fig. 32.** Estructura de la cuerna.



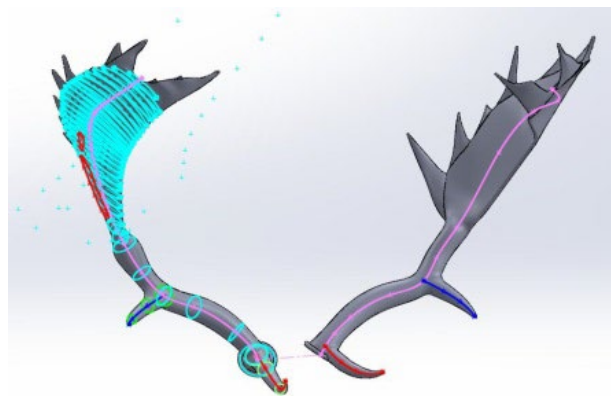
**Fig. 33.** Estructura y perímetros de la cuerna.



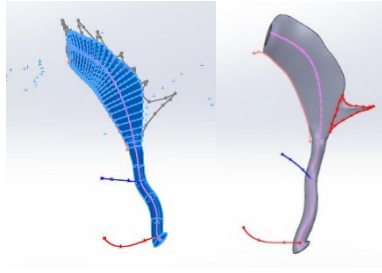
**Fig. 34.** Eje central de la vara y de la pala.



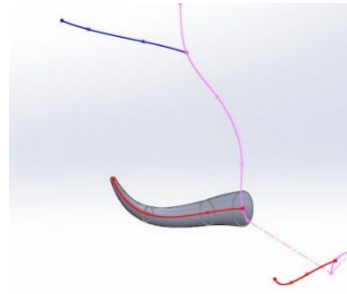
**Fig. 35.** Curvas extremas del contorno de la pala.



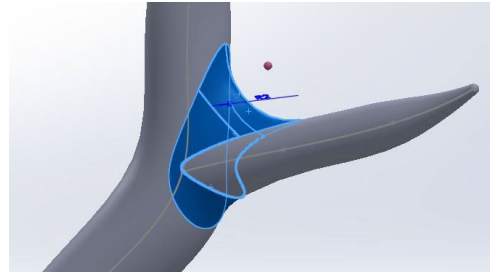
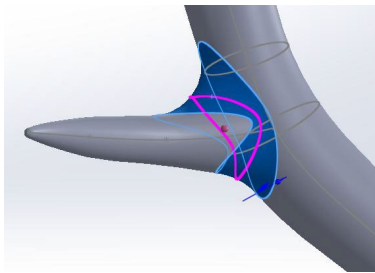
**Fig. 36.** Secciones transversales de la estructura de la pala.



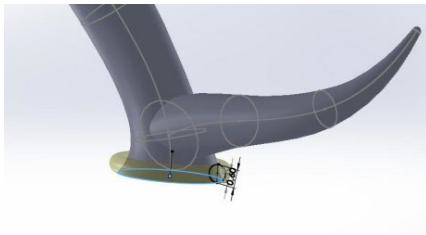
**Fig. 37.** Modelo-3D de la vara central y de la pala.



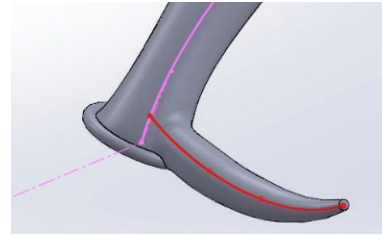
**Fig. 38.** Estructura y modelo-3D de la punta luchadera.



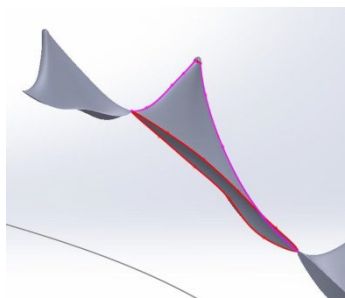
**Fig. 39.** Enlace de las puntas principales con la vara central.



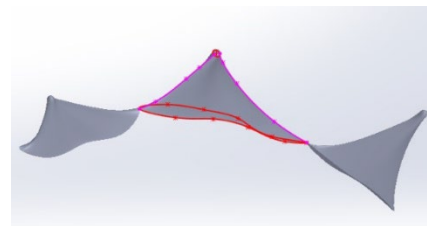
**Fig. 40.** Estructura de la roseta.



**Fig. 41.** Modelo-3D de la roseta.



**Fig. 42.** Estructura de la punta lateral.



**Fig. 43.** Modelo-3D de la punta lateral.

El resultado final, formado por el modelado de cada una de las partes de la cuerna, se muestra en la figura junto con el modelo físico real (**Fig. 44**).

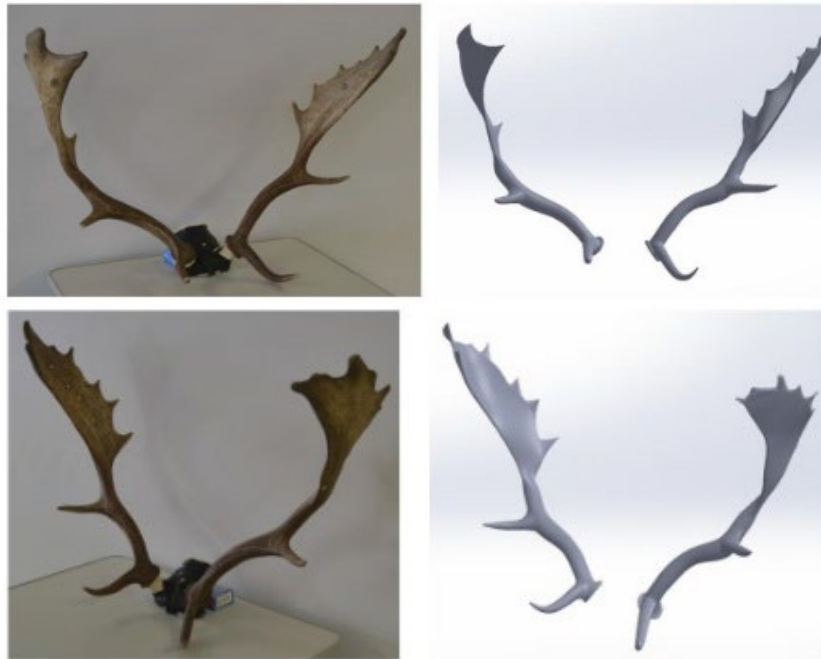


Fig. 44. Modelo-3D de la cuerna.

## 2. APLICACIONES BIOLÓGICAS

Una vez descritas las diferentes metodologías que caracterizan la cuerna en un modelo-3D digital, se describen diferentes tipologías de análisis, aplicaciones biológicas, en las cuales se implementa como entrada dicho modelo-3D.

### 2.1. VALORACIÓN DE LA CALIDAD CINEGÉTICA

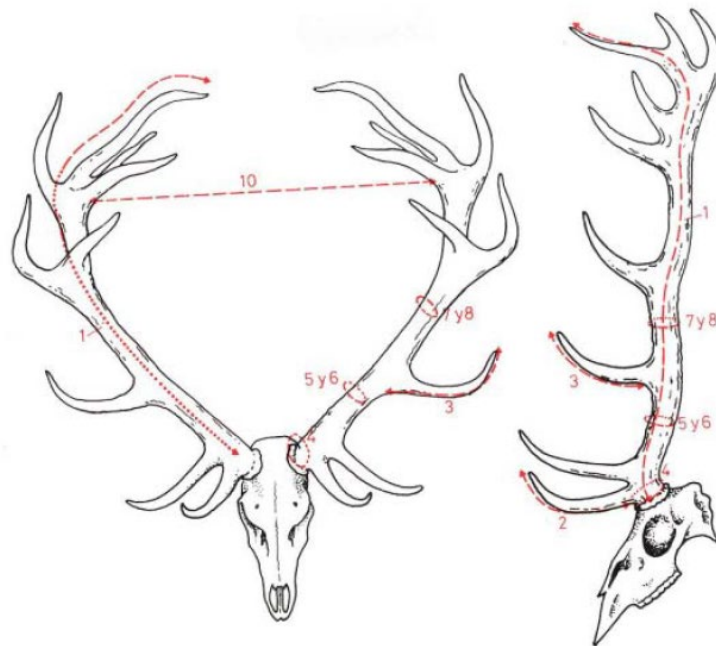
Una vez caracterizada la cuerna digitalmente de forma precisa mediante su estructura axial a partir de la restitución fotogramétrica, se utiliza dicho dato de partida en aplicaciones biológicas. Una de ellas consiste en estimar el grado de calidad cinegética de acuerdo a la puntuación obtenida según se indica en el *'Manual de homologación de Trofeos de caza mayor en España'* (Llanes-Borrero 2013).

En dicho manual, para cada especie animal estudiada, se establece un baremo con una serie de ítems, donde se asigna una puntuación, en función de su longitud, para cada uno de los elementos geométricos cuantificables de la cuerna y de otras características más subjetivas, de forma que, la suma de todos los ítems cuantificados defina el grado de calidad cinegética mediante una puntuación final. El manual establece unas puntuaciones mínimas para obtener la calificación de trofeo; en tres niveles de medalla: para el ciervo, se obtiene oro si se superan 181 puntos, plata con 173 puntos y bronce con 165 puntos; para el gamo, se obtiene oro si se superan 180 puntos, plata con 170 puntos y bronce con 160 puntos.

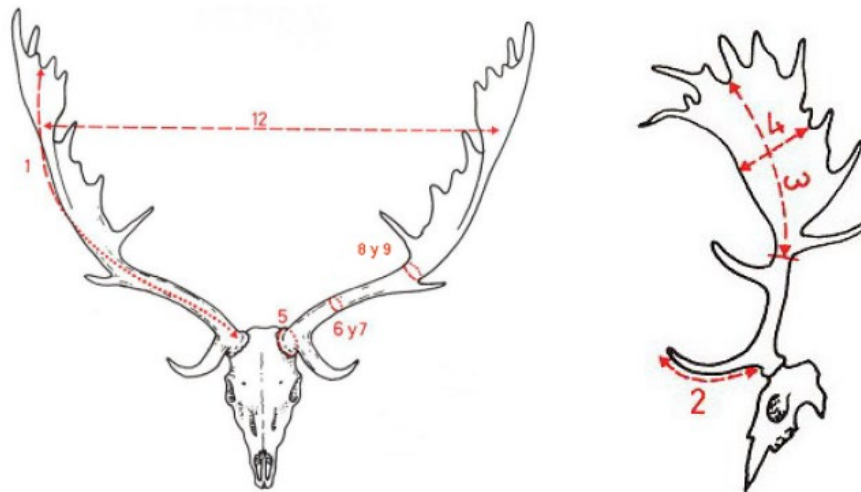
La valoración cinegética va a consistir en evaluar básicamente el tamaño y el grado de desarrollo geométrico de la cuerna en base a una puntuación obtenida.

En nuestro caso para el estudio de la cuerna del ciervo y del gamo, representada por su modelo-3D digital, se van a considerar aquellas partes de la estructura de la cuerna que sean cuantificables métricamente, sin considerar otras características de valoración subjetiva.

- Para el ciervo se van a considerar las longitudes de la ‘vara central’, las de las puntas principales, ‘luchaderas’ y ‘candiles’ y la envergadura o máxima separación interna entre las dos ramas de la cuerna. También se consideran los perímetros de las ‘rosetas’ y de dos secciones transversales situadas entre las puntas principales y la ‘corona’.
- Para el gamo, se van a considerar las longitudes de la ‘vara central’, la de la punta principal ‘luchadera’, la longitud y el ancho de la ‘pala’ y la envergadura o máxima separación interna entre las dos ramas de la cuerna. Los perímetros considerados corresponden a las ‘rosetas’ y de dos secciones transversales situadas entre las puntas principales y la ‘pala’ (Figs. 45-46).

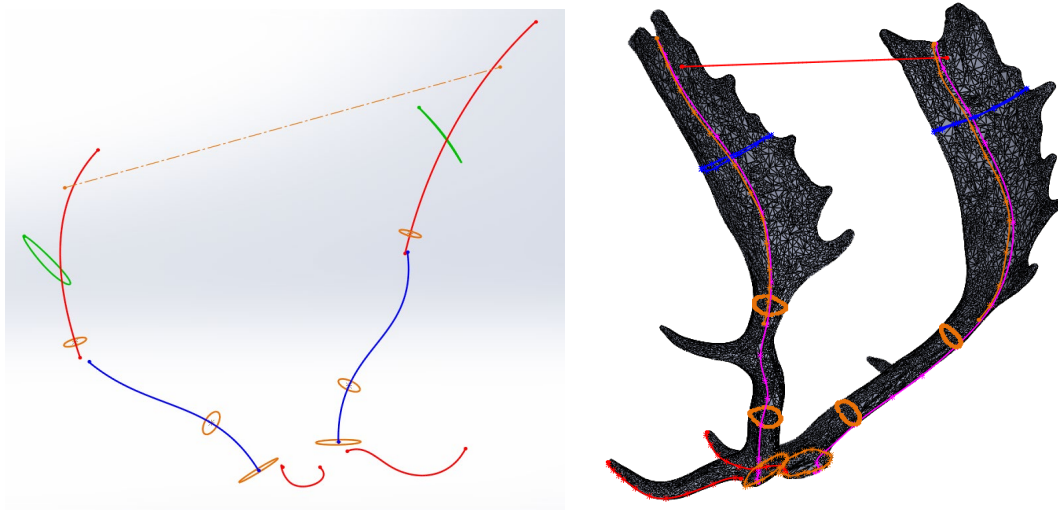


**Fig. 45.** Elementos geométricos de la estructura de la cuerna del ciervo, tenidos en cuenta para la valoración cinegética: (1) Vara central. (2) Punta Luchadera. (3) Punta central o Candil. (4) Roseta. (5-6) (7-8) Perímetros secciones transversales. (10) Envergadura.



**Fig. 46.** Elementos geométricos de la estructura de la cuerna del gamo, tenidos en cuenta para la valoración cinegética: (1) Vara central. (2) Luchadera. (3) Longitud Pala. (4) Ancho Pala. (5) Roseta. (6-7) (8-9) Perímetros secciones transversales. (12) Envergadura.

Dichas mediciones se van a realizar en diferentes muestras de ciervos y gamos utilizando como dato de entrada tanto del modelo real como el modelo-3D CAD que caracteriza la estructura axial de la cuerna (Fig. 47).



**Fig. 47.** Caracterización digital en modelo-3D de la cuerna del gamo: versiones de 'estructura axial' y de modelo-3D 'sólido'. Elementos geométricos de la cuerna considerados para la valoración de la calidad cinegética.

En todos los casos los resultados de las mediciones realizadas sobre el modelo-3D se comparan con los obtenidos sobre el modelo real de la cuerna o sobre la caracterización de la cuerna definida por otras tecnologías. El grado de aproximación de dichos resultados define la precisión geométrica, permitiendo validar el modelo-3D como dato de partida para su implementación en aplicaciones biológicas.

Se realizan tres estudios de valoración cinegética en varias muestras de ejemplares, ciervos (*Cervus elaphus hispanicus*) y gamos (*Dama dama*) abatidos en jornadas de montería en diferentes cotos de caza de Sierra Morena en la localidad de Andújar (Andalucía, España):

- Estudio-1: Sobre muestras de 29 cuernas de ciervos, representadas por sus trofeos, procedentes de sesiones de homologación oficial como trofeos de caza mayor abatidos entre 2014 y 2015 ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)).
- Estudio-2: Sobre varias muestras de 48 cuernas de ciervo procedentes de jornadas de montería y de trofeos de sesiones de homologación oficial, abatidos entre los años 2014 y 2019 ([Montalvo-Gil et al. 2022, 2024a](#)).
- Estudio-3: Sobre una muestra de 15 trofeos de cuernas gamo procedentes de talleres de taxidermia, abatidos en 2018 ([Montalvo-Gil et al. 2024b](#)).

- En el **estudio-1**, se utilizaron las mediciones de valoración cinegética de los 29 trofeos para validar la precisión del modelo-3D de estructura axial de la cuerna obtenido mediante la restitución fotogramétrica de los puntos de la cuerna representados en dos fotografías.

No se establece, en este caso, una puntuación final en la valoración del grado de calidad cinegética para cada cuernas, donde son tenidos en cuenta todos los ítems establecidos en el baremo de valoración, sin considerar aquellos de valoración subjetiva, sino que se realizan las mediciones en aquellas partes concretas de la cuerna medibles y cuantificables; esto se realiza sobre el modelo real de la cuerna, sobre el modelo-3D 'axial' y sobre el modelo-3D CAD digital definido por las coordenadas de puntos obtenidos aportados por la máquina de captación de coordenadas de puntos CMA (*Coordinate Measurement Arm*).

Sobre el total de 29 trofeos, en una primera muestra de 14 trofeos se midieron las cuernas mediante tres métodos: sobre el modelo-3D 'axial', sobre el modelo real con cinta métrica, y sobre el modelo-3D obtenido por la máquina CMA. En la segunda muestra de 15 trofeos se midieron las cuernas sobre el modelo-3D 'axial' y sobre el modelo físico.

- En el **estudio-2**, sobre diferentes muestras de 48 ejemplares de ciervo; se conocen en este caso la puntuación final establecida en la valoración de la calidad cinegética, habiéndose aplicado, por tanto, todos los ítems establecidos en el baremo, aquellos cuantificables y aquellos no cuantificables o de valoración subjetiva. Sobre el modelo real se cuantifican los elementos más significativos de la estructura geométrica de la cuerna y de aquellos de valoración subjetiva, como el color de la cuerna, el nivel de perlado de las 'rosetas', el número de puntas total y de la 'corona' y el peso de la cuerna. Estos datos se toman de las fichas de valoración establecidas por personal oficial en los procesos de homologación de trofeos de caza mayor.

El valor que se establezcan para los ítems de valoración subjetiva en la cuerna real, serán los mismos que se asignen sobre el modelo-3D digital para determinar la puntuación final de calidad cinegética.

- El **estudio-3**, se realiza sobre una muestra de 15 trofeos de gamo.

Al poderse caracterizar la cuerna del gamo por dos modelos-3D digitales: uno que represente su estructura axial y otro mediante un modelo-3D 'sólido' que representa su geometría, la cuantificación de la calidad cinegética se puede realizar utilizando como dato de entrada cualquiera de los dos modelos-3D.

En base a que los resultados de la valoración obtenida son muy similares, la metodología más práctica a implementar es utilizar el modelo-3D 'axial' que representa la estructura axial de la cuerna, ya que su definición es más rápida y sencilla; el modelo-3D 'sólido' se obtiene partiendo de la estructura alámbrica de la cuerna, obtenida por restitución fotogramétrica, y posteriormente, a partir de dichos perfiles, aplicar las técnicas de modelado tradicional CAD, barridos, recubrimientos, etc. para su definición.

La 'valoración cinegética' del ejemplar analizado se realiza analizando el grado de desarrollo geométrico de su cuerna; en función de su buen grado de salud y de las condiciones ambientales en las que se haya desarrollado el ejemplar, estará relacionado con el mayor desarrollo de su cuerna.

La valoración cinegética de la cuerna del gamo, realizada con procedimientos digitales, requiere de la caracterización de esta, en su totalidad o en su estructura, de forma tridimensional.

Se presentan a continuación los **dos métodos** para caracterizar espacialmente la **cuerna del gamo**, para posteriormente utilizar como dato de entrada para realizar el análisis de la cuantificación de la 'calidad cinegética'.

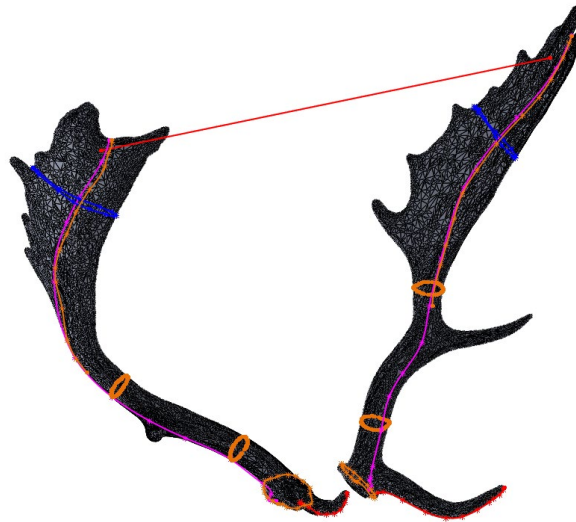
### 2.1.1. SOBRE EL MODELO-3D 'SÓLIDO'

Obtener un modelo-3D 'sólido' 'ad hoc' como dato de partida para realizar sobre él la valoración cinegética de la cuerna, no es la metodología más eficiente por la cantidad de recursos de tiempo, costo monetario y condiciones controladas que se precisan para su obtención.

Al igual que en el caso anterior, se han considerado para la valoración aquellos ítems cuantificables, directamente extraíbles de modelo-3D, como son los valores de las longitudes y de los perímetros de aquellas partes de la geometría de cuerna anteriormente indicados.

En la (Figs. 48-49) se indican sobre el modelo-3D de malla las trayectorias y perímetros consideradas.

Las mediciones de la valoración se realizan sobre el modelo-3D 'sólido' y sobre el modelo real de la cuerna.



**Fig. 48.** Elementos de la cuerna considerados para la valoración cinegética sobre el 'modelo-3D sólido'.

Obtenido el modelo-3D preciso, ya sea por 'escáner-3D' o por 'fotogrametría SfM', se podrán tomar sobre el modelo-3D de malla, con cualquier software CAD, aquellas trayectorias, longitudes y perímetros sobre la superficie externa de aquellas partes de la cuerna que permitan cuantificar. Posteriormente se cuantifican métricamente dichos elementos geométricos considerados, y en base a un baremo de puntuación (Llanes-Borrero 2013), se cuantifica la calidad cinegética de la cuerna analizada mediante la puntuación final obtenida.

Es importante considerar que, con este procedimiento, que parte del dato de la cuerna caracterizado digitalmente, ya sea en su totalidad mediante un modelo-3D o mediante su estructura, se obtienen la información más relevante necesaria para la valoración de la 'calidad cinegética', como son los valores de las longitudes y de los perímetros de aquellas partes de la geometría de cuerna. Para obtener la puntuación final de la 'valoración cinegética', según se indica en (Llanes-Borrero 2013), habría que completar la información geométrica anterior con el resto de ítems del baremo oficial que corresponde a la parte no geométrica de la cuerna o que no sea cuantificable métricamente, como el color, el número de puntas de las palas y el peso.





**Fig. 49.** Trayectorias y perímetros consideradas sobre la superficie de la estructura de la cuerna para la valoración cinegética.

Sobre los resultados obtenidos al realizar mediciones en elementos geométricos de la cuerna del gamo utilizando dos metodologías, una primera realizada sobre las superficies del modelo digital de una cuerna de gamo caracterizado por un ‘modelo-3D sólido’, y una segunda midiendo con cinta métrica sobre el mismo modelo real de la cuerna, realizada por personal oficial; todo ello siguiendo las directrices que se indican en el baremo oficial, en los diferentes ítems, descritos en el manual de valoración de la calidad cinegética como trofeos de caza mayor en España ([LLanes-Borrero 2013](#)).

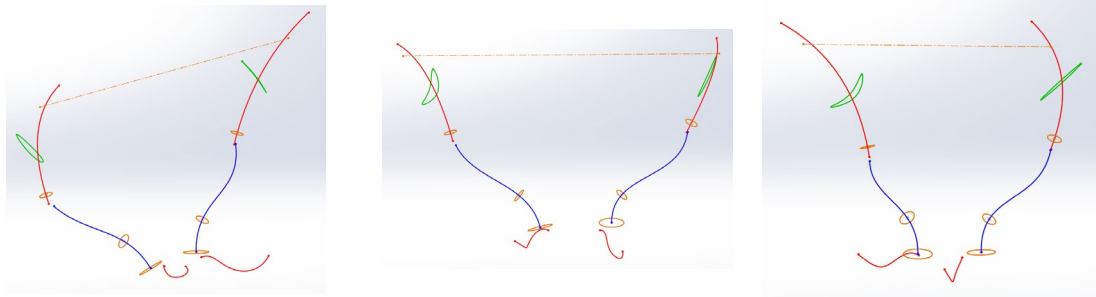
- Los resultados obtenidos sobre el modelo-3D van a poner de manifiesto la convergencia con aquellos realizados con cinta métrica sobre el modelo físico, poniendo de manifiesto la precisión del método Bi-Foto-CAD que caracteriza la cuerna utilizando dos fotografías ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)).
- Queda demostrada la fiabilidad del modelo-3D y la del proceso de medir trayectorias y longitudes sobre la superficie de este para realizar la valoración cinegética, pero no es un procedimiento práctico por el tiempo y las condiciones tan controladas que supone que supone la obtención del modelo-3D.

Por tanto, el procedimiento más eficiente para la valoración cinegética de la cuerna del gamo es aplicar el método Bi-Foto-CAD para obtener de forma relativamente rápida la estructura axial espacial de aquellas partes de la cuerna necesarias para ser medidas y obtener finalmente la puntuación que cuantifique su calidad cinegética.

### **2.1.2. SOBRE EL MODELO-3D ‘AXIAL’**

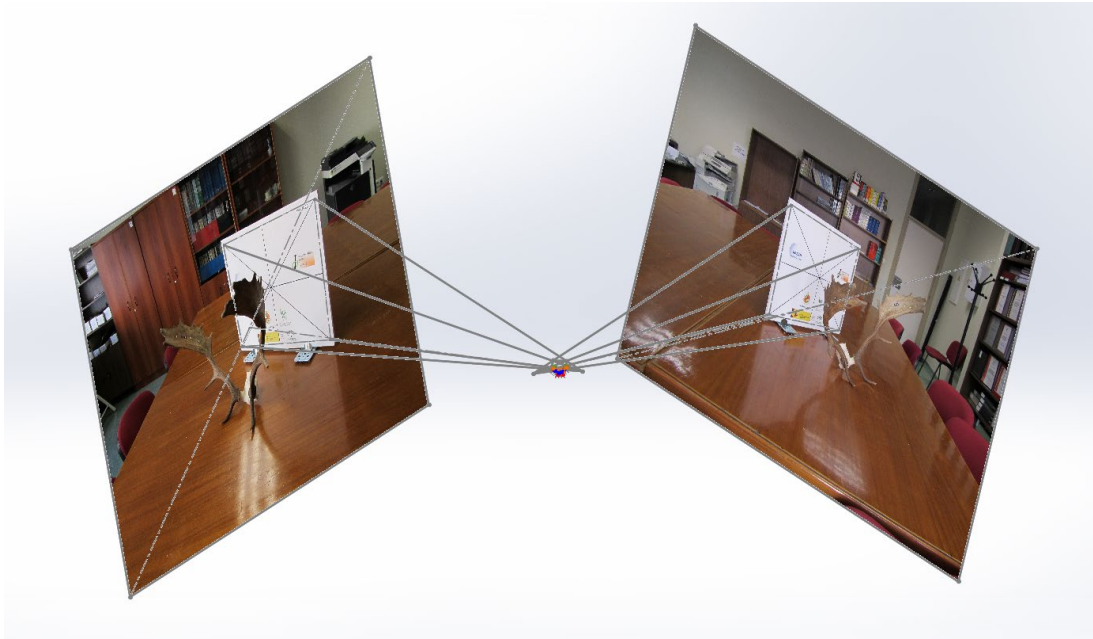
Ya se ha comentado anteriormente que realizar valoraciones de calidad cinegética sobre un modelo-3D ‘sólido’ no es lo más adecuado, debido a los recursos necesarios para su obtención. Es más económico a nivel de recursos invertidos trabajar con un modelo-3D más sencillo, aquel que caracterice la estructura axial espacial de aquellas partes relevantes de la cuerna ([Fig. 50](#)) necesarias para realizar dicha valoración, según se indica en el ‘Manual de homologación de Trofeos de caza’ ([LLanes-Borrero, 2013](#)). Posteriormente se miden las longitudes de dichas

partes: longitudes de la vara central, de la pala y de las puntas luchaderas, anchura de la pala, los perímetros de las rosetas y de varias secciones transversales de la vara de la cuerna. En función de las longitudes de dichos elementos estructurales se obtiene una puntuación final, según el baremo oficial, que va a determinar el grado de calidad cinegética del ejemplar asociada al desarrollo geométrico de su cuerna.



**Fig. 50.** Estructura espacial de las partes relevantes de la cuerna necesarias para la 'valoración cinegética'.

Dicha estructura espacial, se obtiene aplicando la metodología descrita en (Rubio-Paramio *et al.* 2016). En ella se aplica mediante fotogrametría a través de dos fotografías obtenidas desde puntos de vista diferentes, la restitución espacial de las partes de la cuerna, representadas en ambas fotografías, necesarias para la valoración. Todo ello se realiza dentro de un escenario 3D, creado con el software CAD 'SolidWorks' donde previamente se localizan los puntos espaciales desde los que se realizaron las fotografías. Posteriormente mediante el cruce de dos rayos proyectivos, lanzados desde dichos puntos, hasta el punto deseado a restituir espacialmente representado en ambas fotografías, se obtiene la posición espacial de dicho punto (Fig. 51). Obtenida la estructura espacial, el último paso es medir la longitud de los elementos geométricos considerados para finalmente asignar la puntuación final obtenida que va a cuantificar el grado de calidad cinegética; este proceso también se realiza dentro del software CAD utilizado 'SolidWorks'.



**Fig. 51.** Método fotogramétrico Bi-Foto que restituye espacialmente puntos representados en dos fotografías mediante el cruce de rayos proyectivos.

Se obtienen los resultados obtenidos en la valoración de la calidad cinegética en la cuerna del gamo considerada, caracterizada como un modelo-3D 'axial', aplicando la metodología fotogramétrica a partir de dos fotografías, según se indica en el baremo oficial (LLanes-Borrero 2013). También se realiza la valoración con la metodología de medición con cinta métrica, de las mismas partes de la cuerna consideradas, realizada sobre el modelo físico. Los resultados de dicha valoración se reflejan en las fichas de valoración realizadas por personal oficial en los procesos de homologación de cuernas como trofeos de caza mayor. Dichas mediciones se han realizado sobre una muestra de 15 cuernas de gamo, de modelos reales obtenidos en talleres de taxidermia, que proceden de diferentes jornadas de caza y cotos localizados en Andújar (Jaén), España durante el año 2016. La toma de fotografías, para la posterior restitución espacial por fotogrametría de las partes geométricas significativas de la cuerna, se realizó en el propio taller de taxidermia.

Las mediciones con cinta métrica se obtuvieron a partir de la medición oficial, realizada por personal homologado.

- El grado de aproximación de los valores de los diferentes indicadores geométricos de la cuerna, longitudes y trayectorias, considerados para la valoración de la calidad cinegética del ejemplar, es muy similar en las dos tipologías de la cuerna; los valores estimados en el modelo-3D 'axial' son muy similares a aquellos considerados sobre el modelo físico, obtenidos mediante la medición con cinta métrica por personal homologado. Dicha validación de resultados, en cuanto a la correlación y semejanza de resultados en las dos metodologías, fue demostrada en estudios similares aplicados en ejemplares de ciervo mediante técnicas estadísticas (Rubio-Paramio *et al.* 2016).

- Se demuestra que, para los procesos de valoración cinegética en el gamo, el modelo-3D 'axial' que caracteriza la estructura de su cuerna, es el más adecuado que sobre los modelos-3D 'de volumen' obtenidos con otras tecnologías, debido a los mayores recursos y condiciones controladas que se requieren para su obtención.

## **2.2. METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN ASIMETRÍAS**

En el área de la zoología, es de gran interés determinar el grado de asimetría existente en las diferentes estructuras animales, determinando el grado de defecto que presentan las estructuras bilaterales. Este factor se podrá utilizar como 'biomarcador' de forma que su valor o efectos se relacionen con las causas o factores de influencia del ejemplar. En este estudio se proponen nuevas metodologías para la obtención de valores de asimetría tanto globales para toda la cuerna como parciales para rasgos concretos de su estructura.

El estudio se realiza utilizando como dato de partida la caracterización digital en 3D de la cuerna mediante su estructura axial o mediante la disposición espacial de los puntos de estudio considerados de esta, todos ellos definidos mediante la restitución espacial de los puntos de la cuerna representados en dos fotografías.

Disponer de datos que representen la cuerna en formato CAD tiene la ventaja de permitir el estudio de muchos ejemplares procedentes de jornadas de caza. Esto no se posibilita cuando solo se dispone del modelo real de la cuerna, con mediciones manuales tomadas sobre él, ya que dichos modelos reales proceden de talleres de taxidermia, el tamaño de las muestras es pequeño y consisten en muchos casos en cuernas seleccionadas por tener aparentemente una calidad cinegética alta.

Se presentan a continuación dos metodologías que evalúan de grado de defectos bilaterales que se presentan en partes de la estructura de la cuerna del ciervo ibérico (*Cervus elaphus hispánicus*). El estudio se realiza sobre varias muestras de 48 cuernas de ciervo, 33 de ellos procedentes de tres sesiones de procesos de homologación oficial como trofeos de caza y de talleres de taxidermia, y 15 ejemplares abatidos en dos jornadas de caza en los cotos 'Selladores' y 'Lugar Nuevo' en la localidad de Andújar (España) entre los años 2014 y 2019.

### **2.2.1. MÉTODO-1. SEGMENTOS QUE UNEN PARES DE PUNTOS HOMÓLOGOS AFINES**

La metodología propuesta considera el conjunto de mediciones realizadas en los puntos situados en las partes más relevantes de la cornamenta.

Estos son los que corresponden a los puntos significativos de los puntos de inicio y final de las puntas de la cuerna (Fig. 52): el centro de las 'rosetas' (1-2), el punto de inicio de las puntas de las 'luchaderas' (3-4), el punto final de las puntas de las luchaderas (5-6), el punto inicial de las punta central o 'candil' (7-8), el punto final de las puntas del 'candil' (9-10), los puntos geométricos centrales de las puntas de la 'corona' (11-12) y, si existen las puntas 'contraluchaderas', su punto inicial (20-21) y su punto final (22-23).

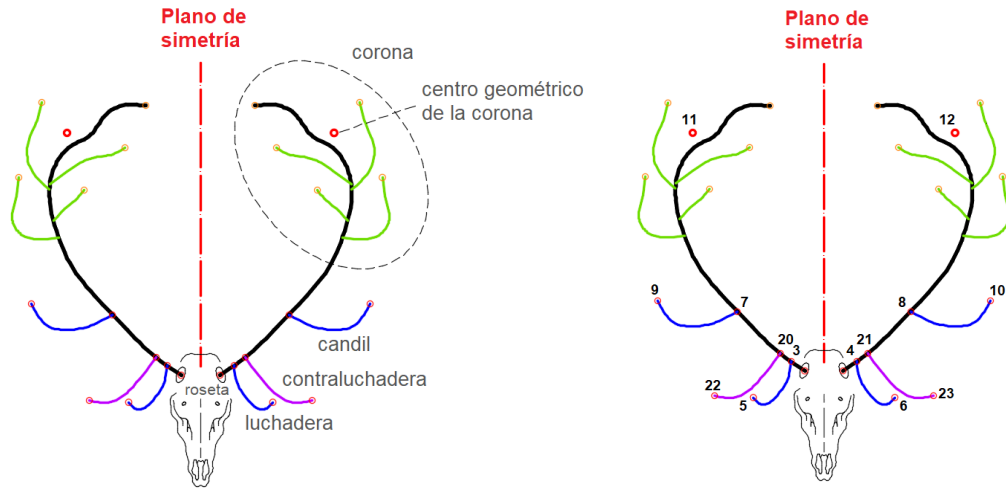


Fig. 52. Elementos de la cuerna y puntos considerados para la valoración de la asimetría.

La metodología propuesta permite estimar y cuantificar numéricamente una variable denominada Índice de "Asimetría" (IA) que representa el grado de divergencia entre las dos partes de la cornamenta en su conjunto, respecto a un plano de simetría tomado como referencia. Este índice mostrará las desviaciones o imperfecciones de los puntos relevantes de la cornamenta en su localización espacial.

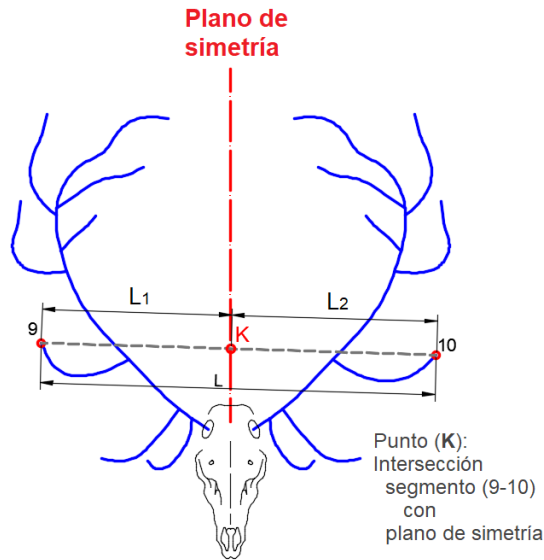
El tipo de asimetría a evaluar será de tipo fluctuante (AF) donde se pondrá de manifiesto la desviación de determinadas partes de un lado de la cornamenta con respecto a sus partes afines en el otro lado de la misma, utilizando un plano central como referencia de simetría.

El objetivo es determinar, para los diferentes segmentos considerados, que unen un punto perteneciente a una rama de la cornamenta con su punto afín relacionado con la otra, las desviaciones en *longitud* y *perpendicularidad* con respecto al plano de simetría, de forma que el grado de divergencia simétrica se represente con un único valor.

A continuación, se definen dos variables de asimetría que se han considerado en el método:

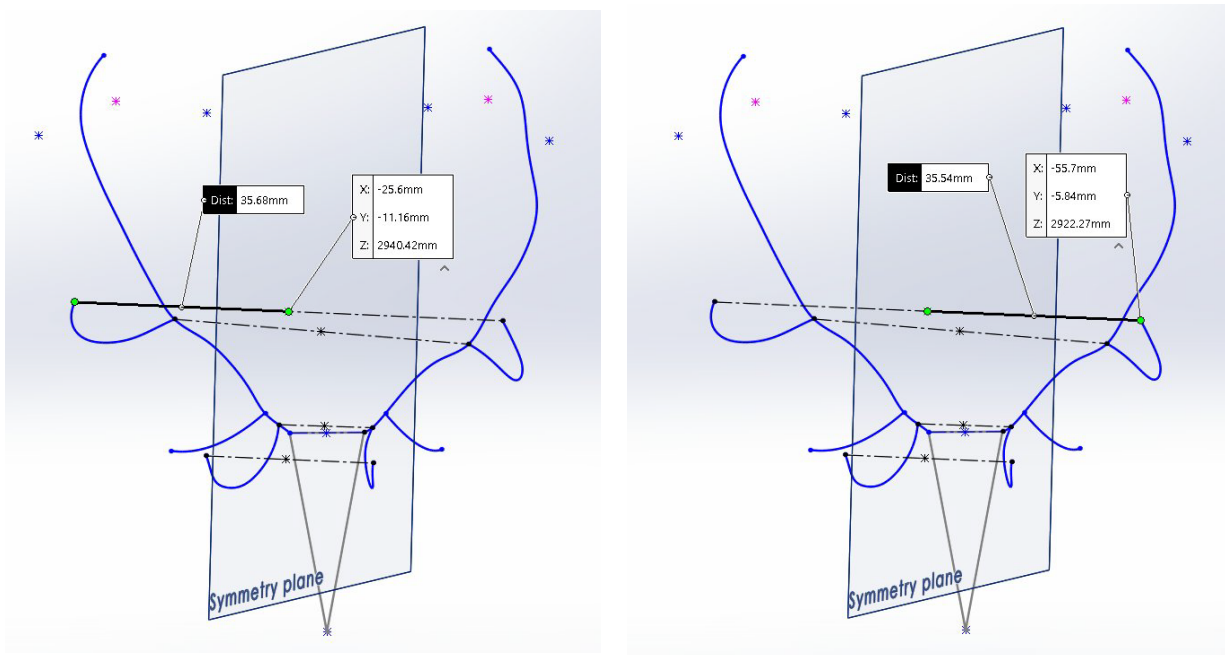
El 'Índice de asimetría por longitud' ( $AI)_L$  describe la diferencia entre las longitudes entre cada punto y el plano de simetría (Fig. 53).

El valor de  $(AI)_L$  se determina mediante la (ec. 1), donde L es la longitud del segmento que une ambos puntos y  $L_1$  y  $L_2$  son las longitudes entre cada punto y el plano de simetría, a lo largo de ese segmento. La forma de realizar la medición mediante el sistema CAD se muestra en la (Fig. 54).



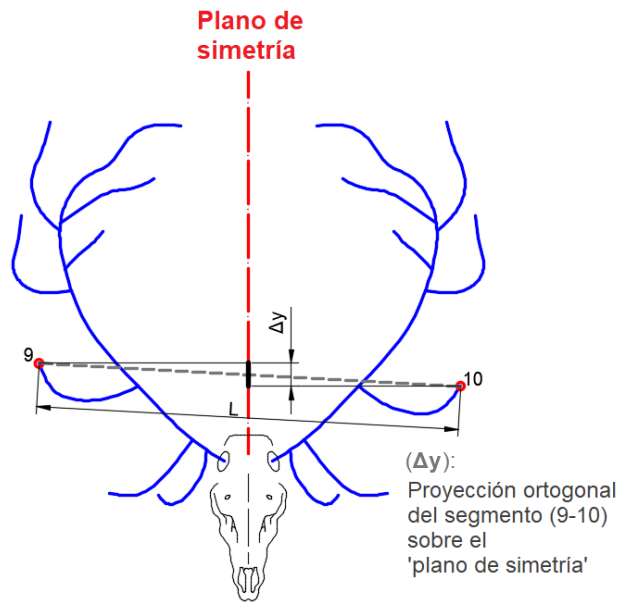
**Fig. 53.** Estimación del valor de asimetría por 'longitud'.

$$(IA)_L = \frac{|L_1 - L_2|}{L} \quad (\text{Ec. 1})$$

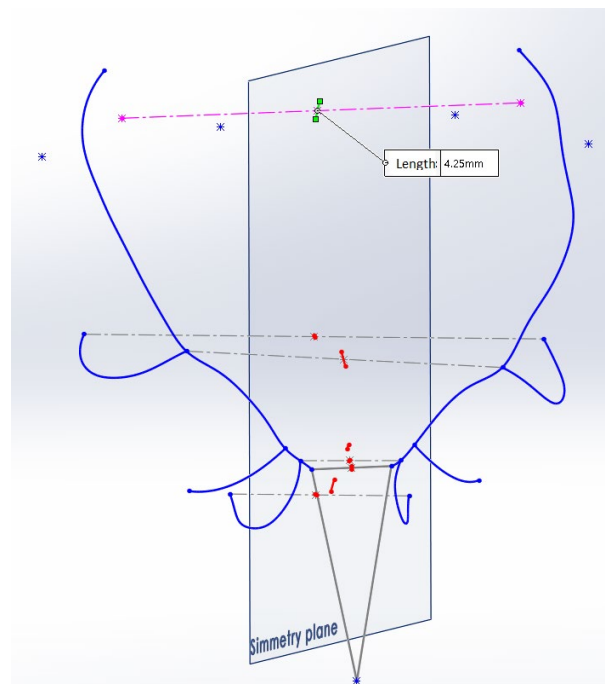


El 'Índice de Asimetría por Perpendicularidad'  $(AI)_P$  describe el grado de alineación (perpendicularidad geométrica) del segmento que une los dos puntos considerados por ambos lados (Fig. 55).

El valor de  $(AI)_P$  se determina mediante la (ec. 2), donde  $L$  es la longitud del segmento que une ambos puntos, y  $\Delta y$  es la longitud de la proyección del segmento que une los dos puntos sobre el plano de simetría. La forma de realizar la medición mediante el sistema CAD se muestra en la (Fig. 56).



**Fig. 55.** Estimación del valor de asimetría por 'perpendicularidad'.



**Fig. 56.** Cálculo para determinar el valor de asimetría por 'perpendicularidad'.

$$(IA)_P = \frac{\Delta y}{L} \tag{Ec. 2}$$

La suma de la media aritmética  $(IA)_L$  de los valores de  $(AI)_L$  'Asimetría por longitud' (ec. 3) y la media aritmética  $(IA)_P$  de los valores de  $(AI)_P$  'Asimetría por perpendicularidad' (ec. 4) para cada uno de los segmentos evaluados, representará el valor final del 'Índice de Asimetría'  $AI$  para la cornamenta (ec. 5).

Este índice final (**IA**) tiene un peso proporcional al número de pares de puntos evaluados en cada una de las dos variables de asimetría: en la 'Asimetría por Longitud' se considera un par de puntos menos que en la 'Asimetría por Perpendicularidad' ya que, como se describe más adelante, el plano de simetría tomado pasa por el punto medio del segmento que une los centros de las rosetas. De esta forma se evaluarán 15 pares de puntos se evaluarán en el peor de los casos, 7 para la estimación de  $(IA)_L$  y 8 para  $(IA)_P$ ; en el caso de que la cornamenta tenga las puntas contraluchaderas.

$$(IA)_L = \sum_1^n \frac{(IA)_L}{n} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$(IA)_P = \sum_1^n \frac{(IA)_P}{n} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$(IA) = 0.47 (IA)_L + 0.53 (IA)_P \quad (\text{Ec. 5})$$

(15 pares de puntos, 7 para  $(IA)_L$  y 8 para  $(IA)_P$ )

El Índice de Asimetría (**IA**) obtenido es un valor adimensional, tiene un rango entre 0 y 1, se expresa en milésimas de punto y va a establecer un valor de asimetría global para toda la cuerna. A través de esta definición del Índice de Asimetría (**IA**), cuanto más altos sean los valores del índice, mayor será la asimetría de la cuerna. Las cuernas más simétricas tendrán valores bajos cercanos a 0 presentando valores bajos de defecto bilateral.

En cuanto a la definición del plano de simetría se obtiene este referenciándolo a un plano vinculado al cráneo del ejemplar. Los puntos del cráneo considerados presentan gran significancia en la morfología de este, una gran consistencia e invariabilidad y sin cambios relevantes con la edad del animal. Este se define pasando por los puntos centrales de las dos 'rosetas' y un tercer punto en el extremo del hueso nasal del hocico del animal, punto disponible ya que en las fotografías de las astas está representado el cráneo o el busto del animal, para ser definido este espacialmente por restitución fotogramétrica.

Una vez definida la superficie triangular del cráneo formada por tres puntos, se ajusta el plano de simetría para que cumpla tres condiciones espaciales: 1) Que sea perpendicular a esta superficie triangular; 2) Que contenga el tercer punto extremo del hocico; y 3) Que contenga el punto medio del segmento que une los dos centros de las rosetas (**Fig. 57**).

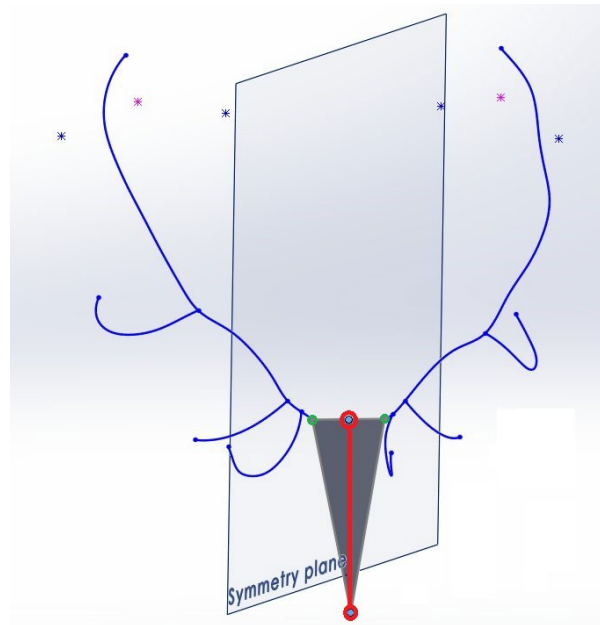


Fig. 57. Definición del plano de simetría.

### 2.2.2. MÉTODO-2. RASGOS ESTRUCTURALES DE LA CUERNA

Se propone una segunda metodología para la estimación del grado de asimetría fluctuante de la cuerna de cérvidos que utiliza inicialmente los datos que se emplean en la valoración del grado de calidad cinegética de la cuerna en el proceso de homologación oficial como trofeo de caza.

Dicha metodología proporciona resultados del grado de asimetría global de la cuerna, representada por una nueva variable, denominada IAG (índice de asimetría global), pero también resultados de asimetría parciales (IAP) (índice de asimetría parcial), en función de los rasgos evaluados para los diferentes elementos geométricos de la estructura de la cuerna, de forma que, se pueda aplicar en ambos casos, en estudios posteriores de poblaciones localizadas en un ambiente determinado y poder inferir con otras variables biológicas, 'biomarcadores' estimadas.

Los datos de partida en los que se basa la nueva metodología, aquellos necesarios para cuantificar la calidad cinegética de la cuerna, pueden estar disponibles digitalmente en forma de modelo-3D representando la estructura axial de la cuerna, o estar definidos por las mediciones obtenidas manualmente con cinta métrica sobre el modelo físico de la cuerna.

Disponer de datos que representen la cuerna en formato digital para estudios de valoración del grado de asimetría, globales o parciales sobre rasgos geométricos concretos de la cuerna, tiene la ventaja de permitir el estudio de muchos ejemplares procedentes de jornadas de caza concretas. Esto no se posibilita cuando solo se dispone del modelo real de la cuerna, con mediciones manuales tomadas sobre él, ya que dichos modelos reales proceden de talleres de taxidermia, el tamaño de las muestras es pequeño y consisten en muchos casos en cuernas seleccionadas por tener una aparente calidad cinegética alta.

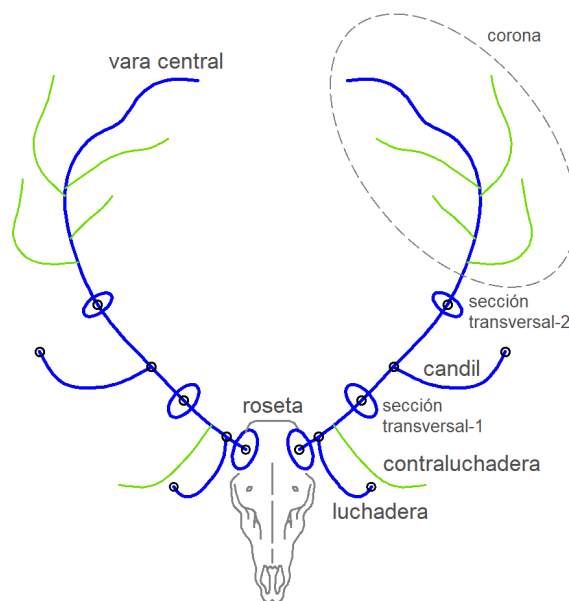
Para la nueva metodología propuesta se necesita partir de un modelo que represente la estructura de la cuerna, de forma que se puedan medir sobre este las longitudes y perímetros de las diferentes partes estructurales de la cuerna consideradas.

Dichos modelos pueden ser la propia cuerna física o la caracterización de su estructura axial, representada en un modelo-3D, de forma que queden descritas fielmente todos los elementos a considerar para el estudio de la asimetría: 'vara central', puntas principales ('luchaderas' y 'candiles') y las secciones transversales de partes relevantes de la vara central de la cuerna (Fig. 58). El modelo-3D proviene de la restitución espacial de la cuerna representada en dos fotografías según se describe en (Rubio-Paramio *et al.* 2016).



**Fig. 58.** Cuerna del ciervo representada por dos fotografías y modelo-3D con la estructura axial y secciones transversales.

Para el presente estudio se van a considerar diferentes partes estructurales relevantes de la geometría de la cuerna, representada por su estructura axial, de forma que se cuantifique la longitud de cada una de ellas (Fig. 59).

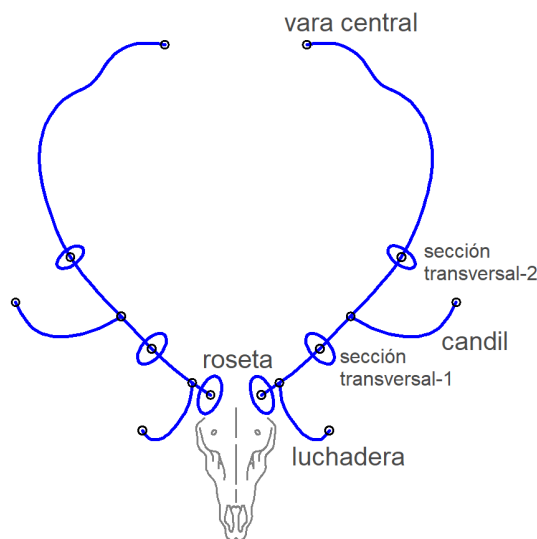


**Fig. 59.** Elementos geométricos de la cuerna considerados para el estudio: vara central, puntas luchaderas, puntas candiles y secciones transversales.

Los elementos geométricos considerados para cada una de las dos ramas de la cuerna, son: la 'vara central', la 'punta luchadera', la 'punta central o candil', la 'roseta' y las dos secciones transversales de la 'vara central', tomadas una entre la 'punta luchadera' y la 'punta candil', y la otra entre la 'punta candil' y la 'corona'.

La metodología propuesta permite la estimación del grado de asimetría de la cuerna, que representa el defecto de simetría entre las dos ramas de la cuerna del ciervo ibérico (*Cervus elaphus hispanicus*), utilizando las mismas mediciones que se hayan realizado en estudios previos para cuantificar la calidad cinegética de la cuerna del ejemplar.

Dentro de los diferentes ítems que utiliza el baremo oficial (Llanes-Borrero, 2013) para la valoración de la calidad cinegética, se van a considerar aquellos relacionados con distancias cuantificables, longitudes y perímetros, de partes relevantes de la estructura de la cuerna sobre cada una de las dos ramas de la cuerna, como son: las longitudes de la 'vara central' y de las puntas principales, luchaderas y candiles, y los perímetros de las 'rosetas' y de dos secciones transversales sobre la 'vara central', una tomada en la parte más delgada entre la 'punta luchadera' y la 'punta candil' y la otra tomada entre la 'punta candil' y la 'corona' (Fig. 60).



**Fig. 60.** Rasgos geométricos de la estructura de la cuerna considerados para la estimación de asimetrías parciales (IAP).

El método permite estimar el valor de asimetría, representado por la variable (IAP) (índice de asimetría parcial) para cada uno de los seis rasgos geométricos estimados de la cuerna y un valor de asimetría global, para toda la cuerna, definido por la variable (IAG) (índice de asimetría global).

Va a permitir realizar, por un lado, estudios específicos para determinar el grado de asimetría de rasgos concretos de la cuerna y, por otro lado, obtener una valoración global del defecto geométrico de simetría para la totalidad de la cuerna.

No se define en la metodología un plano de simetría de referencia para comparar sobre este las diferencias de valores de cada rama de la cuerna, como suele realizar tradicionalmente en casi todos los estudios y metodologías realizados sobre animales.

En esta propuesta se comparan las medidas, pertenecientes al mismo rasgo geométrico de la cuerna considerado, realizadas sobre cada uno de los dos lados de esta. Posteriormente se evalúa la diferencia entre las dos medidas y se compara esta con la longitud media del elemento de la cuerna estudiado (Fig. 61) (ec. 6).

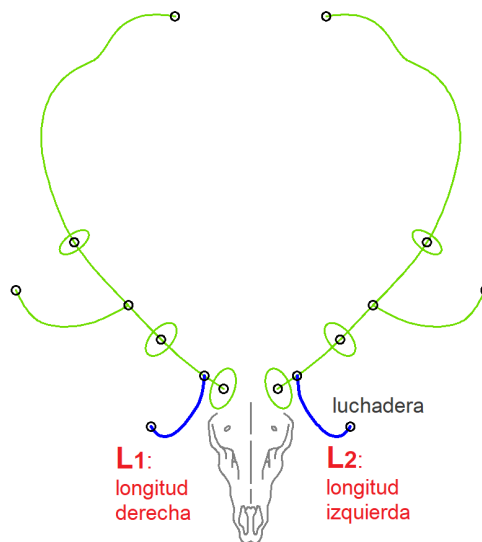


Fig. 61. Elemento estructural de la cuerna considerado y valores métricos para el cálculo del valor de (IAP).

$$(IAP)(luchadera) = \frac{|L_1 - L_2|}{\frac{(L_1 + L_2)}{2}} \quad (\text{Ec. 6})$$

$L_1$  es la longitud del rasgo estudiado de la rama derecha de la cuerna.

$L_2$  es la longitud del rasgo estudiado de la rama izquierda de la cuerna.

$(IAP)(luchadera)$ , representa el 'índice de asimetría parcial' para el rasgo específico estudiado; la 'punta luchadera'.

Aplicando este procedimiento se obtienen los valores de asimetría para cada uno de los seis rasgos considerados correspondientes a los elementos geométricos de la cuerna.

El valor global de asimetría para la cuerna, (IAG) (índice de asimetría global) se toma como la suma ponderada de cada uno de los seis rasgos de (IAP) determinados. Para definir la ponderación que se aplica a cada uno de ellos, se han considerado los mismos pesos que tienen los rasgos, sobre la puntuación que presenta cada uno de ellos en el baremo de valoración de calidad cinegética como trofeo de caza (Llanes-Borrero 2013). Sobre la muestra de 48 ejemplares se ha considerado como referencia aquel que tiene mayor puntuación en calidad cinegética, correspondiente a una de las 'sesiones de homologación'. Este ejemplar es el que presenta mayor

grado de simetría, habiendo realizado las mediciones sobre el modelo real de la cuerna, con una puntuación de 187 puntos, alcanzando el nivel de ‘medalla de oro’ según se indica en el baremo de la valoración oficial como trofeo de caza. Sobre la puntuación total de valoración cinegética de 187 puntos, se desprecian los puntos obtenidos en aquellos ítems del baremo que, por un lado, no ofrecen simetría como la envergadura, el número total de puntas, el peso de la cuerna sin cráneo, y por otro lado, de otros que no son cuantificables y que quedan a la subjetividad del operario que realiza la valoración, como el color de la cuerna y la calidad del perlado de las rosetas; por ello, se considera finalmente el total de puntos, 138.7, que suponen los seis rasgos simétricos y cuantificables de la cuerna, estableciendo el peso, en porcentaje, que representa el valor métrico de cada rasgo geométrico estructural de la cuerna sobre dicha puntuación total considerada (**Tabla 1**).

**Tabla 1.** Pesos de cada rasgo estructural de la cuerna para el cálculo de (IAP).

Rasgo estructural de la cuerna	Puntuación ‘Valoración cinegética’	Peso (%)
Vara central	48	<b>34.6</b>
Luchadera	7	<b>5</b>
Candil	7.28	<b>5.2</b>
Roseta	23	<b>16.6</b>
Sección transversal Luchadera-Candil	27.2	<b>19.6</b>
Sección transversal Candil-Corona	26.2	<b>18.9</b>
Total	<b>138.7</b>	100

Una vez establecidos los pesos que representa cada rasgo estimado, el cálculo del valor global de asimetría para la cuerna (IAG) viene representado por la suma ponderada de los seis rasgos considerando el peso que representa cada uno de ellos (**Tabla 2**) (**ec. 7**).

**Tabla 2.** Proceso de cálculo de (IAG) ‘Índice de Asimetría Global’.

Rasgo estructural de la cuerna	(IAP)	Peso (%)	(IAP) ponderado
Vara central	X1	34.6	<b>Z<sub>1</sub></b>
Luchadera	X2	5	<b>Z<sub>2</sub></b>
Candil	X3	5.2	<b>Z<sub>3</sub></b>
Roseta	X4	16.6	<b>Z<sub>4</sub></b>
Sección transversal Luchadera-Candil	X5	19.6	<b>Z<sub>5</sub></b>
Sección transversal Candil-Corona	X6	18.9	<b>Z<sub>6</sub></b>
			<b>Valor de (IAG)</b>

$$(IAG) = \sum_{i=1}^6 (Z_i) \tag{Ec. 7}$$

Los valores tanto de (IAP) como de (IAG) vienen expresados en milésimas de punto, de forma que cuantifican el defecto asimétrico que presenta la cuerna; valores bajos de asimetría representan un grado de simetría significativo.

Esta metodología aprovecha las mediciones realizadas sobre la cuerna para el estudio de su calidad cinagética. Al permitirse la caracterización de la cuerna mediante un modelo-3D que representa su estructura axial, obtenida a partir de la restitución espacial fotogramétrica de la cuerna representada en dos fotografías (Rubio-Paramio *et al.* 2016), la metodología propuesta permite su aplicación sobre el modelo real de la cuerna o sobre su modelo-3D que la caracteriza. Sobre el modelo-3D, las medidas de los rasgos de la cuerna considerados, están representadas por las longitudes de los ejes: de la ‘vara central’ y de las puntas principales, ‘luchaderas’ y ‘candiles’; sobre el modelo real, dichas longitudes se toman realizando las mediciones en posiciones determinadas de la superficie exterior de los elementos geométricos de la cuerna considerados según se detalla en (Llanes-Borrero 2013). Dichos valores de longitud llegan casi a coincidir, ocurriendo de igual forma para los valores de los perímetros en los rasgos de las ‘rosetas’ y de las dos secciones transversales de la ‘vara central, sin llegar a alterar el resultado en las estimaciones de (IAP) y de (IAG), sin depender, por tanto, de que el modelo de partida para el estudio sea la cuerna real o su representación digital mediante un modelo-3D.

El proceso general de la metodología se describe en la (Fig. 62).

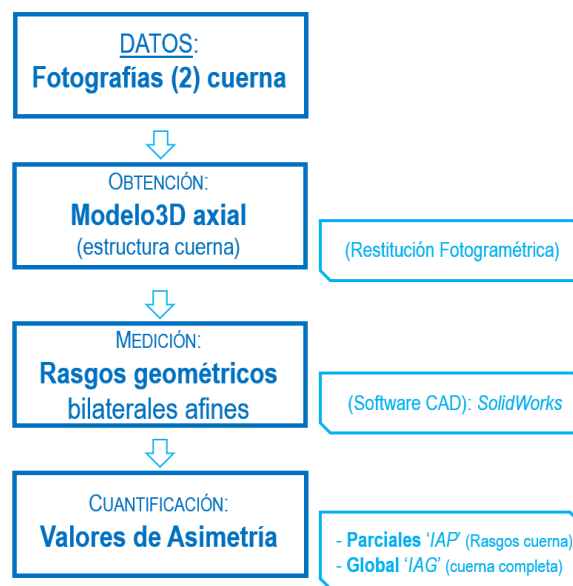


Fig. 62. Esquema general de la metodología propuesta.

### 2.2.3. COMPARACIÓN DE AMBAS METODOLOGÍAS

Una vez descritas las dos metodologías, se detalla a continuación una comparación entre ambos métodos, donde se definen las características de cada uno de ellos, las funcionalidades y la idoneidad en su implementación en función al tipo de aplicación biológica.

#### 1. Características de la metodología:

‘Mét-1’: Necesita definir un ‘plano de simetría’; definido por tres puntos del cráneo. El estudio de asimetría se realiza comparando la perpendicularidad y las distancias sobre el plano de simetría de los segmentos que unen las parejas de puntos afines de la cuerna considerados.

‘Mét-2’: No necesita definir un ‘plano de simetría’. La metodología propuesta consiste en comparar las longitudes de los diferentes rasgos geométricos considerados correspondientes a las dos ramas de la cuerna.

#### 2. Características del dato inicial:

‘Mét-1’: Solo admite que el dato de partida sea en formato digital; se obtiene su posición espacial de los puntos considerados para el estudio, representados en dos fotografías, mediante restitución espacial fotogramétrica.

‘Mét-2’: La valoración del grado de asimetría se apoya los resultados de las mediciones, longitudes y perímetros, realizadas para la valoración de la calidad cinegética. Estas mediciones se pueden obtener por un lado sobre el modelo real de la cuerna realizadas por cinta métrica, o ser definidas en un modelo-3D que representa la estructura axial de la cuerna.

#### 3. Proceso de obtención:

‘Mét-1’: No es necesario obtener toda la estructura CAD de la cuerna por restitución fotogramétrica. Solo se necesitan restituir en 3D los puntos relevantes ‘homólogos’ de la cuerna necesarios para el estudio: arranques y extremos de las puntas principales y el centro de la corona correspondientes a las dos ramas de la cuerna.

‘Mét-2’: Requiere definir en un modelo-3D de su estructura axial formada por la vara central, las puntas principales y el centro geométrico de las puntas de la corona.

#### 4. Aplicaciones biológicas:

‘Mét-1’: Es apropiado si solamente se implementa para la ‘valoración del grado de asimetría’ ya que necesita unos datos más simplificados, de menor cuantía y rápidos de obtener; la rectificación en 3D de las parejas de puntos considerados representados en dos fotografías. Recomendable para el estudio de un conjunto grande de ejemplares, ‘poblaciones’, localizados en un lugar concreto.

‘Mét-2’: Apropiado en estudios de ‘valoración cinegética’ y del ‘grado de asimetría’ global o de rasgos geométricos de la cuerna concretos. En este caso el estudio consiste en conocer las dos variables, permitiendo determinar su grado de correlación. Se puede implementar a ejemplares de sesiones de homologación como trofeos de caza o a grupos de ejemplares provenientes de la misma jornada de caza.

### 2.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN. CUERNA DEL GAMO

En el presente estudio se plantea la caracterización de geometría de la cuerna del gamo, mediante la representación en un modelo-3D. Este se va a definir utilizando diferentes tecnologías para su obtención. Posteriormente se determinará el grado de precisión de los tres modelos-3D de forma que se determine la adecuación de cada uno de ellos en base a la aplicación biológica a la que vaya destinado resaltando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

El modelo-3D de la cuerna del gamo, con precisión adecuada, puede ser utilizado para:

1. Estimar su volumen. El dato, proporcionado por el software, es un variable relevante en el campo de la biología, biomarcador, que permite conocer el grado de desarrollo de la cuerna del ejemplar relacionado con otros datos de este como su edad y las condiciones ambientales en que se ha desarrollado.
2. Estimar su densidad. A partir del dato del volumen, y conocido el peso de la cuerna, se podrá estimar su densidad. Esta proporciona un biomarcador casi más relevante que el del volumen en cuanto al grado de salud del ejemplar, pudiendo analizar el grado de relación de esta con otros factores como su edad y las condiciones ambientales en su desarrollo. El inconveniente para estimar la densidad es conocer el peso de la cuerna, ya que éste solo se podrá obtener en desmogue, con la dificultad añadida de encontrar las dos ramas de la cuerna, y en trofeos de caza, aparte también de los problemas añadidos en aplicar el método para evaluar el peso; por desalojo de agua ([Rubio-Paramio et al. 2012](#)) con los problemas añadidos de deteriorar la cuerna o directamente mediante un dinamómetro o balanza, con los problemas de que los trofeos de caza suelen estar unidos al cráneo del ejemplar.
3. Análisis descriptivos. El modelo-3D de la cuerna permite realizar análisis de la forma y geometría de todas las partes de su estructura. Son de gran utilidad en los estudios de morfometría geométrica donde se estudien los cambios geométricos en los procesos de desarrollo del ejemplar y sus relaciones con otros variables ambientales.
4. Analizar el grado de asimetría de la cuerna. Partiendo del dato del modelo-3D de la cuerna o de su estructura, se tienen disponibles los puntos “homólogos” relevantes y las partes de la cuerna consideradas, puntos extremos de las puntas principales, luchaderas y candiles, de las puntas de las palas, longitudes de las puntas luchaderas y candiles, longitudes y anchuras de las

palas, etc. (Montalvo-Gil *et al.* 2022). El grado de asimetría de la cuerna del ejemplar va a permitir, según muchos autores, detectar relaciones con el grado de salud y de calidad del ejemplar, y en otros estudios posteriores, inferir este posible biomarcador con otros factores, internos o externos en los que se haya desarrollado el ejemplar.

5. Estimar la calidad cinegética. A partir del modelo-3D se puede valorar la puntuación obtenida en los diferentes elementos de la cuerna para valorar su desarrollo geométrico según se describe en los manuales oficiales de valoración de la calidad cinegética como trofeo de caza. Las valoraciones oficiales se realizan midiendo con una cinta métrica sobre el modelo físico de la cuerna las diferentes partes de esta, longitudes, perímetros y envergadura; dichas distancias y trayectorias se pueden obtener midiendo sobre la superficie del modelo-3D.

Una vez descritas diferentes aplicaciones biológicas, y dada la relevancia de disponer del modelo-3D de la cuerna como dato de partida sobre ellas, habría que comparar la precisión geométrica de los modelos-3D obtenidos con las tecnologías utilizadas en su definición. El objetivo es poner de manifiesto las ventajas e inconvenientes de cada tipología de modelo-3D en base al tipo de análisis biológico al que vaya a ser aplicado. En el presente estudio de valoración de modelos-3D, la aplicación biológica considerada es la determinación del volumen de la cuerna, variable necesaria para posteriores estudios de la densidad de esta.

Se describen a continuación varias tecnologías que definen un modelo-3D 'sólido' y la evaluación de la precisión de éstos. Las tareas seguidas son:

1. Obtención de diferentes modelos-3D de la cuerna del gamo, a partir de un modelo real, mediante varias tecnologías:
  1. Escáner-3D de luz estructurada.
  2. Fotogrametría multi-imagen SfM (*Structure from Motion*).
  3. Modelado tridimensional CAD a partir de la estructura de la cuerna obtenida por fotogrametría obtenida por restitución espacial a partir de dos fotografías (Rubio-Paramio *et al.* 2016).
2. Evaluación del grado de precisión geométrica de los tres modelos-3D.
3. Implementación del modelo-3D en aplicaciones biológicas. Éste va a ser la entrada para análisis biológicos posteriores en base a determinar el volumen de la cuerna, necesario para otros estudios de densidad, y de la valoración de la calidad cinegética del ejemplar.
4. Evaluación de cada una de las tres tecnologías de obtención del modelo-3D 'sólido', que caracteriza la cuerna del gamo, resaltando las ventajas e inconvenientes y el grado de adecuación de cada una de ellas en función del tipo de aplicación biológica al que vaya destinado.

Se detalla a continuación el equipamiento utilizado, hardware y software, para la obtención del modelo-3D en cada una de las tres tecnologías utilizadas.

Para la definición del modelo3D por 'escáner', se ha utilizado un escáner modelo '*EinScan Pro 2X*'; es un escáner de mano de última generación desarrollado por '*Shining 3D*'. Su diseño portátil (peso reducido, tamaño compacto) lo hace fácil de usar. Una de sus principales características consiste en su rapidez y precisión que mejora significativamente la eficiencia durante el escaneado. En relación a la velocidad de escaneado cabe destacar su alta adquisición de datos con hasta 1,500,000 puntos por segundo (30 fps) con una transferencia de datos de alta velocidad compatible con USB 3.0. En el escaneado a mano del modelo de la cuerna en la precisión conseguida ha sido de 0.050 mm consiguiendo una malla de 6.135 triángulos con distancias entre puntos de 0.25 mm. Los procesos de edición, de optimización del modelo-3D y de conversión de tipología de este: malla, modelos de superficie y sólido y de formatos de archivo, se han realizado con el software propio proporcionado en el mismo modelo de escáner.

En la definición del modelo-3D por fotogrametría SfM '*Structure from Motion*', se ha utilizado una cámara réflex de la marca '*Olympus E-500*', con un objetivo de focal variable 28-80 mm, pero manteniéndolo durante toda la exposición alrededor de los 35 mm. El software que restituye espacialmente el modelo representado en el conjunto de fotografías es '*Bentley ContextCapture*'.

Para el modelo-3D obtenido por modelado tridimensional CAD a partir de la estructura de la cuerna obtenida por fotogrametría Bi-Foto, se ha utilizado el software CAD '*SolidWorks*', tanto para inicialmente definir el escenario virtual necesario para obtener la estructura espacial de la cuerna como, para posteriormente a partir de esta, obtener el modelo-3D mediante modelado tridimensional. El propio software '*SolidWorks*', ofrece datos del modelo-3D sobre sus propiedades físicas, entre ellos, el dato relevante de su volumen.

Los modelos-3D de la cuerna del gamo resultantes de aplicar las tres tecnologías se muestran en: **(Fig. 63)**.

Para determinar el volumen de cada modelo-3D obtenidos éstos se deben convertir al formato de modelo-3D 'sólido'. El valor del volumen se podrá determinar entonces dentro del software CAD. El valor de volumen vendrá definido por el modelo-3D más preciso.

Posteriormente se describe el proceso de comparación para establecer el grado de precisión de los tres modelos-3D, resultando el más preciso aquel obtenido mediante escáner-3D y, por tanto, el más idóneo para estimar el valor del volumen de la cuerna.

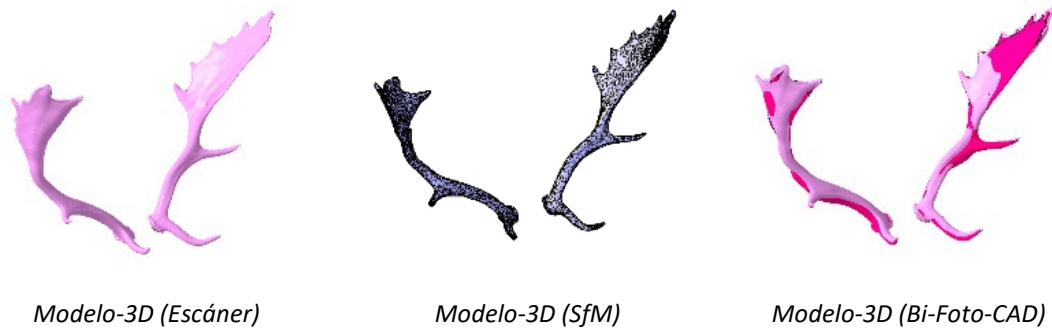


Fig. 63. Modelo-3D 'sólido' de la cuerna obtenidos por diferentes técnicas.

### 2.3.1. ESTUDIO DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS-3D OBTENIDOS CON DIFERENTES TECNOLOGÍAS

A partir del modelo físico de la cuerna del gamo, se caracteriza ésta en un modelo-3D 'sólido' mediante tres tecnologías (Fig. 63):

1. Mediante Escáner de luz estructurada.
2. Mediante Fotogrametría-3D Multi-imagen (SfM) (*Structure from Motion*).
3. Mediante modelado 3D CAD, '*SolidWorks*', con el dato de la estructura de la cuerna, a partir de dos fotografías (Rubio-Paramio *et al.* 2016).

En el siguiente estudio se trata de realizar un estudio de la precisión de los tres modelos-3D de forma que se estime, para cada uno de ellos, su precisión geométrica y de valor del volumen.

La precisión de los modelos-3D obtenidos se va a realizar utilizando los datos que proporciona el software *Autodesk Netfabb 2023* y posteriormente se aplican técnicas estadísticas para valorar la precisión de cada uno de ellos.

Con el software *Netfabb 2023* se permite la comparación de dos modelos-3D de forma que el programa realiza la alineación precisa, superponiendo el volumen de los modelos, ofreciendo como resultados las distancias y desviaciones entre los puntos de un modelo y sus correspondientes en el otro.

También ofrece un mapa de colores con las desviaciones del modelo-3D comparado sobre el modelo-3D tomado como referencia, en base a un valor fijado de 'tolerancia', de forma que solo se consideren las desviaciones superiores a esta.

El modelo-3D de referencia utilizado va a ser el obtenido con la tecnología de 'escáner 3D de luz estructurada', ya que la precisión de este, propia del equipo, es suficientemente alta, para considerar que el modelo-3D obtenido es muy similar al real en cuanto a geometría y volumen. Los otros dos modelos-3D se obtienen con las técnicas SfM y modelado CAD (*SolidWorks*) a partir de la estructura y datos de la cuerna obtenida por restitución espacial fotogramétrica a partir de

dos fotografías. Estos modelos-3D son los que van a ser comparados con respecto al modelo-3D obtenido por escáner-3D.

Se van a realizar dos comparaciones:

En una primera se compara el modelo-3D obtenido por escáner, utilizado como referencia, con respecto al modelo-3D obtenido por fotogrametría-3D multi-imagen SfM.

En la segunda comparación se compara el modelo-3D obtenido por escáner con respecto al modelo-3D obtenido por modelado CAD con *SolidWorks*.

Antes de realizar la comparación se realiza el escalado, con software de alineación, de los tres modelos-3D, de forma que permita que los resultados sean significativos al ser comparados posteriormente.

Inicialmente se importan los dos modelos-3D en el software *Autodesk Netfabb* y se elige cuál de los dos actúa como modelo-3D de referencia y cuál es el modelo-3D que va a ser comparado. Con ello se puede consultar los datos de volumen y del área de cada uno de los modelos-3D.

Posteriormente al solicitar la comparación de los dos modelos, el software ofrece un gráfico de colores con los dos modelos superpuestos de forma que se aprecia visualmente las desviaciones del modelo-3D comparado sobre el modelo-3D tomado como referencia, en base a un valor fijado de 'tolerancia' de forma que solo se consideren las desviaciones superiores a esta.

Las desviaciones positivas (color rojo), pertenecen a los puntos considerados del modelo comparado que estén por el exterior de aquellos puntos afines del modelo-3D de referencia.

Las desviaciones negativas (color azul) se presentan en los puntos del modelo-3D comparado al quedar por el interior de los puntos afines correspondientes a los del modelo-3D de referencia (**Fig. 64**).

En el mismo gráfico también se ofrecen las diferencias máximas y mínimas existentes entre los dos modelos-3D.

Otra información, de mayor relevancia, que ofrece el programa es estimar las distancias y desviaciones existentes entre los puntos seleccionados sobre el gráfico.

Proporciona la desviación entre un punto y su correspondiente punto afín correspondientes a cada uno de los dos modelos-3D.

En el caso estudiado se han considerado 19 puntos de ambas ramas de la cuerna del gamo correspondientes a los extremos de las puntas principales, luchaderas y candiles, y de los extremos de las puntas de la pala (**Fig. 64**).

Los resultados obtenidos en cada una de las dos comparaciones se detallan en el Capítulo IV 'Resultados', apartado: 'Tres tecnologías de ingeniería gráfica 3D para la caracterización de la cuerna del gamo en enfoques aplicados a ecología y gestión'.

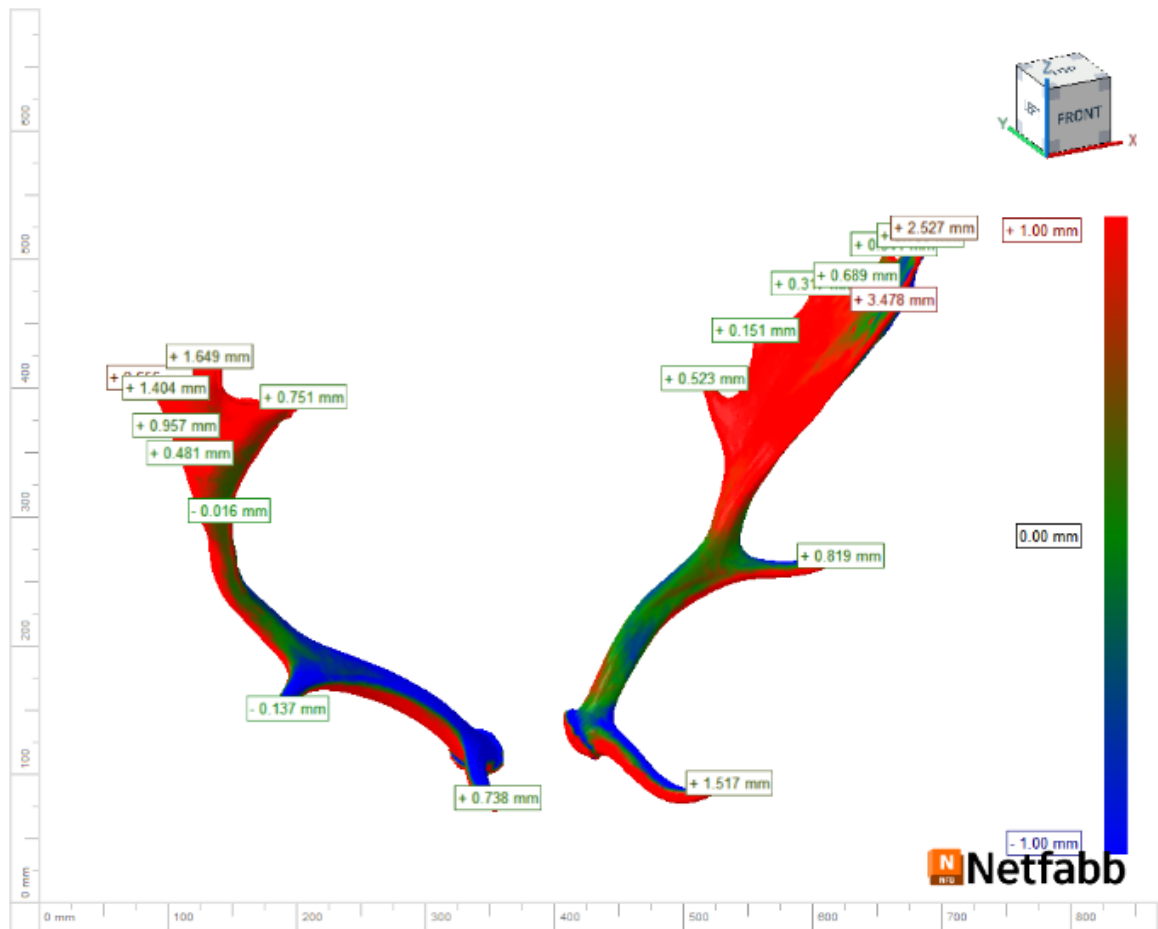


Fig. 64. Superposición y comparación de modelos-3D.

Mediante técnicas de inferencia estadística se utilizarán esas desviaciones entre los puntos de ambos modelos para estimar el comportamiento de la cuerna completa. Se determina que sobre el modelo-3D más preciso, tomado como referencia, el obtenido por escáner-3D, el modelo-3D obtenido por fotogrametría SfM es mucho más preciso que el modelo obtenido por técnicas de modelado CAD tradicional.

## 2.4. TIPOLOGÍA DEL MODELO-3D EN BASE A LA APLICACIÓN BIOLÓGICA IMPLEMENTADA

Una vez descritas las tres tecnologías para obtener modelos-3D que permiten caracterizar la geometría de la cuerna y las aplicaciones biológicas consideradas, se establece una valoración de cuál es el 'grado de idoneidad' de cada modelo-3D obtenido por una tecnología concreta en función del tipo de aplicación biológica que lo implemente. El 'grado de idoneidad' podrá de 'alto', 'medio' o 'bajo' en función del grado de complejidad con que fue obtenido y de las características de la aplicación biológica concreta.

Las características de ‘idoneidad’ que tiene que cumplir el dato de entrada en función de la tipología del análisis biológico que se realice, modelo-3D o estructura axial de la cuerna de la cuerna, son:

- Que sea preciso, de forma que los resultados de los análisis posteriores realizados cuenten con la fiabilidad necesaria para poder inferir con otros biomarcadores.
- Que la toma de datos se obtenga en condiciones favorables; en las propias jornadas de caza *in situ* evitando el empleo de costosos recursos en laboratorios y ambientes controlados.
- Economía en recursos para su obtención, en costo monetario y tiempo invertido en su definición.
- Facilidad de definición en condiciones favorables y con economía de recursos de forma que permita análisis biológicos, no solo de ejemplares concretos sino de poblaciones de ejemplares que se hayan desarrollado en un entorno determinado, permitiendo posteriormente inferir con los resultados obtenidos sobre la calidad del ambiente en un periodo concreto.

En la tabla adjunta (**Tabla 3**) se muestra el grado de idoneidad de cada resultado obtenido para la caracterización geométrica de la cuerna del gamo definido por un modelo3D o por la estructura axial de esta en función a la aplicación biológica a la que vaya a ser implementada, ya sea para la estimación del volumen y de la densidad, para la valoración de la calidad cinegética o para la estimación de las asimetrías.

**Tabla 3.** Grado de idoneidad del tipo de dato en función al tipo de aplicación biológica a implementar.

modelo-3D (1): Tipo ‘sólido’ modelo-3D (2): Tipo ‘estructura axial’			
TECNOLOGÍA APLICACIÓN BIOLÓGICA	Escáner-3D modelo-3D (1)	SfM Fotogrametría-3D modelo-3D (1)	Bi-Foto-CAD modelo-3D (1) modelo-3D (2)
VOLUMEN	ALTO	MEDIO	BAJO modelo-3D (1)
VALORACIÓN CINEGÉTICA	BAJO	MEDIO	ALTO modelo-3D (2)
ASIMETRÍAS	BAJO	BAJO	ALTO modelo-3D (2)

1. Para la **aplicación biológica** destinada a la **determinación del volumen**:

- El modelo-3D obtenido por escáner de luz estructurada es la tecnología ‘más adecuada’ para su aplicación, ya que es el que presenta mayor precisión geométrica y, por tanto, una mayor aproximación al modelo real. El equipo utilizado tiene una precisión de 0.025 mm (25 micras) cumpliendo con la exigencia de obtener un valor de volumen y de aproximación geométrica muy cercano al del modelo real.

Por contra, los inconvenientes que puede presentar, son:

- El escáner de luz estructurada puede ser adecuado para el estudio de ejemplares concretos, requiriendo disponer del modelo físico procedente de trofeos de caza suministrado en talleres de taxidermia, pero para el estudio de poblaciones no es lo más idóneo, ya que, en una jornada de caza no se dispone de los modelos físicos para la toma de datos.
- Se requiere trabajar en laboratorios y ambientes controlados.
- El costo del equipo, hardware y software, puede ser alto; un escáner de luz estructurada puede rondar los 7000€.
- El tiempo de implementación puede ser alto; aproximadamente de 2 horas en la toma de datos con el escáner y en los procesos de edición de la malla por segmentación para obtener un modelo-3D final de topología reconocible.

El modelo-3D obtenido por fotogrametría multiimagen, SfM *Structure From Motion*:

- Tiene un grado de adecuación 'medio', ya que, esta tecnología proporciona un modelo-3D con un grado de precisión adecuado a partir de un barrido de fotografías, entre 30 y 40, del objeto. - Por otra parte, no requiere de equipamiento especializado; es suficiente con una cámara réflex para la toma de fotografías ya que estas no requieren tratamientos posteriores de edición para corregir errores de deformación y, por tanto, la utilización de cámaras métricas de mayor coste. Tampoco el software específico que consigue el modelo-3D mediante la restitución espacial del objeto representado en las fotografías, es demasiado caro.
- El tiempo necesario para la obtención del modelo3D no es alto; dependerá de las características del software utilizado.
- No requiere su implementación en laboratorios ni ambientes controlados.

Los inconvenientes que puede presentar esta tecnología, son:

- No se consigue un modelo-3D con el grado de aproximación que sí tiene el escáner de luz estructurada; dicha precisión va a depender de las prestaciones del software de restitución espacial aplicado y del número de fotografías y de la calidad de estas en cuanto al grado de nitidez y de deformación de estas.
- Para el estudio de características que requieran mucha precisión, como es el caso de la estimación del volumen y de la densidad de la cuerna del ciervo, la tecnología SfM puede ser aplicable, pero sin llegar a ser tan precisa como la implementación por el escáner de luz estructurada.
- Puede ser adecuado para la obtención del modelo-3D de la cuerna del gamo de un ejemplar concreto. Para el estudio de poblaciones no es adecuado ya que se requiere que las fotografías necesarias se tomen *in situ* en la misma jornada de caza donde el

tiempo y la posición de la cuerna para la captura de las fotografías son limitaciones significativas.

- Para la toma de fotografías, se debe procurar que las condiciones sean controladas; la luminosidad del ambiente debe ser aceptable, el objeto debe aparecer como mínimo en un 60% en cada dos fotografías consecutivas, el modelo real debe estar colocado adecuadamente de forma que se facilite la toma del barrido de fotografías.

El modelo-3D obtenido por el modelado con software CAD a partir de la estructura axial de la cuerna por fotogrametría Bi-Foto (Rubio-Paramio *et al.* 2016), no es adecuado debido a los inconvenientes que conlleva su aplicación:

- El modelo-3D obtenido no se aproxima al modelo real, ni en volumen ni en geometría, existiendo desviaciones significativas; debido a la complejidad geométrica que presenta la cuerna del gamo: grosores y secciones transversales diferentes en todas las partes de su morfología, es muy complicado replicarlas en un modelo-3D a partir de los datos de la estructura axial en 3D obtenida previamente.
- En el proceso de modelado tridimensional se han de considerar una serie de supuestos y simplificaciones geométricas que faciliten la creación del modelo-3D final de la cuerna, como son la continuidad y uniformidad en los espesores, secciones y formas de los diferentes partes de la cuerna, sobre todo en la zona de la pala de esta; simplificaciones que no se adaptan a las discontinuidades y deformaciones que presenta la cuerna realmente en sus diferentes zonas.
- El tiempo de obtención del modelo-3D es alto requiriendo definir cada elemento geométrico de la cuerna por separado utilizando diferentes opciones de modelado sólido y por superficies.
- El tiempo para obtener el dato de partida, la estructura axial de la cuerna, es significativo; esta se obtiene mediante la restitución espacial por fotogrametría a partir de dos fotografías (Rubio-Paramio *et al.* 2016) dificultando el estudio del volumen de las cuernas de poblaciones de ejemplares.

Como ventaja resaltar que el coste del equipamiento informático necesario, en cuanto a hardware y software, no es alto, ya que para la obtención del modelo-3D no se requieren grandes necesidades de procesado informático.

2. Para las **aplicaciones biológicas** destinadas a la **valoración de la calidad cinegética** y de las **asimetrías**, indicar que:

- Obtener un modelo-3D por cualquiera de las tres tecnologías indicadas destinado para las valoraciones de la calidad cinegética y de las asimetrías no es lo más adecuado, ya que, supone la inversión de mucho tiempo y material en su definición.

Con la disponibilidad de un modelo-3D, obtenido previamente para otros tipos de análisis, sí se podría aprovechar éste como entrada en este tipo de análisis, ya que las trayectorias y longitudes que se consideran para las valoraciones, se pueden realizar sobre el modelo-3D disponible, ya sea este en versión de malla, de sólido o de superficie.

- El modelo-3D obtenido por escáner no es lo más adecuado, ya que, su definición requiere de equipos caros y tiempos altos.
- El modelo-3D definido por fotogrametría (SfM), podría ser más indicado. Éste es menos preciso que el obtenido por escáner, pero requiere menos tiempo para su obtención y con unas necesidades de equipo informático de menor coste.
- La tecnología más adecuada para valorar la calidad cinegética y las asimetrías de la cuerna del gamo, es la restitución espacial fotogramétrica a partir de dos fotografías ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)).

En un escenario CAD-3D se obtiene por restitución espacial fotogramétrica el modelo-3D 'axial'. Sobre los elementos geométricos de éste, se toman las mediciones métricas necesarias para la valoración de ambos biomarcadores.

La implementación de esta metodología conlleva las siguientes ventajas:

- Para la valoración cinegética y para el 'mét-1' propuesto en la estimación de asimetrías, no es necesario, restituir espacialmente todos los elementos de la estructura de la cuerna; solo son necesarias aquellas partes de esta, especificadas en ([LLanes-Borrero 2013](#)).
- El dato necesario para obtener espacialmente los elementos de la cuerna, son solo dos fotografías donde aparezca representada esta desde dos puntos de vista diferentes.
- La toma de fotografías se realiza en jornadas de caza de forma rápida, de forma que se posibilita la toma de fotografías de muchos ejemplares en la misma jornada para su posterior valoración.
- La definición tridimensional de los elementos de la estructura de la cuerna y su cuantificación métrica no requieren para su implementación de laboratorios ni ambientes controlados.
- El costo de los equipos, hardware y software, es moderado sin necesitar grandes requerimientos de procesamiento y cálculo informático.
- El tiempo necesario para obtener espacialmente los elementos geométricos de la cuerna y su cuantificación métrica es bajo.

**CAPÍTULO IV**  
**RESULTADOS**



## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Se describen a continuación los resultados obtenidos, ordeados cronológicamente en base a su obtención, con la estructura formal de artículo científico.

Los tres primeros ya publicados en revistas internacionales de impacto, con categoría Q1 y Q2. El cuarto, enviado y en fase de revisión para su publicación.

- Resultado 1º:

Un método fotogramétrico interactivo para evaluar la calidad de la cuerna del ciervo usando un sistema de diseño asistido por ordenador paramétrico.

- Resultado 2º:

Un nuevo método para cuantificar la asimetría de elementos biológicos mediante una técnica fotogramétrica que utiliza un sistema paramétrico de diseño asistido por ordenador.

- Resultado 3º:

Una nueva metodología, basada en un sistema CAD, para evaluar las asimetrías parciales y globales de las cuernas de ciervo, a partir de datos de evaluación de la calidad cinegética.

- Resultado 4º:

Tres tecnologías de ingeniería gráfica 3D para la caracterización de la cuerna del gamo en enfoques aplicados a ecología y gestión. (*en revisión*).

**RESULTADO 1º:****UN MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO INTERACTIVO PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LA CUERNA DEL CIERVO USANDO UN SISTEMA DE DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR PARAMÉTRICO.****Resumen.**

En el ámbito de la evaluación de cuernas de ciervo para la homologación de trofeos, así como en la obtención de bases de datos biométricas para su posterior análisis en el campo de la Morfometría Geométrica, tradicionalmente se han utilizado diferentes herramientas biométricas lineales. En este estudio hemos utilizado dos conjuntos de cornamentas de 29 ciervos ibéricos (*Cervus elaphus hispanicus*) para desarrollar y establecer una nueva técnica fotogramétrica que crea el modelo-3D de la cornamenta utilizando un CAD 3D paramétrico. Este método sencillo y fiable para la homologación de trofeos de caza de ciervos se comparó con los otros dos métodos de medición de cornamentas más utilizados, la cinta métrica tradicional y la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMM o CMA).

En primer lugar, se generó un conjunto de curvas paramétricas 3D dentro del sistema CAD 3D. Estas curvas representan las líneas reales para crear el modelo-3D y para ser medidas con el fin de evaluar la calidad de la cornamenta. A continuación, las líneas se generaron a partir de un conjunto de puntos obtenidos según un procedimiento de trazado de rayos 3D, similar al sistema de proyección utilizado en fotografía. La ventaja de este innovador método fotogramétrico es la utilización de sólo dos fotografías para obtener tanto el modelo-3D como las dimensiones necesarias para la evaluación de la cornamenta. Por último, para evaluar las diferencias entre los tres métodos se realizó un procedimiento para comparar las longitudes y la evaluación de la cornamenta como trofeo de caza. Los tres métodos mostraron una fiabilidad similar, aunque el proceso fotogramétrico mediante el sistema CAD 3D fue mucho más rápido y funcional que los métodos tradicionales de la cinta métrica y del brazo articulado. Dado que este método sólo requiere dos fotografías por ejemplar, hace posible el estudio de un alto porcentaje de cuernas en el campo. Por otro lado, el método fotogramétrico tiene la ventaja de obtener un conjunto de datos cuya valoración es un tanto subjetiva, como el color de la cornamenta, la forma de las puntas, la rugosidad de la superficie de la cuerna, etc.

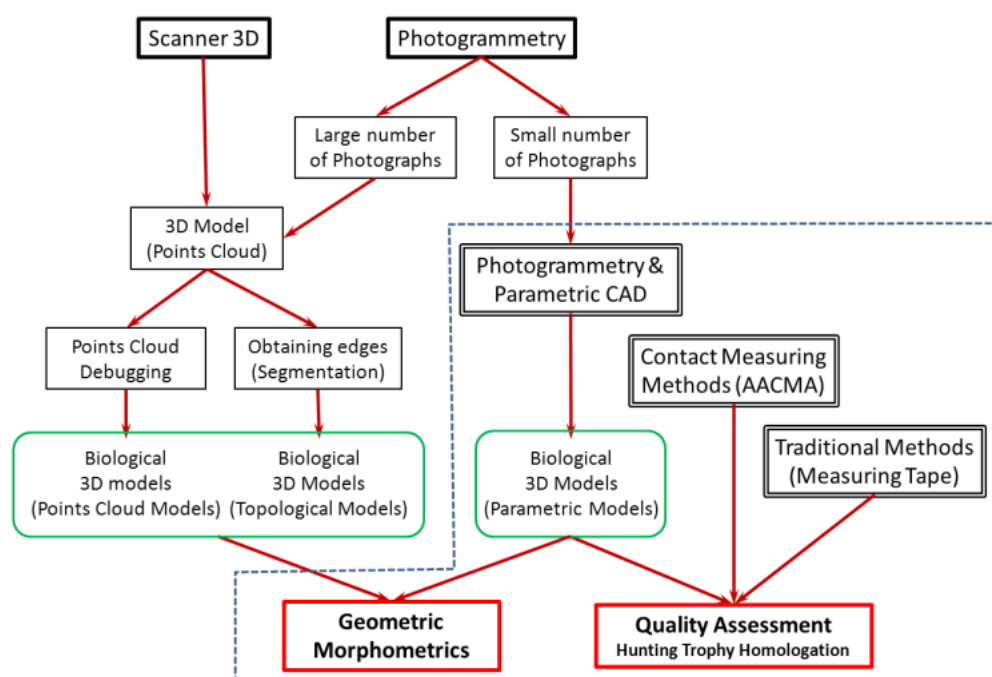
Este nuevo método fotogramétrico se ha utilizado con éxito en el ámbito de la biometría, pero podría convertirse en un método de uso más extendido en éste y otros campos por su facilidad de manejo, rapidez y precisión en la recogida de datos.

**Palabras clave:**

Fotogrametría. Modelado paramétrico 3D. Puntos de referencia. Cuerna de ciervo. Aplicación ecológica. Puntos homólogos.

**1. Introducción**

Desde el punto de vista cinegético existe un creciente interés en la valoración de las cornamentas y en su homologación como trofeos, así como en la obtención de bases de datos biométricas para su posterior análisis en el campo de la Morfometría Geométrica. Para llevar a cabo esta tarea son necesarias nuevas herramientas y metodologías que faciliten y aceleren la recogida y tratamiento de datos geométricos. La (Fig. 65) muestra los principales métodos utilizados en el campo de la biometría para evaluar la calidad de la cornamenta. Aunque la mayoría de las herramientas utilizan métodos de medición tradicionales y de medición por contacto, recientemente se han utilizado en biología nuevas técnicas interesantes como el escáner-3D y la fotogrametría, principalmente en el campo de la creación de modelos-3D biológicos. Además, los modelos-3D también pueden medirse para obtener dimensiones geométricas. Estas últimas tecnologías de medición aplicadas a elementos biológicos proporcionan resultados de gran precisión.



**Fig. 65.** Los principales métodos utilizados para obtener modelos-3D en el campo de la Morfometría Geométrica y la evaluación de la calidad de la cornamenta. Hemos marcado el ámbito y los métodos utilizados en este estudio.

Las máquinas de medición por coordenadas de brazos articulados (AACMM o CMA) (*Coordinate Machine Arm*) son los instrumentos de medición por contacto más utilizados en los estudios biológicos tridimensionales para la obtención de coordenadas de puntos en la superficie del

elemento medido. Estos brazos articulados funcionan a partir de la adquisición de la localización tridimensional de puntos de referencia (puntos homólogos situados en posiciones similares sobre diferentes elementos biológicos) con respecto a un sistema de referencia. Además, el CMA es un método muy preciso y fácil de aplicar en el laboratorio. En el campo de la Morfometría Geométrica se ha utilizado para estudiar huesos especialmente complejos de simios y humanos, como por ejemplo huesos temporales (Lockwood *et al.* 2002; Harvati 2003), mandíbulas (Nicholson y Harvati 2006), o regiones craneofaciales (Kimmerle *et al.* 2008).

Sin embargo, el escáner-3D es actualmente otra técnica que realiza una digitalización de coordenadas muy eficaz, la más precisa a la hora de recoger una enorme cantidad de puntos en las superficies de los elementos medidos. Se ha utilizado en estudios como la morfometría biométrica y geométrica (Hennessy y Stringer 2002), la adquisición de superficies de la geometría del cuerpo humano (Fortin *et al.* 2007) y los estudios de la forma humana vinculados a la industria para la creación de maniqués (Wang 2005). De hecho, la industria es el ámbito que más utiliza estas técnicas, principalmente en el campo de la Ingeniería Inversa (Yu y Peng 2007; Beccari *et al.* 2010; Korosec *et al.* 2010; Panchetti *et al.* 2010), el diseño y rediseño de productos (Ye *et al.* 2008; Goyal *et al.* 2012) y las instalaciones de edificios (Brilakis *et al.* 2010, 2011).

No obstante, tanto el método escáner-3D como el CMA sólo son reproducibles en términos de precisión en laboratorios o entornos controlados. Se trata de un inconveniente de estos métodos, ya que los estudios de la cuerna del ciervo deben realizarse normalmente fuera del laboratorio y requieren poco tiempo por cuerna. Los datos suelen obtenerse en el campo o en una jornada de caza, el número de ejemplares suele ser elevado y las condiciones difíciles. Ambos métodos no son adecuados en el campo.

Otro método interesante es la fotogrametría. Muchos estudios han utilizado la fotogrametría para obtener modelos-3D de forma similar al uso de escáneres-3D. Esto se consigue generando un gran número de fotografías del objeto, tomadas desde diferentes lugares denominados "puntos de vista". Se traza un rayo desde cada punto de vista hasta los puntos del objeto estudiado. Los rayos obtenidos desde distintos puntos de vista se intersecan para producir las coordenadas tridimensionales de los puntos estudiados. Mediante la intersección matemática de rayos convergentes en el espacio, puede determinarse la ubicación precisa de los puntos.

Algunas de las ventajas de la fotogrametría son su flexibilidad, su bajo coste y su reducido equipamiento, así como el hecho de que prácticamente no existen límites en cuanto al tamaño y la complejidad de los objetos medidos. Varios estudios han constatado que la fotogrametría es capaz de obtener resultados similares a los métodos de contacto o de escaneo láser en términos de precisión, primero en el campo de la topografía del terreno, donde se aplicó inicialmente la fotogrametría (Baltsavias 1999; Liu *et al.* 2012), y después para otros elementos como los edificios (Alves y Bartolo 2006; Ordóñez *et al.* 2008; Golparvar-Fard *et al.* 2011; Bhatla *et al.*

2012), estructuras metálicas y barcos (Koelman 2010; Sánchez *et al.* 2012; Veldhuis y Vosselman 1998) y objetos más pequeños (Aguilar *et al.* 2005; Zitova y Flusser 2003; Ramos y Santos 2011). En el campo de la medicina se ha utilizado en aplicaciones dentales (Shigeta y 2013).

Habitualmente, la información proporcionada por la Fotogrametría consiste en puntos agrupados, que reproducen la forma de los elementos estudiados. A partir de puntos agrupados es posible crear reconstrucciones virtuales de elementos biológicos con diferentes fines (Chin-Hung *et al.* 2007; Fortin *et al.* 2007; Shigeta *et al.* 2013). Debido a la gran cantidad de información obtenida, el tratamiento de los datos puede resultar difícil. Esta cantidad de información hace necesario realizar una selección de los datos, eliminando los puntos duplicados, así como los situados en zonas bien definidas, y reduciendo los puntos redundantes o sobrantes (Golparvar-Fard *et al.* 2011; Ramos y Santos, 2011). Por otro lado, el proceso de digitalización suele ser incompleto, ya que hay zonas que no son capturadas, resultando en una falta de información en las superficies obtenidas. Estos fallos deben ser corregidos posteriormente mediante el uso de otras técnicas. Pernot *et al.* 2006 utilizaron un modelo mecánico para simular la minimización de la variación de curvatura. Yan *et al.* 2006 crearon un algoritmo para rellenar agujeros de  $n$  lados con parches NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) que interpolan las curvas límite. Wang y Oliveira 2007 presentaron un algoritmo basado en mínimos cuadrados móviles e interpolaban tanto la geometría como la información de sombreado. Panchetti *et al.* 2010 rellenaron estos agujeros combinando la información geométrica disponible sobre los alrededores de los agujeros y la información contenida en una imagen del objeto real.

Además, los modelos tridimensionales obtenidos a partir de puntos fotogramétricos o escaneados no suelen proporcionar la información exacta necesaria para el uso de técnicas biométricas y de morfometría geométrica. Por lo tanto, de los miles de puntos digitalizados sólo se necesitan los que coinciden con puntos de referencia. El conjunto de puntos de referencia necesarios para el estudio geométrico de la cornamenta es pequeño en comparación con el número de puntos agrupados, pero por desgracia, la aproximación entre los puntos digitalizados y los puntos de referencia suele ser baja. Para resolver este problema, se utilizan técnicas de segmentación basadas en la identificación de elementos significativos como bordes, vértices o diferentes lados del modelo-3D. El resultado son modelos-3D de topología reconocible de los que se pueden extraer puntos de referencia (Zitova y Flusser 2003; Wu y Yu 2005; Demarsin *et al.* 2007; Wang y Oliveira 2007; Goyal *et al.* 2012). En el caso de elementos con formas irregulares, como algunas estructuras biológicas, podrían aparecer dificultades adicionales.

Recientemente se han utilizado varias técnicas y herramientas comerciales basadas en la creación de redes de contornos aparentes para procesar las fotografías. Los modelos-3D obtenidos son prometedores, pero sólo resultan útiles cuando no se requiere una gran precisión

y los objetos no son complejos (Baumberg *et al.* 2005; Remondino y El-Hakim 2006; Prakoonwit y Benjamin 2007).

Otro hecho a tener en cuenta es que la captura de datos morfológicos de la cornamenta requiere tomar muchas fotografías, pero las situaciones reales no suelen permitir tomar más de dos o tres fotos por ejemplar. Algunos autores abordaron métodos que podrían reducir el número de fotografías. (Rodríguez *et al.* 2008) propusieron métodos basados en tomar pocas fotografías para obtener distancias medidas en diferentes posiciones. Veldhuis y Vosselman 1998 y Ordóñez *et al.* 2008 utilizaron un número reducido de fotografías, basándose en restricciones geométricas conocidas de los objetos medidos, es decir, relaciones entre líneas rectas (coplanaridad, paralelismo, perpendicularidad, simetría y distancia). Styliadis 2008 estudió el uso de una sola imagen para reconstruir objetos.

Para obtener la información geométrica óptima de los modelos reales utilizando un número reducido de fotografías, es necesario tener en cuenta las singularidades geométricas de los modelos. En nuestro caso, se conoce la morfología normal de la forma de la cornamenta, ya que siempre se basa en un tronco con ramas. Teniendo esto en cuenta, el número de fotografías necesarias para generar los modelos-3D de las cuernas podría reducirse considerablemente.

Sin duda, en la práctica el método más versátil y preciso para estudiar la morfología de la cornamenta utilizando unos pocos puntos de referencia y un número reducido de fotografías por ejemplar ha sido la recreación de la escena fotogramétrica de la cuerna en un entorno de diseño asistido por ordenador (CAD) en 3D. La técnica de modelado CAD 3D se ha utilizado ampliamente para crear piezas anatómicas humanas (modelado bio-CAD) y obtener huesos y órganos para la fabricación de moldes y prototipos (Sun *et al.* 2005; Kurazume *et al.* 2009), o en la planificación quirúrgica y la evaluación de patologías óseas (Minns *et al.* 2003). Fortin *et al.* 2007 desarrollaron un diseño y ajuste personalizados de corsés vertebrales mediante la visualización en 3D de la superficie externa del tronco con las estructuras óseas subyacentes en 3D. También se han utilizado modelos CAD paramétricos en el diseño de componentes corporales para sustituir elementos lesionados (Li *et al.* 2009). Esta tecnología también ha demostrado su utilidad para el modelado informático de cuernas. En concreto, se han creado con éxito modelos virtuales de cuernas reales para calcular su densidad, en sustitución del método menos práctico basado en el principio de Arquímedes (Rubio-Paramio *et al.* 2012).

Se pueden establecer nuevos procedimientos para mejorar la obtención de dimensiones geométricas y la creación de modelos-3D mediante sistemas CAD paramétricos. El método propuesto en el presente estudio desarrolla técnicas proyectivas de fotogrametría dentro de un CAD 3D paramétrico. Se reproduce una escena tridimensional paramétrica virtual, atravesada por rayos. Esta escena es fácilmente modificable a un nuevo modelo gracias a la parametrización del trazado de rayos vinculado a las fotografías.

Por ello, el principal objetivo del estudio ha sido desarrollar y aplicar un método fotogramétrico, basado en tecnología CAD 3D paramétrica, que sólo requiere dos fotografías por ejemplar. El reducido número de fotografías permite el estudio de un alto porcentaje de cornamentas.

Todos los métodos descritos anteriormente, ampliamente utilizados para la creación de modelos-3D, tanto de coste medio-alto (escáner óptico o láser) como de bajo coste (fotogrametría multiimagen y escáner láser basado en triangulación) no permiten obtener resultados en los escenarios habituales en los que se analizan las poblaciones de ciervos (en jornadas de caza o en campo, en condiciones muy difíciles y con sólo unos segundos para obtener los datos por ejemplar). Estos métodos sólo obtienen resultados satisfactorios trabajando con muestras en localizaciones en escenarios muy concretos y condiciones muy cuidadas como talleres de taxidermia, laboratorios, etc.

La nueva técnica propuesta en este trabajo, denominada 'Método de Medición Fotogramétrica Interactiva' (IPhMM), ha demostrado ser una herramienta versátil para obtener los datos geométricos relevantes necesarios de forma instantánea (sólo se requieren dos fotografías por ejemplar) y en condiciones desfavorables. Además, el procesamiento posterior no requiere un tiempo mayor que el que precisan otros métodos. Este novedoso e innovador método podrá ser de gran utilidad al permitir estudiar grandes poblaciones de ciervos con resultados muy satisfactorios y con la precisión requerida.

## **2. Materiales y Métodos**

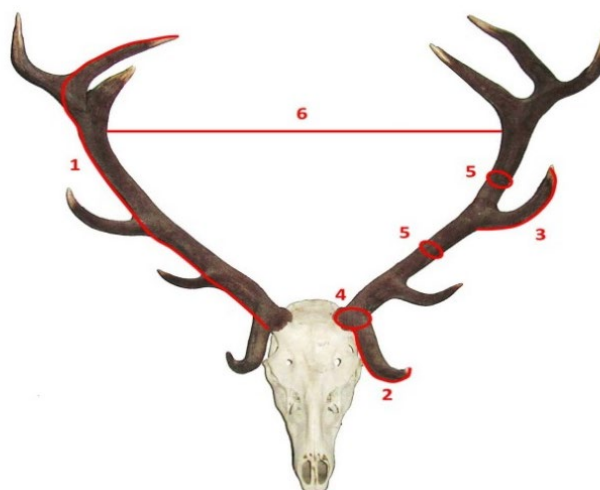
Para validar el IPhMM, se estudió una muestra de una población de ciervos rojos ibéricos (*Cervus elaphus hispanicus*) del sur de España con el fin de obtener una metodología valiosa para evaluar la información geométrica de sus cuernas y la calidad de los animales como trofeos de caza de forma sencilla y en condiciones de campo.

### **2.1. Área de estudio y Muestra**

Se utilizó una muestra de dos conjuntos de 29 trofeos de cornamenta de ciervo ibérico, de diferentes tamaños y número de puntas, recogidos durante las tres últimas temporadas de caza en diferentes fincas de caza mayor de Sierra Morena (Andalucía, España). El primer conjunto de 14 trofeos de cornamenta se midió utilizando los tres métodos: cinta métrica, CMA e IPhMM, mientras que los datos del segundo conjunto de 15 trofeos de cornamenta procedían de dos sesiones de homologación oficial y se midieron utilizando cinta métrica e IPhMM. Las mediciones fueron realizadas por el personal profesional de la sesión de homologación.

## 2.2. Datos geométricos de la cuerna para su homologación como trofeo de caza

Tradicionalmente, la homologación de trofeos se ha basado en las mediciones y asignación de puntuación de las cuernas según las pautas descritas en los protocolos de caza (I.A.C.P.C. 2015; Llanes-Borrero 2013). En el caso de las cuernas muestreadas, se han tenido en cuenta los siguientes elementos (Fig. 66): la longitud de la vara central, la longitud de las puntas luchaderas, la longitud de las puntas centrales o candiles, el perímetro de las rosetas, los perímetros de determinadas secciones de la cuerna y la máxima separación interna de las cuernas. Sin embargo, hay otros elementos cuantitativos y cualitativos de la cuerna cuya valoración es subjetiva, como el color de la cuerna, el color de las puntas y su forma, la rugosidad de la superficie de la cuerna (presencia de perlas), el número total de puntas, la longitud de la corona y su número de puntas, la longitud de las puntas contraluchaderas y la masa total de la cuerna.



**Fig. 66.** Elementos a medir en la homologación de trofeos: 1: Longitud de la vara principal, 2: Longitud de las puntas luchaderas, 3: Longitud de las puntas candiles, 4: Perímetro de las rosetas, 5: Perímetros de determinadas secciones de la cuerna. 6: Máxima separación interna entre las dos ramas.

## 2.3. Equipo utilizado: hardware y software

Las fotografías correspondientes se tomaron con una cámara digital *PowerShot SX210 IS* de mano, con una resolución de 4320 x 3240 píxeles. El sistema de CAD paramétrico variacional utilizado fue *SolidWorks* de *Dassault Systems*. No se necesitó un ordenador especial para procesar las fotografías con *SolidWorks*. Sin embargo, era necesario disponer de una tarjeta gráfica de gama media-alta para un mejor análisis de las fotografías. En nuestro caso, utilizamos una *NVIDIA GeForce GTX 750* de 1 GB. La medición de la cornamenta se realizó utilizando tanto métodos tradicionales (cinta métrica) como una máquina de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMM o CMA) modelo *MicroScribe G2X*, con diámetro de esfera de trabajo de 50'' y una precisión de 0,009'' (0,23 mm).

## 2.4. Método fotogramétrico y tecnología 3D CAD

La fotogrametría utiliza fotografías como medio fundamental de medición. A partir de al menos dos localizaciones diferentes o "líneas de visión", se puede determinar la ubicación precisa de un punto mediante la intersección matemática de líneas convergentes en el espacio. La determinación de las coordenadas 3D se basa en el punto estudiado, el centro proyectivo de la cámara y el punto de la imagen situado sobre una línea recta. La determinación de la localización de un punto se obtiene mediante la intersección de dos o más rectas. Por lo tanto, cada punto debe aparecer en al menos dos fotografías (Fig. 67).

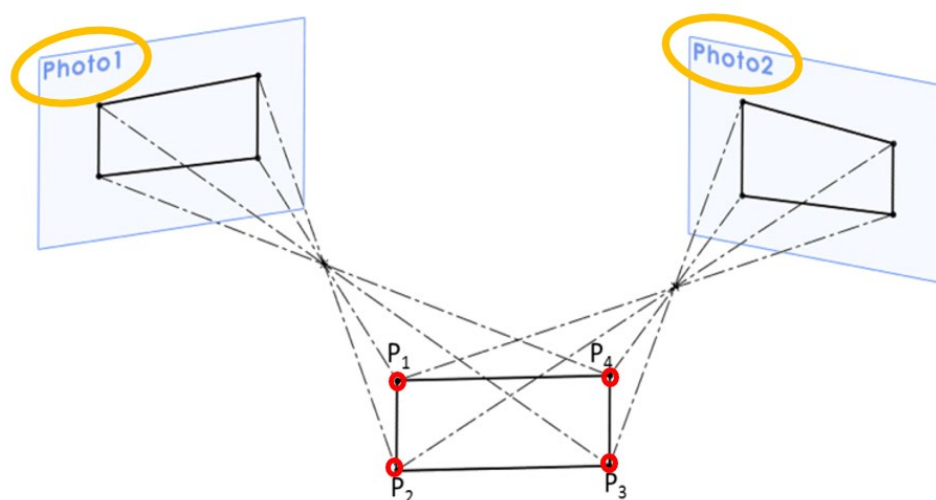


Fig. 67. Puntos espaciales ( $P_i$ ) y sus rayos a partir de dos planos fotográficos (Foto 1, Foto 2).

La relación entre las coordenadas de un punto,  $\mathbf{X}_A$ , y las de un punto imagen,  $\mathbf{x}_a$ , viene dada por la ecuación vectorial (Ec. 8):

$$\mathbf{X}_A = \mathbf{X}_0 - \mu \mathbf{R}^t \mathbf{x}_a \quad (\text{Ec. 8})$$

$\mathbf{X}_0$  son las coordenadas del centro de perspectiva 0 (foco del objetivo de la cámara),  $\mu$  es un escalar y  $\mathbf{R}^t$  es la transpuesta de la matriz de rotación  $\mathbf{R}$ , cuyos elementos son funciones de los ángulos de rotación de la cámara. Si se conocen la posición de la cámara  $\mathbf{X}_0$  y los ángulos de rotación, para una sola foto hay tres ecuaciones y cuatro incógnitas ( $\mu$  y las tres componentes de  $\mathbf{X}_A$ ).

Este sistema de ecuaciones no se puede resolver, pero si hay dos cámaras, como se muestra en la (Fig. 68), el nuevo sistema se puede resolver porque ahora hay cinco incógnitas (dos valores diferentes de  $\mu$  y  $\mathbf{X}_A$ ) y seis ecuaciones.

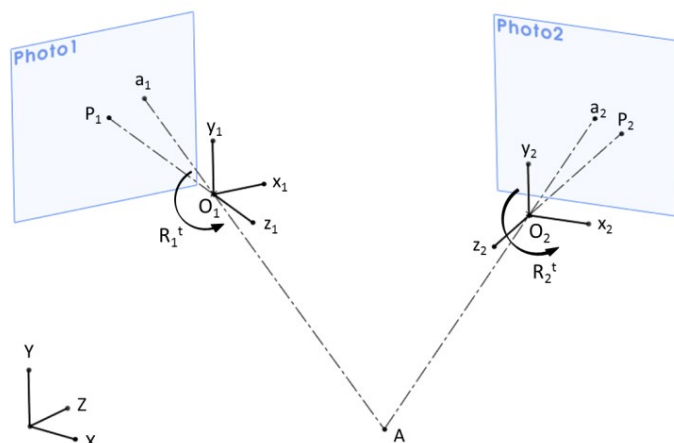


Fig. 68. Coordenadas en el caso de dos cámaras.

Sin embargo, en nuestro caso no se conocen las posiciones de la cámara  $X_0$  ni los ángulos de rotación, por lo que la posición y la orientación de la cámara deben tratarse como incógnitas. Hay seis ecuaciones y diecisiete incógnitas (los tres componentes de  $X_A$ , dos valores de  $\mu$ , dos valores de los tres componentes de  $X_A$  y dos valores de los tres componentes de  $X_0$ ). No obstante, el sistema de ecuaciones queda sobredeterminado al añadir puntos conocidos. Con al menos cuatro puntos conocidos (puntos de referencia), el sistema de ecuaciones puede resolverse.

El método fotogramétrico interactivo propuesto (IPhMM) consiste en la representación de todo el trazado de rayos de la fotografía como una estructura lineal paramétrica en un entorno CAD virtual tridimensional. Para llevarlo a cabo, es necesario tomar dos fotografías desde diferentes perspectivas de la estructura que permitan la localización de puntos comunes en ambas. Este sistema se basa en el hecho de que en las dos fotografías se identifican puntos idénticos (puntos de referencia).

Por otra parte, es posible definir homologías geométricas en el campo de la fotografía. En el plano de la fotografía se reproduce la imagen real, reducida en escala e invertida (Fig. 69). Las sucesivas ampliaciones o reducciones homológicas de la fotografía pueden situarse en planos paralelos (Fig. 4).

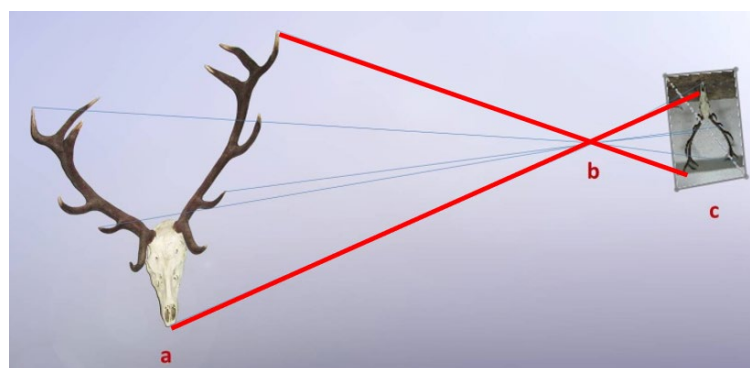
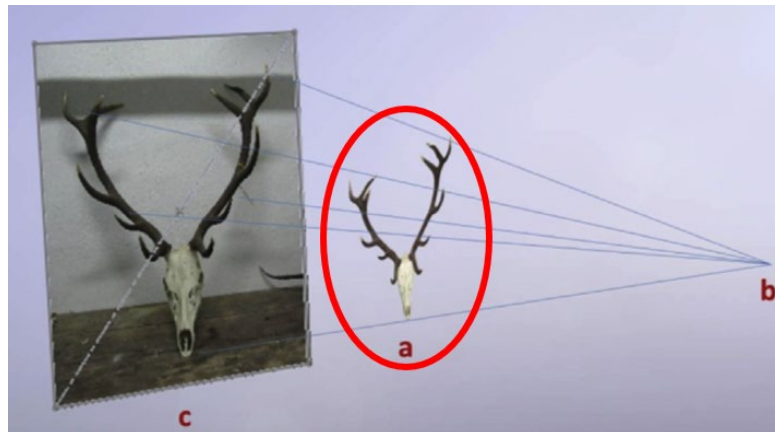


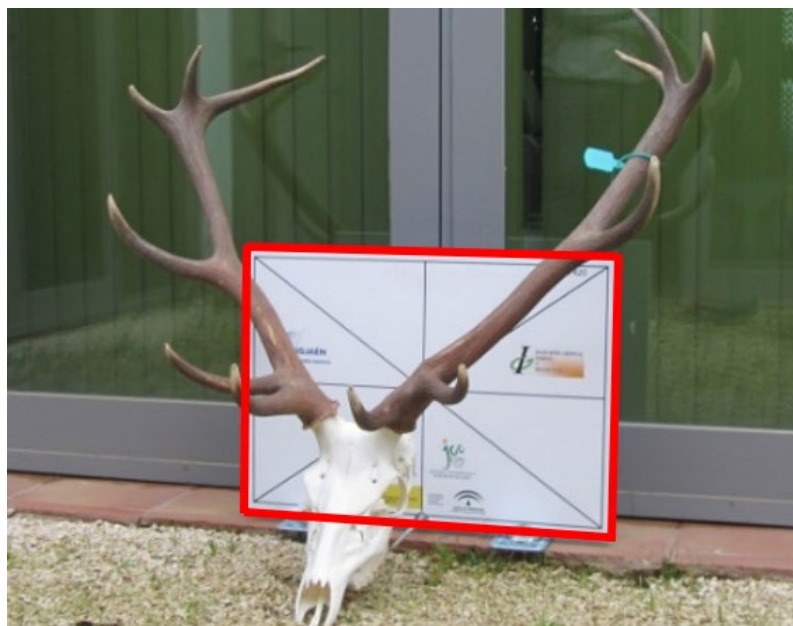
Fig. 69. Rayos de incidencia sobre el plano de una fotografía. a) Objeto real; b) posición del objetivo de la cámara; y c) fotografía (reducida en escala e invertida).

El centro de homología se sitúa en la posición del objetivo de la cámara. Sin embargo, también es posible obtener imágenes homólogas no invertidas de la fotografía. Las imágenes no invertidas aparecerían en planos situados entre la cámara y el objeto real o detrás del objeto real. Nosotros hemos preferido utilizar una imagen no invertida situada detrás del objeto real con un factor de escala acorde con el tamaño del objeto (**Fig. 70**).



**Fig. 70.** El objeto (a) se sitúa entre el centro de homología (b) y una imagen fotográfica no invertida (c). La imagen fotográfica se situará detrás del objeto y será mayor que éste.

Cuando se utiliza el método fotogramétrico, es necesario incluir dentro de cada escena fotográfica un elemento de geometría y tamaño conocidos como referencia métrica. En este caso se utilizó un panel rectangular de dimensiones DIN A2, 594 x 420 mm, cuyas cuatro esquinas debían aparecer claramente en la fotografía (**Fig. 71**).



**Fig. 71.** Referencia métrica de dimensiones conocidas detrás de la cornamenta (panel rectangular de 594 x 420 mm).

Estos cuatro puntos nos permitirán establecer la posición exacta del punto de vista de cada fotografía (ubicación de la cámara) de la siguiente manera:

Dentro de una escena virtual construida en el sistema CAD 3D paramétrico, se traza una línea  $s$  perpendicular al plano de la fotografía desde el centro de la misma (Fig. 72-a). Esta línea terminará en el punto de vista  $V$ , origen de la radiación (centro de homología) que afecta a la fotografía (Fig. 72-b). En este momento,  $V$  aún no se encuentra en la posición correcta a lo largo del eje  $s$ .

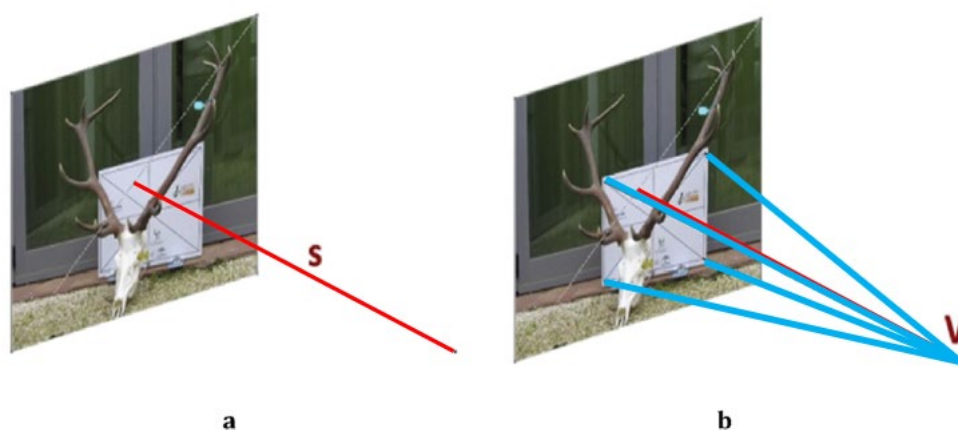
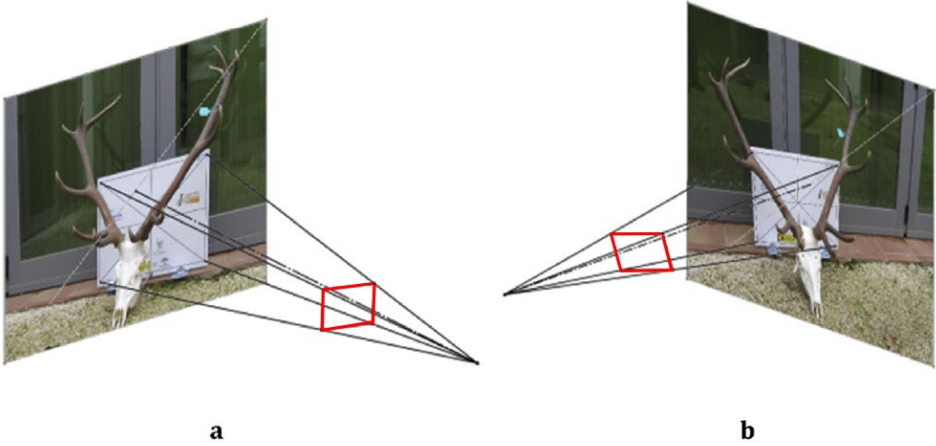


Fig. 72. a) Zona rectangular de la fotografía y línea  $s$  perpendicular al plano de la fotografía;  
b) Rayos piramidales para determinar el centro de homología  $V$ .

Una pirámide se construye sobre una base poligonal de cuatro lados, que están incluidos en el plano fotográfico. Su eje es la línea  $s$  y su vértice el punto de vista  $V$ . Además, la pirámide tiene cuatro aristas laterales que se unen en el vértice del eje perpendicular descrito anteriormente. Los cuatro vértices de la base de la pirámide coinciden respectivamente con la visualización en la imagen de los cuatro vértices de la referencia métrica rectangular utilizada. Sin embargo, en este momento todavía no se ha determinado el punto de vista de la fotografía o la posición  $V$  del vértice de la pirámide y la altura de la pirámide no es fija (Fig. 72-b). Para determinar la posición exacta del origen de la radiación, es necesario hacer coincidir los bordes laterales de la pirámide con los vértices de un rectángulo que mida lo mismo que la referencia métrica (594 x 420 mm). Entonces, como el sistema CAD es paramétrico variacional, el vértice de la pirámide se desplaza a lo largo de la línea perpendicular  $s$  y alcanza una posición fija, resolviendo el problema geométrico (Fig. 73-a). Por lo tanto, la posición del vértice corresponde al lugar exacto en el que se tomó la foto, es decir, la posición de la cámara. Todo el proceso se repite para una segunda fotografía creando una nueva pirámide vinculada al plano de la fotografía. En consecuencia, es posible obtener la posición de una segunda cámara (Fig. 73-b).

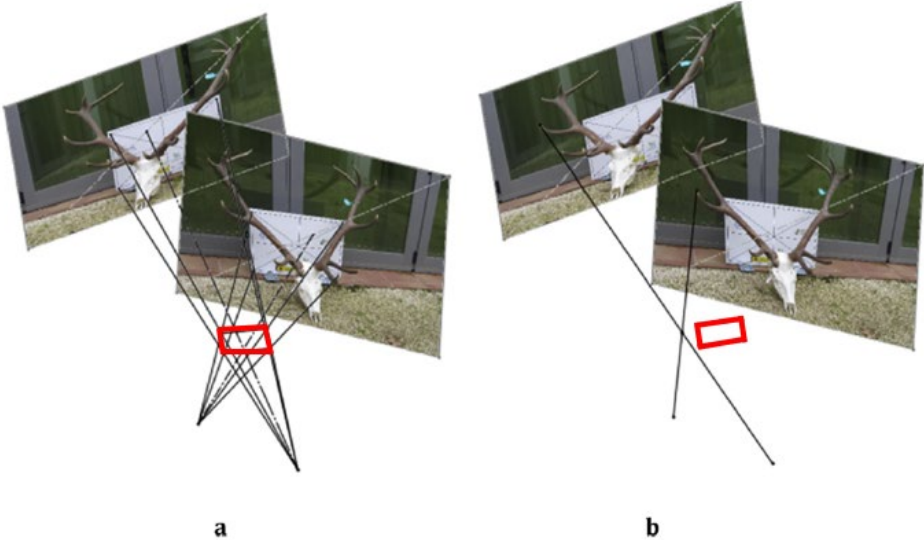


**Fig. 73.** Referencia métrica, en verdadera magnitud, dentro de la pirámide.

a) Centro de homología de la primera fotografía; b) Centro de homología de la segunda fotografía.

En este punto, la misma escena virtual se representa desde dos puntos de vista diferentes con dos haces de rayos que parten de cada posición de la cámara, atraviesan el objeto real y afectan al plano de cada fotografía. Además, existe un elemento común a ambos haces de rayos en el espacio: la referencia métrica rectangular.

Entonces se crea un nuevo espacio tridimensional en el que las dos radiaciones que afectan a la imagen coinciden con los dos elementos de referencia contenidos en los bordes laterales de las pirámides correspondientes (Fig. 74-a). Así, un sistema formado por dos trazados de rayos proyectivos puede representar completamente la escena real.



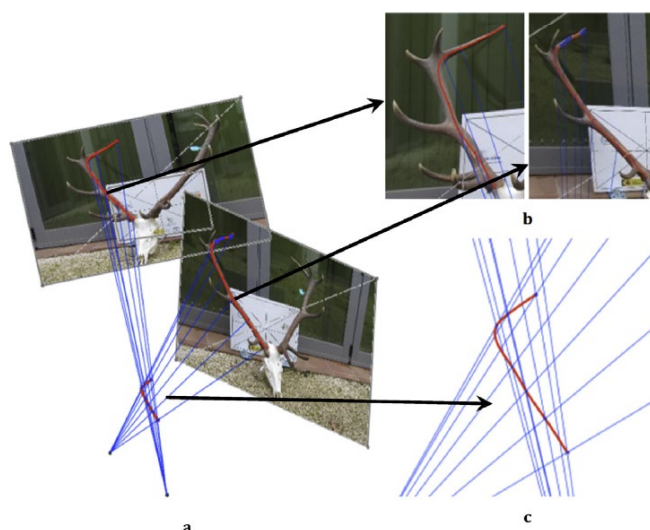
**Fig. 74.** a) Coincidencia del rectángulo de referencia en las dos fotografías.

b) Obtener la localización espacial de un elemento en la intersección de las radiaciones del elemento tomadas en las dos fotografías.

El siguiente paso del proceso consiste en emparejar los rayos procedentes de los dos orígenes de la radiación que alcanzan el plano de su fotografía correspondiente. El punto en el que el rayo

toca la fotografía se empareja con un elemento fotografiado. Se hace lo mismo con el rayo de la segunda fotografía hasta que coincide con el elemento fotografiado correspondiente. El punto de intersección de ambos rayos representa la posición real del elemento en el espacio (**Fig. 74-b**).

La coincidencia de más rayos de luz permite obtener distancias reales entre los puntos visibles de ambas fotografías. Un ejemplo de ello es que una sucesión de puntos situados en la vara central permite obtener tanto la posición real de la curva como su longitud (**Fig. 75-a-b-c**).



**Fig. 75.** Obtención de la posición real de una serie de puntos y de la línea de contorno que pasa por ellos.

- a) Trazado de rayos desde los dos centros de homología de ambas fotografías;
- b) Localización de los puntos de las curvas en las fotografías;
- c) Se obtiene la curva en verdadera magnitud que pasa por los puntos de intersección de los dos trazados de rayos.

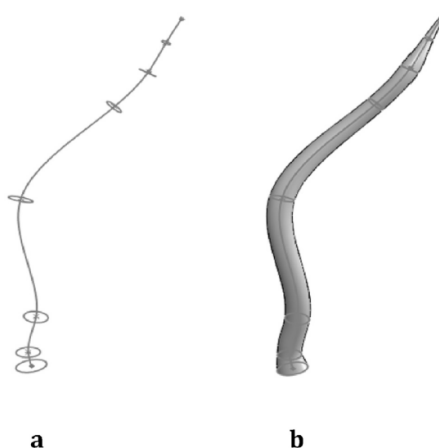
Los diferentes puntos se unen mediante curvas spline caracterizadas por adaptarse a su posición, y su longitud es fácilmente calculada por el sistema. Para medir la cuerna, se traza la spline que pasa por una cadena de puntos de la superficie de la cuerna. Los puntos se sitúan a lo largo de la trayectoria recomendada por el procedimiento oficial de homologación ([I.A.C.P.C. 2015](#); [Llanes-Borrero 2013](#)).

Realizar este procedimiento mediante un sistema CAD paramétrico variacional permite, además, modelar fácilmente las cuernas en 3D porque son geoméricamente equivalentes.

Para obtener el modelo-3D, utilizamos el método de modelado de volumen basado en la forma de árbol ramificado de la cuerna de ciervo desarrollado por [Rubio-Paramio et al. 2012](#). Se localiza un conjunto de puntos en los puntos de unión de cada rama a lo largo del eje central del árbol principal de la cuerna. Los puntos se obtienen de nuevo de la misma manera mediante la intersección de los dos rayos de estos puntos, desde el centro de homología a la proyección de

estos puntos en el plano de cada fotografía. La vara central de la cuerna se representa mediante una curva de interpolación B-spline.

Estos puntos que describen el eje central son los centros de un conjunto de círculos (**Fig. 76-a**). Conteniendo a cada punto del eje, se sitúa un plano, perpendicular al eje. Se crea un círculo en este punto del plano, como sección transversal del eje principal. Para obtener el modelo-3D de la vara central, se modela un volumen barrido que pasa por todos los círculos a lo largo de la estructura axial (**Fig. 76-b**).

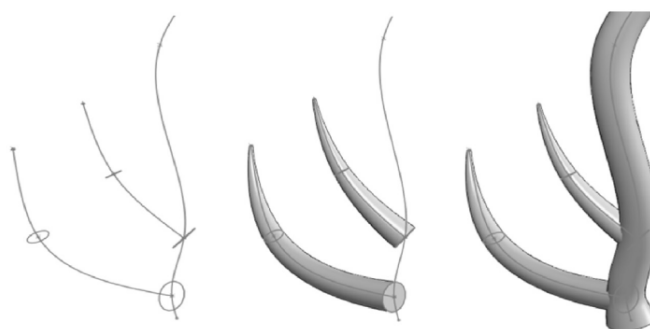


**Fig. 76.** a) estructura axial de la vara central de la cuerna que pasa por un conjunto de puntos.

Estos puntos son los centros de un conjunto de círculos.

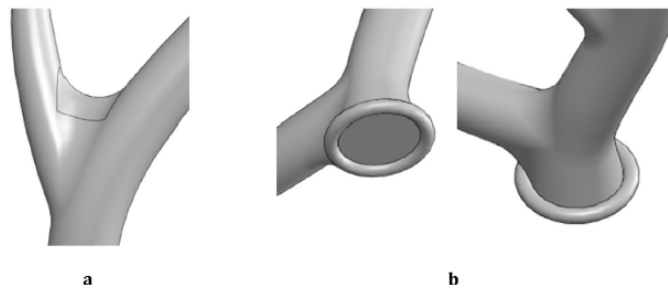
b) modelo-3D de la vara central de la cuerna generada mediante un volumen barrido que pasa por todos los círculos.

En una segunda etapa, las puntas se modelan de forma similar. Cada punta debe modelarse mediante un nuevo eje axial que pase por tres puntos: en la unión, en el centro y en el extremo de la punta. Para cada punta se crean tres secciones transversales formadas por tres círculos. Un nuevo volumen barrido que pasa por estos círculos permite representar las puntas (**Fig. 77**).



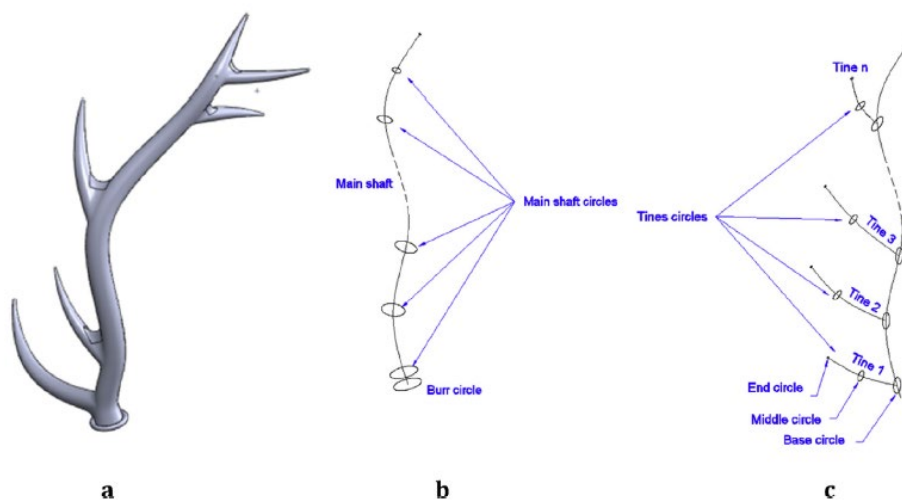
**Fig. 77.** Creación de las puntas de la cuerna mediante nuevos ejes axiales, círculos y volúmenes de barrido.

Un tercer proceso alisa las superficies y bisela los bordes afilados. Las ramas modeladas parecen más parecidas a las reales (**Fig. 78-a**).



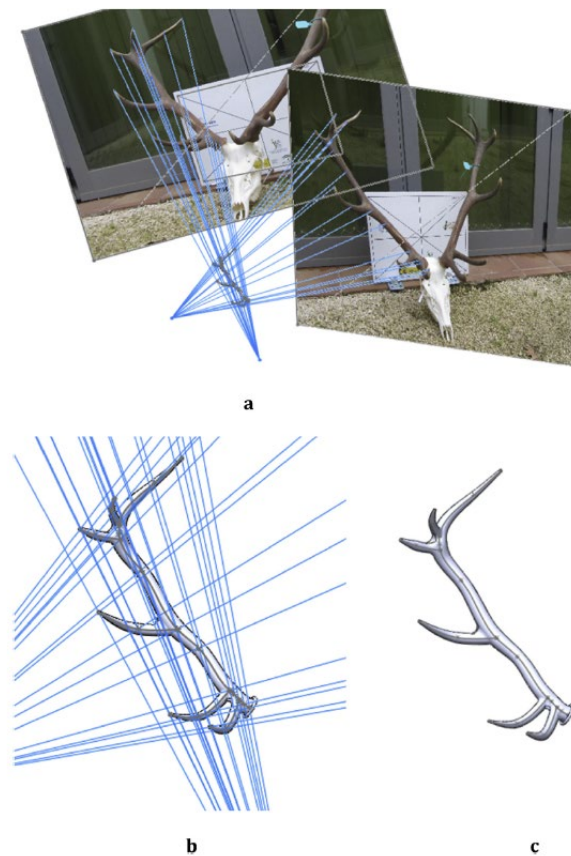
**Fig. 78.** a) El alisado de las superficies en la zona de arranque de las puntas.  
b) La roseta en el punto de arranque de la vara central.

El último elemento de la cornamenta es la roseta, el anillo grueso situado en la zona inicial de la cuerna. Se modela mediante un toroide cuyo centro es el primer punto del eje de la vara central (**Fig. 78-b**). En la (**Fig. 79-a**) se muestra un modelo-3D completo de la cuerna. Todos los elementos geométricos utilizados para construir el modelo-3D se muestran en la (**Fig. 79-b**).



**Fig. 79.** a) Modelo-3D completo de la cuerna.  
b) Eje axial y círculos transversales de la vara central.  
c) Ejes y círculos transversales de las puntas.

El conjunto de puntos necesarios para crear estos elementos geométricos se localiza con precisión realizando un escenario de trazado de rayos (**Fig. 80-a**). Para obtener cada punto se cruzan dos rayos (**Fig. 80-b**). El modelo-3D se construye una vez localizado el conjunto de puntos, siguiendo el proceso de creación del modelo-3D descrito anteriormente (**Fig. 80-c**). Se crea rápidamente un modelo virtual geoméricamente equivalente a una cuerna real. La (**Fig. 80-c**) muestra el modelo-3D de una cuerna obtenido con este método.



**Fig. 80.** a) Escenografía de trazado de rayos para obtener la ubicación de los puntos relevantes para la creación del modelo-3D.  
 b) Creación del modelo-3D a partir del conjunto de puntos.  
 c) Modelo-3D que oculta el trazado de rayos.

Para evaluar la calidad de los trofeos, se supone que los perímetros reales son similares a los de las secciones circulares.

Las medidas obtenidas se aproximan mucho a las reales ya que las zonas donde se sitúan estos perímetros están alejadas de las puntas, donde las cuernas tienen secciones casi circulares. La metodología de homologación utiliza estas zonas basándose en este hecho (I.A.C.P.C. 2015; Llanes-Borrero 2013). Para la medición de la roseta, que es la zona más desfavorable, el uso de la circunferencia también proporciona resultados precisos.

El modelo-3D y las mediciones pertinentes de la cuerna pueden obtenerse repetidamente con agilidad y rapidez cambiando las dos fotografías y encajando las nuevas posiciones de los rayos en los planos de las fotografías. El proceso de obtención del modelo-3D dura unos 30 minutos. Obtener sólo las medidas de una cornamenta lleva unos 10-15 min. Las fotografías se tomaron en segundos.

Desarrollamos los modelos-3D teniendo en cuenta todas las configuraciones habituales de las astas y el número de puntas, pero hay que tener en cuenta consideraciones especiales en relación con las astas defectuosas o las que se salen de la morfología típica. Ciertos tipos de

cuernas defectuosas o irregulares que no se ajustan a los esquemas de árbol ramificado desarrollados no son, por el momento, posibles de modelizar con este método.

Para evaluar la eficacia del método, se realizó un análisis estadístico utilizando *Statgraphics Centurion XV v15.2.06 (Stat Point, Inc)*. Se comprobaron los supuestos de normalidad (prueba Shapiro-Wilk, W-test) y homocedasticidad (Levene test) de los datos y, a continuación, se evaluaron las diferencias entre los métodos (longitudes calculadas mediante cinta métrica tradicional, máquina de medición de coordenadas de brazo articulado CMA y el método CAD fotogramétrico propuesto CAD). Se utilizó un análisis de la varianza (ANOVA) y una prueba de comparación múltiple. Se calculó un coeficiente de correlación para evaluar la relación entre las longitudes obtenidas por los tres métodos. Además, para proporcionar más información sobre las diferencias individuales entre los valores de los tres métodos estudiados (cinta, CAD y CMA) en el mismo ciervo en particular, utilizamos un conjunto reducido de 14 ciervos que fueron estudiados utilizando los tres métodos diferentes. La desviación estándar calculada (dv) se utilizó para indicar la variación de los resultados de los tres métodos diferentes. Interpretamos que los valores bajos de (dv) muestran que los puntos de datos tienden a estar cerca de la media, siendo lo suficientemente pequeños como para ser considerados en la evaluación de la calidad de la cuerna.

### 3. Resultados y Discusión

En todos los procesos de análisis y simulaciones por ordenador es relevante partir de un dato de partida preciso; de esta forma, los resultados de las aplicaciones biológicas van a ser fiables y muy próximos a los que proporcionen si los ensayos se realizan sobre el modelo real de la cuerna.

La implementación de la metodología fotogramétrica (Bi-Foto) consiste en, a partir de dos fotografías, obtener un resultado preciso, un modelo3D fiable que se ajuste a la geometría y dimensiones del modelo real de la cuerna.

Para evaluar esta precisión se han considerado dos muestras de 29 trofeos de cuernas de ciervo ibérico (*Cervus elaphus hispanicus*) procedentes de diferentes cotos de caza mayor en Sierra Morena (Andalucía, España).

Se han realizado diferentes mediciones sobre elementos de la estructura de la cuerna, que se asemejan a las que se indican en el baremo oficial de valoración de la calidad cinegética como trofeos de caza mayor en España.

Las mediciones realizadas han sido las longitudes de la 'vara central', la de las puntas principales, 'luchaderas' y 'candiles' y la envergadura o separación máxima interna de las ramas de la cuerna, junto con los perímetros de las 'rosetas' y de dos secciones transversales situadas entre las

puntas principales (Fig. 66). No se han considerado otros ítems del baremo oficial de cuantificación compleja, y de valoración subjetiva como el color de la cuerna, el perlado de las rosetas, el número total de puntas y de la 'corona' o el peso total de la cuerna.

En una primera muestra de 14 trofeos se midieron los elementos de la cuerna con tres métodos: sobre el modelo real con mediciones directa con cinta métrica realizada por personal oficial en procesos de homologación como trofeos de caza, sobre el modelo-3D CAD que representa su estructura axial, y sobre el modelo obtenido a partir de las coordenadas de puntos proporcionados por la tecnología CMA (Coordinate Measurement Arm), un brazo articulado con un sensor palpador en el extremo, que define las coordenadas de los puntos de un objeto por el contacto del sensor con la superficie externa del mismo. En la segunda muestra de 15 trofeos de cuernas se consideraron las mediciones sobre el modelo CAD y sobre el modelo real de la cuerna.

Para evaluar la eficiencia del método CAD-Fotogramétrico Bi-Foto, se realizó un análisis estadístico. Se comprueba la normalidad de los datos (Shapiro-Wilk W-test) y luego se evalúan las diferencias entre los métodos (longitudes calculadas mediante cinta métrica tradicional, máquina CMA y el método propuesto CAD fotogramétrico). Se utiliza un análisis de varianza (ANOVA) y un test de comparación múltiple. Un coeficiente de correlación se calcula para evaluar la relación entre las longitudes obtenidos por los tres métodos.

La (Tabla 4) muestra los resultados comparativos estadísticos para la primera muestra de 14 astas (longitudes de puntas y envergadura utilizando los tres métodos (Cinta, CAD, CMA), y la comparación de los perímetros de las tres posiciones definidas en el proceso de homologación usando sólo dos métodos, la cinta y el método CAD fotogramétrico (Cinta, CAD) debido a que no es posible medir perímetros utilizando el método de CMA.

No hay diferencias significativas con un nivel de significación de 0,05 (Tabla 4), en las 'longitudes' utilizando los tres métodos, con valores de P-valor próximas a 1. También los 'perímetros' no fueron significativamente diferentes.

La (Tabla 5) muestra los mismos resultados comparativos para el segundo conjunto de 15 astas. En este caso sólo se utilizaron dos métodos, la cinta y el método CAD fotogramétrico. Las mediciones con cinta de medición se llevaron a cabo por operadores profesionales en una sesión oficial de homologación de trofeos.

En esta segunda muestra, no hubo diferencias significativas en las longitudes de las puntas principales y envergadura, así como para perímetros (rosetas, posición 1 y posición 2) con un nivel de significación de 0,05.

En la (Tabla 6) se muestran los resultados proporcionados al comparar los tres métodos, con una significancia estadística de 0.05, sin grandes diferencias y con valores de P valor próximos a 1. La desviación estándar (dv) indica la variación de los tres valores de los diferentes métodos para

cada ciervo. Encontramos que valores de  $dv$  inferiores a 2,5 cm indican que los puntos de datos tienden a estar cerca de la media, siendo lo suficientemente pequeños como para ser considerados en la evaluación de la calidad de la cornamenta. Con todos estos datos se demuestra el grado de fiabilidad y de aproximación del modelo3D digital que caracteriza la cuerna.

**Tabla 4.** Resultados estadísticos para la primera muestra de 14 trofeos de cuernas. (longitudes de las puntas luchaderas, puntas del candil, varas centrales y separación interna máxima, utilizando los tres métodos -Cinta, CAD, CMA-, y perímetros en las tres posiciones definidas por el proceso de homologación, utilizando dos métodos -Cinta, CAD-).

Rasgo	Número elementos	Método	Longitud (cm)		ANOVA (P-valor)
			Rango	Media $\pm$ St. desviación (CV)	
Luchaderas	28	CAD	7.43 - 34.68	21.94 $\pm$ 6.57 (29.93%)	F= 0.2; P = 0.82
		CMA	8.17 - 31.6	22.71 $\pm$ 6.04 (26.61%)	
		Cinta	6.0 - 33.0	21.68 $\pm$ 6.40 (29.52%)	
Candiles	28	CAD	8.73- 34.94	18.83 $\pm$ 6.75 (35.85%)	F= 0.11; P = 0.89
		CMA	8.6- 34.9	19.47 $\pm$ 6.39 (32.81%)	
		Cinta	8.5- 35.0	19.61 $\pm$ 6.46 (32.94%)	
Vara central	28	CAD	42.76 - 85.47	66.35 $\pm$ 13.05 (19.67%)	F= 0.04; P = 0.96
		CMA	42.4 - 86.8	65.75 $\pm$ 12.90 (19.62%)	
		Cinta	40.0 - 82.5	65.34 $\pm$ 12.84 (19.65%)	
Envergadura	14	CAD	35.14 - 77.14	56.98 $\pm$ 10.86 (19.05%)	F=0.01; P = 0.99
		CMA	36.1 - 79.7	57.16 $\pm$ 11.00 (19.25%)	
		Cinta	35.5 - 76.0	56.54 $\pm$ 10.49 (18.56%)	
Perímetro Roseta	28	CAD	10.73 - 21.84	16.59 $\pm$ 2.67 (16.11%)	F= 0.18; P = 0.68
		Cinta	10.5 - 21.0	16.32 $\pm$ 2.27 (13.89%)	
Perímetro Posición 1	28	CAD	8.49 - 13.6	10.97 $\pm$ 1.72 (15.72%)	F= 0.05; P = 0.82
		Cinta	8.5 - 14.0	11.07 $\pm$ 1.69 (15.29%)	
Perímetro Posición 2	28	CAD	7.5 - 13.09	10.15 $\pm$ 1.67 (16.45%)	F= 0.04; P = 0.85
		Cinta	8.0 - 13.0	10.23 $\pm$ 1.65 (16.10%)	

**Tabla 5.** Resultados estadísticos para la segunda muestra de 15 trofeos de cuernas. (longitudes de las puntas luchaderas, puntas del candil, varas centrales y separación interna máxima, y perímetros en las tres posiciones definidas por el proceso de homologación, utilizando dos métodos -Cinta, CAD-). En este segundo caso, la medición con cinta fue realizada por operadores profesionales de una sesión de homologación oficial.

Rasgo	Número elementos	Método	Longitud (cm)		ANOVA (P-valor)
			Rango	Media $\pm$ St. desviación (CV)	
Luchaderas	30	CAD	19,73 - 34,06	27,54 $\pm$ 3,36 (12,21%)	F= 0,03; P = 0,87
		Cinta	21,0 - 33,7	27,40 $\pm$ 3,18 (11,62%)	
Candiles	30	CAD	19,65- 35,85	28,64 $\pm$ 4,27 (14,92%)	F= 0,01; P = 0,94
		Cinta	19,2- 36,6	28,72 $\pm$ 4,43 (15,41%)	
Vara central	30	CAD	75,41 - 103,69	90,88 $\pm$ 7,07 (7,78%)	F= 0,00; P = 0,999
		Cinta	74,3 - 103,1	90,88 $\pm$ 6,62 (7,27%)	
Envergadura	15	CAD	55,95 - 85,37	73,78 $\pm$ 8,67 (11,75%)	F= 0,07; P = 0,79
		Cinta	56,0 - 84,5	72,95 $\pm$ 8,23 (11,28)	
Perímetro Roseta	30	CAD	17,7 - 24,3	21,36 $\pm$ 1,39 (6,52%)	F= 1,12; P = 0,29
		Cinta	17,95 - 24,89	20,95 $\pm$ 1,61 (7,69%)	
Perímetro Posición 1	30	CAD	11,2 - 15,5	12,87 $\pm$ 0,97 (7,50%)	F= 3,91; P = 0,05
		Cinta	9,61 - 15,5	12,33 $\pm$ 1,16 (9,41%)	
Perímetro Posición 2	15	CAD	10,9 - 14,6	12,28 $\pm$ 0,92 (7,50%)	F= 0,11; P = 0,75
		Cinta	9,98 - 15,18	12,19 $\pm$ 1,16 (9,53%)	

**Tabla 6.** Comparativa de resultados obtenidos por los tres métodos.

(dv) indica la desviación estándar que cuantifica la cantidad de variación para los valores de los distintos métodos en cada ciervo: un valor bajo de (dv) indica que los valores tienden a estar cerca de la media y para ser tenidos en cuenta en el proceso de valoración de la calidad cinegética.

(cm) deer	puntas LUCHADERAS				puntas CANDILES				VARA CENTRAL				ENVERGADURA			
	Cinta	CAD	CMA	dv	Cinta	CAD	CMA	dv	Cinta	CAD	CMA	dv	Cinta	CAD	CMA	dv
1	6.5	7.5	8.73	1.12	12	10.78	11.1	0.63	49	47.55	47.2	0.95	48	48.86	49.1	0.58
2	16	15.49	17.3	0.93	14	16.07	14.2	1.14	40.5	43.14	42.7	1.41	40	39.69	40.2	0.26
3	29	30.01	31.1	1.05	35	34.94	34.9	0.05	82.5	85.47	84.3	1.50	76	77.14	79.7	1.89
4	28	26.46	26	1.05	24	24.01	24.1	0.06	77.5	75.38	75.2	1.28	58	57.41	59.4	1.02
5	21	20.54	22.5	1.02	20	20.09	20	0.05	78	76.05	76.7	0.99	67.5	69.26	68.6	0.89
6	26	26.94	26.3	0.48	20	18.13	20.6	1.29	78.5	79.36	78.8	0.44	60.5	59.09	59.3	0.76
7	33	34.68	31.5	1.59	22	20.3	21.4	0.86	75	76.83	73.2	1.82	61	60.04	60.8	0.51
8	18	17	18.1	0.61	15	13.86	13.6	0.74	57	56.6	55.1	1.00	54.5	54.5	53.6	0.52
9	22	19.22	23.1	2.00	18	16.4	20	1.80	56	58.73	57.4	1.37	50	51.51	50.4	0.78
10	22	22.6	21.6	0.50	23	22.24	21	1.01	60	59.23	60.2	0.51	60	59.71	59.9	0.15
11	20	19.94	21.4	0.83	13	10.95	13	1.18	62.5	62.41	61.5	0.55	58	59.88	59.2	0.95
12	24	24.64	25.2	0.60	21	16.65	19.3	2.19	73.5	75.66	74.9	1.10	61	62.69	62.2	0.87
13	15.5	16.38	16.1	0.45	15.5	15.02	15.4	0.25	55	56.21	54.8	0.76	35.5	35.14	36.1	0.48
14	25.5	23.14	26.5	1.73	25.5	25.43	24.9	0.33	77.5	80.68	77.9	1.73	61.5	62.85	61.7	0.73

Otros resultados que refuerzan la validación de la metodología propuesta, de forma que se comprueba el grado de similitud geométrico del modelo-3D 'axial' obtenido por restitución fotogramétrica a partir de dos fotografías con respecto al modelo real de la cuerna. Se comprueba por ello, que la puntuación del valor de calidad cinegética va a ser similar independientemente de que al análisis se realice sobre la cuerna física o sobre su modelo-3D.

Se muestran los resultados, sobre una muestra de 48 ejemplares procedentes de jornadas de caza y de sesiones de homologación como Trofeos de caza.

En la (Tabla 7) se describen los resultados obtenidos para los dos tipos de datos, cuerna real y modelo-3D, donde se detallan los valores medios en las puntuaciones finales de valoración de calidad cinegética para cada una de las muestras consideradas. Se observa que las puntuaciones finales promedio son muy similares en ambos casos, validándose la precisión del modelo-3D de estructura axial de la cuerna para este tipo de aplicación biológica.

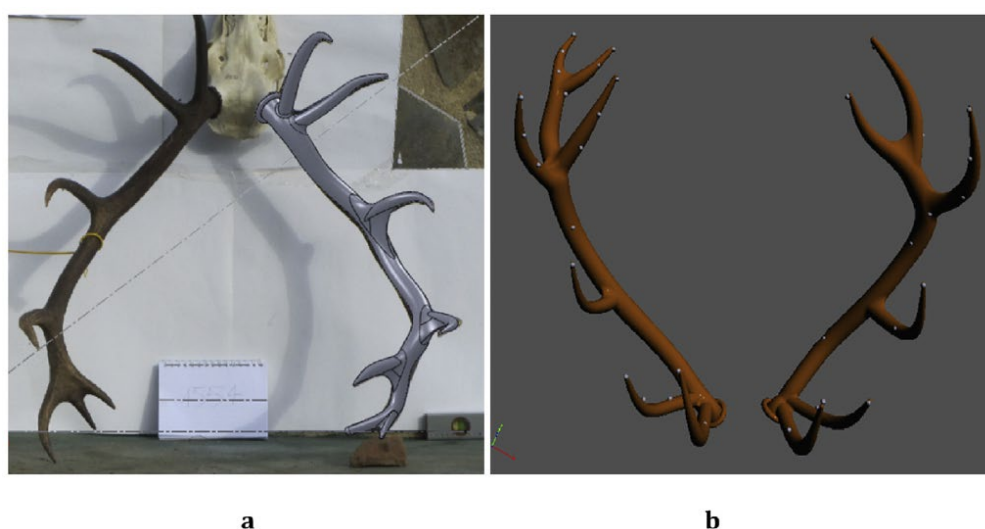
**Tabla 7.** Medias de puntuación de calidad cinegética, para cada una de las muestras, del modelo real de las cuernas y de su caracterización en modelo-3D.

Muestra	Número de ejemplares	Valoración cinegética Modelo real	Valoración cinegética Modelo3D CAD
Homologación (27-03-2014)	4	178	177
Homologación (06-04-2015)	11	150	150
Homologación (25-10-2017)	6	169	167
Jornada caza (23-10-2014) Lugar Nuevo	18	150	149
Jornada caza (18-12-2019) Selladores	9	154	153

Las mediciones de la cuerna realizadas con el método de la cinta requieren unos 20 minutos. Estas mediciones deben realizarse con cuidado, a ser posible sobre una mesa. El método CMA debe aplicarse preferentemente en un laboratorio, y requiere unos 30-40 min por cuerna. Por último, el método CAD sólo necesita unos segundos para tomar las dos fotografías por ejemplar. El tratamiento fotográfico dura unos 15 minutos por cuerna, pero se realiza a posteriori con un ordenador y lejos del campo.

El método de la cinta métrica requiere mediciones realizadas por diferentes personas, o al menos realizadas por personas formadas, para obtener buenos resultados. Esto es imposible de realizar en el campo o en una jornada de caza, ya que el número de ejemplares suele ser elevado y las condiciones difíciles. El método CMA es aún más difícil de aplicar en el campo. Teniendo en cuenta las medidas en la cuerna consideradas por los actuales protocolos de homologación de trofeos, el método CMA sería el menos adecuado, ya que no sirve para medir perímetros.

Nuestro estudio demuestra la capacidad y las ventajas de este método en la generación de la morfología de la cuerna. La (Fig. 81-a) muestra la superposición del modelo-3D, y sus fotografías.



**Fig. 81.** a) Superposición del modelo-3D CAD virtual sobre la cuerna derecha real fotografiada.  
b) Superposición de los puntos obtenidos por el método de medición CMA y el modelo-3D obtenido mediante el método Bi-Foto.

La (Fig. 81-b) muestra la superposición de los puntos obtenidos mediante una máquina de medición de coordenadas de brazo articulado CMA y el modelo-3D obtenido mediante el método CAD fotogramétrico Bi-Foto propuesto. Los puntos obtenidos mediante CMA se representan mediante pequeñas esferas blancas.

El modelo-3D obtenido, que representa la estructura axial de la cuerna de cérvidos de forma precisa, va a permitir su implementación en análisis biológicos donde se estimen las variaciones en la geometría de la cuerna, representando el dato de partida para los mismos:

- Estimando el tamaño y el grado de desarrollo de la cuerna en valoraciones de su calidad cinegética.
- Valorando el grado de defectos bilaterales que representan los elementos característicos de la cuerna en estudios de asimetrías.
- Cuantificando el volumen de la cuerna, sobre el 'modelo-3D sólido', para estudios posteriores de la densidad.

Los resultados de dichos análisis van a proporcionar unos valores del estado de la cuerna, 'biomarcadores', donde va a ser relevante en al ámbito de la biología animal, relacionarlos con los factores de influencia del ejemplar.

La metodología proporciona una herramienta donde la cuerna de cérvidos se caracterice de forma precisa, relativamente rápida y con poca información de partida, ya que solo precisa de dos fotografías para obtener el modelo-3D de la cuerna.

Las fotografías se pueden tomar *in situ* sobre muestras de gran tamaño, por ejemplo, en jornadas de monterías de caza, en condiciones poco favorables y con pocos requerimientos de preparación del ejemplar.

Va a permitir el estudio de una gran cantidad de ejemplares, ya que el dato de partida, el modelo-3D de la cuerna, es relativamente sencillo de definir.

El tiempo de obtención junto con el coste del material empleado, hardware y software, suponen una economía de recursos, ya que no se precisa excesiva potencia de procesamiento informático; sí es relevante que el hardware disponga de una tarjeta gráfica con la suficiente memoria para el procesamiento de gráficos. La definición del escenario-3D y el modelado tridimensional se ha realizado con la aplicación CAD '*SolidWorks v.2020*'.

#### **4. Conclusiones**

Tras la validación del IPhMM utilizando una colección de trofeos de cuernas y la obtención de los parámetros correspondientes, los resultados se compararon con los observados mediante los métodos tradicional y CMA. Los tres métodos mostraron resultados similares, proporcionando valores análogos para las diferentes longitudes en las cuernas medidas. Las diferencias de tamaño y forma entre las cuernas muestreadas eran probables, ya que presentaban condiciones morfológicas diferentes.

Los métodos de 'cinta métrica' y CMA son ciertamente más complejos y a veces más difíciles de conseguir en el campo que el método CAD. Otros métodos como el escáner óptico o láser y el escáner láser basado en la triangulación no permiten obtener resultados en los escenarios habituales en los que se analizan las poblaciones de ciervos, como en jornadas de caza o en el

campo, con condiciones muy difíciles y con sólo unos segundos para obtener los datos por ejemplar. Dado que el método CAD sólo requiere dos fotografías por individuo, hace posible el estudio de un alto porcentaje de cornamentas en el campo. La creación de un escenario fotogramétrico en 3D dentro de un sistema CAD paramétrico permite adaptar diferentes fotografías en muy poco tiempo, con lo que el tratamiento posterior de la información gráfica con asistencia informática se reduce notablemente en comparación con otros métodos.

Por otro lado, al tratarse de un método fotogramétrico, tiene la ventaja de obtener más información de interés a través de las fotografías, cuya valoración es un tanto subjetiva como, por ejemplo: el color de la cuerna, la forma de las puntas, la rugosidad de la superficie de la cuerna, etc.

El método CAD se ha convertido en una herramienta útil que proporciona datos como longitudes, ángulos, diámetros, perímetros, etc. necesarios tanto para la homologación de trofeos como para el análisis morfométrico. Además, el CAD o IPhMM es un método de bajo coste, lo que implica un bajo consumo de tiempo.

Este estudio también ha tratado de mostrar la utilidad del método CAD como una opción óptima en el ámbito de los estudios zoológicos, como los relacionados con la morfometría geométrica de la cornamenta del ciervo. Además, realizando los ajustes necesarios, este método podría aplicarse a cualquier parte anatómica de cualquier especie animal.

**RESULTADO 2º:****UN NUEVO MÉTODO PARA CUANTIFICAR LA ASIMETRÍA DE ELEMENTOS BIOLÓGICOS MEDIANTE UNA TÉCNICA FOTOGAMÉTRICA QUE UTILIZA UN SISTEMA PARAMÉTRICO DE DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR.****Resumen.**

En el área de la zoología es de gran interés determinar el grado de asimetría existente en las diferentes estructuras animales para establecerlo como variable (biomarcador). En este estudio se propone una nueva metodología para la obtención de esta variable "Índice de Asimetría". Se han utilizado 48 cuernas de ciervo ibérico (*Cervus elaphus hispanicus*) procedentes de cotos de caza de la provincia de Jaén (España). Se ha obtenido el grado de asimetría de sus astas entre puntos homólogos considerados en los dos lados derecho e izquierdo de cada cuerna. La metodología se aplica dentro de un sistema paramétrico de Diseño Asistido por Ordenador a partir de la restitución fotogramétrica de la cuerna a partir de dos fotografías. El procedimiento compara el grado de asimetría en el que se encuentran los puntos de cada uno de los lados derecho e izquierdo de la cornamenta mediante longitudes y ángulos respecto a un plano de referencia establecido a partir de la geometría del cráneo del ejemplar. Como resultado del estudio, se ha observado que el Índice de Asimetría obtenido es menor en aquellos ejemplares que tienen una puntuación alta en su valoración cinegética, por lo que se considera que este factor puede ser tenido en cuenta como un indicador objetivo y cuantificable (biomarcador).

**Palabra clave:** Asimetría fluctuante. Ungulados. Cuerna de ciervo. Fotogrametría. Modelado-3D paramétrico. Puntos de referencia.

**1. Introducción**

Numerosos estudios han tratado de detectar el grado de simetría existente en las estructuras animales de forma que se relacione con algunos factores y variables en los que estas estructuras se han desarrollado. Estos factores pueden ser de diverso ámbito: unos internos, como el grado evolutivo y la genética inherente (Palmer y Strobeck 1986; Graham 1993; Solberg y Saether 1993; Palmer 1996; Lagesen y Folstad 1998; Pélabon y Joly 2000; Bartoš *et al.* 2007); y otros externos relacionados con el medio en el que se han desarrollado, como sus condiciones ambientales, niveles de alimentación, recursos disponibles y relaciones con otros animales (Putman 2000; Azorit *et al.* 2002; Torres-Porras *et al.* 2009; García *et al.* 2010; Carranza 2017).

Algunos autores, [Van Valen 1962](#), [Leamy 1984](#), [Palmer y Strobeck 1986](#), [Pélabon y van Breukelen 1998](#) y [Klingenberg 2010](#) distinguen dos tipos de asimetría: Asimetría Direccional (AD) y Asimetría Fluctuante (AF). En la Asimetría Direccional, existen diferencias geométricas significativas en la estructura de cada uno de los dos lados de las partes del animal objeto de estudio. Por otro lado, la Asimetría Fluctuante (AF) considera las dos partes como un todo sin diferencias exageradas entre el lado derecho e izquierdo del animal, tomando las dos partes como una sola estructura con características comunes, pero distinguiendo desviaciones significativas entre los elementos de un lado y sus homólogos del otro. Algunos autores declaran este tipo de asimetría como la más común, y tanto las condiciones internas y genéticas como las ambientales son las que influyen en mayor medida en su aparición ([Lagesen y Folstad 1998](#); [Putman 2000](#); [Kruuk et al. 2003](#); [Mateos et al. 2008](#)).

Existen en la literatura numerosos estudios sobre el grado de asimetría en diferentes especies animales. El primer grupo de ellos analiza los factores y posibles causas de la asimetría en todo tipo de especies del reino animal, desde vertebrados e invertebrados hasta especies unicelulares, como adaptación a las condiciones ambientales imperantes en ese momento. [Blum y Ott 2018](#) se centran en el estudio de los "cilios", estructuras celulares de apéndices, y en los factores evolutivos.

[Jawad y Abed 2020](#) estudiaron especies de vertebrados acuáticos, concretamente el gran pez lagarto (*Saurida tumbil*). Llegaron a la conclusión de que las asimetrías se ven acentuadas por el tamaño del ejemplar, así como por el estado de salud del animal y de su población en un lugar y un periodo determinados. También lo relacionaron con el grado de contaminantes químicos del agua. [Klingenberg 2003](#) realizó un estudio exhaustivo de la asimetría en especies animales; relacionó el grado de asimetría con el bienestar, la salud, la resistencia al estrés y la capacidad de rendimiento funcional. Relacionó la AF con los componentes genéticos del animal y cuestionó algunos factores defendidos por otros autores. Realizó experimentos para correlacionar las causas, factores internos o externos, con el grado de asimetría. [Palmer 2013](#) estudia rasgos de asimetría física basados en factores geométricos y morfológicos en diferentes especies animales, tanto invertebrados como vertebrados. Intenta cuantificar estos valores y aportar causas de la asimetría basadas en su comportamiento y evolución.

Otros autores se centraron en mamíferos y humanos. [Manning y Ockenden 1994](#) llegaron a la conclusión de que los caballos de carreras con rasgos simétricos en la cabeza y las patas delanteras tienen más capacidad de rendimiento que los que tienen rasgos más asimétricos. [Knierim et al. 2007](#) estudiaron la Asimetría Fluctuante AF como indicador del bienestar animal, estudiando mamíferos, aves cautivas y humanos. Creó una variable DI que medía el grado de estabilidad del desarrollo del animal y lo relacionó con el grado de asimetría. La DI depende de múltiples factores relacionados principalmente con el medio ambiente, como la exposición a la

contaminación, los agentes patógenos, las temperaturas externas y los factores genéticos. Cuestiona los estudios realizados hasta la fecha, considerándolos inconsistentes debido a las inadecuadas metodologías aplicadas. Para mejorar la fiabilidad de los estudios que relacionan la asimetría con el bienestar animal, propone la aplicación de las técnicas y aspectos estadísticos del análisis AF. [Queen et al. 2020](#) estudian los rasgos de asimetría en humanos y otros animales con el objetivo de evaluar la mecánica locomotriz. En numerosos ensayos y variables, relacionan el riesgo de lesión con el nivel de asimetría detectado. [Vilensky et al. 1989](#) intentan cuantificar las ecuaciones de simetría, realizando pruebas con gatos, monos y humanos basadas en los movimientos del cuerpo y las extremidades. [Guo et al. 2019](#) estudian la asimetría bilateral en vacas y cerdos utilizando técnicas 3D: escáneres, visión artificial, vídeos e imágenes digitales, relacionándola con su calidad genética basada en su mejor crecimiento y condiciones para la reproducción. [Møller et al. 1995](#) relacionan la simetría mamaria con el número de hijos, relacionándola con la fertilidad y el atractivo físico para el hombre. [Manning y Pickup 1998](#) afirman que los rasgos simétricos en corredores jóvenes de medio fondo, en fosas nasales y orejas, están relacionados con el rendimiento.

En el caso del estudio de los cérvidos, numerosos autores han tratado de relacionar el grado de divergencia geométrica entre los lados derecho e izquierdo de la cuerna con el grado de salud del animal ([Møller 1992](#); [Møller 1994](#); [Ditchkoff y Defreese 2010](#)), su buena genética reproductiva ([Clutton-Brock et al. 1982](#); [Berglund et al. 1996](#)), su aspecto para atraer a las hembras para la reproducción ([Underwood 2000](#); [Moyes et al. 2009](#)), su disposición morfogeométrica para salir victorioso en las luchas relacionadas con el dominio territorial y el apareamiento ([Mateos et al. 2008](#); [Clements et al. 2010](#); [Stéger et al. 2010](#)), su edad de madurez óptima ([Møller 1994](#)), su calidad cinegética ([Pélabon y Joly 2000](#); [Ditchkoff y Defreese 2010](#); [Carranza 2017](#)) y el grado de desarrollo de los atributos geométricos de su cuerna ([García et al. 2010](#)). Todos estos factores relacionan, en definitiva, el grado de simetría de las astas de los lados derecho e izquierdo con el grado de salud y dominio de los cérvidos en su entorno y sus posibilidades de reproducción.

La cuerna se considera una buena estructura para el estudio de la asimetría ya que se renueva cada año y proporciona un buen indicador para detectar los altibajos sufridos por el animal ([García et al. 2010](#); [Carranza 2017](#)). [Carranza 2017](#) establece relaciones del grado de asimetría con los años en los que las condiciones climáticas fueron más desfavorables y, por tanto, con la peor disponibilidad de alimento. [Azorit et al. 2002](#) establecen la relación entre la edad y las condiciones del medio donde se desarrolla el animal con las características de su cuerna. La edad de los ejemplares se determinó a través del cemento de los molares según procedimientos estandarizados para la zona de estudio ([Azorit et al. 2004](#)).

Otros autores estudiaron la existencia de asimetría en la cuerna de los ciervos, definiendo previamente su concepto y tipología. [Leamy 1984](#) definió los dos tipos de asimetría: Fluctuante (AF) y Direccional (AD). [Valen 1962](#), [Palmer y Strobeck 1986](#), [Pélabon y van Breukelen 1998](#) estudiaron la Asimetría Fluctuante, afirmando que se produce cuando aparecen diferencias cuantificables y aleatorias entre los lados derecho e izquierdo. [Klingenberg et al. 2010](#) indicaron que la Asimetría Direccional (AD) refleja diferencias significativas entre los lados derecho e izquierdo del cuerpo. [Palmer 1994](#) también concluye que tiende a resaltar el mayor desarrollo de un lado del cuerpo que del otro.

[Graham et al. 1993](#) y [Møller 1994](#) sugieren un cambio de AF a AD en unas pocas generaciones. [Palmer 1986, 1997](#) afirma que la AD se debe a la genética y a veces está relacionada con una actividad adaptativa diferencial del genoma de cada parte de la cuerna. [Møller 1994](#) relaciona la AD con los factores de salud y bienestar, y con la estabilidad en el desarrollo del ejemplar. Otros autores lo niegan ([Graham et al. 1993](#); [Palmer 1996](#)), citando la genética como causa de la estabilidad del desarrollo y la calidad individual. [Møller y Swaddle 1997](#) concluyen que el aumento de la AF está relacionado con una serie de factores de estrés como temperatura subóptima, falta de nutrición, productos químicos en el ambiente, alta densidad de población, ruido, y otros. [Pélabon y Joly 2000](#) estudian la AF en gamos. Relacionan la asimetría con caracteres sexuales secundarios basados en la selección de hembras o machos rivales para el apareamiento. Afirman la existencia de AD con la cuerna, encontrando que la parte derecha es la más desarrollada basándose en el hecho de que el animal ataca inicialmente por ese lado en la lucha con otros machos y, además, ese lado es más pronunciado con la edad del ejemplar.

[Parsons 1990](#) y [Møller 1992](#) sugieren que la AF es una medida epigenética del estrés y que las desviaciones de la simetría bilateral se deben a la sensibilidad del desarrollo de la cuerna. [Bateman 2000](#), [Mateos et al. 2008](#) indican que el nivel de AF viene dado por las capacidades de los machos para luchar, obtener alimento y hacer frente a enfermedades y parasitismo. [Kruuk et al. 2003](#), [Ditchkoff y Defreese 2010](#) concluyen que el grado de AF no está relacionado con la calidad individual. [Moller 1992](#) y [Ditchkoff y Defreese 2010](#) afirman que la AF disminuye con el tamaño de la cuerna y con la edad del ejemplar, ya que se supone que sólo los ejemplares de mayor calidad son capaces de producir grandes cuernas a lo largo de su vida.

[Bateman 2000](#) y [Mateos et al. 2008](#) indican que el nivel de AF viene dado por las capacidades de los machos para luchar, obtener alimento y hacer frente a enfermedades y parasitismo. [Kruuk et al. 2003](#) y [Ditchkoff y Defreese 2010](#) concluyen que el grado de AF no está relacionado con la calidad individual. [Moller 1992](#) y [Ditchkoff y Defreese 2010](#) afirman que la AF disminuye con el tamaño de la cuerna y con la edad del ejemplar ya que se supone que sólo aquellos ejemplares de mayor calidad son capaces de producir grandes cuernas a lo largo de su vida. [Mateos et al. 2008](#) se preguntan si el grado de asimetría está relacionado con la calidad del individuo y con el

grado de estrés del animal. Destacan la inconsistencia de los estudios previos y la importancia de técnicas estadísticas eficientes y tamaños de muestra grandes para obtener relaciones fiables entre las variables. Afirman que las cuernas simétricas y de buen tamaño representan un factor relevante en la selección sexual durante la mejor edad reproductiva.

Algunos autores han creado métodos y herramientas para cuantificar la simetría ([Møller 1992](#); [Solberg y Saether 1993](#); [Bartoš y Bahbouh 2006](#); [Mateos \*et al.\* 2008](#)), que estimaron la asimetría de diferentes estructuras utilizando herramientas clásicas de medición lineal. [Bartoš \*et al.\* 2007](#) estiman la AF analizando tres características de la cuerna del ciervo: su peso, la longitud y el número de puntas. Utilizaron muestras de 51 ejemplares de edades comprendidas entre los 3 y los 8 años. Mediante técnicas estadísticas, comprobaron si las diferencias para cada parte de la cuerna en cada uno de sus parámetros se ajustan significativamente a partir de una distribución normal con valor medio cero.

Debido a la complejidad de la estructura de la cuerna del ciervo, [Ditchkoff y Defreese 2010](#) utilizaron metodologías tridimensionales para estimar la asimetría. Las medidas de asimetría de varios rasgos de la cuerna se calcularon midiendo las distancias de parámetros significativos de la cuerna en dos planos, vertical y horizontal, obtenidos a través de puntos del modelo-3D pertenecientes a la geometría de la propia cuerna: los puntos de inicio de la vara central (roseta) y el punto medio entre los ojos. Inicialmente utilizaron una serie de entre 9 y 12 fotografías de la cuerna en las que se habían marcado puntos relevantes con pegatinas marcadoras: los puntos de inicio y final de las puntas y los puntos de la vara central. Posteriormente, se obtuvo el modelo-3D de la cuerna mediante un programa informático de fotogrametría multiimagen. Se estimaron las distancias entre los puntos con respecto a los planos horizontal y vertical, así como el ángulo de los segmentos en dichos planos. Se utilizaron técnicas estadísticas para verificar el grado de correlación entre las medidas obtenidas.

En el presente estudio se propone una nueva metodología cuyo objetivo es evaluar el grado de asimetría en la estructura de la cuerna de los ciervos cuantificándolo a través de una nueva variable denominada (IA) (índice de asimetría), cuyos valores oscilarán entre 0 y 1 y que será utilizada en estudios posteriores para evaluar el grado de simetría de las poblaciones de ciervos que se han desarrollado bajo determinadas condiciones ambientales. Se basa en un modelo-3D obtenido a partir de un método fotogramétrico que utiliza únicamente dos fotografías, similar al desarrollado por [Rubio-Paramio \*et al.\* 2016](#). A partir del modelo-3D, se considerará como referencia un plano de simetría vertical obtenido mediante puntos situados en el cráneo del animal, de forma que se puedan comparar fácilmente los lados derecho e izquierdo de la cuerna. Se compararán entre sí los puntos homólogos de la cuerna: el inicio y el final de las puntas de un lado con respecto a los puntos correspondientes del otro lado, tomando como referencia el plano

de simetría descrito. También se analizarán las distancias entre puntos y los ángulos de incidencia que forman sobre el plano de referencia.

Esta metodología es perfectamente utilizable para el estudio de otro tipo de estructuras biológicas: desde microorganismos, donde es relevante conocer datos geométricos del volumen y trayectorias superficiales para estimar cambios de estado debidos a interacciones con otros, (Alsaffar y Jarallah 2016) hasta otras especies animales, vertebrados o invertebrados. El proceso fotogramétrico permite obtener datos geométricos de numerosos animales en poco tiempo, ya que no requiere un gran número de fotografías, y su posterior tratamiento se realiza con una herramienta versátil y precisa.

## 2. Materiales y Métodos

Para la propuesta de la metodología de evaluación de la asimetría se utilizó una muestra de 48 ejemplares de (*Cervus elaphus hispanicus*) procedentes de diferentes cotos de caza. Los datos fueron obtenidos en el sur de España, en Andújar (Jaén). Veintiuno de ellos procedían de procesos oficiales de homologación de calidad cinegética, como trofeos de caza y de salas de taxidermia; el resto procedían directamente de jornadas de caza, cuyos datos de partida se tomaron mediante fotografías *in situ*.

### 2.1. Equipamiento utilizado

Los datos sobre la cuerna de los ciervos se obtuvieron a partir de fotografías de cada ejemplar, punto de partida para obtener la estructura tridimensional de la cuerna. Se tomaron con una cámara réflex *Nikon 300D* con una resolución de 4288 x 2848 píxeles. En el proceso de restitución fotogramétrica del modelo-3D a partir de las fotografías, se comprobó que la deformación de las mismas, especialmente en su periferia y esquinas, era menor con este tipo de cámara. Según Rubio-Paramio *et al.* 2016, las deformaciones en las fotos hacen que la restitución espacial, a la hora de obtener la estructura tridimensional de la cuerna, sea imprecisa. En el presente estudio, las fotografías fueron tomadas con una cámara réflex comercial, *Nikon 300D*, con un objetivo de 18-55 mm y un sensor de imagen CCD de 23,6 x 15,8 mm; por tanto, las deformaciones perimetrales de las fotografías no son muy significativas en comparación con las tomadas con cámaras compactas.

Para la obtención del modelo-3D de la cuerna y la posterior medición de sus puntos significativos, se utilizó el software de modelado CAD 3D *SolidWorks v.2019* de *Dassault Systèmes*. Para el hardware no se necesitan grandes requisitos. Un PC *HP Pavilion*, con procesador *Core i7* y 16 Mb de RAM es suficiente. Sin embargo, es recomendable utilizar una tarjeta gráfica con suficiente

memoria para el procesamiento de imágenes. En nuestro estudio, se utilizó una *Nvidia GeForce RTX* con 6 Gb de memoria.

## 2.2. Objeto de estudio

Para comenzar el estudio de la simetría de la cuerna, es necesario obtener el modelo-3D de su estructura. Este modelo-3D consiste en la línea central (eje axial) de cada una de sus partes: vara central, puntas luchaderas, puntas candil y las puntas de la corona. Para obtener este modelo-3D, se aplicó la metodología descrita en ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)), que restituye espacialmente el modelo tridimensional a partir de dos fotografías.

Para restaurar tridimensionalmente la estructura de la cuerna se utiliza el método definido por [Rubio-Paramio et al. 2016](#), en el que a partir de dos fotografías tomadas desde diferentes ángulos sobre el objeto real, junto con la determinación de la posición exacta del punto de toma de cada fotografía, y con la ayuda de una referencia métrica que aparece en cada fotografía, se posiciona en el espacio el punto a restaurar representado en ambas fotografías mediante el cruce de rayos desde los puntos de toma de las fotografías hasta el mismo punto representado en ellas. Teniendo en cuenta que la técnica de estereoscopia 3D restaura un punto espacial representado en dos fotografías, el método descrito por [Rubio-Paramio et al. 2016](#) comparte similitudes con esta técnica.

El método desarrollado por [Rubio-Paramio et al. 2016](#) detalla la descripción del método fotogramétrico que permite la restitución de objetos en el espacio representados en dos fotografías tomadas desde dos puntos de vista diferentes. La restitución espacial 3D de los puntos representados en ambas fotografías se consigue aplicando los fundamentos de la fotografía, obteniendo inicialmente el punto espacial desde el que se tomó cada una de las fotografías, todo ello implementado dentro de un escenario 3D creado mediante un software comercial CAD-3D. Posteriormente, cruzando los rayos proyectivos lanzados desde cada una de estas dos posiciones hasta el mismo punto que se desea restituir espacialmente representado en ambas fotografías, se consigue la posición espacial de dicho punto. Sólo son necesarias dos fotografías para obtener la restitución espacial del punto deseado. La toma de una tercera fotografía podría ser útil para obtener algo más de precisión en su localización espacial con el fin de disipar las posibles deformaciones en las fotografías.

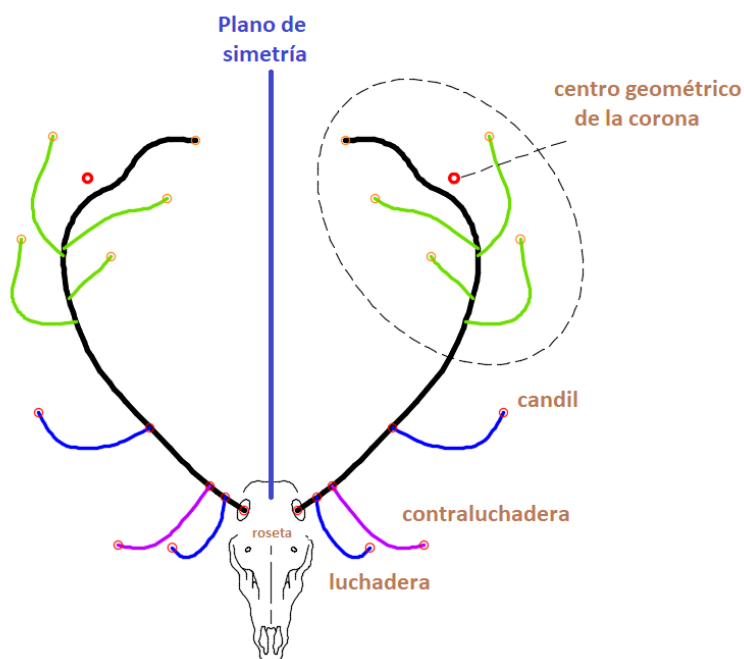
El resultado obtenido tras el proceso de restitución fotogramétrica a partir de dos fotografías se muestra en la ([Fig. 82](#)).



**Fig. 82.** Datos iniciales Datos iniciales: Dos fotografías y el modelo-3D de la estructura de la cuerna.

### 2.3. Datos geométricos de la cuerna del ciervo

La metodología propuesta considera el conjunto de medidas tomadas en los puntos situados en las partes más relevantes de la cuerna. Estos son los que corresponden a los puntos significativos de los puntos inicial y final de las puntas de la cuerna (**Fig. 83**): el centro de las rosetas (1-2), los puntos de inicio de las puntas luchaderas (3-4), los puntos finales de las puntas luchaderas (5-6), los puntos iniciales de las puntas candil (7-8) y los puntos finales (9-10), el conjunto de puntos extremos de las puntas de la corona (11-12) y, si existen las puntas contraluchaderas, sus puntos iniciales (20-21) y finales (22-23).



**Fig. 83.** Elementos de la cuerna a medir: puntos homólogos.

A partir de la estructura tridimensional axial de la cuerna, representada por su eje, los puntos relevantes, como los puntos de inicio de las puntas luchaderas y de las puntas candiles, se localizan por el contacto de la intersección del eje de estas puntas con el del eje de la vara central de la cuerna.

En la parte superior de la cuerna del ciervo, a partir de la punta central o candil, todas las puntas superiores se consideran pertenecientes a la corona de la cuerna. Estas puntas presentan muchas irregularidades en cuanto a número y disposición geométrica a ambos lados de la cuerna. Por ello, para estudiar el grado de asimetría de esta parte de la cuerna, se considera el punto medio geométrico de los extremos de las puntas de la corona en cada lado de la cuerna, y posteriormente se estima el valor de asimetría de ambos puntos sobre el plano de simetría. Todo ello, permite evaluar el grado de asimetría de toda la estructura de la corona.

#### **2.4. Método para obtener el ‘Índice de Asimetría’ (IA)**

La metodología se describe en el Capítulo ‘Metodología general’.

El Índice de Asimetría AI es adimensional y tiene un rango entre 0 y 1. Mediante esta definición del Índice de Asimetría AI, cuanto mayor sean los valores del índice, mayor será la asimetría de la pieza. Las cuernas más simétricas tendrán valores bajos, próximos a 0.

El tiempo de ejecución para la obtención del valor de IA de cada ejemplar pasa inicialmente por la obtención de la estructura axial de la cuerna; esto se consigue aplicando la metodología propuesta por [Rubio-Paramio et al. 2016](#); esta tarea es la que supone una mayor inversión de tiempo. Una vez obtenida la estructura axial de la cuerna, la aplicación de la metodología propuesta para la cuantificación del valor del IA requiere menos tiempo que la tarea anterior. Se estima que, para ambas tareas, una vez automatizada la aplicación de la metodología, se invertirán aproximadamente 2 horas en la cuantificación del valor de IA para cada ejemplar evaluado.

El estudio del grado de asimetría de la cuerna (IA) se estima evaluando pares de puntos relevantes de la cuerna: los centros de las rosetas y los inicios y finales de las puntas (luchaderas, contraluchaderas y candiles) junto con el centro geométrico de los extremos de las puntas de la corona.

Se estima que el grado de asimetría de la cuerna viene determinado por la convergencia simétrica de estos puntos significativos (homólogos) de cada una de las ramas de la cuerna sobre el plano de simetría estimado. En estos puntos de estudio, los autores consideran que se describe, con la necesaria precisión y nivel de detalle, el grado de simetría en la convergencia geométrica de ambas ramas de la cuerna. Todo ello sin olvidar la gran utilidad del trabajo que analiza la cuerna en 3D mediante morfometría geométrica tridimensional. De hecho, el grupo de investigación ha desarrollado con anterioridad estudios de este tipo, como el de [Martínez-Salmerón 2014](#).

Respecto al error de medición, éste puede producirse en muchos experimentos; por un lado, en los datos iniciales obtenidos previamente y considerados como referencia sobre la que realizar

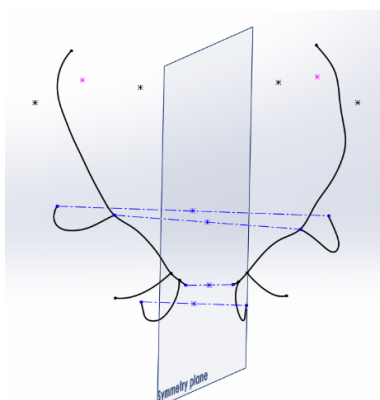
las diferentes mediciones, y por otro, durante las tareas propias de la toma de medidas sobre ese elemento de datos.

En el presente estudio, el dato de partida es la estructura axial de la cuerna; ésta se define mediante el método descrito por [Rubio-Paramio \*et al.\* 2016](#), en el que, partiendo de los datos iniciales de considerar dos fotografías, se obtiene el modelo-3D de la cuerna mediante restitución espacial fotogramétrica. El mismo autor ya demostró que las medidas tomadas para evaluar la calidad cinegética del ejemplar, evaluando trayectorias y distancias geométricas relevantes de la estructura de la cuerna, estaban muy próximas y correlacionadas estadísticamente con las medidas tomadas sobre el modelo físico de la cuerna por personal homologado. Otro elemento de los datos de partida, es el plano de simetría considerado utilizado para referenciar las medidas de los puntos relevantes estimados; éste se refiere al plano del cráneo del ejemplar, y del mismo modo, como en el caso de la estructura de la cuerna, se restituye espacialmente a partir de tres puntos fijos significativos del cráneo: el centro de las dos rosetas y el punto extremo del cráneo que representa el hocico del ejemplar. En cuanto al error de medida de las mediciones realizadas sobre el elemento de dato previamente obtenido, para el caso que nos ocupa, estas mediciones consisten en la obtención de las distancias de los segmentos de los puntos relevantes considerados, los puntos inicial y final de las puntas de la cuerna y la proyección de estos sobre el plano de simetría. Estos puntos tienen una posición fija situada en la estructura axial de la cuerna representada en el modelo-3D, donde no existe ningún grado de error al considerarlos. Los resultados obtenidos, son las longitudes de los puntos extremos hasta el plano de simetría y las proyecciones de los segmentos que unen cada par de puntos considerados sobre dicho plano; resultados proporcionados por el software CAD *SolidWorks*, donde se implementa el proceso de medición. Las metodologías aplicadas en los estudios de AF suelen medir partes específicas de cada lado del elemento a evaluar, como la variación de distancias y ángulos entre puntos relevantes de la característica o rasgo estructural estudiado del elemento biológico a evaluar; en este caso, es relevante realizar mediciones repetidas para estimar el error de medición obtenido junto con su posterior análisis estadístico y a su vez estimar la influencia de éste en el resultado de AF obtenido.

## **2.5. Influencia de la determinación del plano de simetría en los resultados del índice de asimetría**

La determinación del plano de simetría es uno de los procesos más determinantes del método. Con el fin de encontrar una solución fiable y robusta para sus condiciones y localización, se definieron varias soluciones, estimando en todas ellas el valor medio espacial ocupado por las 2 ramas de la cuerna.

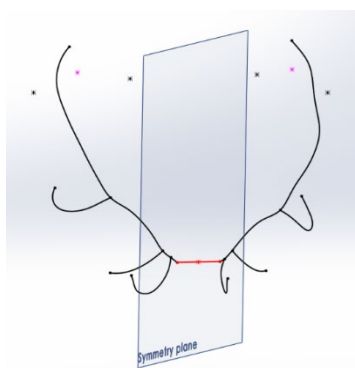
La primera alternativa fue establecer como plano de simetría, el plano que se ubicaba en el centro de la cuerna, tomando como referencia los elementos más notables de la cuerna en ambos lados, derecho e izquierdo. Para la obtención del plano se consideraron 4 segmentos que unen puntos significativos similares en los 2 lados de la cuerna: el segmento que une los centros de las rosetas, el que une los extremos de las 2 puntas luchaderas, y los que unen los inicios y finales de las puntas candil. Se obtuvo el punto medio de cada uno de los segmentos y, a partir de este conjunto de puntos medios, se determinó el plano que se ajusta a todos ellos mediante interpolación utilizando técnicas gráficas CAD. El resultado más rápido y eficiente para esta tarea se obtuvo con la ayuda del software de modelado 3D *Catia*, v5. La (Fig. 84) muestra los segmentos utilizados para el ajuste y la posición obtenida para este plano de simetría.



**Fig. 84.** Primer método para obtener el plano de simetría (4 puntos).

Se realizaron mediciones del Índice de Asimetría IA en las cuernas utilizando este plano de simetría, y los resultados fueron muy bajos para todas las cuernas, por lo que no se detectaron diferencias notables de los valores de asimetrías en ellas. La razón de este hecho es que este plano está sujeto a la forma de la propia cuerna. Una cuerna claramente asimétrica transmite esa asimetría al propio plano de simetría de referencia. Utilizando este plano de simetría no se detectan adecuadamente las desviaciones y lateralidades de la cuerna.

Una segunda opción para establecer el plano de simetría fue considerar el plano perpendicular al segmento que une los centros de las rosetas y que pasa por el punto medio de dicho segmento (Fig. 85).



**Fig. 85.** Segundo método para obtener el plano de simetría (1 punto).

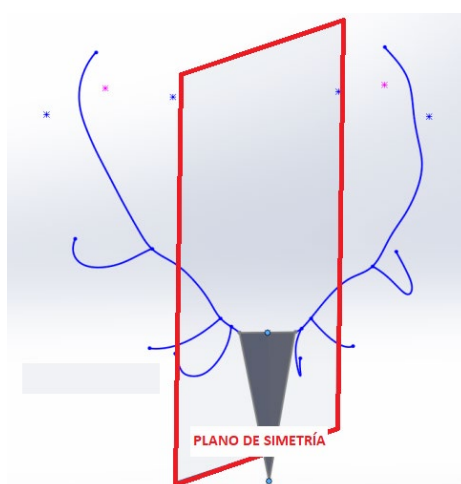
Los valores obtenidos para la IA de las cuernas medidas con este segundo método fueron más elevados que en el anterior, ofreciendo más pruebas de las asimetrías de la cuerna. En la primera propuesta se ha considerado el plano de simetría de referencia tomando puntos distantes de la cuerna, como los extremos de las puntas candil. Los valores de IA obtenidos bajo esta hipótesis fueron elevados debido a la poca definición simétrica de esos puntos de los extremos de las puntas candiles, por el bajo nivel de simetría que presentan; luego, el plano de simetría que se apoya en esos puntos presenta poca consistencia como referencia para el estudio.

La razón es que este plano no está sujeto a la forma global de la cuerna, sino sólo a 2 elementos más ligados al cráneo del animal, como son las rosetas. Con este segundo método se detectan las desviaciones laterales de los lados de la cuerna y las asimetrías que presenta.

La tercera y definitiva alternativa para establecer el plano de simetría considera los dos puntos del método anterior (centros de las dos rosetas) pero además incluye un punto significativo del cráneo del animal, este último punto no vinculado a la cuerna sino a su cabeza.

Considerando que las fotografías de las cuernas están disponibles con el cráneo o con el busto del animal, con la ayuda del método CAD Fotogramétrico, se restituyeron espacialmente los 3 puntos considerados para la definición del plano de referencia de simetría: los centros de las rosetas de ambos lados y como tercer punto el extremo del hueso nasal del hocico del animal.

Una vez definida la superficie triangular formada por los tres puntos, se ajustó el plano de simetría para que cumpliera tres condiciones espaciales: (1) Es perpendicular a esta superficie triangular; (2) Contiene el tercer punto extremo del hocico; y (3) Contiene el punto medio del segmento que une los dos centros de las rosetas (**Fig. 86**).



**Fig. 86.** Tercer método para obtener el plano de simetría (2 puntos).

Los valores obtenidos para el valor IA con este tercer método fueron incluso superiores a los del método anterior para los casos de cuernas que presentaban asimetrías. Con este método se detectan mejor las desviaciones y lateralidades de los pares de puntas de cuerna considerados.

Los resultados de las mediciones para evaluar el valor del índice de asimetría del IA en los ejemplares de la muestra considerada, tomando como referencia el plano de simetría referenciado sobre el plano del cráneo, presentan mayor uniformidad y menores divergencias que en el caso de ser estimado con las otras dos opciones propuestas para el plano de referencia.

Finalmente, se ha optado por esta tercera solución para establecer el plano de simetría. La geometría de la cabeza del animal presenta gran consistencia e invariabilidad, además de no experimentar cambios considerables con la edad del animal. Se ha considerado que estos dos puntos son los más adecuados para ser utilizados como referencia para la determinación del plano de simetría, y este tercer criterio muestra mejores resultados para el cálculo del Índice de Asimetría.

### 3. Resultados

A modo de ejemplo, a continuación, se detallan los resultados de las mediciones realizadas para un estudio de caso sobre un espécimen concreto. Se han obtenido los valores de  $(IA)_L$ ,  $(IA)_p$ , y  $(IA)$  (Tablas 8-9). La (Fig. 87) representa gráficamente los parámetros geométricos tenidos en cuenta para la estimación de ambos tipos de asimetrías.

**Tabla 8.** Primera serie de mediciones para obtener el IA (sin tener en cuenta los puntos de la corona).

ESTUDIO DE ASIMETRÍA:			
1. Índice de Asimetría, por 'Perpendicularidad' $AI_p$ :			
	$\Delta y$	$L$	$(AI)_p = \frac{\Delta y}{L}$
Segmento 1-2	0.59	12.39	0.048
Segmento 3-4	0.5	15.52	0.032
Segmento 5-6	1.28	27.57	0.046
Segmento 7-8	3.9	48.64	0.080
Segmento 9-10	1.02	71.22	0.014
Segmento 20-21	1.29	19.89	0.065
Segmento 22-23	3.45	44.62	0.077
$AI_p = \sum_1^n \frac{(AI)_p}{n}$			<b>0.052</b>
2. Índice de Asimetría, por 'Longitud' $AI_l$ :			
	$I1$	$I2$	$(AI)_l = \frac{ I1-I2 }{L}$
Segmento 3-4	7.63	7.89	0.017
Segmento 5-6	13.15	14.42	0.046
Segmento 7-8	24.18	24.46	0.006
Segmento 9-10	35.68	35.54	0.002
Segmento 20-21	9.64	10.24	0.030
Segmento 22-23	22.12	22.5	0.009
$AI_l = \sum_1^n \frac{(AI)_l}{n}$			<b>0.018</b>
Índice de Asimetría Total $AI$ :			
$AI = 0.47 AI_l + 0.53 AI_p$			<b>0.036</b>

**Tabla 9.** Segunda serie de mediciones para obtener el IA (teniendo en cuenta los puntos de la corona).

**ESTUDIO DE ASIMETRÍA:**

**1. Índice de Asimetría, por 'Perpendicularidad'  $AI_p$ :**

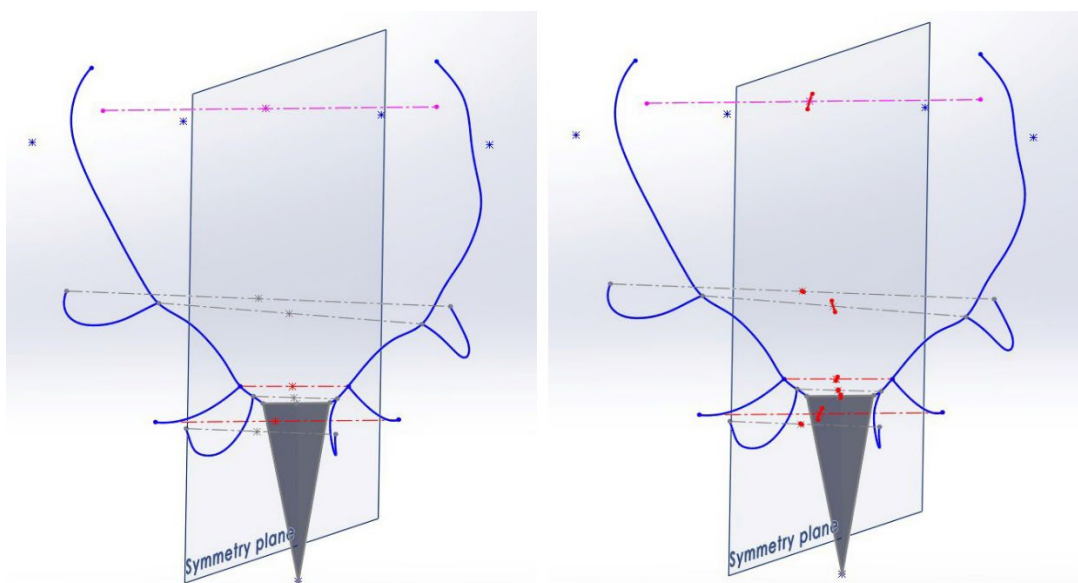
	$\Delta y$	$L$	$(AI)_p = \frac{\Delta y}{L}$
Segmento 1-2	0.59	12.39	0.048
Segmento 3-4	0.5	15.52	0.032
Segmento 5-6	1.28	27.57	0.046
Segmento 7-8	3.9	48.64	0.080
Segmento 9-10	1.02	71.22	0.014
Segmento 20-21	1.29	19.89	0.065
Segmento 22-23	3.45	44.62	0.077
Segmento 11-12	4.25	61.46	0.069
$AI_p = \sum_1^n \frac{(AI)_p}{n}$			<b>0.054</b>

**2. Índice de Asimetría, por 'Longitud'  $AI_l$ :**

	$l1$	$l2$	$(AI)_l = \frac{ l1-l2 }{L}$
Segmento 3-4	7.63	7.89	0.017
Segmento 5-6	13.15	14.42	0.046
Segmento 7-8	24.18	24.46	0.006
Segmento 9-10	35.68	35.54	0.002
Segmento 20-21	9.64	10.24	0.030
Segmento 22-23	22.12	22.5	0.009
Segmento 11-12	30.11	31.35	0.020
$AI_l = \sum_1^n \frac{(AI)_l}{n}$			<b>0.018</b>

**Índice de Asimetría Total  $AI$  :**

$AI = 0.47 AI_l + 0.53 AI_p$	<b>0.037</b>
------------------------------	--------------



**Fig. 87.** Parámetros geométricos para el cálculo de  $(AI)_L$  y  $(AI)_P$ .

Se tomó un ejemplar de una sesión de homologación como trofeo de caza, seleccionado por su probable alta calidad. Esta cuerna obtuvo la mejor puntuación entre todas las evaluadas. Tenía el valor de IA más bajo, 36 milésimas de punto, presentando así el mejor grado de simetría entre las dos ramas de su cuerna con respecto al plano de simetría de referencia. Las (Tablas 8-9) incluyen los valores de IA considerando las puntas de la corona y los valores sin considerar dichas puntas.

Los resultados obtenidos para el valor de la IA sobre una muestra más amplia de ciervos pertenecientes a distintos cotos y de distintas jornadas de caza y homologaciones se recogen en la (Tabla 10). El valor de la IA se incluye considerando las puntas de la corona y sin considerar dichas puntas. La última columna de la tabla muestra la valoración cinegética media otorgada a cada muestra. La valoración de la calidad cinegética se realizó según el baremo del "Manual de Medición y Homologación de Trofeos de Caza" (Llanes-Borrero 2013) sobre los ejemplares de ciervo considerados para el estudio.

**Tabla 10.** Resumen de resultados para los valores de IA y de calidad cinegética.

Fecha	Localización Coto de caza	Número de ejemplares	(IA) (sin corona) (valor medio)	(IA) (con corona) (valor medio)	Calidad cinegética (valor medio)
27-03-2014	Homologation (Andújar)	4	59	56.3	178
06-04-2015	Homologation (Andújar)	11	65.5	64.9	169
25-10-2017	Homologation (Andújar)	6	68.3	68.3	150
23-10-2014	Lugar Nuevo	18	84.4	84.9	150
18-12-2019	Selladores	9	136.7	134.1	154

(\*) *AI* values en milésimas de punto

Las medias de los valores de IA (sin corona) corresponden a la media aritmética de los valores de IA del conjunto de la muestra, sin considerar los puntos extremos de las puntas de la corona del ejemplar. Sólo se consideran los puntos significativos (homólogos) de la cuerna hasta la punta candil. Es la parte de la cuerna que, a primera vista, parece presentar un mayor grado de simetría.

Las medias de los valores de IA (con corona) corresponden a la media aritmética de los valores de IA del conjunto de la muestra que sí considera los puntos extremos de las puntas de la corona del ejemplar a través del punto medio geométrico de todos ellos. En este caso, se consideran todos los puntos significativos (homólogos) de la cuerna completa.

De los valores obtenidos de *AI* en las mediciones realizadas para los 48 ejemplares se puede observar que:

- Los valores de *AI* están comprendidos en un rango entre 36 y 209 milésimas de punto.

- Los valores de  $IA$  inferiores a 90 indican un alto grado de simetría en la cuerna, y los  $IA$  valores superiores a 100 indican que hay un bajo grado de simetría en ellas.
- Los valores de  $AI$  considerando la cornamenta completa, incluida la corona, representada como el punto medio geométrico de la nube de puntos extremos de sus puntas, son menores en la mayoría de los casos que los obtenidos considerando sólo la cornamenta hasta la punta del candil, por lo tanto, tienden a ofrecer un mayor grado de simetría de la cornamenta.
- Los ejemplares valorados con puntuación de medalla según el baremo oficial para determinar su calidad cinegética (valores superiores a 165 puntos) han tenido un valor  $AI$  valor, inferior a 70 milésimas de punto en la mayoría de los casos, con lo que muestran un alto grado de simetría.
- Los valores de  $AI$  en las muestras correspondientes a sesiones de homologación, aquellas en las que los técnicos oficiales miden las mejores cuernas para su puntuación y certificación de calidad cinegética, son los más bajos, y presentan por ello, un mayor grado de simetría. Estos ejemplares son elegidos por su buen tamaño y proporciones para su valoración oficial como trofeo de caza. En cuanto a las muestras pertenecientes a diferentes jornadas de caza ('Lugar Nuevo' y 'Selladores'), se ha observado que el grado estimado de  $AI$  también está directamente relacionado con su grado de calidad cinegética: las cornamentas con una alta calificación cinegética presentan un alto grado de simetría (valor bajo de  $AI$ ).
- El reducido valor de  $AI$  obtenido en aquellos ejemplares que tenían una alta puntuación en su calidad cinegética fue aún más pronunciada en las cuernas con mayor puntuación cinegética puntuación, en los ejemplares con "puntuación de medalla" (oro > 181 puntos, plata 173-181 puntos y bronce 165-173).

Por tanto, los resultados preliminares, muestran que el grado de correlación entre el índice  $AI$  y la valoración de la caza es muy evidente y característico. Los animales con mayor calidad cinegética también tienen cuernas extremadamente simétricas (valor  $AI$  extremadamente bajo); esta correlación se podrá demostrar con mayor consistencia en estudios de poblaciones con muestras de mayor tamaño.

#### 4. Discusión

Muchos estudios afirman que la  $AF$  podría ser un indicador fiable de la calidad de las poblaciones de cérvidos, pero esto aún no se ha demostrado debido a la dificultad de desarrollar una metodología para investigar la  $AF$  en cérvidos que asegure dicha correlación. En los cérvidos es más difícil estimar esta relación tomando como elemento de estudio su cornamenta ya que ésta, a diferencia de otras especies, no se mantiene en el tiempo, sino que se renueva anualmente y,

por tanto, su grado de desarrollo depende de las condiciones ambientales del periodo en el que la cornamenta ha crecido en pocos meses.

Relacionar el grado de AF con la calidad del ejemplar es inconsistente y no puede afirmarse con certeza. La mayoría de los investigadores sobre AF han intentado relacionar la AF con respecto a algunas características geométricas y físicas de la cuerna con la edad y con relaciones de éxito reproductivo y salud del ejemplar. Así, (Eggeman et al. 2009) relaciona la simetría de la cuerna de los cérvidos con el éxito reproductivo. (Krapinec et al. 2022) relaciona el grado de AF con la edad, pero no con las condiciones ambientales en las que se ha desarrollado el animal, como el nivel de precipitaciones en un periodo determinado y, por tanto, la cantidad de pastos disponibles para la alimentación. (Krapinec et al. 2022; Leary and Allendorf 1989) afirman que la AF en cérvidos no es un indicador de estrés ambiental y que cada población tiene una densidad específica en la que se manifiesta la AF. Otros autores (Møller et al. 1996; Hayden et al. 1994) afirman que la AF disminuye en individuos físicamente aptos. (Krapinec et al. 2022) relacionan la AF con algunos rasgos geométricos y físicos: la masa y el volumen de la cuerna junto con la circunferencia superior de la corona, con la edad del ejemplar.

Este último autor también señala que los estudios realizados hasta la fecha son de dudosa validez por la falta de rigor en la planificación de los experimentos debido al hecho fundamental de que las mediciones no se realizan sobre muestras repetidas; los estudios sobre desmogueos de un mismo ejemplar, por la dificultad de obtenerlos y que estos no estén deteriorados, además de trabajar en experimentos con tamaños de muestra pequeños, inferiores a 40 ejemplares. También afirma que pocas investigaciones se basan en muestras de ejemplares de mortalidad natural y que los diferentes estudios se basan en muestras de cornamentas sin cráneo ni mandíbula. También señala el problema histórico de correlacionar la AF con varios rasgos; algunos autores relacionan la AF con un único rasgo: [Hayden et al. 1994](#) y [Møller et al. 1996](#) con la condición física y la masa corporal del ejemplar, [Folstad et al. 1996](#) la relacionan con el índice de masa renal y [Solberg y Saether 1993](#), [Pélabon y van Breukelen 1998](#), [Ditchkoff et al. 2001](#) y [Bartoš et al. 2007](#) con la edad. Por todo ello, [Krapinec et al. 2022](#) indican que la metodología de investigación de la AF en cérvidos debe mejorarse en cuanto a la definición de rasgos en los que la AF represente un indicador objetivo de inestabilidad en el desarrollo del ejemplar.

Otro punto a tener en cuenta es que, hasta ahora, la investigación sobre la AF en el ciervo rojo se ha realizado en varias subespecies, desde el ciervo escocés ([Kruuk et al. 2003](#)) y el ibérico ([Martínez-Salmerón 2014](#)) hasta el centroeuropeo ([Bartoš et al. 2007](#)). Sin embargo, estas subespecies difieren en la morfología de su cuerna, por lo que las conclusiones derivadas de diferentes estudios sobre la AF en ciervos rojos no deberían ser uniformes.

En el caso de nuestra investigación, el objetivo es evaluar globalmente las desviaciones geométricas de puntos significativos de la cuerna sobre un plano de simetría para cuantificar

numéricamente el valor global de estos defectos. No se pretende asociar, en los ejemplares de la muestra estimada, un valor de AF para relacionarlo con ninguna característica geométrica o física de la cuerna, sólo proponer una metodología que pueda ser utilizada para futuros estudios de estimación de AF.

De los resultados obtenidos en la evaluación del IA en los 48 ejemplares de ciervo evaluados, se observa que los valores de IA se sitúan entre 36 y 209 milésimas de punto. Se puede suponer que valores bajos del valor de IA, inferiores a 90, indican gran simetría en la cuerna, teniendo en cuenta la convergencia simétrica visual percibida en la cuerna cuando se comparan ambos factores.

Los valores de IA mostrados en la (Tabla 10), considerando la cuerna completa, incluida la corona, representada como el punto medio geométrico de la nube de puntos extremos de sus puntas, son algo inferiores, en la mayoría de los casos, a los obtenidos considerando sólo la parte de la cuerna hasta las puntas candil. Esto es posible porque, al añadir este nuevo par de puntos al estudio y pasar de 14 a 15 pares de puntos significativos, la valoración se hace más consistente, resultando un valor global de IA más significativo y fiable.

El valor de la puntuación de la calidad cinegética en relación con el valor global de IA obtenido para cada ejemplar no representa uno de los objetivos de este estudio. El valor de la calidad cinegética es conocido en los ejemplares evaluados según otros estudios previos, y como futuras líneas de investigación, los autores destacan la convergencia existente entre ambas variables, tal y como se describe en la (Tabla 10); los mejores valores de IA obtenidos corresponden a aquellos ejemplares que presentan mejores valores de calidad cinegética, pero los autores no pretenden afirmar categóricamente este grado de correlación; esto deberá demostrarse en estudios más exhaustivos y con tamaños muestrales mayores.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se propone una metodología de fácil aplicación mediante un sistema paramétrico de Diseño Asistido por Ordenador para cuantificar el grado de asimetría de las cuernas de ciervo, obteniendo como resultado un índice de valor numérico.

El grado de simetría se define mediante un único valor numérico adimensional "Índice de Asimetría" AI, que cuantifica numéricamente esta característica para cada cuerna. Por consiguiente, se pueden realizar comparaciones de forma rápida y sencilla entre cuernas de un gran número de muestras.

Este nuevo método de estimación del grado de asimetría, como biomarcador, puede utilizarse en el estudio conjunto de otras variables, morfogeométricas características del ejemplar, etc., de

forma que permitan establecer causalidades y factores de influencia, tanto internos (genéticos, estrés, etc.) como externos, relacionadas con las condiciones del medio en el que se ha desarrollado el animal.

La metodología propuesta presenta otras ventajas en su implementación, como el uso de sólo dos variables geométricas en el proceso, longitud y perpendicularidad. También es rápida en su implementación ya que son pocos los pares de puntos relevantes a evaluar, permitiendo además medir grandes muestras de numerosos ejemplares en poco tiempo de forma que se obtengan resultados estadísticamente significativos y fiables.

Dado que el método se implementa a través de una aplicación de Diseño Asistido por Ordenador 3D para obtener la restitución fotogramétrica de la estructura de la cuerna y los pares de puntos a medir, hay que tener en cuenta el tiempo invertido y las habilidades requeridas en su uso para obtener el modelo-3D como dato de partida para el proceso de medición.

Por último, cabe destacar que esta metodología de cuantificación de asimetría puede aplicarse al estudio de otros elementos biológicos de cualquier especie animal o vegetal debido a la sencillez de su algoritmo y al proceso de obtención de datos de forma gráfica.

**RESULTADO 3º:****UNA NUEVA METODOLOGÍA, BASADA EN UN SISTEMA CAD, PARA EVALUAR LAS ASIMETRÍAS PARCIALES Y GLOBALES DE LAS CUERNAS DE CIERVO, A PARTIR DE DATOS DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD CINEGÉTICA.****Resumen.**

**Contexto.** En el campo de la biología son de gran relevancia los 'biomarcadores' de diferentes especies animales, así como las relaciones entre ellos y con la calidad del hábitat. En el estudio realizado para el caso del ciervo ibérico, se ha estimado el grado de asimetría, parcial y local, mediante una nueva metodología aplicada a la caracterización de la cuerna en un modelo-3D CAD. **Objetivo.** El objetivo principal ha sido definir y evaluar una nueva metodología para la estimación automatizada del grado de asimetrías, 'global', para toda la estructura de la cuerna del ciervo, o 'parcial' para rasgos seleccionados de la cuerna. La cuerna se caracteriza en un modelo-3D CAD generado con sólo dos fotografías. El algoritmo aprovechará las mediciones utilizadas en la evaluación de la calidad cinegética. Se midieron las cornamentas de 48 ejemplares de ciervo ibérico abatidos en jornadas de caza. **Métodos.** Los datos de partida para el estudio han sido el modelo físico de la cuerna o su caracterización mediante un modelo-3D de su estructura axial. Éste se obtuvo mediante fotogrametría a partir de dos fotografías tomadas desde diferentes ángulos. Sobre el modelo de cuerna se tomaron las medidas necesarias para la evaluación de la calidad cinegética. Comparando las desviaciones existentes, se cuantificaron las asimetrías en cada rasgo estructural y para la cuerna completa. **Principales resultados.** Los resultados preliminares han detectado una aproximación entre los valores de la asimetría global y la calidad cinegética. También se ha observado que el valor de la asimetría parcial correspondiente al perímetro de la segunda sección transversal tomada en la cuerna podría aproximarse al valor de la asimetría global. **Conclusiones.** Los resultados mostraron que la evaluación de las asimetrías de la cuerna de ciervo caracterizadas en un modelo-3D CAD es rápida, barata y fácil de implementar. **Implicaciones.** Se permite la aplicación en futuros estudios de la asimetría de otros elementos biológicos de origen animal o vegetal. Sólo es necesario que los datos de partida, la estructura axial bilateral, se caractericen en forma de modelo-3D.

**Palabras clave**

Cuerna de ciervo. Valor de asimetría. Calidad cinegética. Aplicaciones biológicas. Modelo-3D CAD. Puntos de referencia. Técnicas digitales 3D. Diseño gráfico por ordenador.

## 1. Introducción

En los ungulados, el grado de desarrollo estable de un animal viene determinado por factores internos, genéticos y externos, nivel de pastos en el entorno, relaciones con otras especies, etc.; algunos de ellos pueden alterar el desarrollo del animal, provocando defectos geométricos en determinados rasgos morfológicos de la cuerna. Las astas de los ungulados se distinguen en que, en algunas especies, como los bóvidos, sus cuernos permanecen estables a lo largo del tiempo, y en otras especies, como los cérvidos, las cuernas se desprenden tras la época de celo y se renuevan cada año. Algunos autores [Goss 1983](#), [Bubenik y Bubenik 1990](#) y [Geist 1998](#) señalan las diferencias morfológicas y evolutivas entre las astas de ambas especies de ungulados. Otros autores, [Baxter et al. 1999](#), [Clements et al. 2010](#) y [Gómez et al. 2022](#) indican los factores que influyen en el crecimiento de la cornamenta de los cérvidos y el periodo de "muda". El estado de la cuerna tras la renovación anual representa un biomarcador relevante que puede relacionarse con los factores de influencia a los que ha estado sometido el ejemplar. La función de la cuerna como carácter sexual secundario y con propiedades biomecánicas adaptadas a la lucha durante el periodo de celo se ven por tanto muy afectadas por factores ambientales, e incluso se ha observado que el año de nacimiento es un factor determinante para la futura calidad de la cuerna del individuo ([Azorit et al. 2002a](#)).

Una de estas alteraciones es definida por varios autores como "asimetría fluctuante" (AF), que representa aquellas desviaciones aleatorias en el desarrollo simétrico de ciertos rasgos de estructuras bilaterales ([Ludwig 1932](#); [Van Valen 1962](#)). Estudios sobre la asimetría fluctuante (AF) se realizaron en especies de invertebrados, vertebrados inferiores y aves ([Valentine et al. 1973](#); [Govind y Pearce 1986](#); [Møller 1992](#)). Los autores [Romero et al. 2023](#) estudian los valores de asimetría en el esqueleto de primates (*macacos rhesus*) que sufrieron cierto grado de estrés, debido a eventos climáticos huracanados, en su etapa de desarrollo gestacional. La mayoría de los estudios se han realizado sobre la estimación del grado de asimetría en especies de ungulados, como el alce (*Alces alces*) ([Solberg y Sæther 1993](#)), el gamo (*Dama dama*) ([Stenström 1998](#); [Putman et al. 2000](#)), el reno (*Rangifer tarandus*) ([Markusson y Folstad 1997](#)), rebeco alpino (*Rupicapra rupicapra*) ([Chirichella et al. 2020](#)) y el ciervo (*Cervus elaphus hispanicus*) ([Mateos et al. 2008](#)), así como corzos (*Capreolus capreolus*) ([Pélabon y Van Breukelen 1998](#)), apoyando la relación entre la AF y el estrés del animal causado por condiciones ambientales adversas en el año de crecimiento de la cuerna o antes.

Varios estudios evalúan el grado de divergencia bilateral de los animales y las causas de la inestabilidad del desarrollo en función de diferentes condiciones de estrés animal ([Clarke 1995](#); [Møller 1997](#); [Ditchkoff et al. 2001](#); [Palmer y Strobeck 2003](#); [Van Dongen 2006](#)). [Jennings y Gammell 2023](#), estudian la influencia de la AF en la cuerna del gamo con la calidad individual del ejemplar y con el grado de relevancia de la cuerna como arma en la lucha con otros machos. En ciervos rojos ibéricos [Azorit et al. 2002b](#) observaron una correlación directa entre las ramas

derecha e izquierda de las astas de ciervo siendo más significativa en los grosores que en las longitudes y número de puntas, y [Kruuk et al. 2003](#) relacionan esta variable de asimetría con la edad.

El estudio de la AF en las cuernas del ciervo ibérico, dado que se renuevan anualmente, puede ser un buen indicador de su calidad individual y del grado de estrés ambiental que han sufrido durante su desarrollo ([Mateos et al. 2008](#)).

Varios estudios cuestionan la fiabilidad de los resultados sobre la relación de la asimetría con otras variables: [Palmer 1999](#) y [Kruuk et al. 2003](#) afirman que se necesitan estudios con muestras de gran tamaño para obtener resultados concluyentes; otros destacan que se deberían aplicar metodologías con errores de medición controlados ([Björklund y Merilä 1997](#); [Van Dongen et al. 1999](#); [Palmer y Strobeck 2003](#)) y cuestionan la relación entre asimetría y estrés animal porque los resultados obtenidos en numerosos análisis no son consistentes ni homogéneos ([Van Dongen 2006](#)); o ponen en duda que el desarrollo de la cuerna sea un factor de selección de la hembra ([Kruuk et al. 2002](#); [Bartos y Bahbouh 2006](#)).

Las metodologías para los estudios de asimetría en cérvidos deberían ser más rigurosas, basándose en el estudio de aquellos rasgos particulares de la cuerna que representen las causas de la inestabilidad del desarrollo, provocando así la asimetría en las dos ramas de la cuerna ([Krapinec et al. 2022](#)). Algunos autores destacan la importancia de orientar los estudios de asimetría hacia el análisis de rasgos geométricos particulares de la cuerna, así, [Palmer y Strobeck 2003](#), [Van Dongen 2006](#) y [Mateos et al. 2008](#) establecen valores parciales de asimetría en rasgos diferenciales de la cuerna, permitiendo detectar y relacionar aquellos rasgos más expuestos al estrés para que los resultados concluyentes sean más rigurosos en estudios sobre la inestabilidad del desarrollo de la cuerna. [Krapinec et al. 2022](#) relaciona el grado de AF en diferentes rasgos de la cuerna y en diferentes intervalos de edad. Contrariamente a otros estudios, afirma que la AF causada por la inestabilidad del desarrollo es más pronunciada en los machos de más edad. En estadios tempranos hay poco grado de asimetría, sin embargo, si se detecta asimetría en ciertos rasgos esta se mantiene en estadios más maduros de edad. Los estudios más frecuentes sobre la asimetría en las cuernas de los cérvidos han consistido en evaluar la asimetría en rasgos particulares de estas. Así, numerosos autores han estudiado el grado de asimetría, no como un valor compuesto, sino en varios rasgos, desde unos pocos ([Solberg y Sæther 1993](#); [Pélabon y van Breukelen 1998](#); [Putman et al. 2000](#)) hasta un gran número ([Kruuk et al. 2003](#); [Bartoš y Bahbouh 2006](#); [Bartoš et al. 2007](#)). Los estudios que ofrecen un valor compuesto para la asimetría son menos frecuentes ([Mateos et al. 2008](#); [Baker y Hoelzel 2013](#)). Del mismo modo, [Bowyer et al. 2001](#) y [Ditchkoff et al. 2001](#) estudian la relación de la asimetría con los valores de calidad cinegética obtenidos como trofeos de caza en las especies de alce de Alaska y ciervo de cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en Norteamérica.

Las metodologías tradicionales se han basado en evaluaciones parciales de la asimetría de algunos rasgos concretos del elemento biológico estudiado y no en evaluaciones globales de la asimetría de toda la estructura. Esto se debe a la dificultad de realizar las mediciones necesarias y su precisión respecto a todos los rasgos que forman la estructura, para obtener finalmente un valor global de asimetría.

Los autores, [Palmer y Strobeck 2003](#), [Van Dongen 2006](#) y [Mateos \*et al.\* 2008](#) destacan la importancia de estudiar rasgos particulares de la cuerna y su relación con el grado de estrés del animal.

El método presentado permite ampliar este estudio sobre diferentes rasgos de la estructura de la cuerna y sus relaciones con el estrés del animal. La nueva metodología permite ampliar este estudio e inferir posteriormente las causas de influencia.

Estudios más recientes han evaluado los valores de asimetría, no como un valor global, sino como valores parciales para rasgos diferenciales de la estructura de la cuerna ([Solberg y Sæther 1993](#); [Putman \*et al.\* 2000](#); [Pélabon y van Breukelen 1998](#)). En menor medida, se evalúa y estima un valor global de asimetría para toda la cuerna ([Mateos \*et al.\* 2008](#); [Baker y Hoelzel 2013](#)).

El nuevo método permite estimar valores parciales de asimetría para aquellos rasgos de la estructura de la cuerna tenidos en cuenta en la evaluación del biomarcador de calidad cinegética. Es decir, con los mismos valores es posible evaluar ambos biomarcadores. También permite estimar un valor global de asimetría para toda la cuerna.

En cuanto a las diferentes tipologías metodológicas para estimar el valor de la asimetría, algunos autores, [Møller 1992](#), [Solberg y Saether 1993](#), [Bartoš y Bahbouh 2006](#) y [Mateos \*et al.\* 2008](#) han creado métodos y herramientas para cuantificar la asimetría de elementos biológicos utilizando técnicas proyectivas de medición lineal en dos dimensiones. [Bartoš \*et al.\* 2007](#) estiman el grado de asimetría utilizando tres características de la cuerna: peso, longitud y número de puntas, sin basarse totalmente en valores geométricos.

[Ditchkoff y Defreese 2010](#) utilizan metodologías tridimensionales para la definición geométrica de las cornamentas para el posterior análisis de las asimetrías. El método propuesto define la cornamenta en tres dimensiones para estimar, del mismo modo, los valores de asimetría parcial en sus rasgos estructurales, sin considerar planos de simetría horizontales o verticales referenciados en la propia cuerna. Los autores [Tsuboi \*et al.\* 2020](#), obtienen un modelo-3D de la cuerna del ciervo y evalúan su precisión geométrica aplicando la técnica de fotogrametría-3D multi-imagen (SfM) (*Structure from Motion*). La aplican a estudios morfológicos y para estimar el volumen de la cuerna de los ciervos.

[Montalvo-Gil \*et al.\* 2022](#) propusieron un método para determinar la asimetría global de toda la cuerna. Para ello, utiliza los datos de la cuerna caracterizados por un modelo-3D CAD de su estructura axial. En este caso, se consideran las desviaciones de los puntos extremos de las

puntas de ambas ramas de la cuerna con respecto a la referencia de un plano de simetría ligado a puntos relevantes del cráneo del ejemplar.

La nueva metodología presentada en este estudio permite una aplicación más directa, ya que no considera la definición previa de un plano de simetría. Se considerarán las divergencias, de las medidas poderadas, de diferentes rasgos estructurales relacionados en las dos ramas de la cuerna del ciervo ibérico (*Cervus elaphus hispanicus*). Con estos valores de asimetrías parciales se obtiene finalmente un valor global de asimetría para toda la estructura de la cuerna. Para el análisis se utiliza la caracterización de la cuerna como modelo-3D de su estructura axial. El algoritmo aprovecha las medidas consideradas para la valoración del grado de calidad cinegética (Llanes-Borrero 2013).

El nuevo método aportará una serie de ventajas relevantes frente a otros métodos:

- Para el análisis, se utiliza como dato de entrada la caracterización de la estructura de la cuerna mediante un modelo-3D CAD, obtenido por restitución fotogramétrica a partir de pocos datos, sólo dos fotografías.
- El modelo-3D obtenido es preciso y, por lo tanto, las desviaciones estimadas en las dos ramas de la cuerna también lo serán, obteniéndose finalmente valores fiables del grado de asimetrías.
- No es necesario referir las desviaciones, estimadas entre las dos estructuras bilaterales de la cuerna, a un plano de simetría previamente definido.
- Dado que la definición CAD de la cuerna mediante un modelo-3D es relativamente rápida, permitirá realizar nuevos análisis con muestras de mayor tamaño, de modo que puedan obtenerse resultados concluyentes y grados de correlación con otros biomarcadores y factores de influencia.
- Permitirá estimar un valor "global" del grado de asimetría para toda la cuerna.

Estimar un valor de asimetría global es de gran dificultad debido al gran número de mediciones que deben considerarse en puntos significativos correspondientes a todos los rasgos de la estructura de la cuerna. Por esta razón, la mayoría de los métodos anteriores han estimado los valores de asimetría de rasgos específicos de la cuerna.

El método propuesto resuelve todos estos inconvenientes, ya que permite medir rápidamente, sobre el modelo-3D CAD previamente definido, los valores de las desviaciones en los rasgos de las dos ramas de la cuerna (asimetrías parciales) y, a partir de ellos, cuantificar un valor de asimetría "global" para toda la cuerna.

- El método propuesto también permite aprovechar las mismas medidas utilizadas en la evaluación de la calidad cinegética de la cuerna. Éstas corresponden a las desviaciones geométricas producidas en los rasgos estructurales de las dos ramas de la cuerna. Por lo tanto,

con las mismas mediciones se pueden estimar dos biomarcadores: el grado de calidad cinegética y los valores de asimetría parcial y global.

Otros estudios posteriores, de interés biológico y ecológico, tendrán por objeto relacionar los valores obtenidos para este biomarcador con otros factores de influencia.

## **2. Materiales y Métodos**

Para validar la metodología se utilizó un conjunto de 48 ejemplares de ciervo rojo: 21 de ellos procedentes de tres sesiones de procesos de aprobación oficial como trofeos de caza (sesiones de homologación) y talleres de taxidermia, y 27 ejemplares abatidos en dos jornadas de caza en cotos entre 2014 y 2019, con edades comprendidas entre 5 y 9 años, en el Parque Natural Sierra de Andújar, en el sur de España.

### **2.1. Equipo utilizado**

Para todos los ejemplares estudiados se tomaron fotografías desde diferentes puntos de vista y en las que aparece una referencia métrica, un panel con un formato DIN-A2 (594 x 420 mm), con el fin de posibilitar la restitución fotogramétrica ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)) para obtener la representación espacial 3D de la cuerna representada por estructura axial. Las fotografías se tomaron con una cámara réflex *Nikon 300D*, resolución 4.288 x 2.848 píxeles, con objetivo zoom 28-80 mm. La exposición se mantuvo en valores en torno a 35 mm durante la toma fotográfica. Para que el proceso de restitución fotogramétrica fuera fiable y preciso, se comprobó que las fotografías tomadas con cámaras réflex presentaran menos deformaciones en el centro y en la periferia, que las tomadas con cámaras compactas, sin necesidad de utilizar costosas cámaras métricas ni tratamientos posteriores de edición y ajuste de las fotografías para corregir las deformaciones.

En términos de hardware, no se requieren grandes recursos. La tarjeta gráfica utilizada es una '*Nvidia GeForce RTX*' con 6 Gb de memoria. En estudios con objetos CAD 3D se recomienda que la tarjeta gráfica sea independiente de la placa base y tenga una gran cantidad de memoria para conseguir un buen rendimiento en el procesado de imágenes.

Para la restitución de la cuerna, representada en las dos fotografías, se utilizó el software de modelado 3D '*SolidWorks v.2020*' de *Dassault Systèmes*, creando un escenario 3D para la definición del modelo-3D de la cuerna y para la medición de las diferentes partes geométricas de su estructura axial.

Para las mediciones manuales de las diferentes partes de la cuerna, necesarias para el proceso de valoración cinegética, sólo es necesario utilizar una cinta métrica flexible y adaptarla a las diferentes superficies externas de la cuerna como se indica en (Llanes-Borrero 2013).

## 2.2. Objeto de estudio

Para la nueva metodología propuesta, el estudio de la asimetría de la cuerna de ciervo, es necesario partir de un modelo que represente la estructura de la cuerna, de forma que sobre él se puedan medir las longitudes y perímetros de las diferentes partes estructurales de la cuerna consideradas.

El proceso de definición del modelo-3D de la cuerna, utilizando una metodología de restitución fotogramétrica a partir de dos fotografías de la cuerna tomadas desde diferentes ángulos, se describe en (Rubio-Paramio *et al.* 2016) (Fig. 88). El modelo-3D axial está formado por diferentes curvas spline que representan cada uno de los rasgos de la estructura de la cuerna. Éstas se obtienen intersectando los rayos proyectivos de los puntos considerados de la cuerna representados en las dos fotografías. Del mismo modo, la geometría digital CAD de la cuerna también se valida sobre el modelo físico de la misma, demostrando su grado de aproximación y precisión geométrica.

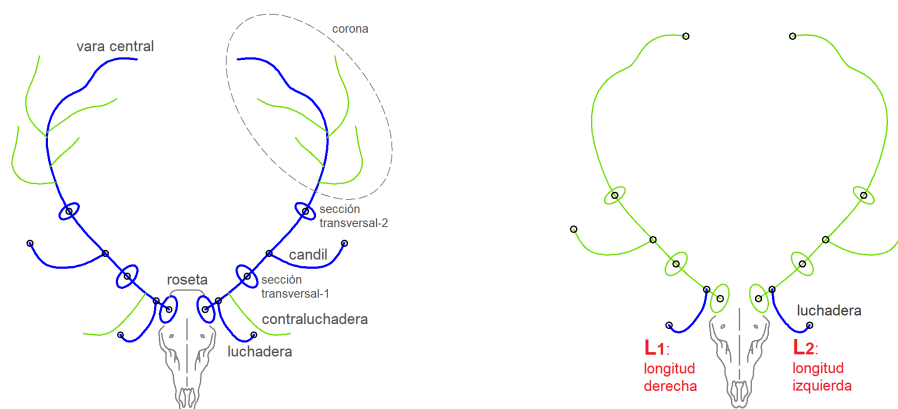
En el análisis propuesto los datos de partida son la caracterización de la cuerna en un modelo-3D CAD de su estructura axial, que describe fielmente los elementos geométricos de su estructura: vara central, puntas principales (luchaderas y candiles) y las secciones transversales de las partes relevantes de la vara central de la cuerna. (Figs. 88-89).



Fig. 88. Cuerna de ciervo representada por dos fotografías y un modelo-3D de su estructura axial y secciones transversales.

## 2.3. Datos geométricos de la estructura de la cuerna

Para el presente estudio se considerarán diferentes partes estructurales relevantes de la geometría de la cuerna, representadas por su estructura axial, con el fin de cuantificar la longitud de cada una de ellas (Fig. 89).



**Fig. 89.** Elementos geométricos de la cuerna considerados para el estudio: vara central, puntas luchaderas, puntas candiles y secciones transversales. Longitudes consideradas (derecha e izquierda) en el rasgo estructural considerado (punta luchaderas) para la estimación de su valor (IAP) (Índice de asimetría parcial).

Los elementos geométricos considerados para cada una de las dos ramas de la cuerna son: la "vara central", la "punta luchadera", la "punta candil", la "roseta" y las dos secciones transversales de la "vara central", una tomada entre la "punta luchadera" y la "punta candil", y la otra entre la "punta candil" y la "corona".

#### 2.4. Descripción de la metodología propuesta

La metodología se describe en el Capítulo 'Metodología general'.

Los valores (IAP) y (IAG) cuantifican el defecto de asimetría de la cuerna. Para un rasgo dado, un valor IAP "0" indica ausencia de asimetría; los valores próximos a cero representan grados reducidos de asimetría.

Esta metodología utiliza las mismas medidas tomadas en las cuernas para estudiar su calidad cinegética. La metodología propuesta permite su aplicación sobre el modelo-3D de la cuerna o sobre su modelo físico.

### 3. Resultados

El proceso de cálculo de los valores de (IAP) y (IAG) para cada una de las cuernas se detalla en (Tabla 11). Estos resultados se derivan de las mismas medidas utilizadas para la estimación de la calidad cinegética, valores métricos en (cm) de los seis rasgos estructurales de las cuernas consideradas. Los resultados pertenecen al ejemplar de la muestra, tomado como referencia, que presenta la mayor calidad cinegética, 187 puntos (medalla de oro).

Tabla 11. Proceso de cálculo de (IAP) y (IAG)

valores (IAP) y (IAG): (ejemplar de referencia)		
Datos iniciales (calidad cinegética): longitudes (cm)	(PAI)'s Índices Parciales de Asimetría	(GAI) Índice Global de Asimetría
Vara central drcha. 97.6 Vara central izqda. 94.8	(PAI)(Vara central) <b>0.015</b>	34.6%
Luchadera drcha. 26.9 Luchadera izqda. 29.1	(PAI)(Luchadera) <b>0.039</b>	5.1%
Candil drcho. 28.7 Candil izqdo. 29.5	(PAI)(Candil) <b>0.014</b>	5.2%
Roseta drcha. 22.7 Roseta izqda. 23.3	(PAI)(Roseta) <b>0.013</b>	16.6%
Secc. LU-CA drcha. 13.5 Secc. LU-CA izqda. 13.7	(PAI)(Secc. LU-CA) <b>0.007</b>	19.6%
Secc. CA-CO drcha. 13.1 Secc. CA-CO izqda. 13.1	(PAI)(Secc. CA-CO) <b>0</b>	18.9%
<b>Total Value (GAI)</b>		<b>0.011</b>

El análisis de evaluación de los valores de asimetría parcial (IAP) y asimetría global (IAG) de todos los ejemplares evaluados se realizó sobre los datos de entrada de la cuerna caracterizada por su modelo-3D CAD (Tabla 12). Los resultados muestran la media aritmética de los valores (IAP) y (IAG) en los ejemplares de cada una de las muestras, correspondientes a las tres "sesiones de homologación" y a los dos "jornadas de caza".

Tabla 12. Resultados de 'IAP' y 'IAG' en cuernas caracterizadas en 'modelo-3D CAD'.

mediciones cuerna Modelo-3D CAD								
(sesiones de 'Homologación')								
	IAP						IAG	Calidad Cinegética (puntuación)
	longitudes			perímetros				
	Vara central	Luchaderas	Candiles	Rosetas	LU-CA	CA-CO		
(2014-03-27)	0.012	0.045	0.039	0.022	0.024	0.025	<b>0.022</b>	177
(2015-04-06)	0.015	0.034	0.042	0.025	0.014	0.020	<b>0.020</b>	167
(2017-10-25)	0.016	0.042	0.083	0.028	0.026	0.020	<b>0.026</b>	150
media	<b>0.014</b>	<b>0.040</b>	<b>0.055</b>	<b>0.025</b>	<b>0.021</b>	<b>0.022</b>	<b>0.022</b>	
(jornadas de caza)								
	IAP						IAG	Calidad Cinegética (puntuación)
	longitudes			perímetros				
	Vara central	Luchaderas	Candiles	Rosetas	LU-CA	CA-CO		
(2014-10-23)	0.022	0.051	0.082	0.075	0.025	0.029	<b>0.037</b>	150
(2019-12-18)	0.009	0.045	0.075	0.077	0.057	0.038	<b>0.040</b>	153
media	<b>0.015</b>	<b>0.048</b>	<b>0.078</b>	<b>0.076</b>	<b>0.041</b>	<b>0.033</b>	<b>0.039</b>	

Los valores "IAG" obtenidos en las mediciones CAD se sitúan entre 0.020 y 0.040.

#### 4. Discusión

Los valores (IAP) y (IAG) detectan algunas relaciones sobre los resultados obtenidos en los diferentes rasgos estructurales estudiados y sobre la procedencia de los ejemplares, de "sesiones de homologación" o de "jornadas de caza". También se destaca la convergencia entre los resultados preliminares obtenidos en el biomarcador de asimetría y el biomarcador de calidad cinegética.

El valor de 'IAG' es inferior en los ejemplares procedentes de las 'sesiones de homologación' como trofeos de caza; 0.022 de valor medio, un 44% inferior al valor medio obtenido de 0.039 de los ejemplares procedentes de jornadas de caza. Esto se debe a que las cuernas de los ciervos de las 'sesiones de homologación' presentan un mayor grado de calidad cinegética, y por ello son seleccionadas por sus propietarios para ser tratadas en talleres de taxidermia para su definición como trofeos de caza.

Respecto al valor de asimetría evaluado en los diferentes rasgos de la estructura de la cuerna, 'IAP', se ha concluido que sobre las tres longitudes consideradas los valores más bajos de 'IAP', con valores medios entre 0.014 y 0.015, corresponden a la longitud de la 'vara central' de la cuerna, representando por tanto el elemento más simétrico. El siguiente elemento de la cuerna, algo menos simétrico, corresponde a la 'punta luchadera', con valores medios de 'PAI' comprendidos entre 0.040 y 0.048; el elemento menos simétrico es el correspondiente a la 'punta central o candil', con valores medios que oscilan entre 0.055 y 0.078.

Respecto a los perímetros de las 'rosetas' y de las dos secciones transversales consideradas en partes estructurales de la cuerna, se observa que las 'rosetas' presentan el mayor defecto de asimetría, con valores medios de 0.025 en ejemplares de 'sesiones de homologación' y de 0.076 en ejemplares de jornadas de caza. Los valores medios de 'IAP' en los perímetros de las secciones transversales consideradas es de 0.0215 en las cuernas de 'sesiones de homologación' y de 0.037 en las de jornadas de caza, un 72% superior.

Por último, se puede establecer una aproximación para el valor "IAG" representado por un único rasgo "IAP" de los seis que se han considerado representados por diferentes rasgos geométricas de la cuerna. Como puede observarse en la ([Tabla 4](#)), el valor de la "asimetría global" "IAG" de la cuerna se aproxima mucho al valor de la "asimetría parcial" "IAP" correspondiente al perímetro de la sección transversal tomada entre la "punta central o candil" y la "corona" de la cuerna; por lo que, en una primera aproximación, el valor global "IAG" podría representarse por el valor "IAP" para ese rasgo geométrico debido a la gran convergencia de estos valores.

Las ventajas de la metodología propuesta se basan en su facilidad de implementación y la economía de recursos necesarios. Por ello, su implementación puede ser adecuada en el estudio de los biomarcadores, asimetrías y calidad cinegética de grandes poblaciones y muestras, como

es el caso de los animales muertos abatidos en jornadas de caza (Schoenebeck y Peterson 2014) sobre ejemplares seleccionados y con muestras de diferentes procedencias. Posteriormente, estos resultados pueden relacionarse con otros factores influyentes. Además, esta nueva metodología podría ampliar el estudio de ejemplares muertos de forma natural y de mayor edad (Mills y Peterson 2013). Se podría demostrar la relación de asimetría de varios rasgos estructurales de la cuerna con respecto a otros valores medios de la cuerna. También podría estudiarse el grado de consistencia de las relaciones de las asimetrías parciales con la edad. El método propuesto permite el estudio de rasgos particulares de la cuerna en los que posteriormente se pueden detectar las causas de las inestabilidades en el desarrollo de la cuerna a distintos intervalos de edad (Krapinec *et al.* 2022).

Esta metodología propuesta nos permitirá además relacionar dos variables, biomarcadores muy relevantes en los estudios biológicos, el grado de calidad cinegética y la asimetría global 'IAG' de la cuerna. En base a los datos obtenidos, se ha obtenido una fuerte relación directa entre el valor de 'calidad cinegética' y el de asimetría. Así, los ejemplares procedentes de las 'sesiones de homologación' presentan altos valores de 'calidad cinegética' (Tabla 4) y bajos valores de 'IAG', representando bajos grados de defecto y, por tanto, altos valores de simetría. Los ejemplares que se evalúan en 'sesiones de homologación' son aquellos cuya calidad cinegética se reconoce a simple vista debido a su gran desarrollo geométrico, número de puntas, color, etc., siendo seleccionados por los cazadores para su valoración y posterior conservación como trofeos de caza.

Por tanto, se propone esta nueva variable 'IAG' como un 'biomarcador' que cuantifique el grado de defecto de asimetría de la cuerna en las dos ramas de la cuerna del ciervo, de forma que en futuros estudios se puedan establecer relaciones y causalidades con otros factores ambientales internos y/o externos en los que se han desarrollado los ejemplares.

Estudios posteriores de poblaciones de ejemplares, con muestras más amplias, permitirán inferir los resultados obtenidos con otras variables internas (biomarcadores) como la edad, la densidad de la cuerna y el grado de desarrollo geométrico determinado por la calidad cinegética, u otras variables externas como el nivel de pastos del lugar concreto, el nivel de pluviometría, la relación del entorno con otras especies animales, etc., en el que se ha desarrollado la población.

Otros estudios podrán relacionar la asimetría de rasgos estructurales específicos de la cuerna con la edad o con variables geométricas como la envergadura o la calidad cinegética.

La especie analizada para definir la metodología propuesta es el ciervo rojo (*Cervus elaphus hispanicus*). Dado que el método propuesto parte inicialmente de las mediciones realizadas para la valoración de la calidad cinegética, basadas en la cuantificación de las diferencias de longitudes y perímetros de los rasgos geométricos de las ramas derecha e izquierda de la cuerna, la aplicabilidad de la metodología propuesta podría generalizarse a otras especies indicadas en el

"Manual de Homologación de Trofeos de Caza Mayor en España" (Llanes-Borrero 2013): a otros cérvidos, como el gamo (*Dama dama*) y el corzo (*Capreolus capreolus canus*) y a otras especies de ungulados, como el jabalí (*Sus scrofa baeticus*), el muflón (*Ovis orientalis musimon*), la cabra montés (*Capra pirenaica victoriae*), la oveja bárbara (*Ammotragus lervia lervia*) y el rebeco (*Rupicapra pyrenaica parva*).

Para ejemplares en libertad que se desarrollan en áreas o hábitats de países que protegen especies específicas de cérvidos, como el huemul (*Hippocamelus bisulcus*) en Argentina, la aplicación de esta metodología es complicada por razones de conservación y gestión de la especie. Para obtener las medidas métricas de las cuernas, para la estimación de las asimetrías, es necesario disponer de las cuernas físicas o de su caracterización en forma de modelo-3D CAD a partir de dos fotografías. Las fotografías de la cuerna, utilizadas como datos de partida para obtener el modelo-3D, deben incluir una referencia métrica que haga posible el proceso de restitución espacial fotogramétrica. Con los especímenes en libertad, este proceso es muy complicado de llevar a cabo y poco eficiente debido a los costosos requisitos de infraestructura y equipamiento controlado, como, por ejemplo, cámaras de fototrampeo bien equilibradas con escalado validado.

Por lo tanto, en la estimación del biomarcador de asimetría en estructuras bilaterales de la cuerna de cérvidos, la aplicación de la metodología en animales vivos es complicada. En zonas protegidas, donde se conservan ejemplares en peligro de extinción u otras causas, la metodología podría aplicarse a ejemplares encontrados muertos. En especies protegidas, sobre ejemplares encontrados muertos, la metodología propuesta aportaría información adicional en análisis completos, como procedimientos de necropsia, aplicados para determinar las causas y otros datos de interés sobre las circunstancias de la muerte del ejemplar. Los datos de asimetría obtenidos pueden ser utilizados posteriormente para inferir con otros biomarcadores estimados, pero condicionados por el entorno ambiental favorable.

Otro caso de obtención de la cuerna física puede ser mediante la obtención de las ramas de la cuerna, procedentes de 'desmogues', recogidas en el campo al final de la estación invernal, cuando los cérvidos renuevan anualmente su cuerna, al igual que los estudios en los que los 'desmogues' se utilizan para diferentes estudios, ya sean genéticos (Venegas *et al.* 2020) o para validar metodologías de cálculo del volumen y densidad de la cuerna (Rubio-Paramio *et al.* 2012). Pero esto es complicado por la dificultad de encontrar y asociar las dos ramas de la cuerna al mismo ejemplar. Otro inconveniente es la coherencia de los resultados del estudio debido a la posibilidad de limitación del tamaño de la muestra.

#### 4.1. Comparación de metodologías

Los resultados obtenidos, con la metodología propuesta 'Met-2' se compararon con los obtenidos con otra metodología anterior propuesta por el mismo autor, [Montalvo-Gil et al. 2022](#), denominada 'Met-1'. Se observa ([Tabla 13](#)) que los valores medios de IA (índice de asimetría) obtenidos con 'Met-1, fueron de 0.063 para los ejemplares estudiados en 'sesiones de homologación', un 43% inferiores a los de los ejemplares procedentes de jornadas de caza, con un valor medio de 0.110; lo que indica una mayor simetría en los ejemplares procedentes de 'sesiones de homologación'. La misma proporción se produce en los resultados aplicando 'Met-2', 0.024 y 0.039, un 39% inferior, por lo que los resultados de las dos metodologías convergen, cada una en su escala de valores.

**Tabla 13.** Resultados de 'IA' (Met-1) y (Met-2) con cuerna en 'modelo-3D CAD'.

<b>Resultados (AI): (Met-1) and (Met-2): sobre el 'Modelo-3D CAD'</b>				
	Met-1		Met-2	
	IA	Mean	IAG	Mean
sesión Homologation (2014-03-27)	0.056		0.022	
sesión Homologation (2015-04-06)	0.065	<b>0.063</b>	0.024	<b>0.024</b>
sesión Homologation (2017-10-25)	0.068		0.028	
Jornada Caza (2014-10-23)	0.085	<b>0.110</b>	0.037	<b>0.039</b>
Jornada Caza (2019-12-18)	0.134		0.040	

En la nueva metodología propuesta, 'Met-2', los resultados obtenidos son convergentes con los obtenidos en 'Met-1', cada uno en su escala de resultados. Los valores de asimetría en los ejemplares de 'sesiones de homologación' son algo inferiores sobre los de 'jornadas de caza'; 57% en 'Met-1' en a y 61% en 'Met-2'.

Debido a la gran convergencia de resultados obtenidos con las dos metodologías, 'Met-1' ([Montalvo-Gil et al. 2022](#)) y esta nueva propuesta, 'Met-2', en la valoración del grado de asimetría de la cuerna, habrá que decidir, en función del alcance del estudio, cuál de ellas se aplicará.

La decisión sobre la aplicación de uno u otro método vendrá determinada, en primer lugar, por el tipo de datos disponibles, ya sean procedentes de CAD o de mediciones manuales con cinta métrica sobre el modelo físico; en segundo lugar, por el número de variables que deban estimarse, las estimaciones del grado de calidad cinegética, el grado de asimetría o ambos, y, en tercer lugar, por el tamaño de la población de ejemplares que deba estudiarse.

Si sólo se desea el estudio de la asimetría la aplicación del 'Met-1' es óptima, ya que sólo requiere la restitución espacial de los pares de puntos necesarios para el estudio representados por el inicio y los extremos de las puntas principales y la corona de la cuerna. 'Met-2' es más apropiado cuando se desea estudiar la calidad cinegética, y aprovechar las mismas mediciones de ese estudio para realizar el estudio de la asimetría, bien globalmente 'IAG' o parcialmente 'IAP' sobre rasgos específicos de la cuerna.

Las características de ambas metodologías se han descrito en el capítulo III 'Metodología general', apartado 'Aplicaciones biológicas'.

## 5. Conclusiones

El presente estudio valida la utilidad de las medidas CAD tomadas en la estructura de la cuerna del ciervo para evaluar el grado de asimetría en los rasgos de la estructura de la cuerna. El algoritmo utiliza las mismas mediciones empleadas en la evaluación de la calidad cinegética para estimar los valores de la asimetría de la cuerna. Las mismas mediciones permitirán estimar dos biomarcadores. Los datos de entrada para el análisis son la caracterización de la cuerna mediante un modelo-3D CAD representado por su estructura axial. Esto se consigue mediante la restitución espacial de dos fotografías, tomadas desde ángulos diferentes.

La implementación de la metodología es relativamente rápida; sobre el modelo físico de la cuerna, sólo será necesario realizar el cálculo a partir de las mediciones disponibles que se utilizaron previamente para realizar la evaluación de la calidad cinegética. Sobre el modelo CAD de la cuerna el tiempo invertido es algo mayor, ya en la definición del modelo-3D se requieren procesos de restitución fotogramétrica y de modelado CAD.

El estudio de evaluación de la asimetría se realiza sobre un modelo-3D axial de la cuerna, obtenido con relativa rapidez a partir de dos fotografías. Los diferentes rasgos estructurales de la cuerna, la vara central y las puntas, se representan espacialmente mediante su eje central. Con estos datos, se cuantifican las asimetrías presentes en cada uno de los rasgos estructurales determinando la divergencia métrica en cada rama de la cuerna respecto al valor medio. Por lo tanto, no es necesario definir un modelo 3D "sólido" para este tipo de análisis. Las cuernas, caracterizadas digitalmente mediante un modelo-3D, permiten realizar análisis para estimar el grado de asimetría de cuernas de ejemplares procedentes de "sesiones de homologación" o en muestras más amplias de ejemplares procedentes de "jornadas de caza".

La metodología aquí presentada también puede ser implementada en estudios de asimetría de otros elementos biológicos de origen animal o vegetal, ya que los datos de partida, la estructura axial bilateral de los rasgos geométricos objeto de estudio, son relativamente sencillos de obtener y de caracterizar digitalmente en forma de modelo-3D.

**RESULTADO 4º:****TRES TECNOLOGÍAS DE INGENIERÍA GRÁFICA 3D PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUERNA DEL GAMO EN ENFOQUES APLICADOS A ECOLOGÍA Y GESTIÓN.****Resumen.**

**Contexto.** Numerosos estudios abordan la creación de modelos tridimensionales de elementos biológicos para su evaluación geométrica mediante herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD). Una cuestión clave es obtener datos geométricos precisos, fáciles de obtener y rentables para el análisis. **Objetivo.** El objetivo principal es evaluar tres métodos de caracterización de la cuerna del gamo en forma de modelo-3D, en términos de precisión y complejidad, para utilizarlos como datos de entrada en análisis biológicos que permitan estimar la calidad cinegética, la asimetría y la densidad y el volumen. **Métodos.** Se evalúan tres tecnologías: escáner de luz estructurada, fotogrametría multiimagen (SfM) (*Structure from Motion*) y restitución fotogramétrica espacial a partir de dos fotografías en un sistema de diseño asistido por ordenador (CAD). Se estima la precisión geométrica de los modelos-3D obtenidos y la desviación entre puntos geoméricamente relacionados de la estructura de la cuerna, incluyendo la vara central, las puntas principales y la pala. Posteriormente, se estudia la idoneidad de cada modelo-3D en función del tipo de aplicación biológica al que se destine. **Principales resultados.** A partir de los resultados, modelos-3D de tipo sólido y de estructura axial, se discute la aplicabilidad de las tres técnicas para el estudio de parámetros biológicos, como el cálculo del volumen, la densidad, la calidad cinegética y la asimetría. **Conclusiones.** Se concluye sobre el procedimiento más adecuado que define el dato de entrada, la caracterización digital de la cuerna, en base al tipo de estudio biológico que se vaya a realizar, con el fin de lograr resultados con la precisión adecuada. **Implicaciones.** La caracterización de una estructura geoméricamente compleja, como la cuerna del gamo, en forma de modelo-3D, de forma rápida y con la precisión adecuada, puede ayudar en la cuantificación de diversos biomarcadores en poblaciones de especímenes, de modo que se puedan inferir con factores de influencia internos y externos.

**Palabras clave**

Cuerna de gamo. *Dama dama*. Escáner-3D de luz estructurada. Structure from Motion (SfM). Fotogrametría multiimagen. Volumen. Calidad cinegética. Técnicas 3D digitales. Diseño asistido por ordenador.

## 1. Introducción

En las últimas tres décadas, diversos estudios han investigado las variables relacionadas con el tamaño y calidad de la cuerna en cérvidos como ciervos (*Cervus elaphus*), gamos (*Dama dama*) y corzos (*Capreolus capreolus*) (Álvarez *et al.* 1991; Soriguer *et al.* 1994; Azorit *et al.* 2002; Gómez *et al.* 2006; Landete-Castillejos *et al.* 2007, 2010; Gaspar-López *et al.* 2008, 2010; Torres-Porras *et al.* 2009). En las zonas mediterráneas, el crecimiento de la cuerna está influido por el clima y la gestión de la población, que afecta a la condición corporal y al tamaño de los ciervos, así como a su cuerna (Azorit *et al.* 2002; Torres-Porras *et al.* 2009). El valor de la densidad de la cuerna en cérvidos es un biomarcador de interés zoológico, relacionado con su tamaño y mineralización (Chen *et al.* 2009), y refleja su estado nutricional durante el crecimiento. La evaluación de la densidad requiere la estimación del volumen, en conjunto con el peso. Miller *et al.* 1985 propuso medir el volumen usando el método de Arquímedes, pero el daño durante la manipulación y la preparación afecta la precisión. Estimar la densidad en modelos reales de cuerna es laborioso (Landete-Castillejos *et al.* 2007, 2010; Estévez *et al.* 2008) y dificulta la precisión del volumen debido a la manipulación. Además, obtener su masa es desafiante, especialmente si la cuerna proviene de caza o renovación natural.

Los sistemas CAD, comunes en diseño e industria, consiguen la extracción de los datos geométricos de la cuerna, extraen datos geométricos y proporcionan directamente el volumen. Rubio-Paramio *et al.* 2012 proponen un método CAD que crea un modelo-3D a partir de coordenadas de puntos medidos en cuernas de ciervo, obteniendo volumen y densidad. Este método se valida comparándolo con la técnica hidrostática de Arquímedes. Las avanzadas técnicas de ingeniería gráfica han permitido aplicaciones biomédicas en CAD, desde modelar huesos y órganos humanos (Sun 2005; Kurazume 2009) diseñar implantes médicos personalizados (Hollister *et al.* 2000; Lal y Sun 2004; Sun *et al.* 2004a, 2004b) hasta analizar resistencia ósea (Sun *et al.* 2004a, 2004b) y asesorar en cirugías de patologías de huesos (Minns *et al.* 2003). Entre estas técnicas destacan las máquinas de medición de coordenadas (CMM, *Coordinate Measuring Machines*), que permiten medir con precisión los datos geométricos en 3D de objetos reales mediante contactos. Estas máquinas han sido ampliamente utilizadas en morfometría geométrica para estudiar huesos de simios, huesos temporales y mandíbulas humanas (Lockwood *et al.* 2002; Harvati 2003; Nicholson y Harvati 2006), así como regiones craneofaciales (Kimmerle *et al.* 2008). A pesar de su alta precisión, estas técnicas son costosas y requieren condiciones de laboratorio controladas.

Otra técnica consiste en el digitalizado 3D mediante un escáner de luz estructurada, que crea modelos precisos de objetos reales. Estos escáneres han encontrado aplicaciones en ingeniería inversa, diseño industrial y biometría, incluyendo la geometría del cuerpo humano y regiones craneofaciales (Fortin *et al.* 2007; Yu y Peng 2007; Kimmerle *et al.* 2008; Korosec *et al.* 2010;

[Panchetti et al. 2010](#)). Sin embargo, su alto costo y la necesidad de condiciones controladas en laboratorio limitan su uso en el campo y dificultan la toma de datos de múltiples ejemplares en poco tiempo.

Por otro lado, las técnicas de fotogrametría *Structure from Motion* (SfM) se han destacado por ser menos costosas y más flexibles en cuanto a las condiciones de captura. Estas técnicas consisten en la reconstrucción en 3D de objetos a partir de fotografías tomadas desde diversos ángulos. Aunque inicialmente presentaban desafíos en la edición y optimización de los modelos-3D debido a la gran cantidad de puntos capturados, las eficiencias y precisión del software han resuelto estos problemas ([Golparvar-Fard et al. 2011](#); [Ramos and Santos 2011](#)).

A pesar de estas ventajas, las técnicas fotogramétricas requieren una cantidad significativa de fotografías para generar modelos 3D, lo cual limita su aplicación en el campo donde el tiempo para tomar fotografías de numerosos ejemplares es limitado. Aunque se han intentado reducir la cantidad de fotografías necesarias ([Rodríguez et al. 2008](#); [Veldhuis y Vosselman 1998](#); [Ordóñez et al. 2008](#); [Chin-Hung et al. 2007](#)), aún persiste la limitación en la modelización rápida de numerosos ejemplares.

En este contexto, una técnica propuesta por [Rubio-Paramio et al. 2016](#) se destaca por su eficacia en la captura de datos masivos en el campo. Esta técnica utiliza solo dos fotografías tomadas desde ángulos aleatorios para generar modelos-3D mediante restitución fotogramétrica espacial en un sistema CAD. Esta técnica es especialmente eficaz en el ámbito de la cinegética, permitiendo la obtención rápida de datos en condiciones no ideales. Esta optimización de herramientas y metodologías es especialmente útil en estudios de biología que requieren la captura de datos de numerosos ejemplares en el campo. Por ejemplo, en el estudio de la asimetría de las cuernas, un biomarcador relacionado con la salud del ejemplar, estas técnicas pueden ser valiosas ([Carranza 2017](#); [García et al. 2010](#); [Møller et al. 1996](#); [Hayden et al. 1994](#); [Pélabon y Joly 2000](#); [Krapinec et al. 2022](#)).

El objetivo de esta investigación es comparar la precisión en la geometría de las cuernas de gamos mediante modelos-3D generados por tres técnicas relevantes: escáner-3D de luz estructurada, fotogrametría multiimagen *Structure from Motion* (SfM) basada en múltiples fotografías y restitución fotogramétrica espacial en un sistema CAD a partir de solo dos imágenes. Además de evaluar la precisión de los modelos resultantes, se discutirá su adecuación a diversas investigaciones biológicas, como el cálculo de volumen, densidad, valoración cinegética y asimetría. También se considerará su aplicabilidad en el campo para la obtención de datos masivos y la economía de recursos de cada técnica.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Objeto de estudio

En el presente estudio se plantea la caracterización geométrica de la cuerna del gamo, mediante la representación en un modelo-3D utilizando diferentes tecnologías. Además, se determinará el grado de precisión de los tres modelo-3D y cómo estos se adecuan a la aplicación biológica a la que vaya destinado destacando sus ventajas e inconvenientes.

Una vez obtenido el modelo-3D de la cuerna del gamo, con la debida precisión, puede ser utilizado para:

- a) Estimación del volumen y densidad: Se puede determinar el volumen de la cuerna, lo que sirve como biomarcador para evaluar su desarrollo en relación con la edad y el entorno. Además, a partir del volumen y del peso conocido de la cuerna, se podría estimar su densidad, otro biomarcador que proporciona información sobre la salud del ejemplar y su relación con otros factores ambientales. Sin embargo, medir el peso es un desafío ya que puede requerir desmogueos, con la dificultad añadida de encontrar las dos ramas de la cuerna.
- b) Analysis descriptivos: Los modelos 3D permiten analizar la forma y geometría de diferentes partes de la cuerna. Estos análisis son valiosos en estudios de morfometría geométrica para comprender cambios en el desarrollo y su relación con variables ambientales.
- c) Análisis del grado de asimetría de la cuerna: Partiendo del dato del modelo-3D de la cuerna o de su estructura, se tienen disponibles los puntos “homólogos” relevantes y las partes de la cuerna consideradas: puntos extremos de las puntas principales, luchaderas y candiles, puntas de las palas, longitudes de las puntas luchaderas y candiles, longitudes y anchuras de las palas, etc. (Montalvo-Gil *et al.* 2022). Esto permite futuros estudios para relacionar este biomarcador con otros factores internos o externos que influyeron en el desarrollo.
- d) Estimación de calidad cinegética: A partir del modelo-3D se puede valorar la puntuación obtenida en los diferentes elementos de la cuerna para valorar su desarrollo geométrico según se describe en los manuales oficiales de valoración de la calidad cinegética como trofeo de caza. Las valoraciones oficiales se realizan midiendo con una cinta métrica sobre el modelo físico de la cuerna las diferentes partes de esta, longitudes, perímetros y envergadura. Dichas distancias y trayectorias se pueden obtener midiendo sobre la superficie del modelo-3D.

Una vez descritas diferentes aplicaciones en las que puede ser de utilidad disponer del modelo-3D como dato de partida, se trata de comparar la precisión geométrica de los modelo-3D obtenidos mediante las citadas tecnologías y poner de manifiesto las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

En el presente estudio las aplicaciones biológicas van a ser, por un lado, la determinación del volumen de la cuerna, variable necesaria para posteriores estudios de la densidad de esta, y por otro, la valoración de la calidad cinegética del gamo, mediante la estimación métrica de las diferentes partes de la estructura de la cuerna.

Las tareas principales son:

- Generación de Modelos-3D: Se obtendrán modelos-3D de las cuernas de gamo utilizando tres tecnologías: escáner de luz estructurada, fotogrametría multiimagen SfM y modelado tridimensional basado en la estructura de la cuerna obtenida por fotogrametría por restitución espacial a partir de dos fotografías ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)).
- Evaluación de Precisión Geométrica: Se analizará la precisión de los tres modelos-3D obtenidos.
- Aplicación Biológica: Los modelos-3D se implementarán en aplicaciones biológicas, especialmente en el cálculo del volumen de la cuerna para estudios de densidad y en la valoración de la calidad cinegética, al medir distintas partes de la estructura.
- Evaluación de Tecnologías: Se evaluarán las tres tecnologías utilizadas para obtener los modelos 3D de las cuernas, destacando sus ventajas e inconvenientes y su adecuación a diferentes aplicaciones biológicas.

## 2.2. Equipamiento utilizado

Se detalla a continuación el equipamiento utilizado, hardware y software, para la obtención del modelo3D en cada una de las tres tecnologías utilizadas.

Para el proceso de escaneado, se empleó el escáner-3D '*EinScan Pro 2X*' de '*Shining 3D*', conocido por su velocidad y precisión, capturando hasta 1,500,000 puntos por segundo. El proceso de edición se realizó con su propio software.

En la fotogrametría (SfM), se utilizó una cámara '*Olympus*' modelo *E-500* con lente focal de 28-80 mm. El software '*Bentley ContextCapture*' se empleó para la restitución espacial del modelo a partir de las fotos.

Para el modelado-3D CAD a partir de la estructura axial de la cuerna obtenida por fotogrametría Bi-Foto, se usó '*SolidWorks*'. El software definió el escenario virtual y creó el modelo-3D a partir de la estructura axial.

En las aplicaciones biológicas, como la determinación del volumen y la valoración cinegética de la cuerna, se usó el software CAD '*SolidWorks*'. También se empleó para medir las longitudes de las partes de la estructura.

### **2.3. Definición del modelo-3D de la cuerna mediante varias tecnologías**

Se describe a continuación el proceso de obtención del modelo-3D, que caracteriza la geometría de la cuerna, mediante cada una de las tres tecnologías consideradas.

- a) Por 'escáner-3D de luz estructurada'.
- b) Por 'fotogrametría multi-imagen SfM (*Structure from Motion*).
- c) Por fotogrametría 'Bi-Foto' y 'modelado CAD Tridimensional'.

#### **a) Obtención del modelo-3D de la cuerna del gamo mediante la tecnología de 'escáner de luz estructurada'**

Este proceso se describe en el Capítulo 'Metodología general', apartado 'Metodologías para la caracterización digital de la cuerna en un modelo-3D'.

Dentro del estudio del análisis métrico y volumétrico de las cuernas de gamo, se hace necesario poder comparar resultados obtenidos del escáner de luz estructura con otras tecnologías, el objetivo tener un método contrastado que nos sirva de referencia.

#### **b) Obtención del modelo-3D de la cuerna del gamo mediante fotogrametría multiimagen, tecnología SfM (*Structure From Motion*)**

Este proceso se describe en el Capítulo 'Metodología general', apartado 'Metodologías para la caracterización digital de la cuerna en un modelo-3D'.

#### **c) Obtención del modelo-3D de la cuerna del gamo mediante modelado-3D a partir de la estructura axial obtenida por fotogrametría Bi-Foto (Bi-Foto-CAD)**

Este proceso se describe en el Capítulo 'Metodología general', apartado 'Metodologías para la caracterización digital de la cuerna en un modelo-3D'.

## 2.3. Metodologías para definir los modelos-3D y determinar su volumen y precisión geométrica

### 2.3.1. Tecnologías utilizadas para la definición del modelo-3D de la cuerna (Fig. 64):

- a.- Escáner-3D de Luz Estructurada.
- b.- Fotogrametría Multiimagen (SfM).
- c.- Modelado 3D con *SolidWorks* a partir de datos fotogramétricos.  
(Rubio-Paramio *et al.* 2016).

### 2.3.2. Herramientas para evaluar la Precisión:

1. Comparación del modelos-3D: software *Autodesk Netfabb v.2023*.
2. Análisis Estadísticos para valorar desviaciones.

El proceso de comparación de modelos-3D, va a consistir en:

1. Modelo-3D de Referencia muy similar al real en cuanto a geometría y volumen:
  - Obtenido por Escáner de Luz Estructurada (Mayor Precisión).
2. Dos Comparaciones Realizadas (mediante alineación de modelos-3D):
  - Modelo 3D de Referencia (Escáner) vs. Modelo-3D SfM
  - Modelo-3D de Referencia (Escáner) vs. Modelo-3D Bi-Foto-CAD

La metodología que sigue el software de comparación de modelos-3D, Autodesk Netfabb, es:

- Importación de Modelos-3D.
- Escalado de Modelos para Resultados Significativos.
- Elección de Modelo-3D de Referencia y Modelo-3D Comparado.
- Gráfico de Colores para Visualizar Desviaciones.
- Diferencias Máximas y Mínimas entre Modelos.

Tras la comparativa, el software muestra un gráfico de colores con ambos modelos-3D superpuestos. Esto permite visualizar las desviaciones del modelo comparado en relación al modelo de referencia. Estas desviaciones se destacan en colores, rojo para desviaciones positivas y azul para desviaciones negativas (Fig. 90). Solo se consideran las desviaciones superiores a un valor de tolerancia predeterminado. Además, el gráfico muestra las diferencias máximas y mínimas entre los dos modelos.

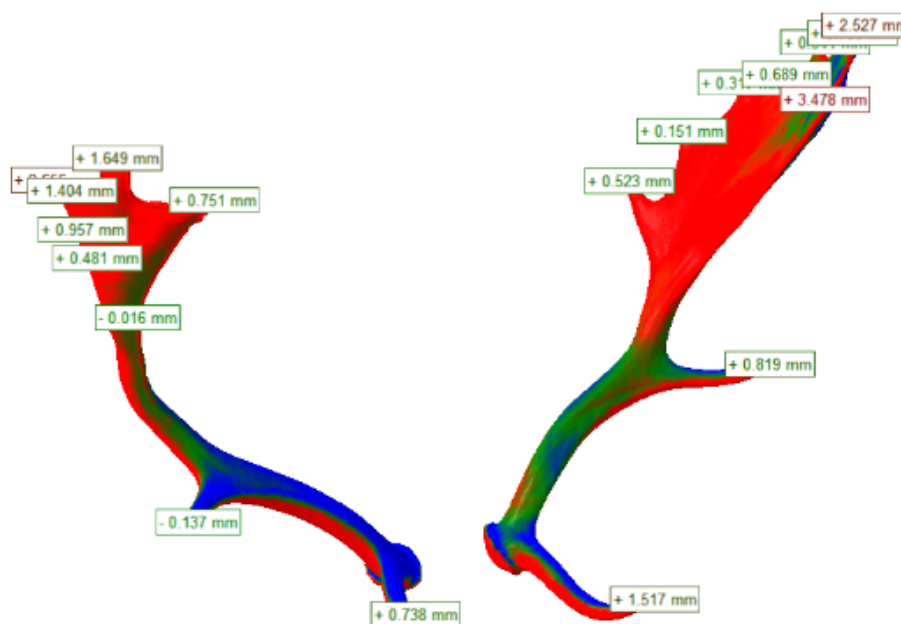


Fig. 90. Superposición y comparación de modelos-3D.

### Estimación de Distancias y Desviaciones entre Puntos Seleccionados en el modelo-3D:

En nuestro caso, se han considerado 19 puntos de ambas ramas de la cuerna del gamo correspondientes a los extremos de las puntas principales: luchaderas y candiles, y de los extremos de las puntas de la pala. Estos valores de desviación entre puntos homólogos de los modelos-3D se van a utilizar, mediante técnicas de inferencia estadística, para la estimación del grado de precisión geométrica de los tres modelos-3D teniendo en cuenta todos los puntos de la cuerna.

Los resultados obtenidos en cada una de las dos comparaciones han sido:

#### 1. Primera Comparación: Modelo A-(Escáner-3D) vs Modelo B-(SfM):

Se muestra la superposición de los dos modelos-3D de la cuerna realizados con tecnologías de escáner-3D y fotogrametría (SfM) (Fig. 91).



Fig. 91. Superposición de modelos-3D: obtenidos por 'escáner-3D' y por 'SfM'.

Se muestran las desviaciones, en los puntos de referencia considerados, que resultan de los dos modelos-3D superpuestos de la cuerna (**Tabla 14**).

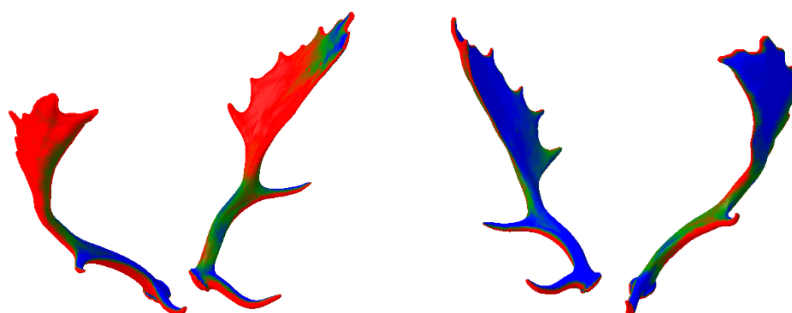
Modelo-3D (escáner-3D)	Modelo-3D (SfM)
Volumen= 709.089 cm <sup>3</sup>	Volumen= 702.042 cm <sup>3</sup>
Área= 1553.033 cm <sup>2</sup>	Área= 1506.736 cm <sup>2</sup>
- Máxima distancia positiva (color rojo): +7.179 mm	
- Máxima distancia negativa (color azul): -4.697 mm	

**Tabla 14.** Diferencias entre los puntos de la cuerna de los modelos 3D: A-(escáner-3D) y B-(SfM).

Desviaciones entre puntos (mm)	
rama derecha	rama izquierda
+0.738 luchadera	+1.517 luchadera
-0.137 candil	+0.819 candil
+0.751 pala	+3.478 pala
+1.649 pala	+2.527 pala
+1.404 pala	+0.739 pala
+2.656 pala	+0.541 pala
+0.957 pala	+0.689 pala
+0.481 pala	+0.317 pala
-0.016 pala	+0.151 pala
	+0.523 pala

Estos valores de desviación entre puntos homólogos de los modelos-3D se van a utilizar, mediante técnicas de inferencia estadística, para la estimación del grado de precisión geométrico entre ambos modelos-3D.

- Gráfico: muestra la superposición y las desviaciones en zonas específicas.
  - Color rojo: divergencia modelos-3D: 'SfM' vs 'escáner-3D'.
  - Tolerancia: establece el límite de las desviaciones consideradas.
- Zonas de desviación con tolerancia de 1 mm (**Fig. 92**).
  - Mayor precisión al considerar desviaciones >1 mm.
  - Zonas azules: Divergencias internas en zonas laterales.
  - Zonas rojas: Divergencias positivas en elementos estructurales.
  - Zonas verdes: Coincidencias <1 mm en vara central y parte interna de pala.



**Fig. 92.** Superposición y comparación de modelos-3D: con 1 mm de tolerancia.

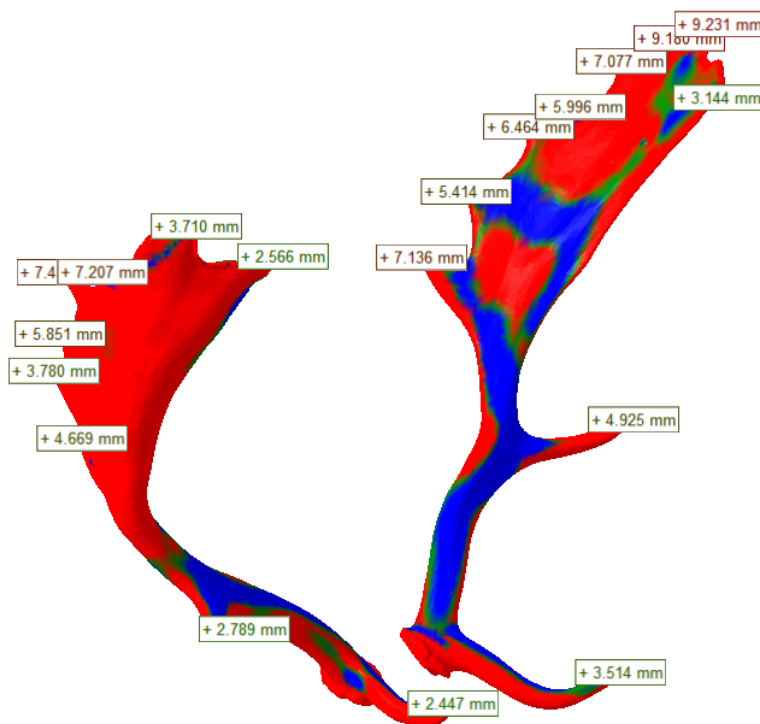
**2. Segunda Comparación: Modelo A-( Escáner-3D) vs Modelo C-(Bi-Foto-CAD):**

Se muestra la superposición de los dos modelos-3D de la cuerna realizados con tecnologías de escáner-3D y Bi-foto-CAD (Fig. 93).



**Fig. 93.** Superposición de modelos-3D: obtenidos por 'escáner' y por 'Bi-Foto-CAD'.

Se muestran las desviaciones, en los puntos de referencia considerados, que resultan de los dos modelos-3D superpuestos de la cuerna (Fig. 94) (Tabla 15).



**Fig. 94.** Superposición y desviaciones entre los modelos-3D.

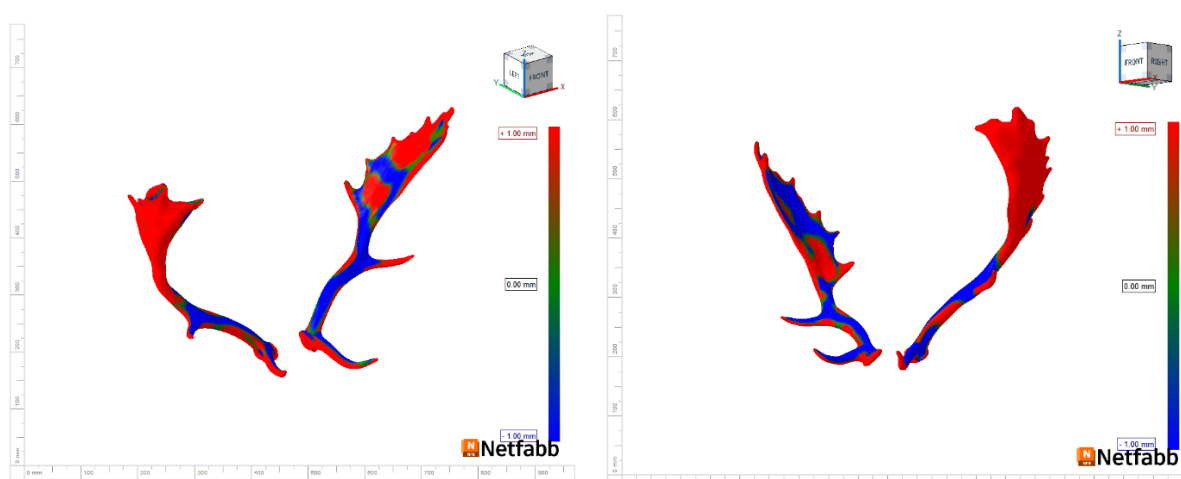
Modelo-3D (escáner-3D)	Modelo-3D (Bi-Foto-CAD)
Volumen= 709.089 cm3	Volumen= 581.078 cm3
Área= 1553.033 cm2	Área= 1476.371 cm2
- Máxima distancia positiva (color rojo): +20.959 mm	
- Máxima distancia negativa (color azul): -11.595 mm	

**Tabla 15.** Diferencias entre los puntos de la cuerna de los modelos 3D: A-(escáner-3D) y C-(Bi-Foto-CAD).

Desviaciones entre puntos (mm)	
rama derecha	rama izquierda
+2.447 luchadera	+3.514 luchadera
+2.789 candil	+4.925 candil
+2.566 pala	+3.144 pala
+3.710 pala	+9.231 pala
+7.207 pala	+9.180 pala
+7.452 pala	+7.077 pala
+5.851 pala	+5.996 pala
+3.780 pala	+6.464 pala
+4.669 pala	+5.414 pala
	+7.136 pala

De la misma manera que en la comparación anterior, mediante técnicas de inferencia estadística se utilizarán esas desviaciones entre los puntos de ambos modelos para estimar el comportamiento de todos los puntos de la cuerna.

- Gráfico: muestra la superposición y las desviaciones en zonas específicas.
  - Color rojo: Divergencia modelos-3D: ‘Bi-Foto-CAD’ vs ‘Escáner-3D’.
  - Tolerancia: establece el límite de las desviaciones consideradas.
- Zonas de desviación con tolerancia de 1 mm. (Fig. 95)
  - Pequeña área de coincidencia (color verde).
  - Predominio de color rojo: Divergencias exteriores en palas, vara central y puntas principales.
  - Zonas azules: Desviaciones interiores en vara central y palas.



**Fig. 95.** Comparación de modelos-3D: con tolerancia de 1 mm.

## 2.4. Metodologías para la valoración de la ‘calidad cinegética’

La ‘valoración cinegética’ del ejemplar analizado se realiza analizando el grado de desarrollo geométrico de su cuerna. La valoración cinegética de la cuerna del gamo, realizada con procedimientos digitales, requiere su caracterización digital CAD, en forma de modelo-3D, en su totalidad volumétrica o en su estructura axial.

**Se presentan dos métodos para caracterizar espacialmente la cuerna del gamo.**

### 2.4.1. Valoración sobre el ‘Modelo-3D’:

- Datos 3D de cuerna (modelo-3D preciso de escáner o fotogrametría SfM); ambos métodos validados anteriormente.
- Usar software CAD para medir trayectorias, longitudes y perímetros en superficie externa.
- Cuantificar métricamente elementos geométricos.
- Aplicar baremo de puntuación (Llanes-Borrero 2013) para obtener puntuación final.
- Considerar valores de longitudes y perímetros de cuerna (para obtener la puntuación final de la ‘valoración cinegética’ (Llanes-Borrero 2013)).
- Completar puntuación con ítems no geométricos del baremo oficial (color, el número de puntas de las palas, el peso y la regularidad).

En la (Fig. 50) se indican, sobre el modelo-3D de malla, las trayectorias y perímetros consideradas.

### 2.4.2. Valoración sobre la ‘Estructura de la Cuerna’:

Obtener un modelo-3D ‘ad hoc’ como dato de partida para realizar sobre él la valoración cinegética de la cuerna, no es la metodología más eficiente por la cantidad de tiempo, costo monetario y condiciones controladas que se precisan para su obtención. Es más económico, a nivel de recursos invertidos para realizar la ‘valoración cinegética’, trabajar con la estructura espacial de aquellas partes relevantes de la cuerna (Fig. 51) necesarias para realizar dicha valoración, según se indica en el ‘Manual de homologación de Trofeos de caza’ (Llanes-Borrero 2013). Dicha estructura espacial, se obtiene aplicando la metodología de restitución fotogramétrica descrita en (Rubio-Paramio *et al.* 2016) (Fig. 52)

- Crear escenario-3D en software CAD ‘SolidWorks’.
- Obtener la estructura axial de la cuerna.
- Medir longitudes y perímetros de partes específicas de cuerna (Fig. 51).
- Obtener puntuación final según baremo oficial.

### 3. Resultados

#### 3.1. Resultados de los modelos-3D obtenidos

Existe cierta similitud del modelo-3D obtenido mediante 'Bi-Foto-CAD' con el modelo físico de la cuerna en cuanto a la definición geométrica. Para la definición tridimensional CAD de la cuerna, se ha partido de una estructura formada por puntos homólogos, al igual que en el estudio del ciervo ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)), significativos de la geometría de la cuerna del gamo, como son los puntos de arranque de las puntas principales, los ejes de estas, el eje de la vara central, el punto medio de la pala y el del punto más alto de la pala. Posteriormente se comprueba el grado de aproximación de este modelo-3D con otros, obtenidos con otras tecnologías como el 'escáner-3D' y la 'SfM-Fotogrametría'. De dicha comparación se observa que existen diferencias en cuanto a la precisión geométrica y al volumen. Esta variable, junto con la densidad, representa un biomarcador relevante que permite estimar el grado del desarrollo anatómico del ejemplar, y ampliando el estudio a poblaciones, evaluar la calidad de ecosistemas en periodos climáticos determinados.

El grado de desviación geométrica del modelo-3D, obtenido mediante 'Bi-Foto-CAD', sobre los otros dos modelos-3D obtenidos con las tecnologías antes citadas que se ajustan en gran medida al modelo real, se debe a la complejidad geométrica de la cuerna del gamo. Se han tomado una serie de supuestos y simplificaciones geométricas, destinados a facilitar la obtención del modelo-3D mediante las herramientas de modelado tridimensional CAD con el software *SolidWorks*, como son:

- Estimar unos valores de grosor de la pala constantes en la parte central y menores en los extremos; transiciones entre la vara central y el inicio de la pala. Realmente estos grosores no son constantes, y dependiendo de cada ejemplar el valor medio del grosor puede variar.
- Considerar unas geometrías de la sección transversal de la pala similares, sólo variando el tamaño en función de su posición.

Realmente, las secciones transversales en las diferentes posiciones de la pala, son diferentes geométricamente, y no mantienen un patrón constante; este grado de variabilidad dependerá de la geometría de cada ejemplar.

Para las puntas laterales de la pala, el grosor de la base que contacta con la pala se supone similar en todas ellas, no siendo realmente así ya que dicho grosor se adapta a los bordes irregulares de superficie de la pala.

Los demás parámetros de la cuerna extraídos de las fotografías con el método 'Bi-Foto-CAD', como longitudes: (de la vara central, de la pala, fibras centrales de las puntas de las luchaderas y candiles, perfiles de las puntas de las palas), y de perímetros: (de rosetas, y de dos secciones transversales de la cvara central), son casi exactos a los del modelo físico. [Rubio-Paramio et al. 2016](#) validan el grado de convergencia de dichas longitudes y perímetros obtenidas con la

metodología de restitución espacial por fotogrametría a partir de dos fotografías con los mismos datos obtenidos sobre el modelo físico de la cuerna obtenidos en mediciones oficiales realizadas por personal homologado con cinta métrica en aplicaciones para el estudio de la calidad cinagética de cuernas de ciervo, y por tanto demostrar la precisión y fiabilidad del método 'Bi-Foto-CAD'.

### 3.2. Evaluación de la precisión de los modelos-3D obtenidos

Para obtener una estimación de la aproximación geométrica los modelos-3D: B-(*SfM*) y C-(*Bi-Foto-CAD*) sobre el modelo-3D de referencia A-(*Escáner-3D*), se van a establecer dos comparaciones: la del modelo3D B-(*SfM*) sobre el modelo-3D A-(*Escáner-3D*) y la del modelo-3D C-(*Bi-Foto-CAD*) sobre el modelo-3D A-(*Escáner-3D*), estableciendo técnicas de 'inferencia estadística' (Ec. 9), determinación del intervalo de confianza, de forma que se generalice el comportamiento de toda la población de datos, las diferencias de las medias de todos los puntos de la cuerna de los dos modelos-3D comparados, a partir de una muestra de valores.

$$\bar{D} \pm t_{1-\left(\frac{\alpha}{2}\right), n-1} \frac{S_{n-1,D}}{\sqrt{n}} \quad (\text{Ec. 9})$$

$\bar{D}$ : Difference between the mean values of the two samples

$t$ : Distribution t-Student

$S_{n-1}$ : Quasi-standard deviation

$n$ : Sample values (differences between related points)

En ambas comparaciones de modelos-3D se va a obtener para cada una de ellas el 'intervalo de confianza', estableciendo para ellas el mismo error ( $\alpha$ ) del 5% y por tanto un 'nivel de confianza' ( $1 - \alpha$ ) del 95%. El 'nivel de confianza' del 95% indica que, de cada 100 muestras, 95 de ellas contendrán al verdadero valor del parámetro, la diferencia de las medias de todos los puntos de ambos modelos comparados; el 95% de las muestras son válidas, entendiendo a estas como aquellas en que el 'intervalo de confianza' resultante contenga el verdadero valor del parámetro.

Finalmente se compara la amplitud de los dos intervalos de confianza obtenidos en ambas comparaciones, pudiendo establecer con ello, el grado de desviación de los modelos-3D B-(*SfM*) y C- (*Bi-Foto-CAD*) sobre el modelo3D A-(*Escáner-3D*) más preciso tomado como referencia.

En cada comparación se han considerado una muestra de 19 valores correspondientes a los puntos extremos de las puntas principales: luchaderas y candiles y de las puntas de la pala de ambas ramas de la cuerna. Estos valores corresponden a las desviaciones de cada pareja de puntos afines de cada uno de los dos modelos-3D comparados, extremos de las puntas, una vez que estos se han superpuesto utilizando el software '*Autodesk Netfabb v.2023*'.

a.- Comparación de los modelos-3D: A-(*Escáner-3D*) vs B-(*SfM*):**Tabla 16.** Diferencias entre puntos de los dos modelos-3D (A-B) y resultados estadísticos.

Valores de la muestra (diferencias entre puntos afines) (mm):									
0,738	0.137	0.751	1.649	1.404	2.656	0.957	0.481	0.016	1.517
0.819	3.478	2.527	0.739	0.541	0.689	0.317	0.151	0.523	
n	media	S (n-1)	t-student	( $\alpha$ ) error					
19	1.057	0.941	2.101	5%					
Intervalo de confianza:					Amplitud del intervalo:				
<b>1.057 <math>\pm</math> 0.454 mm (0.604, 1.511)</b>					<b>0.907 mm</b>				

b.- Comparación de los modelos-3D: A-(*Escáner-3D*) vs C-(*Bi-Foto-CAD*):**Tabla 17.** Diferencias entre puntos de los dos modelos-3D (A-C) y resultados estadísticos.

Valores de la muestra (diferencias entre puntos afines) (mm):									
2.447	2.798	2.566	3.710	7.207	7.452	5.851	3.780	4.669	3.514
4.925	3.144	9.231	9.180	7.077	5.996	6.464	5.414	7.136	
n	media	S (n-1)	t-student	( $\alpha$ ) error					
19	5.398	2.139	2.101	5%					
Intervalo de confianza:					Amplitud del intervalo:				
<b>5.398 <math>\pm</math> 1.031 mm (4.367, 6.429)</b>					<b>2.062 mm</b>				

En la comparación de los modelos-3D A-(*Escáner-3D*) y B-(*SfM*), se observa que el ‘intervalo de confianza’ obtenido es pequeño, con una amplitud de 0.907 mm con ( $\alpha$ )=5% y (1-  $\alpha$ )= 95%. En la segunda comparación se comparan los modelos-3D A-(*Escáner-3D*) y C- (*Bi-Foto-CAD*), obteniéndose una amplitud para el ‘intervalo de confianza’ de 2.062 mm con el mismo valor alfa del 5%.

La amplitud del intervalo de la primera comparación es muy pequeña indicando el gran grado de aproximación geométrica del modelo-3D B-(*SfM*) con respecto al modelo-3D A-(*Escáner-3D*) de mayor precisión. Todo ello indica que las diferencias entre todos los puntos afines de ambas cuernas son muy pequeñas, por tanto, las diferencias de sus medias son también muy próximas, resultando también pequeña la amplitud del ‘intervalo de confianza’ obtenido.

Comparando la amplitud de los ‘intervalos de confianza’ obtenidos en las dos comparaciones, se obtiene que: (2.062 / 0.907) = 2.3, resultando que el grado de desviación del modelo-3D C-(*Bi-Foto-CAD*) es 2.3 veces mayor que la del modelo-3D B-(*SfM*), ambos referidos al modelo-3D A-(*Escáner-3D*) de mayor precisión.

### 3.3. Resultados de las aplicaciones biológicas

#### 3.3.1. Resultados de 'volumen' y 'área' de los modelos-3D obtenidos

Se describen los resultados del volumen y del área de cada uno de los modelos-3D proporcionados por el software *Autodesk Netfabb v.2023*:

##### Comparación de los modelos-3D: A-(Escáner-3D) vs B-(SfM):

En cuanto al volumen:

$$\Delta\text{-Vol} = [\text{Vol. modelo-3D B-(SfM)} / \text{Vol modelo-3D A-(Escáner-3D)}] =$$

$$= ( 702.042 \text{ cm}^3 / 709.089 \text{ cm}^3 ) = 99\%$$

Grado de precisión de ambos modelos-3D: [B-(SfM) sobre A-(Escáner-3D)].

- Existe una desviación en ambos volúmenes del 1%.

En cuanto al área:

$$\Delta\text{-Área} = (\text{Área modelo-3D B-(SfM)} / \text{Área modelo-3D A-(Escáner-3D)}) =$$

$$= ( 1506.736 \text{ cm}^2 / 1553.033 \text{ cm}^2 ) = 97.02\%$$

Grado de precisión de ambos modelos: [B-(SfM) sobre A-(Escáner-3D)].

- Existe una desviación en ambas áreas del 2.98%.

Es muy significativo el grado de similitud de ambos modelo-3D en cuanto a los valores de volumen y de área, y por tanto también de geometría. El modelo-3D B-(SfM) tiene un valor de volumen del 99% con respecto al del modelo-3D A-(Escáner-3D) existiendo por tanto muy poca desviación entre ellos.

##### Comparación de los modelos-3D: A-(Escáner-3D) vs C-(Bi-Foto-CAD):

En cuanto al volumen:

$$\Delta\text{-Vol} = (\text{Vol modelo-3D C-(Bi-Foto-CAD)} / \text{Vol modelo-3D A-(Escáner-3D)}) =$$

$$= ( 581.078 \text{ cm}^3 / 709.089 \text{ cm}^3 ) = 81.9\%$$

Grado de precisión de ambos modelos-3D: [C-(Bi-Foto-CAD) sobre A-(Escáner-3D)].

- Existe una desviación en ambos volúmenes del 18.1%.

En cuanto al área:

$$\Delta\text{-Área} = (\text{Área modelo-3D C-(Bi-Foto-CAD)} / \text{Área modelo-3D A-(Escáner-3D)}) =$$

$$= ( 1476.371 \text{ cm}^2 / 1553.033 \text{ cm}^2 ) = 95.1\%$$

Grado de precisión de ambos modelos: [C-(Bi-Foto-CAD) sobre A-(Escáner-3D)].

- Existe una desviación en ambas áreas del 4.9%.

Se pone de manifiesto el grado de divergencia, en los valores de volumen y de área, que existe entre los modelos-3D A-(Escáner-3D) y C-(Bi-Foto-CAD) debido a la dificultad de reproducir con

exactitud la geometría de la cuerna, mediante modelado 3D, a partir del dato de la estructura de esta. Ello se debe a las irregularidades que presenta la geometría de la cuerna en sus diferentes partes. El modelo-3D C-(*Bi-Foto-CAD*) tiene un valor de volumen del 82% con respecto al del modelo-3D A-(*Escáner-3D*) existiendo una desviación del 18% entre ellos.

### 3.3.2. Datos de la ‘valoración cinegética’

Se describen los resultados del ‘volumen’ y del ‘área’ de cada uno de los modelos-3D proporcionados por el software *Autodesk Netfabb v.2023*:

#### 3.3.2.1. Resultados obtenidos sobre el modelo-3D

Se indican los resultados obtenidos (**Tabla-18**) en la valoración de la calidad cinegética en la cuerna del gamo considerada, sobre la superficie del modelo-3D (sólido); se han medido las longitudes de las trayectorias de aquellas partes de la cuerna según se indica en el baremo oficial en los diferentes ítems (**Llanes-Borrero 2013**). A la vez se indican, para los mismos ítems de la estructura de la cuerna, la medición con cinta métrica realizada sobre el modelo físico por personal oficial homologado.

**Tabla 18.** Mediciones sobre el modelo-3D y sobre el modelo físico realizadas con cinta métrica.

Mediciones modelo-3D (mm)		Modelo físico Mediciones cinta (mm)		
Longitud (1)	496.2	Longitud (1)	485	(1) vara central-dcha.
Longitud (2)	501.17	Longitud (2)	495	(2) vara central-izqda.
Longitud (3)	287.86	Longitud (3)	293	(3) (long.) pala-dcha.
Longitud (4)	279.90	Longitud (4)	272	(4) (long.) pala-izqda.
Longitud (5)	92.41	Longitud (5)	92.5	(5) (ancho) pala-dcha.
Longitud (6)	87.27	Longitud (6)	90	(6) (ancho) pala-izqda.
Longitud (7)	110.42	Longitud (7)	107	(7) luchadera-dcha.
Longitud (8)	130.51	Longitud (8)	128	(8) luchadera-izqda.
Longitud (9)	587.82	Longitud (9)	581	(9) envergadura
Perímetro (10)	134.44	Perímetro (10)	140	(10) roseta-dcha.
Perímetro (11)	133.21	Perímetro (11)	138	(11) roseta-izqda.
Perímetro (12)	76.87	Perímetro (12)	78	(12) secc. transv.-drcha. (1)
Perímetro (13)	74.31	Perímetro (13)	72	(13) secc. transv.-izqda. (1)
Perímetro (14)	71.8	Perímetro (14)	72	(14) secc. transv.-drcha. (2)
Perímetro (15)	72.15	Perímetro (15)	70	(15) secc. transv.-izqda. (2)
<p><b>sección transversal (1):</b> sección más delgada en la vara central situada entre la ‘luchadera’ y el ‘candil’  <b>sección transversal (2):</b> sección más delgada en la vara central situada entre el ‘candil’ y la ‘pala’</p>				

- Los resultados obtenidos sobre el modelo-3D (sólido) convergen de forma precisa con aquellos resultados realizados con cinta métrica, poniendo de manifiesto la precisión del método ‘Bi-Foto-CAD’ al caracterizar espacialmente aquellas partes geométricas de la cuerna representadas mediante dos fotografías (**Rubio-Paramio et al. 2016**).

- Queda demostrada la fiabilidad del modelo-3D (sólido) y la del proceso de medir trayectorias y longitudes sobre la superficie de este para realizar la valoración cinegética, pero no es un procedimiento práctico por el tiempo y las condiciones tan controladas que supone que supone la obtención del modelo-3D.

Por tanto, el procedimiento más eficiente para la valoración cinegética de la cuerna del gamo es aplicar el método ‘Bi-Foto-CAD’ para obtener de forma relativamente rápida el modelo-3D de ‘estructura axial’ de aquellas partes de la cuerna necesarias para ser medidas y obtener la puntuación final que cuantifique su calidad cinegética.

### 3.3.2.2. Resultados obtenidos sobre la estructura de la cuerna

Se indican los resultados obtenidos (**Tabla-19**) en la valoración de la calidad cinegética en la cuerna del gamo considerada, aplicando la metodología fotogramétrica de restitución espacial de los puntos característicos de las partes de la ‘estructura axial’ de la cuerna, representada en dos fotografías, según se indica en el baremo oficial (**Llanes-Borrero 2013**). A la vez se indican, la medición con cinta métrica, de las mismas partes de la cuerna consideradas, realizada sobre el modelo real por personal oficial homologado. Dichas mediciones se han realizado sobre una muestra de 15 cuernas de gamo, de modelos reales obtenidos en talleres de taxidermia, que proceden de diferentes jornadas de caza y cotos localizados en Andújar (Jaén), España durante el año 2016. La toma de fotografías, para la posterior restitución espacial por fotogrametría de las partes geométricas significativas de la cuerna, se realizó en el propio taller de taxidermia.

Las mediciones con cinta métrica se obtuvieron a partir de la medición oficial, realizada por personal homologado.

**Tabla 19.** Resultados de la valoración cinegética para la muestra de 15 gamos: medición ‘Bi-Foto-CAD’ y con ‘Cinta métrica’.

(1): Mét: Bi-Foto-CAD-axial (cm)									
(2): Mét: Cinta métrica (cm)									
	gamo-1		gamo-2		gamo-3		gamo-4		
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
Longitud (1)	58.96	60	64.24	66	55.47	56.5	56.62	56	(1) vara central-dcha.
Longitud (2)	57.91	57.5	64.12	65	57.99	57.5	59.78	61	(2) vara central-izqda.
Longitud (3)	16.5	16.5	12.84	12.5	13.97	13.5	14.76	15	(3) luchadera-dcha.
Longitud (4)	15.12	15	16.71	16.5	13.74	13.5	16.91	16	(4) luchadera-izqda.
Longitud (5)	36	35	41.12	41.5	34.33	34	30.47	30.5	(5) (long.) pala-dcha.
Longitud (6)	31.74	32	40.68	41	36.38	37	34.88	35	(6) (long.) pala-izqda.
Longitud (7)	10.99	11	12.55	13.2	13.43	14	12.72	13	(7) (ancho) pala-dcha.
Longitud (8)	13.51	13	16.53	16.75	14.26	14.75	12.74	13	(8) (ancho) pala-izqda.
Longitud (9)	65.4	66	73.54	73	64.79	65	70.83	71	(9) envergadura
Perímetro (10)	16.27	16	17.08	17	17.01	17	17.11	17	(10) roseta-dcha.
Perímetro (11)	17.42	16.5	17.35	17	16.33	16	16.74	16.5	(11) roseta-izqda.
Perímetro (12)	9.04	9.5	9.16	9.5	9.28	9.5	9.3	9.5	(12) secc. transv.-drcha. (1)
Perímetro (13)	9.76	10	9.37	9.5	9.31	9.3	9.48	9.5	(13) secc. transv.-izqda. (1)
Perímetro (14)	10	10	9.7	10	9.83	9.7	9.22	9.2	(14) secc. transv.-drcha. (2)

Perímetro (15)	11.05	11.3	9.8	10	10.75	10.5	9.08	9.2	(15) secc. transv.-izqda. (2)
<b>sección transversal (1):</b> sección más delgada en la vara central situada entre la 'luchadera' y el 'candil' <b>sección transversal (2):</b> sección más delgada en la vara central situada entre el 'candil' y la 'pala'									

(1): Mét: Bi-Foto-CAD-axial (cm)									
(2): Mét: Cinta métrica (cm)									
	gamo-5		gamo-6		gamo-7		gamo-8		
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
Longitud (1)	65.47	66	67.7	67	61.9	61	60.29	60.8	(1) vara central-dcha.
Longitud (2)	68.38	68.5	67.2	66.5	64.2	65	59.98	60	(2) vara central-izqda.
Longitud (3)	13.49	13	12.29	12	11.09	10.5	14.91	14.8	(3) luchadera-dcha.
Longitud (4)	11.42	11	13.64	13.5	12.15	12.5	14.88	14.5	(4) luchadera-izqda.
Longitud (5)	39.88	40	41.21	41	33.87	34.5	37.64	38.5	(5) (long.) pala-dcha.
Longitud (6)	45.33	45.5	40.93	41	38.39	39	36.08	36.5	(6) (long.) pala-izqda.
Longitud (7)	11.85	11.2	12.38	12.1	11.69	11.75	10.93	11.25	(7) (ancho) pala-dcha.
Longitud (8)	11.5	12.1	12.35	12.25	11.77	12	11.47	10.9	(8) (ancho) pala-izqda.
Longitud (9)	68.62	68	74.27	75	67.35	67	67.21	67	(9) envergadura
Perímetro (10)	17.23	17	17.21	17	17.33	16.5	16.6	16.5	(10) roseta-dcha.
Perímetro (11)	16.76	16.5	17.21	17.5	15.96	16	16.74	17	(11) roseta-izqda.
Perímetro (12)	8.81	9	8.81	9	9.41	9.3	8.91	8.9	(12) secc. transv.-drcha. (1)
Perímetro (13)	9.37	9.5	9.66	9.4	8.8	8.6	9.34	9.2	(13) secc. transv.-izqda. (1)
Perímetro (14)	10.49	10.6	8.78	9	9.34	9.4	9.09	9	(14) secc. transv.-drcha. (2)
Perímetro (15)	9.58	9.5	8.93	9.2	9.8	9.6	9.35	9.5	(15) secc. transv.-izqda. (2)
<b>sección transversal (1):</b> sección más delgada en la vara central situada entre la 'luchadera' y el 'candil' <b>sección transversal (2):</b> sección más delgada en la vara central situada entre el 'candil' y la 'pala'									

(1): Mét: Bi-Foto-CAD-axial (cm)									
(2): Mét: Cinta métrica (cm)									
	gamo-9		gamo-10		gamo-11		gamo-12		
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
Longitud (1)	58.64	59	68.89	68	61.96	61	63.46	61.5	(1) vara central-dcha.
Longitud (2)	62.97	62	65.81	64	62.13	62	66.37	65	(2) vara central-izqda.
Longitud (3)	0	0	14.04	13.7	16	15.4	19.3	18	(3) luchadera-dcha.
Longitud (4)	14.09	13.8	14.81	14.5	15.58	15.8	17.29	16	(4) luchadera-izqda.
Longitud (5)	36.89	37.5	43.52	43	32.92	32	33.5	33.7	(5) (long.) pala-dcha.
Longitud (6)	36.25	36.5	39.55	39.5	31.77	31.5	37.16	37.5	(6) (long.) pala-izqda.
Longitud (7)	10.85	10.9	13.08	12.9	11.26	11.3	10.51	10.4	(7) (ancho) pala-dcha.
Longitud (8)	10.43	10.75	13.96	14	13	13	13.59	14.2	(8) (ancho) pala-izqda.
Longitud (9)	60.02	60	66.59	67	59.67	59	62.85	61	(9) envergadura
Perímetro (10)	14.7	14.5	17.8	18	15.79	16	18.67	18.5	(10) roseta-dcha.
Perímetro (11)	16.16	16	18.38	18.5	15.76	16	18.11	18.2	(11) roseta-izqda.
Perímetro (12)	8.35	8.4	9.72	10	8.64	8.8	9.4	9.5	(12) secc. transv.-drcha. (1)
Perímetro (13)	8.23	8.4	10.51	10.5	8.37	8.5	9.82	10	(13) secc. transv.-izqda. (1)
Perímetro (14)	8.4	8.6	10.2	10	9.18	9.3	10.24	10.5	(14) secc. transv.-drcha. (2)
Perímetro (15)	8.35	8.4	10.39	10.5	9.53	9.7	10.25	10.3	(15) secc. transv.-izqda. (2)
<b>sección transversal (1):</b> sección más delgada en la vara central situada entre la 'luchadera' y el 'candil' <b>sección transversal (2):</b> sección más delgada en la vara central situada entre el 'candil' y la 'pala'									

(1): Mét: Bi-Foto-CAD-axial (cm)						
(2): Mét: Cinta métrica (cm)						
	gamo-13		gamo-14		gamo-15	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)

Longitud (1)	56.63	56	62.16	62.5	65.8	66	(1) vara central-dcha.
Longitud (2)	55.53	54	66.1	64.5	68.4	68	(2) vara central-izqda.
Longitud (3)	9.74	9.5	15.97	15.5	16.11	16.5	(3) luchadera-dcha.
Longitud (4)	14.61	14.8	17.9	17.5	17.62	17	(4) luchadera-izqda.
Longitud (5)	32.7	32.5	39.8	40	43.3	43	(5) (long.) pala-dcha.
Longitud (6)	31.6	31.5	40.3	40.6	44.2	44	(6) (long.) pala-izqda.
Longitud (7)	10.67	10.8	15.73	16	16.62	16	(7) (ancho) pala-dcha.
Longitud (8)	11.34	11.6	16.75	17.6	17.03	17.3	(8) (ancho) pala-izqda.
Longitud (9)	57.21	58	64.84	69	71.04	73	(9) envergadura
Perímetro (10)	17.5	17.5	17.53	17.6	17.1	17	(10) roseta-dcha.
Perímetro (11)	17.21	17.5	17.9	18	17.4	17.5	(11) roseta-izqda.
Perímetro (12)	9.25	9.5	10.88	10.9	9.9	10	(12) secc. transv.-drcha. (1)
Perímetro (13)	8.83	9	11.46	11.5	11.05	11.1	(13) secc. transv.-izqda. (1)
Perímetro (14)	9.38	9.5	12.31	12.3	11.3	11.5	(14) secc. transv.-drcha. (2)
Perímetro (15)	9.31	9.5	12.08	12.2	11.25	11.3	(15) secc. transv.-izqda. (2)
<p><b>sección transversal (1):</b> sección más delgada en la vara central situada entre la 'luchadera' y el 'candil'</p> <p><b>sección transversal (2):</b> sección más delgada en la vara central situada entre el 'candil' y la 'pala'</p>							

En (Tabla 20) se describen los resultados correspondientes a los valores promedio en cada uno de los ítems evaluados para cada uno de los modelos de la cuerna, su caracterización digital en 3D y sobre el modelo real. Se observa que los resultados son muy próximos, validando por ello, la precisión del 'modelo3D axial' como dato fiable en este tipo de aplicación biológica.

**Tabla 20.** Medias de puntuación de calidad cinegética, para los ítems cuantificables, del modelo físico de las cuernas del gamo y de su caracterización en 'modelo-3D axial'.

Unidades: cm	MEDIA	MEDIA
	Valoración Cinegética <b>Modelo real</b>	Valoración Cinegética <b>Modelo3D axial</b>
1. Longitud Vara-dcha:	62.4	<b>61.6</b>
2. Longitud Vara-izqda:	62.6	<b>60.9</b>
3. Longitud Luchadera-dcha:	11.6	<b>10.6</b>
4. Longitud Luchadera-izqda:	15	<b>15.1</b>
5. Longitud Pala-dcha:	38.5	<b>36</b>
6. Longitud Pala-izqda:	38.4	<b>37.8</b>
7. Ancho Pala-dcha:	14	<b>13.4</b>
8. Ancho Pala-izqda:	13	<b>13</b>
9. Envergadura:	66.6	<b>65.4</b>
10. Perímetro Roseta-dcha:	16.9	<b>16.3</b>
11. Perímetro Roseta-izqda:	16.6	<b>17.4</b>
12. Perímetro LU-CA-dcha:	9.5	<b>9</b>
13. Perímetro LU-CA-izqda:	9.7	<b>9.8</b>
14. Perímetro CA-PA-dcha:	9.6	<b>10</b>
15. Perímetro CA-PA-izqda:	10	<b>11.1</b>

- Se observa que el grado de aproximación de los valores de los diferentes indicadores geométricos de la cuerna, longitudes y trayectorias, considerados para la valoración de la calidad cinegética del ejemplar, es muy similar en las dos metodologías. Los valores estimados en la restitución espacial realizada en CAD por fotogrametría con dos fotografías son muy similares a aquellos, considerados muy próximos a los reales, obtenidos mediante

la medición con cinta métrica por personal homologado. Dicha validación de resultados, en cuanto a la correlación y semejanza de resultados en las dos metodologías, fue demostrada en estudios similares aplicados en ejemplares de ciervo mediante técnicas estadísticas (Rubio-Paramio *et al.* 2016).

- Se demuestra que dicho procedimiento es el más eficiente para la valoración cinegética de la cuerna del gamo, cuando esta se caracteriza por un modelo-3D de su estructura axial, sobre otros procedimientos de definición de modelos-3D, como 'SfM' o 'escáner-3D', debido a los mayores recursos y condiciones controladas que se precisan.

Otros resultados (Tabla 21) ponen de manifiesto la convergencia de las mediciones realizadas, para la estimación del valor de calidad cinegética, en los modelos físico y el modelo-3D 'sólido' de la cuerna del gamo. Este estudio se realizó para una cuerna de gamo.

**Tabla 21.** Mediciones sobre el modelo-3D 'sólido' y sobre el modelo físico.

Medición Modelo-3D (mm)		Medición Cinta (mm)	
Lon Vara-Dcha	496.2	Lon Vara-Dcha	485
Lon Vara-Izq	501.17	Lon Vara-Izq	495
Lon Pala-Dcha	287.86	Lon Pala-Dcha	293
Lon Pala-Izq	279.90	Lon Pala-Izq	272
Lon Ancho PA-Dcha	92.41	Lon Ancho PA-Dcha	92.5
Lon Ancho PA-Izq	87.27	Lon Ancho PA-Izq	90
Lon Luch-Dcha	110.42	Lon Luch-Dcha	107
Lon Luch-Izq	130.51	Lon Luch-Izq	128
Lon Envergadura	587.82	Lon Envergadura	581
Per Ros-Dcha	134.44	Per Ros-Dcha	140
Per Ros-Izq	133.21	Per Ros-Izq	138
Per LU-CA-Dcha	76.87	Per LU-CA-Dcha	78
Per LU-CA-Izq	74.31	Per LU-CA-Izq	72
Per CA-PA-Dcha	71.8	Per CA-PA-Dcha	72
Per CA-PA-Izq	72.15	Per CA-PA-Izq	70

Los resultados obtenidos sobre el modelo-3D convergen de forma precisa con aquellos resultados realizados con cinta métrica, poniendo de manifiesto:

- La precisión del método CAD-Bifoto al caracterizar espacialmente aquellas partes geométricas de la cuerna representadas mediante dos fotografías (Rubio-Paramio *et al.* 2016).
- La fiabilidad del modelo-3D y la del proceso de medir trayectorias y longitudes sobre la superficie de este para realizar la valoración cinegética, pero no es un procedimiento práctico por el tiempo y las condiciones tan controladas que supone que supone la obtención del modelo3D por cualquiera de las tecnologías descritas.

El procedimiento más eficiente para la valoración cinegética de la cuerna del gamo es aplicar el método Bi-Foto-CAD para obtener de forma relativamente rápida la estructura axial espacial de aquellas partes de la cuerna necesarias para ser medidas y obtener la puntuación final que cuantifique su calidad cinegética.

#### 4. Discusión

La caracterización del modelo-3D de la cuerna mediante las tres tecnologías descritas se utiliza como dato de entrada para diferentes aplicaciones biológicas. Las características de 'idoneidad' que tiene que cumplir el dato de entrada en función de la tipología del análisis biológico al que vaya destinado, modelo3D o estructura axial de la cuerna; son:

- Que sea preciso, de forma que los resultados de los análisis posteriores que se realicen cuenten con la fiabilidad necesaria para poder inferir con otros biomarcadores.
- Que la toma de datos se obtenga en condiciones favorables; en las propias jornadas de caza '*in situ*' evitando el empleo de costosos recursos en laboratorios y ambientes controlados.
- Economía en recursos para su obtención, en costo monetario y tiempo invertido en su definición.
- Facilidad de obtención en ambientes favorables de forma que permita análisis biológicos, no solo de ejemplares concretos sino de poblaciones de ejemplares que se hayan desarrollado en un entorno determinado, permitiendo posteriormente inferir con los resultados obtenidos sobre la calidad del ambiente en un periodo concreto.

En la (Tabla 3) se muestra el grado de idoneidad de cada resultado obtenido en la caracterización geométrica de la cuerna del gamo definido por un modelo-3D, sólido o de estructura axial, en base al tipo de aplicación biológica al que vaya a ser implementado, la estimación del volumen y de la densidad o la valoración de la calidad cinegética.

1. Para la aplicación biológica destinada a la **determinación del volumen**, se justifica a continuación el grado de idoneidad del dato de entrada.

1.1. El modelo-3D obtenido por 'escáner-3D de luz estructurada' es la tecnología 'más adecuada' para su aplicación, ya que es el que presenta mayor precisión geométrica y, por tanto, una mayor aproximación al modelo real. El equipo utilizado tiene una precisión de 0.025 mm (25 micras) cumpliendo con la exigencia de obtener un valor de volumen y de aproximación geométrica muy cercano al del modelo real.

Por contra, los inconvenientes que puede presentar, son:

- El 'escáner de luz estructurada' puede ser adecuado para el estudio de ejemplares concretos, requiriendo disponer del modelo físico procedente de trofeos de caza suministrado en talleres

de taxidermia, pero para el estudio de poblaciones no es lo más idóneo, ya que, en una jornada de caza no se dispone de los modelos físicos para la toma de datos.

- Se requiere trabajar en laboratorios y ambientes controlados.
- El costo del equipo, hardware y software, puede ser alto; puede rondar los 7000€.
- El tiempo de implementación puede ser alto; aproximadamente de 2 horas.

#### 1.2. El modelo3D obtenido por 'fotogrametría multi-imagen', SfM (Structure From Motion):

- Tiene un grado de adecuación 'medio', ya que, esta tecnología proporciona un modelo-3D con un grado de precisión adecuado a partir de un barrido de fotografías, entre 30 y 40, del objeto. Por otra parte, no requiere de equipamiento especializado; es suficiente con una cámara réflex para la toma de fotografías ya que estas no requieren tratamientos posteriores de edición para corregir errores de deformación y, por tanto, la utilización de cámaras métricas de mayor coste. Tampoco el software específico que consigue el modelo-3D mediante la restitución espacial del objeto representado en las fotografías, es demasiado caro.
- El tiempo necesario para la obtención del modelo3D no es alto; dependerá de las características del software utilizado.

Los inconvenientes que puede presentar esta tecnología, son:

- No se consigue un modelo-3D con el grado de aproximación que sí tiene el escáner de luz estructurada; dicha precisión va a depender de las prestaciones del software de restitución espacial aplicado y del número de fotografías y de la calidad de estas en cuanto al grado de nitidez y de deformación de estas.
- Para el estudio de características que requieran mucha precisión, como es el caso de la estimación del volumen y de la densidad de la cuerna del ciervo, la tecnología SfM puede ser aplicable, pero sin llegar a ser tan precisa como la implementación por el escáner de luz estructurada.
- Puede ser adecuado para la obtención del modelo-3D de a cuerna del gamo de un ejemplar concreto. Para el estudio de poblaciones no es adecuado ya que se requiere que las fotografías necesarias se tomen '*in situ*' en la misma jornada de caza donde el tiempo y la posición de la cuerna para la captura de las fotografías son limitaciones significativas.
- Para la toma de fotografías, se debe procurar que las condiciones sean controladas; la luminosidad del ambiente debe ser aceptable, el objeto debe poseer un solape mínimo de un 60% en cada dos fotografías consecutivas, el modelo real debe estar colocado adecuadamente de forma que se facilite la toma del barrido de fotografías.

1.3. El modelo-3D obtenido por el 'modelado con software CAD' a partir de la estructura axial de la cuerna por fotogrametría Bi-Foto ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)), no es adecuado debido a los inconvenientes que conlleva su aplicación:

- El modelo-3D obtenido no se aproxima al modelo real, ni en volumen ni en geometría, existiendo desviaciones significativas; debido a la complejidad geométrica que presenta la cuerna del gamo: grosores y secciones transversales diferentes en todas las partes de su morfología, es muy complicado replicarlas en un modelo-3D a partir de los datos de la estructura axial en 3D obtenida previamente.
- En el proceso de modelado tridimensional se han de considerar una serie de supuestos y simplificaciones geométricas que faciliten la creación del modelo-3D final de la cuerna, como son la continuidad y uniformidad en los espesores, secciones y formas de los diferentes partes de la cuerna, sobre todo en la zona de la pala de esta; simplificaciones que no se adaptan a las discontinuidades y deformaciones que presenta la cuerna realmente en sus diferentes zonas
- El tiempo de obtención del modelo-3D es alto requiriendo definir cada elemento geométrico de la cuerna por separado utilizando diferentes opciones de modelado sólido y por superficies.
- El tiempo para obtener el dato de partida, la estructura axial de la cuerna, es significativo; esta se obtiene mediante la restitución espacial por fotogrametría a partir de dos fotografías ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)) dificultando el estudio del volumen de las cuernas de poblaciones de ejemplares.

Como ventaja resaltar que el coste del equipamiento informático necesario, en cuanto a hardware y software, no es alto, ya que para la obtención del modelo-3D no se requieren grandes necesidades de procesado informático.

2. Para la segunda aplicación biológica destinada a la **valoración de la calidad cinegética** del ejemplar, indicar que:

- Obtener un modelo-3D por cualquiera de las tres tecnologías indicadas destinado para la valoración de la calidad cinegética no es lo más adecuado, ya que, supone la inversión de mucho tiempo y material.
- Con la disponibilidad de un modelo-3D, obtenido previamente para otros tipos de análisis, sí se podría aprovechar este como entrada para realizarla valoración de la calidad cinegética, ya que las trayectorias y longitudes que se consideran para la valoración, indicadas en ([Llanes-Borrero 2013](#)), se pueden realizar sobre el modelo-3D disponible, ya sea este en versión de malla, de sólido o de superficie.

2.1. El modelo-3D obtenido por 'escáner-3D' no es lo más adecuado, ya que, su definición requiere de equipos caros y tiempos altos.

2.2. El modelo-3D definido por 'fotogrametría (SfM)', podría ser más indicado; este es menos preciso que el obtenido por escáner-3D, pero requiere un equipo informático de menor coste.

2.3. La tecnología más adecuada para valorar el grado de la calidad cinegética de la cuerna del gamo, es la restitución espacial 'fotogramétrica Bi-Foto' a partir de dos fotografías (Rubio-Paramio *et al.* 2016).

En un escenario CAD-3D se obtiene la restitución espacial de aquellos elementos geométricos necesarios, longitudes y trayectorias, de la estructura de la cuerna: longitudes de la vara central y de la pala, de las puntas luchaderas, anchura de las palas, envergadura y perímetros de la vara central y de las rosetas.

En función de la magnitud del valor de dichas longitudes y perímetros, se obtiene una puntuación, según se indica en (Llanes-Borrero 2013), que determina el grado de calidad cinegética de la cuerna del ejemplar.

La implementación de esta metodología (Bi-Foto-CAD) conlleva las siguientes ventajas:

- No es necesario para la valoración cinegética restituir espacialmente todos los elementos de la estructura de la cuerna; solo son necesarias aquellas partes de esta, especificadas en (Llanes-Borrero 2013).
- El dato necesario para obtener espacialmente los elementos de la cuerna, son solo dos fotografías donde aparezca representada esta desde dos puntos de vista diferentes.
- La toma de fotografías se realiza en jornadas de caza de forma rápida, de forma que se posibilita la toma de fotografías de muchos ejemplares en la misma jornada para su posterior valoración.
- La definición tridimensional de los elementos de la estructura de la cuerna y su cuantificación métrica no requieren de laboratorios ni ambientes controlados.
- El costo de los equipos, hardware y software, es moderado sin necesitar grandes requerimientos de procesamiento y cálculo informático.
- El tiempo necesario para obtener espacialmente los elementos geométricos de la cuerna y su cuantificación métrica es bajo.

## 5. Conclusiones

Este estudio ha considerado que para las aplicaciones biológicas relevantes como son la estimación del volumen y de la valoración de la calidad cinegética de la cuerna del gamo, es necesario considerar como entrada de datos para esos análisis unos modelos-3D que caractericen de forma precisa la geometría de la cuerna, de forma que los resultados obtenidos se consideren precisos y relevantes para permitir posteriormente correlacionar con otras

variables, internas o externas, del ejemplar. Se describió inicialmente el proceso de obtención del modelo-3D por cada una de las tres tecnologías consideradas: escáner-3D, fotogrametría SfM y fotogrametría Bi-Foto-CAD, a partir de su geometría. Posteriormente se estudió el grado de aproximación de los tres modelos-3D mediante la comparación de dos de ellos con respecto al modelo-3D de referencia más preciso, el obtenido por escáner-3D, mediante la superposición y alineado de dos modelos-3D, de forma que se verifique el grado de desviación de las parejas de puntos afines significativos considerados de la cuerna: los extremos de las puntas principales, luchaderas y candiles, y de las puntas de la pala. Para estudios de estimación del volumen y de la densidad es necesario un modelo-3D preciso como es el proporcionado por la tecnología del escáner-3D de luz estructurada, o de forma más rápida, aunque algo menos precisa, con la tecnología SfM.

Para el estudio de la valoración de la calidad cinegética, tomar las longitudes y perímetros, necesarias para la 'valoración cinegética', sobre la superficie externa de un modelo-3D se podría realizar, aunque no es lo más idóneo en términos de recursos empleados de tiempo, costo y condiciones controladas para la obtención del modelo-3D. Lo más eficiente es trabajar con el dato de partida de la estructura geométrica axial de aquellas partes de la cuerna obtenidas de forma rápida mediante la restitución espacial fotogramétrica de la cuerna a partir de dos fotografías. La estimación del volumen de la cuerna, mediante su caracterización en un modelo-3D 'sólido', puede ser relevante como biomarcador para conocer el grado de desarrollo y de salud del ejemplar. Más relevante puede ser conocer el valor de la densidad de la cuerna, que podría relacionarse con el grado de salud y de desarrollo corporal del ejemplar en función de las condiciones ambientales en que se ha desarrollado. Para estimar el valor de la densidad, a partir del volumen, se necesita la masa o el peso de la cuerna; esta variable no es fácil de obtener ya que en muestras de cuernas tomadas a partir de trofeos de caza estas vienen sujetas al cráneo, dificultando la estimación de la masa de cada parte.

Otra forma de estimarlo es, mediante el procedimiento de desalojo de agua ([Rubio-Paramio et al. 2012](#)), aunque de esta forma pueden existir problemas de deterioro en la superficie de la cuerna. Para el estudio de poblaciones, que se hayan desarrollado en una localización determinada, una forma de estudiar la densidad puede ser el estudio del peso de las muestras disponibles en el campo en los periodos en que los ejemplares pierden su cornamenta, finales de invierno e inicio de primavera, denominada 'desmogue', de forma que valore la masa de la rama de la cuerna disponible. La valoración cinegética de poblaciones de gamos, en posteriores estudios, en un periodo y localización concreta, se posibilita con esta herramienta descrita, la restitución espacial a partir de dos fotografías, ya que es posible la toma de fotografías 'in situ' de muchos ejemplares en la misma jornada de caza. Conocer la valoración cinegética en poblaciones posibilita su relación con otros biomarcadores, como la edad ([Azorit et al. 2002](#)) y grado a asimetría ([Krapinec et al. 2022](#)), de forma que se pueda inferir sobre características

internas del ejemplar como el grado de salud de este con otras variables externas como la calidad de las condiciones ambientales en las que se haya desarrollado la población de gamos en un periodo determinado.

**CAPÍTULO V**  
**DISCUSIÓN GENERAL**



## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN GENERAL

La generalización de la informática a partir de los años 80 del pasado s. XX, su democratización y su accesibilidad, por coste y potencia de procesado, ha dado lugar a que, en muchas disciplinas, como la industria manufacturera, la bioingeniería, biomedicina, etc., los procesos de análisis y simulaciones sean posibles con resultados precisos. En todos los procesos de diseño y desarrollo de un producto nuevo, de optimización de estos, de implementación de nuevas tecnologías, de medición de procesos, de ensayo del comportamiento de diversa tipología, los análisis y simulaciones de procesos realizados con software han permitido la mejora y eficiencia de estos, en términos de costes y precisión de resultados, similares a los obtenidos en análisis con situaciones y prototipos físicos reales.

Todo ello se posibilita gracias a la caracterización del objeto o producto a desarrollar o ensayar en la simulación, de forma digital, en de un modelo-3D preciso. Éste, junto con las condiciones de contorno, también definidas digitalmente, proporcionan resultados muy próximos a los reales, validándose, por tanto, el proceso de simulación por software.

En el capítulo I ‘Introducción’, se indican diferentes estudios y su evolución sobre diferentes tipologías de modelos-3D y sus aplicaciones destinadas a la optimización de procesos de diversa índole.

Existen pocos estudios que caracterizan digitalmente la cuerna de cérvidos, para su posterior implementación en análisis biológicos, que definan con precisión su geometría. Son pocos los autores que consiguen la digitalización en 3D de la cuerna con el objetivo de aplicar dicho dato en análisis biológicos. Algunos autores han realizado estudios de análisis de asimetrías sin realizarlos directamente sobre el modelo físico de la cuerna. Utilizan técnicas proyectivas en 2D sobre planos de proyección ([Mateos et al. 2008](#); [Ditchkoff y Defreese 2010](#)), o en pocos casos, obteniendo modelos-3D con técnicas de fotogrametría-3D multi-imagen SfM ([Krapinec et al. 2022](#)). [Martínez-Salmerón 2014](#), implementa la caracterización digital de la cuerna del ciervo ibérico en estudios de morfometría geométrica.

Las técnicas de caracterización de la cuerna de cérvidos, en el ciervo y con mayor complejidad en el gamo, básicamente se basan en conseguir ‘imitar’ la geometría real de la cuerna en un modelo digital en tres dimensiones preciso. Éste, puede tener varias tipologías; puede estar definido de una forma más simple, en un modelo que represente el eje axial de su estructura, o en un modelo-3D de tipo ‘sólido’ que represente con precisión su geometría externa, en este caso con mayores recursos para su obtención.

La presente tesis doctoral tiene como objetivo principal la caracterización digital de la cuerna de cérvidos, ciervos y gamos, mediante modelos-3D precisos. A partir de ese dato se realizan análisis biológicos en base a determinar variables, biomarcadores, que valoran el estado geométrico de la cuerna, en cuanto a su grado de desarrollo, defectos bilaterales y volumen ([Fig. 1](#)).

La metodología fotogramétrica es la base de la presente tesis. Con ella se consigue la caracterización digital de la cuerna de cérvidos, ciervos y gamos, en forma de un modelo-3D preciso. Esta, va a servir de punto de partida para, en tareas y estudios posteriores, realizar análisis biológicos destinados a cuantificar el estado geométrico de la cuerna en diferentes variables de interés biológico, denominados biomarcadores.

Para los análisis biológicos destinados a la estimación del valor de la calidad cinegética, el modelo-3D más adecuado es aquel que representa la estructura axial de sus rasgos estructurales. Se ha validado dicho modelo-3D determinando su grado de aproximación geométrico con respecto al modelo real de la cuerna. La técnica gráfica implementada ha consistido en una metodología fotogramétrica novedosa, la cual, con pocos datos, sólo dos fotografías, de fácil registro en el campo y en condiciones ambientales desfavorables, mediante restitución espacial de puntos, permite la caracterización de los rasgos estructurales de la cuerna en un modelo-3D axial ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)).

Otros análisis biológicos realizados, consisten en la estimación del grado de asimetrías, en toda la cuerna o en rasgos concretos de su estructura. Se han propuestos dos metodologías. En una de ellas se estiman las divergencias de puntos homólogos afines sobre un plano de simetría y se cuantifica un valor de asimetría (IA) (índice de asimetría) para toda la cuerna ([Montalvo-Gil et al. 2022](#)).

Los estudios de asimetrías en cérvidos, en muy pocos casos se realizan sobre toda la estructura del elemento a analizar ([Mateos et al. 2008](#); [Baker y Hoelzel 2013](#)) dada la complejidad del proceso. De forma frecuente se realizan sobre rasgos particulares ([Kruuk et al. 2003](#); [Bartoš y Bahbouh 2006](#); [Bartoš et al. 2007](#)). Por otro lado, los análisis de asimetrías no se suelen realizar tomando un plano de simetría como referencia. La valoración de asimetrías se suele realizar sobre un rasgo concreto del elemento analizado, estimando las divergencias geométricas, en longitudes, ángulos, perímetros, etc. en las estructuras bilaterales de la cuerna. Posteriormente se evalúan dichas divergencias, el valor de las desviaciones, cuantificándose un valor de asimetría para dicho rasgo estudiado.

El interés biológico se basa en conocer finalmente valores y grados de relaciones, cuantificadas con técnicas estadísticas, entre los valores de asimetrías presentes en los rasgos de la estructura de la cuerna, y establecer posteriormente posibles inferencias con otros biomarcadores y/o factores de influencia.

Por todo ello, se ha propuesto una segunda metodología, la cual, proporciona resultados de asimetría parciales para rasgos concretos de la cuerna, no considera un plano de simetría y utiliza las mismas mediciones consideradas en la valoración del valor de calidad cinegética. Estima las divergencias métricas bilaterales y las compara con el valor medio. Con las mismas mediciones, se permiten estimar dos biomarcadores, el valor de calidad cinegética y las asimetrías.

En ambas metodologías el dato de entrada para el análisis es la caracterización digital de la cuerna mediante su estructura axial. Los resultados preliminares obtenidos en las dos metodologías proceden de las mediciones realizadas sobre una muestra de ejemplares, cuyo objetivo ha sido la puesta a punto de la metodología y su validación.

Estos resultados han detectado una convergencia inversa entre los valores de asimetría con los de calidad cinegética, de forma que, cuernas de alta calidad cinegética presentan bajos defectos asimétricos; cuernas de aparente desarrollo geométrico, con alta puntuación cinegética como trofeo de caza, medallas, muestran gran armonía y simetría en las dos ramas de su cuerna.

De igual forma que con el estudio del biomarcador de calidad cinegética, en estudios posteriores se podrían aplicar estas metodologías sobre muestras de mayor tamaño y poblaciones que permitan inferir sobre causalidades y factores de influencia.

Otra aplicación biológica implementada es la estimación del volumen de la cuerna con el objetivo de conocer su densidad a partir del dato de su masa. La determinación del volumen de la cuerna implica su caracterización en un modelo-3D 'sólido' y preciso. Para el caso del ciervo ([Rubio-Paramio et al. 2012](#)) consigue dicho modelo con precisión, y consigue determinar el volumen de forma menos invasiva y de deterioro de la cuerna como la utilizada en el método de Arquímedes por desalojo de agua. Genera un modelo-3D mediante técnicas de modelado CAD a partir de las coordenadas de puntos medidos en las proyecciones de tres planos. Los autores ([Rubio-Paramio et al. 2016](#)) consiguen la posición espacial de puntos de la cuerna mediante un proceso de restitución fotogramétrico, antes descrito.

A partir de dicha información y, aplicando herramientas de modelado CAD, se consigue el modelo-3D 'sólido' de la cuerna del ciervo. Para el caso del gamo, dada su complejidad geométrica, obtener un modelo-3D mediante modelado CAD que represente su geometría con precisión, es complicado. En este caso los datos disponibles para representar una estructura tan compleja son escasos, solo de su estructura axial. Se consigue proponer un modelo-3D de la cuerna del gamo ([Montalvo-Gil et al. 2024b](#)). El modelo digital obtenido es laborioso de conseguir y no es totalmente preciso ya que para su definición se han tenido en cuenta una serie de supuestos geométricos que proporcionan una continuidad en partes de la geometría de la cuerna que realmente no son reales.

Para la cuantificación del volumen de la cuerna se tiene que partir de modelos-3D precisos. Para definirlos, se tienen que implementar otras técnicas y tecnologías gráficas, más costosas y con necesidades de operación más exigentes.

En los resultados obtenidos en la presente tesis, se proponen modelos-3D que representan el volumen y la geometría de la cuerna del gamo de forma precisa. Se han generado aplicando tecnologías de escáner-3D y de fotogrametría multi-imagen SfM. La precisión de ambos modelos es alta, pero el escáner-3D es el que ofrece un modelo más preciso, pero a costa de mayores costes de equipamiento y de necesidad de ambientes controlados. La fotogrametría SfM necesita de un gran número de fotografías alrededor de la cuerna, pero unos costes de equipamiento y de software menores que los del escáner-3D. Otro inconveniente es que en ambos casos se necesitan procesos de edición y postprocesado, de forma que, a partir del modelo-3D de nube de puntos se consiga otro de tipo 'sólido'.

La precisión de los modelos-3D se evalúa mediante software, mediante la superposición del volumen común entre dos modelos-3D. El software utilizado proporciona la desviación de puntos relacionados de la cuerna fuera de un valor de tolerancia establecido. En dicha comparación se establece como modelo-3D más preciso el obtenido por escáner-3D seguido del obtenido por fotogrametría SfM.

Se estudia finalmente en función de los recursos requeridos, el tipo de modelo-3D de la cuerna más idóneo para la aplicación biológica concreta. Así, para aplicaciones biológicas de estimación de calidad cinegética y de asimetrías, el modelo-3D ideal es el definido por su estructura axial. Para estudios del volumen, el idóneo es el modelo obtenido por escáner-3D, o el obtenido por fotogrametría SfM, menos preciso, pero con menores costes.

Debido a la complejidad de obtener modelos-3D que representen con fiabilidad su geometría, sobre todo en el caso del gamo, los estudios de estimación del volumen de la cuerna, para determinar posteriormente el valor de su densidad, son costosos, y en mayor cuantía si el estudio se amplía a tamaños muestrales grandes.

Las metodologías presentadas van a permitir, en estudios posteriores, demostrar su utilidad para la valoración de estos dos biomarcadores en otras especies, de origen animal o vegetal. Para animales, aquellas especies definidas en el 'Manual de valoración cinegética como trofeos de caza' (Llanes-Borrero 2013), aparte del ciervo y del gamo, otras como el jabalí, muflón, corzo, lobo, arruí, cabra montés, rebeco y zorro, se podrían valorar.

Esto es posible ya que la metodología fotogramétrica presentada permite la caracterización precisa de los elementos y rasgos estructurales de la especie considerada en un modelo-3D de 'estructura axial', o en caso necesario, en uno de 'volumen'. A partir de ese dato digital se posibilita realizar análisis biológicos de calidad cinegética, asimetrías y volumen-densidad.

Por todo ello, en base a todas las necesidades planteadas, en la presente tesis se han propuesto una serie de metodologías y procedimientos que permiten definir las y resolverlas de forma eficiente.

Las metodologías y procedimientos novedosos aportados en la presente tesis, son:

1. Técnica fotogramétrica de restitución espacial de puntos representados en dos fotografías.
2. Metodología (Mét-1) destinada a cuantificar un valor de asimetría para la cuerna del ciervo considerando un plano de simetría.
3. Metodología (Mét-2) que cuantifica valores de asimetría, 'global' para la cuerna completa, y 'parcial' para rasgos geométricos concretos de esta.  
No considera un plano de simetría y las mediciones requeridas en su algoritmo son las mismas que se utilizan en el proceso de valoración de la calidad cinegética.

Otros procesos novedosos, han consistido en:

4. Caracterización digital de la cuerna del ciervo y del gamo en un modelo-3D 'sólido'. Este se obtiene a partir de la estructura axial, mediante restitución fotogramétrica, aplicando técnicas clásicas de modelado en tres dimensiones dentro de un software CAD. Los modelos-3D van a ser el dato de partida para para los estudios de volumen/densidad.
5. Valoración de la precisión de modelos-3D 'sólido' de la cuerna del gamo, obtenida por diferentes tecnologías, escáner-3D, fotogrametría multi-imagen SfM (*Structure from Motion*) y fotogrametría Bi-Foto-CAD.  
Se realiza mediante software, al superponer el volumen común de dos modelos-3D, cuantificando las desviaciones entre puntos relevantes y zonas de la cuerna.
6. Se determina el grado de idoneidad de los modelos-3D obtenidos por las tecnologías antes mencionadas en base al tipo de análisis biológico que se realice.



**CAPÍTULO VI**  
**CONCLUSIONES**



## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

La presente tesis doctoral se presenta como un conjunto de trabajos de investigación relativos a la caracterización de la cuerna de cérvidos, ciervos y gamos, mediante modelos-3D precisos, en versiones de 'estructura alámbrica' y de modelo-3D 'sólido'. A partir de dicha caracterización digital dicho dato de partida se utiliza como entrada en la implementación de aplicaciones biológicas para la estimación de la calidad cinegética, evaluaciones de asimetrías parciales y globales, y estudios de volumen.

Con el desarrollo de la tesis doctoral se ha generado el conocimiento y aportaciones en las áreas de conocimiento de la ingeniería gráfica y de la biología animal que establecen procedimientos de partida, inicialmente de caracterización digital de la cuerna y posteriormente en aplicaciones biológicas. Los estudios realizados se han realizado con muestras de tamaño medio, obteniendo resultados preliminares, que permitirán en estudios posteriores, la implementación de la metodología propuesta, en muestras de mayor tamaño, de forma que las relaciones e inferencias que se puedan establecer entre los 'biomarcadores' evaluados sobre los condicionantes de influencia en la población sean más consistentes.

Para los diferentes trabajos de investigación presentados, las conclusiones más relevantes han sido:

- La metodología fotogramétrica desarrollada ha conseguido caracterizar la cuerna de cérvidos, mediante un modelo-3D que representa su estructura axial. Se ha conseguido un modelo preciso, de forma que, los resultados obtenidos se consideren concluyentes y significativos. El modelo-3D digital se utiliza como dato de partida fiable para la implementación en la aplicación biológica de estimación de la calidad cinegética de la cuerna. Las ventajas de esta metodología sobre otras son la rápida recogida de datos *in situ* en jornadas de caza, mediante solo dos fotografías, la economía de recursos en la definición del modelo-3D tanto en tiempo de definición como en equipamiento utilizado.

La metodología fotogramétrica se utiliza para caracterizar digitalmente la estructura axial de la cuerna. Éste se utiliza como el dato de partida en la implementación de otro tipo de análisis biológico, la estimación del grado de asimetría de la cuerna.

- Se ha definido una metodología (*método-1*) que consigue estimar el grado de asimetría para la totalidad de la cuerna, a partir de puntos homólogos de esta obtenidos mediante restitución fotogramétrica. Los resultados preliminares obtenidos indican que el grado de defecto bilateral o asimetría está en relación directa a la mayor calidad cinegética que presenta la cuerna, infiriendo que cuernas de gran tamaño y desarrollo presentan bajos valores de defectos bilaterales. Las ventajas que aporta son una rápida implementación ya que solo

precisa restituir pocos puntos, con cálculos sencillos y automatizados, con equipamiento sin grandes necesidades de procesado. Permite su implementación en estudios posteriores sobre poblaciones de ejemplares, en muestras de mayor tamaño, de forma que los resultados proporcionen mayor consistencia sobre las variables de influencia.

Teniendo en cuenta que la mayor parte de los estudios de asimetría se realizan sin utilizar un plano de simetría de referencia y que estos se realizan sobre rasgos geométricos particulares de la estructura de la cuerna, siendo, por tanto, poco frecuente proporcionar un valor global de asimetría para toda la cuerna:

- Se consigue desarrollar una nueva metodología (*método-2*) que proporciona valores de asimetría parciales para rasgos geométricos de la cuerna y un valor global para toda ella. Aprovecha las mediciones realizadas en la valoración de la calidad cinegética, en los rasgos de ambas ramas de la cuerna, sobre el modelo real de la cuerna o en la caracterización digital en 3D de su estructura.
- Los resultados preliminares muestran que los valores de asimetría global están en concordancia con los obtenidos con la metodología anterior (*método-1*). También se detecta una correlación directa entre los grados de asimetría y de calidad cinegética, de forma que ejemplares de alta calidad cinegética presentan bajos valores de asimetría. Se han encontrado relaciones entre valores de asimetría parcial sobre el valor global, de forma que podría aproximarse el valor de asimetría global para toda la cuerna al valor parcial concreto definido entre la ‘punta candil’ y la ‘corona’. En otros estudios podrían establecerse relaciones más consistentes entre los valores parciales de asimetría en rasgos concretos, y entre los propios rasgos, con los posibles factores de influencia de la población.

Para la cuerna del gamo, debido a la complejidad geométrica que presenta, se ha logrado definir su caracterización digital tridimensional, en dos versiones diferentes, mediante varias tecnologías, evaluando la precisión de los modelos-3D obtenidos y determinando qué versión es la más adecuada en base a la tipología de la aplicación biológica.

- Se ha logrado caracterizar la cuerna del gamo en dos versiones de modelos tridimensionales digitales, una representada por su ‘estructura axial’ y otra en forma de modelo-3D ‘sólido’; para este último tipo, se ha evaluado la precisión de los modelos-3D obtenidos por diferentes tecnologías.
- En análisis biológicos de valoración de la calidad cinegética se ha valorado que el dato de partida más adecuado es el modelo tridimensional de la cuerna definido por su ‘estructura axial’, por las ventajas y economía de recursos que supone su definición; el ‘modelo-3D sólido’

también se podría utilizar ya que permite la medición de sus partes estructurales sobre sus superficies externas.

Para la aplicación biológica destinada a cuantificar el volumen-densidad de la cuerna, el modelo-3D 'sólido' obtenido por 'escáner-3D' es lo más adecuado por la gran precisión que este presenta, aunque el equipamiento y el tiempo de procesado son significativos; otra tecnología que supone menos recursos y con una presión aceptable es la fotogrametría SfM (*Structure from Motion*) requiriendo solamente un barrido de fotografías de la cuerna.

- La implementación de esta aplicación biológica, la cuantificación del volumen, en muestras de poblaciones de gran tamaño, procedentes de jornadas de caza es difícil ya que se requiere la toma de un gran número de fotografías por ejemplar, quedando el estudio restringido a la evaluación de cuernas procedentes de desmogues o de trofeos que procedan de talleres de taxidermia.



## **BIBLIOGRAFÍA**



## BIBLIOGRAFÍA

Aguilar MA, Aguilar FJ, Agüera F, Carvajal F (2005). The evaluation of close-range photogrammetry for the modelling of mouldboard plough surfaces. *Biosystems Engineering* 90(4), 397-407.

doi:[10.1016/j.biosystemseng.2004.11.006](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.006)

Alsaffar M, Jarallah EM (2016). Isolation and Characterization of Lytic Bacteriophages Infecting *Pseudomonas aeruginosa* from Sewage water. *International Journal of PharmTech Research* 9, 220-230.

Álvarez G, Martínez T, Martínez E (1991). Winter diet of red deer stag (*Cervus elaphus* L.) and its relationship to morphology and habitat in central Spain. *Folia Zoologica* 40, 117-130.

Alves, N. M., Bartolo, PJ (2006). Integrated computational tools for virtual and physical automatic construction. *Automation in Construction* 15, 257-271.

doi:[10.1016/j.autcon.2005.05.007](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.05.007)

Azorit C, Analla M, Carrasco R, Muñoz-Cobo J (2002a). Influence of age and environment on antler traits in spanish red deer (*Cervus elaphus hispanicus*). *European Journal of Wildlife Research* 48(3), 137-144.

doi:[10.1007/BF02189987](https://doi.org/10.1007/BF02189987)

Azorit C, Analla M, Carrasco R, Carrasco A, Muñoz-Cobo J (2002b). Astas, esqueleto y edad del ciervo (*Cervus elaphus hispanicus*) de Sierra Morena oriental: Estudio de correlación. *Anales de Biología* 24, 195-200.

<https://revistas.um.es/analesbio/article/view/31641>

Azorit C, Muñoz-Cobo J, Hervás J, Analla M (2004). Aging through growth marks in teeth of Spanish red deer (*Cervus elaphus hispanicus*). *Wildlife Society Bulletin* 32, 702-710.

doi:[10.2193/0091-7648\(2004\)032\[0702:ATGMIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0091-7648(2004)032[0702:ATGMIT]2.0.CO;2)

Baker KH, Hoelzel AR (2013). Fluctuating asymmetry in populations of british roe deer (*Capreolus capreolus*) following historical bottlenecks and founder events. *Mammalian Biology* 78, 387-391.

doi:[10.1016/j.mambio.2013.02.001](https://doi.org/10.1016/j.mambio.2013.02.001)

Baltsavias EP (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 83-94.

doi:[10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3)

Bartos L, Bahbouh R (2006). Antler size and fluctuating asymmetry in red deer (*Cervus elaphus*) stags and probability of becoming a harem holder in rut. *Biological Journal of the Linnean Society* 87, 59-68.

doi:[10.1111/j.1095-8312.2006.00555.x](https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2006.00555.x)

Bartoš L, Bahbouh R, Vach M (2007). Repeatability of size and fluctuating asymmetry of antler characteristics in red deer (*Cervus elaphus*) during ontogeny. *Biological Journal of the Linnean Society* 91, 215-226.

doi:[10.1111/j.1095-8312.2007.00789.x](https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2007.00789.x)

- Bateman P (2000). The influence of weapon asymmetry on male-male competition success in a sexually dimorphic insect, the African King Cricket *Libanastidus vittatus* (Orthoptera: Anostostomatidae). *Journal of Insect Behavior* 13, 157-163.  
doi:[10.1023/A:1007775928411](https://doi.org/10.1023/A:1007775928411)
- Baumberg A, Lyons A, Taylor R (2005). 3D S.O.M. commercial software solution to 3D scanning. *Graphical Models* 67(6), 476-495.  
doi:[10.1016/j.gmod.2004.10.002](https://doi.org/10.1016/j.gmod.2004.10.002)
- Baxter BJ, Andrews RN, Barrell GK (1999). Bone turnover associated with antler growth in red deer (*Cervus elaphus*). *Anatomical Record* 256, 14-19.  
doi:[10.1002/\(SICI\)1097-0185\(19990901\)256:1<14::AID-AR3>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0185(19990901)256:1<14::AID-AR3>3.0.CO;2-A)
- Beccari CV, Farella E, Liverani A, Morigi S, Rucci M (2010). A fast interactive reverse-engineering system. *Computer-Aided Design* 42, 860-873.  
doi:[10.1016/j.cad.2010.06.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.06.001)
- Berglund A, Bisazza A, Pilastro A (1996). Armaments and ornaments: An evolutionary explanation of traits of dual utility. *Biological Journal of the Linnean Society* 58, 385-399.  
doi:[10.1006/bijl.1996.0043](https://doi.org/10.1006/bijl.1996.0043)
- Besl P (1988). Active, optical range imaging sensors. *Machine Vision and Applications* 1, 127-152.  
doi:[10.1007/BF01212277](https://doi.org/10.1007/BF01212277)
- Bhatla A, Choe SY, Fierro O, Leite F (2012). Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld. *Automation in Construction* 28, 116-127.  
doi:[10.1016/j.autcon.2012.06.003](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.003)
- Björklund M, Merilä J (1997). Why some measures of fluctuating asymmetry are so sensitive to measurement error. *Annales Zoologici Fennici* 34, 133-137.  
[www.jstor.org/stable/23735689](http://www.jstor.org/stable/23735689)
- Bowyer RT, Stewart KM, Kie JG, Gasaway W (2001). Fluctuating asymmetry in antlers of alaskan moose: size matters. *Journal of Mammalogy* 82, 814-824.  
doi:[10.1644/1545-1542\(2001\)082<0814:FAIAOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1644/1545-1542(2001)082<0814:FAIAOA>2.0.CO;2)
- Brilakis I, Lourakis M, Sacks R, Savarese S, Christodoulou S, Teizer J, Makhmalbaf A (2010). Toward automated generation of parametric BIMs based on hybrid video and laser scanning data. *Advanced Engineering Informatics* 24, 456-465.  
doi:[10.1016/j.aei.2010.06.006](https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.006)
- Brilakis I, Fathi H, Rashidi A (2011). Progressive 3D reconstruction of infrastructure with videogrammetry. *Automation in Construction* 20, 884-895.  
doi:[10.1016/j.autcon.2011.03.005](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.03.005)
- Bubenik GA, Bubenik AB (1990). Horns, Pronghorns, and Antlers Evolution, Morphology, Physiology, and Social Significance. Springer-Verlag New York Inc.  
doi:[10.1007/978-1-4613-8966-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8966-8)

Carranza J (2017). Ciervo-(*Cervus elaphus Linnaeus*), 1758. Enciclopedia Virtual de Los Vertebrados Españoles. Madrid. Spain.

Chen P-Y, Stokes AG, Mckittrick J (2009). Comparison of the structure and mechanical properties of bovine femur bone and antler of the North American elk (*Cervus elaphus canadensis*). *Acta Biomaterialia* 5, 693-706.

doi:[10.1016/j.actbio.2008.09.011](https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.09.011)

Chin-Hung T, Yun-Sheng C, Wen-Hsing H (2007). Constructing a 3D trunk model from two images. *Graphical Models* 69, 33-56.

doi:[10.1016/j.gmod.2006.06.001](https://doi.org/10.1016/j.gmod.2006.06.001)

Chin-Hung T, Yun-Sheng C, Wen-Hsing H (2007). Constructing a 3D trunk model from two images. *Graphical Models* 69, 33-56.

doi:[10.1016/j.gmod.2006.06.001](https://doi.org/10.1016/j.gmod.2006.06.001)

Chirichella R, Rocca M, Brugnoli A, Mustoni A, Apollonio M (2020). Fluctuating asymmetry in Alpine chamois horns: An indicator of environmental stress. *Evolutionary Ecology* 34, 573–587.

doi:[10.1007/s10682-020-10051-3](https://doi.org/10.1007/s10682-020-10051-3)

Clarke GM (1995). Relationships between developmental stability and fitness: application for conservation biology. *Conservation Biology* 9, 18-24.

doi:[10.1046/j.1523-1739.1995.09010018.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.09010018.x)

Clements MN, Clutton-Brock TH, Albon SD, Pemberton JM, Kruuk LEB (2010). Getting the timing right: antler growth phenology and sexual selection in a wild red deer population. *Oecologia* 164, 357-368.

doi:[10.1007/s00442-010-1656-7](https://doi.org/10.1007/s00442-010-1656-7)

Clutton-Brock TH, Guinness FE, Albon SD (1982). Red Deer: Behavior and Ecology of Two Sexes. University of Chicago Press. Chicago, IL. USA.

Demarsin K, Vanderstraeten D, Volodine T, Roose D (2007). Detection of closed sharp edges in point clouds using normal estimation and graph theory. *Computer-Aided Design* 39(4), 276-283.

doi:[10.1016/j.cad.2006.12.005](https://doi.org/10.1016/j.cad.2006.12.005)

Ditchkoff SS, Lochmiller RL, Masters RE, Hooper SR, Van Den Busshe RA (2001). Major-Histocompatibility-Complex-Associated Variation in Secondary Sexual Traits of White-Tailed Deer (*Odocoileus virginianus*): Evidence for Good-Genes Advertisement. *Evolution* 55, 616-625.

doi:[10.1554/0014-3820\(2001\)055\[0616:mhcavi\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1554/0014-3820(2001)055[0616:mhcavi]2.0.co;2)

Ditchkoff SS, Lochmiller RL, Masters RE, Starry WR, Leslie DM Jr (2001). Does fluctuating asymmetry of antlers in white-tailed deer (*Odocoileus Virginianus*) follow patterns predicted for sexually selected traits?. *Biological Sciences* 268, 891-898.

doi:[10.1098/rspb.2001.1588](https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1588)

Ditchkoff SS, Defreese RL (2010). Assessing fluctuating asymmetry of white-tailed deer antlers in a three-dimensional context. *Journal of Mammalogy* 91, 27-37.

doi:[10.1644/09-MAMM-A-134R.1](https://doi.org/10.1644/09-MAMM-A-134R.1)

Eggeman SL, Hebblewhite M, Cunningham J, Hamlin K (2009). Fluctuating Asymmetry in Elk Cervus Elaphus Antlers Is Unrelated to Environmental Conditions in the Greater Yellowstone Ecosystem. *Wildlife Biology* 15, 299-309.  
doi:[10.2981/08-069](https://doi.org/10.2981/08-069)

Estévez JA, Landete-Castillejos T, García A, Ceacero F, Gallego L (2008). Population management and bone structural effects in composition and radio-opacity of iberian red deer (Cervus elaphus hispanicus) antler. *European Journal of Wildlife Research* 54, 215-223.  
doi:[10.1007/s10344-007-0132-0](https://doi.org/10.1007/s10344-007-0132-0)

Folstad I, Arneberg P, Karter AJ (1996). Antlers and Parasites. *Oecologia* 105, 556-558.  
doi:[10.1007/BF00330020](https://doi.org/10.1007/BF00330020)

Fortin D, Cheriet F, Beauséjour M, Debanné P, Joncasm J, Labelle H (2007). A 3D visualization tool for the design and customization of spinal braces. *Computerized Medical Imaging and Graphics* 31, 614-624.  
doi:[10.1016/j.compmedimag.2007.07.006](https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2007.07.006)

García AJ, Gaspar-López Roldán E, Estévez JA, Gómez JA, Ceacero-Herrador F, Olguín-Hernández CA, Carrión D, Landete-Castillejos D, Gallego-Martínez L (2010). El trofeo en los cérvidos: Caracterización funcional del crecimiento de la cuerna usando como modelo el ciervo. Ed. Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid. Spain.

Gaspar-López E, Landete-Castillejos T, Gallego L, García AJ (2008). Antler growth rate in yearling Iberian red deer (Cervus elaphus hispanicus). *European Journal of Wildlife Research* 54(4), 753-755.  
doi:[10.1007/s10344-008-0185-8](https://doi.org/10.1007/s10344-008-0185-8)

Gaspar-López E, Landete-Castillejos T, Estévez JA, Ceacero F, Gallego L, García AJ (2010). Biometrics, testosterone, cortisol and antler growth cycle in Iberian red deer stags (Cervus elaphus hispanicus). *Reproduction in Domestic Animals* 45, 243-249.  
doi:[10.1111/j.1439-0531.2008.01271.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2008.01271.x)

Geist, V (1998). *Deer of the World: Their Evolution, Behaviour, and Ecology*. Stackpole Books. Swan Hill Press. Shrewsbury, Shropshire. UK.

Golparvar-Fard M, Bohn J, Teizer J, Savarese S, Peña-Mora F (2011). Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. *Automation in Construction* 20(8), 1143-1155.  
doi:[10.1016/j.autcon.2011.04.016](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.016)

Gómez JA, Landete-Castillejos T, García AJ, Gallego L (2006). Importance of growth on body size and antler development in the Iberian red deer (Cervus elaphus hispanicus). *Livestock Science* 105, 27-34.  
doi: [10.1016/j.livsci.2006.04.028](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.04.028)

Gómez JA, Pérez-Barbería J, García AJ, Cappelli J, Chonco L, Ceacero F, Pérez-Serrano M, Landete-Castillejos T (2022). Factors affecting antler growth period and casting date in red deer. *Journal of Mammalogy* 103, 169-177.  
doi:[10.1093/jmammal/gyab097](https://doi.org/10.1093/jmammal/gyab097)

- Goss RJ (1983). Deer Antlers. Regeneration, Function, and Evolution. *Science* 24, 737-738.  
doi:[10.1126/science.224.4650.737](https://doi.org/10.1126/science.224.4650.737)
- Govind CK, Pearce J (1986). Differential reflex activity determines claw and closer muscle asymmetry in developing lobsters. *Science* 233, 354-356.  
doi:[10.1126/science.233.4761.354](https://doi.org/10.1126/science.233.4761.354)
- Goyal M, Murugappan S, Piya C, Benjamin W, Fang Y, Liu M, Ramani K (2012). Towards locally and globally shape-aware reverse 3D modeling. *Computer-Aided Design* 44(6), 537-553.  
doi:[10.1016/j.cad.2011.12.004](https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.12.004)
- Graham JH, Freeman DC, Emlen JM (1993). Antisymmetry, directional asymmetry, and dynamic morphogenesis. *Genetica* 89, 121-137.  
doi:[10.1007/BF02424509](https://doi.org/10.1007/BF02424509)
- Guo H, Li ZB, Ma Q, Zhu DH, Su W, Wang K, Marinello F (2019). A bilateral symmetry based pose normalization framework applied to livestock body measurement in point clouds. *Computers and Electronics in Agriculture* 160, 59-70.  
doi:[10.1016/j.compag.2019.03.010](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.010)
- Harvati K (2003). Quantitative analysis of Neanderthal temporal bone morphology using three-dimensional geometric morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology* 120(4), 323-338.  
doi:[10.1002/ajpa.10122](https://doi.org/10.1002/ajpa.10122)
- Hayden TJ, Lynch JM, O'Corry-Crowe G (1994). Antler Growth and Morphology in a Feral Sika Deer (*Cervus nippon*) Population in Killarney, Ireland. *Journal of Zoology* 232, 21-35.  
doi:[10.1111/j.1469-7998.1994.tb01557.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1994.tb01557.x)
- Hennessy RJ, Stringer CB (2002). Geometric morphometric study of the regional variation of modern human craniofacial form. *American Journal of Physical Anthropology* 117(1), 37-48.  
doi:[10.1002/ajpa.10005](https://doi.org/10.1002/ajpa.10005)
- Hollister SJ, Levy R, Chu TM, Hollaran JW, Feinberg SE (2000). An image based approach for designing and manufacturing of craniofacial scaffolds. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 29, 67-71.  
doi:[10.1034/j.1399-0020.2000.290115.x](https://doi.org/10.1034/j.1399-0020.2000.290115.x)
- I.A.C.P.C. Instituto Andaluz de la Caza y Pesca Continental. (2015). Reglamento de funcionamiento y manual práctico de medición para la homologación de trofeos de caza en Andalucía.  
[www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portaldelacazaylapescacontinental](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portaldelacazaylapescacontinental)
- Jawad LA, Abed JM (2020). Morphological asymmetry in the greater lizardfish *Saurida tumbil* (Bloch, 1795) collected from the marine waters of Iraq. *Marine Pollution Bulletin* 159, 111523.  
doi:[10.1016/j.marpolbul.2020.111523](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111523)
- Jennings DJ, Gammell MP (2023). Fluctuating asymmetry of fallow deer antlers is associated with weapon damage but not tactical behaviour during fights. *Symmetry* 15(4), 829.  
doi:[10.3390/sym15040829](https://doi.org/10.3390/sym15040829)

Kimmerle EH, Ross A, Slice D. (2008). Sexual dimorphism in America: Geometric morphometric analysis of the craniofacial region. *Journal of Forensic Sciences* 53(1), 54-57.  
doi:[10.1111/j.1556-4029.2007.00627.x](https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00627.x)

Klingenberg CP (2003). Fluctuating asymmetry and animal welfare: How far are we? And how far should we go? *The Veterinary Journal* 166, 5-6.  
doi:[10.1016/S1090-0233\(02\)00187-9](https://doi.org/10.1016/S1090-0233(02)00187-9)

Klingenberg CP, Wetherill L, Rogers J, Moore E, Ward R, Autti-Rämö, I, Fagerlund Å, Jacobson SW, Robinson LK, Hoyme HE, Mattson SN, Li TK, Riley EP, Foroud T (2010). Prenatal alcohol exposure alters the patterns of facial asymmetry. *Alcohol*, 44, 649-657.  
doi:[10.1016/j.alcohol.2009.10.016](https://doi.org/10.1016/j.alcohol.2009.10.016)

Knierim U, Van Dongen S, Forkman B, Tuytens FAM, Špinko M, Campo JL, Weissengruber GE (2007). Fluctuating asymmetry as an animal welfare indicator - A review of methodology and validity. *Physiology & Behavior* 92, 398-421.  
doi:[10.1016/j.physbeh.2007.02.014](https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.02.014)

Koelman, HJ (2010). Application of a photogrammetry-based system to measure and re-engineer ship hulls and ship parts: An industrial practices-based report. *Computer-Aided Design* 42, 731-743.  
doi:[10.1016/j.cad.2010.02.005](https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.02.005)

Korosec M, Duhovnik J, Vukasinovic N (2010). Identification and optimization of key process parameters in noncontact laser scanning for reverse engineering. *Computer-Aided Design* 42, 744-748.  
doi:[10.1016/j.cad.2010.02.003](https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.02.003)

Krapinec K, Jumic V, Balekic M, Lolic N, Putnik R, Florijancic T, Ozimec S, Boškovic I. (2022). The Reliability of Fluctuating Asymmetry in Population Estimation: The Case of Feedlot Red Deer. *Symmetry* 14, 2092.  
doi:[10.3390/sym14102092](https://doi.org/10.3390/sym14102092)

Kruuk LEB, Slate J, Pemberton JM, Broherstone S, Guinness F, Clutton-Brock T (2002). Antler size in red deer: heritability and selection but no evolution. *Evolution* 56, 1683–1695.  
doi:[10.1111/j.0014-3820.2002.tb01480.x](https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2002.tb01480.x)

Kruuk LEB, Slate J, Pemberton JM, Clutton-Brock TH (2003). Fluctuating asymmetry in a secondary sexual trait: No associations with individual fitness, environmental stress or inbreeding, and no heritability. *Journal of Evolutionary Biology* 16, 101-113.  
doi:[10.1046/j.1420-9101.2003.00503.x](https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.2003.00503.x)

Kurazume R, Nakamura K, Okada T, Sato Y, Sugano N, Koyama T, Iwashita Y, Hasegawa T (2009). 3D reconstruction of a femoral shape using a parametric model and two 2D fluoroscopic images. *Computer Vision and Image Understanding* 113, 202-211.  
doi:[10.1016/j.cviu.2008.08.012](https://doi.org/10.1016/j.cviu.2008.08.012)

Kurazume R (2009). 3D reconstruction of a femoral shape using a parametric model and two 2D fluoroscopic images. *Computer Vision and Image Understanding* 113, 202-211.  
doi:[10.1016/j.cviu.2008.08.012](https://doi.org/10.1016/j.cviu.2008.08.012)

- Lagesen K, Folstad I (1998). Antler asymmetry and immunity in reindeer. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 44, 135-142.  
doi:[10.1007/s002650050524](https://doi.org/10.1007/s002650050524)
- Lal P, Sun W (2004). Computer modeling approach for microsphere-packed bone graft. *Journal of Computer-Aided Design* 36, 487-497.  
doi:[10.1016/S0010-4485\(03\)00134-9](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(03)00134-9)
- Landete-Castillejos T, Currey JD, Estevez JA, García A, Gallego L (2007). Influence of physiological effort of growth and chemicals composition in antler bone mechanical properties. *Bone* 41, 794-803.  
doi:[10.1016/j.bone.2007.07.013](https://doi.org/10.1016/j.bone.2007.07.013)
- Landete-Castillejos T, Currey JD, Estevez JA, Fierro Y, Calatayud A, Ceacero F, García A, Gallego L (2010). Do drastic weather effects on diet influence changes in chemical composition, mechanical properties and structure in deer antler?. *Bone* 47, 815-825.  
doi:[10.1016/j.bone.2010.07.021](https://doi.org/10.1016/j.bone.2010.07.021)
- Leamy L (1984). Morphometric studies in inbred and hybrid house mice. V. Directional and fluctuating asymmetry. *The American Naturalist* 123, 579-593.  
[www.jstor.org/stable/2461239](http://www.jstor.org/stable/2461239)
- Leary RF, Allendorf FW (1989). Fluctuating Asymmetry as an Indicator of Stress: Implications for Conservation Biology. *Trends in Ecology & Evolution* 4, 214-217.  
doi:[10.1016/0169-5347\(89\)90077-3](https://doi.org/10.1016/0169-5347(89)90077-3)
- Li N, Zhang H, Ouyang H (2009). Shape optimization of coronary artery stent based on a parametric model. *Finite Elements in Analysis and Design* 45, 468-475.  
doi:[10.1016/j.finel.2009.01.001](https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.01.001)
- Liu T, Burner AW, Jones TW (2012). Photogrammetric techniques for aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences* 54, 1-58.  
doi:[10.1016/j.paerosci.2012.03.002](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.03.002)
- Lockwood CA, Lynch JM, Kimbel WH (2002). Quantifying temporal bone morphology of great apes and humans: An approach using geometric morphometrics. *Journal of Anathomy* 201(6), 447-464.  
doi:[10.1046/j.1469-7580.2002.00122.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2002.00122.x)
- Ludwig W (1932). *Das RechtseLinks Problem im Tierreich und beim Menschen*. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Llanes Borrero L (2013). *Manual de Homologación de Trofeos de Caza Mayor en España*. Madrid. Spain.
- Manning JT, Ockenden L (1994). Fluctuating asymmetry in racehorses. *Nature* 370, 185-186.  
doi:[10.1038/370185a0](https://doi.org/10.1038/370185a0)
- Manning JT, Pickup LJ (1998). Symmetry and performance in middle distance runners. *Internatonal Journal of Sports Medicine* 19, 205-209.  
doi:[10.1055/s-2007-971905](https://doi.org/10.1055/s-2007-971905)

Markusson E, Folstad I (1997). Reindeer antlers: visual indicators of individual quality?. *Oecologia* 110, 501-507.

doi:[10.1007/s004420050186](https://doi.org/10.1007/s004420050186)

Martínez-Salmerón D (2014). Estudio Tridimensional de la Cornamenta del Ciervo Ibérico (*Cervus elaphus hispanicus*): Aplicación de Técnicas de Morfometría Geométrica y Otras Metodologías. Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona. Barcelona, Spain.

Mateos C, Alarcos S, Carranza J, Sánchez-Prieto CB, Valencia J (2008). Fluctuating asymmetry of red deer antlers negatively relates to individual condition and proximity to prime age. *Animal Behaviour* 75, 1629-1640.

doi:[10.1016/j.anbehav.2007.10.016](https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.10.016)

Miller KV, Marchinton RL, Beckwith JR (1985). Variations in density and chemical composition of white-tailed deer antler. *Journal of Mammalogy* 66(4), 693-701.

doi:[10.2307/1380795](https://doi.org/10.2307/1380795)

Mills KJ, Peterson RO (2013). Moose morphology and asymmetry on Isle Royale National Park. *Alces* 49, 17-28.

<https://alcesjournal.org/index.php/alces/article/view/106>

Minns RJ, Bibb R, Banks R, Sutton RA (2003). The use of a reconstructed three-dimensional solid model from CT to aid the surgical management of a total knee arthroplasty: A case study. *Medical Engineering & Physics* 25, 523-526.

doi:[10.1016/S1350-4533\(03\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4533(03)00050-X)

Møller AP (1992). Patterns of fluctuating asymmetry in weapons: Evidence for reliable signalling of quality in beetle horns and bird spurs. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences* 248, 199-206.

doi:[10.1098/rspb.1992.0062](https://doi.org/10.1098/rspb.1992.0062)

Møller AP (1994). Directional selection on directional asymmetry: Testes size and secondary sexual characters in birds. *Proceedings: Biological Sciences* 258, 147-151.

[www.jstor.org/stable/49989](http://www.jstor.org/stable/49989)

Møller AP, Soler M, Thornhill R (1995). Breast asymmetry, sexual selection, and human reproductive success. *Ethology and Sociobiology* 16, 207-219.

doi:[10.1016/0162-3095\(95\)00002-3](https://doi.org/10.1016/0162-3095(95)00002-3)

Møller AP, Cuervo JJ, Soler JJ, Zamora-Muñoz C (1996). Horn Asymmetry and Fitness in Gemsbok. *Oryx* g. Gazelle. *Behavioral Ecology* 7, 246-253.

doi:[10.1093/beheco/7.3.247](https://doi.org/10.1093/beheco/7.3.247)

Møller AP (1997). Developmental stability and fitness: a review. *American Naturalist* 149, 916-932.

doi:[10.1086/286030](https://doi.org/10.1086/286030)

Møller AP, Swaddle JP (1997). Asymmetry, Developmental Stability, and Evolution. Oxford Series in Ecology and Evolution. Oxford university Press. Bristol, UK.

Montalvo-Gil JM, Azorit C, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2022). A new method for quantifying the asymmetry of biological elements by means of a photogrammetric technique using a parametric computer-aided design system. *Symmetry* 14, 2296.  
doi:[10.3390/sym14112296](https://doi.org/10.3390/sym14112296)

Montalvo-Gil JM, Azorit C, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2024a). A new methodology, based on a CAD system, for evaluating partial and global asymmetries in deer antlers from hunting quality assessment data. *Symmetry* 16, 785.  
doi:[10.3390/sym16070785](https://doi.org/10.3390/sym16070785)

Montalvo-Gil JM, Azorit C, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2024b). Three 3D graphics engineering technologies for fallow deer antler characterisation in ecology and management approaches. *Discover Applied Sciences*.

Moyes K, Morgan-BJ T, Morris A, Morris SJ, Clutton-Brock TH, Coulson T (2009). Exploring individual quality in a wild population of red deer. *Journal of Animal Ecology* 78, 406-413.  
doi:[10.1111/j.1365-2656.2008.01497.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01497.x)

Nicholson E, Harvati K (2006). Quantitative analysis of human mandibular shape using three-dimensional geometric morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology* 131(3), 368-383.  
doi:[10.1002/ajpa.20425](https://doi.org/10.1002/ajpa.20425)

Ordóñez C, Arias P, Herráez J, Rodríguez J, Martín MT (2008). Two photogrammetric methods for measuring flat elements. *Automation in Construction* 17(5), 517-525.  
doi:[10.1016/j.autcon.2007.11.003](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.11.003)

Panchetti M, Pernot JP, Veron P (2010). Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications. *Computer-Aided Design* 42(8), 693-707.  
doi:[10.1016/j.cad.2010.01.004](https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.01.004)

Palmer A (2013). Eclectic Reflections on Biological asymmetry.  
[www.biology.ualberta.ca/palmer.hp/asy/asymmetry.htm](http://www.biology.ualberta.ca/palmer.hp/asy/asymmetry.htm)

Palmer AR, Strobeck C (1986). Fluctuating Asymmetry: Measurement, Analysis, Patterns. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17, 391-421.  
doi:[10.1146/annurev.es.17.110186.002135](https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.002135)

Palmer AR (1994). Fluctuating asymmetry analyses: A primer. In *Developmental Instability: Its Origins and Evolutionary Implications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 335-364.  
doi:[10.1007/978-94-011-0830-0\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0830-0_26)

Palmer AR (1996). Waltzing with asymmetry. *BioScience* 46, 518-532.  
doi:[10.2307/1312930](https://doi.org/10.2307/1312930)

Palmer AR (1999). Detecting publication bias in meta-analyses: a case study fluctuating asymmetry and sexual selection. *American Naturalist* 154, 220-233.  
doi:[10.1086/303223](https://doi.org/10.1086/303223)

- Palmer AR, Strobeck C (2003). Fluctuating asymmetry analyses revisited. In: *Developmental Instability: Causes and Consequences*. Oxford: Oxford University Press.  
doi:[10.1093/oso/9780195143454.003.0017](https://doi.org/10.1093/oso/9780195143454.003.0017)
- Panchetti M, Pernot JP, Veron P (2010). Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications. *Computer-Aided Design* 42(8), 693-707.  
doi:[10.1016/j.cad.2010.01.004](https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.01.004)
- Parsons PA (1990). Fluctuating asymmetry: An epigenetic measure of stress. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 65, 131-145.  
doi:[10.1111/j.1469-185x.1990.tb01186.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.1990.tb01186.x)
- Pélabon C, Van Breukelen L (1998). Asymmetry in antler size in roe deer (*Capreolus capreolus*): an index of individual and population conditions. *Oecologia* 116, 1-8.  
doi:[10.1007/s004420050557](https://doi.org/10.1007/s004420050557)
- Pélabon C, Joly P (2000). What, if anything, does visual asymmetry in fallow deer antlers reveal?. *Animal Behaviour* 59, 193-199.  
doi:[10.1006/anbe.1999.1291](https://doi.org/10.1006/anbe.1999.1291)
- Pernot JP, Moraru G, Veron P (2006). Filling holes in meshes using a mechanical model to simulate the curvature variation minimization. *Computers & Graphics* 30, 892-902.  
doi:[10.1016/j.cag.2006.08.020](https://doi.org/10.1016/j.cag.2006.08.020)
- Prakoonwit S, Benjamin R (2007). 3D surface point and wireframe reconstruction from multiview photographic images. *Image and Vision Computing* 25, 1509-1518.  
doi:[10.1016/j.imavis.2006.12.019](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2006.12.019)
- Putman RJ, Sullivan MS, Langbein J (2000). Fluctuating asymmetry in antlers of fallow deer (*Dama dama*): The relative roles of environmental stress and sexual selection. *Biological Journal of the Linnean Society* 70, 27-36.  
doi:[10.1006/bijl.1999.0362](https://doi.org/10.1006/bijl.1999.0362)
- Queen R, Dickerson L, Ranganathan S, Schmitt D (2020). A novel method for measuring asymmetry in kinematic and kinetic variables: The normalized symmetry index. *Journal of Biomechanics* 99, 109531.  
doi:[10.1016/j.jbiomech.2019.109531](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109531)
- Ramos B, Santos E (2011). Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design* 43(2), 188-206.  
doi:[10.1016/j.cad.2010.11.005](https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.11.005)
- Remondino F, El-Hakim S (2006). Image-based 3D modeling: A review. *The Photogrammetric Record* 21(115), 269-291.  
doi:[10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x](https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x)
- Rioux M, Bechthold G, Taylor D, Duggan M (1987). Design Of A Large Depth Of View Three-Dimensional Camera For Robot Vision. *Optical Engineering* 26(12), 261245.  
doi:[10.1117/12.7977163](https://doi.org/10.1117/12.7977163)

- Rodríguez J, Martín MT, Arias P, Ordóñez C, Herráez J (2008). Flat elements on buildings using close-range photogrammetry and laser. *Optics and Lasers in Engineering* 46(7), 541-545.  
doi:[10.1016/j.optlaseng.2008.02.007](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.02.007)
- Romero AN, Dickinson E, Turcotte CM, Terhune CE (2023). Skeletal age during hurricane impacts fluctuating asymmetry in Cayo Santiago rhesus macaques. *Ecology and Evolution* 13(8).  
doi:[10.1002/ece3.10425](https://doi.org/10.1002/ece3.10425)
- Rubio-Paramio MA, Muñoz-Cobo J, Moro J, Gutiérrez R, Oya A, Tellado S, Azorit C (2012). Assessing red deer antler density with a hydrostatic method versus a new parametric volume-modelling technique using 3D-CAD. *Animal Production Science* 52, 750-755.  
doi:[10.1071/AN12015](https://doi.org/10.1071/AN12015)
- Rubio-Paramio MA, Montalvo-Gil JM, Ramírez-Garrido JA, Martínez-Salmerón D, Azorit C (2016). An interactive photogrammetric method for assessing deer antler quality using a parametric Computer-Aided Design system (Interactive Photogrammetric Measure Method). *Biosystems Engineering* 150, 54-68.  
doi:[10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012)
- Sánchez F, Fernández RI, Cuesta E, Álvarez BJ, Martínez S (2012). Study of the technical feasibility of photogrammetry and coordinated measuring arms. *AIP Conference Proceedings* 1431, 311-318.  
doi:[10.1063/1.4707579](https://doi.org/10.1063/1.4707579)
- Schoenebeck CW, Peterson BC (2014). Evaluation of hunters antler-size selection through an age-specific comparison of harvested and naturally cast antler metrics. *Journal of Fish and Wildlife Management* 5, 167-173.  
doi:[10.3996/032013-JFWM-022](https://doi.org/10.3996/032013-JFWM-022)
- Shigeta Y, Hirabayashi R, Ikawa T, Kihara T, Ando E, Hirai S, Fukushima S, Ogawa T (2013). Application of photogrammetry for analysis of occlusal contacts. *Journal of Prosthodontic Research* 57, 122-128.  
doi:[10.1016/j.jpor.2012.11.004](https://doi.org/10.1016/j.jpor.2012.11.004)
- Solberg EJ, Saether BE (1993). Fluctuating asymmetry in the antlers of moose (Alces alces): Does it signal male quality?. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences* 254, 251-255.  
doi:[10.1098/rspb.1993.0154](https://doi.org/10.1098/rspb.1993.0154)
- Soriguer RC, Fandos P, Bernáldez E, Delibes JR (1994). E1 ciervo en Andalucía. Junta de Andalucía. Consejería de agricultura y pesca. Dirección General de Desarrollo Forestal: Sevilla, Spain.
- Stéger V, Molnár A, Borsy A, Gyurján I, Szabolcsi Z, Dancs G, Molnár J, Papp P, Nagy J, Puskás L, et al. (2010). Antler development and coupled osteoporosis in the skeleton of red deer *Cervus elaphus*: Expression dynamics for regulatory and effector genes. *Molecular Genetics and Genomics* 284, 273-287.  
doi:[10.1007/s00438-010-0565-0](https://doi.org/10.1007/s00438-010-0565-0)
- Stenström D (1998). Mating behaviour and sexual selection in nonleekking fallow deer (*Dama dama*). Ph.D. thesis, University of Uppsala, SW.
- Styliadis AD (2008). Historical photography-based computer aided architectural design, demolished buildings information modeling with reverse engineering functionality. *Automation in Construction* 18(1), 51-69. doi: [10.1016/j.autcon.2008.04.010](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.04.010)

Sun W, Darling A, Starly B, Nam J (2004a). Computer-aided tissue engineering. Part I: overview, scope and challenges. *Journal of Biotechnology and Applied Biochemistry* 39, 29-47.  
doi:[10.1042/BA20030108](https://doi.org/10.1042/BA20030108)

Sun W, Starly B, Darling A, Gomez C (2004b). Computer-aided tissue engineering, part II: application to biomimetic modeling and design of tissue scaffolds. *Journal of Biotechnology and Applied Biochemistry* 39, 49-58.  
doi:[10.1042/BA20030109](https://doi.org/10.1042/BA20030109)

Sun W (2005). Bio-CAD modeling and its applications in computer-aided tissue engineering. *Computer Aided Design* 37, 1097-1114.  
doi:[10.1016/j.cad.2005.02.002](https://doi.org/10.1016/j.cad.2005.02.002)

Sun W, Starly B, Nam J, Darling A (2005). Bio-CAD modeling and its applications in computer-aided tissue engineering. *Computer-Aided Design* 37, 1097-1114.  
doi: [10.1016/j.cad.2005.02.002](https://doi.org/10.1016/j.cad.2005.02.002)

Torres-Porras J, Carranza J, Pérez-González J (2009). Combined effects of drought and density on body and antler size of male Iberian red deer (*Cervus elaphus hispanicus*): climate change implications. *Wildlife Biology* 15(2), 213-221.  
doi:[10.2981/08-059](https://doi.org/10.2981/08-059)

Tsuboi MM, Kopperud BT, Syrowatka C, Grabowski M, Voje K, Pélabon C, Hansen TF (2020). Measuring complex morpho-logical traits with 3D photogrammetry: A case study with deer antlers. *Evolutionary Biology* 47, 175–186.  
doi:[10.1007/s11692-020-09496-9](https://doi.org/10.1007/s11692-020-09496-9)

Underwood HB (2000). Deer of the World: Their Evolution, Behaviour, and Ecology. Valerius Geist. *The Quarterly Review of Biology* 75, 196.  
doi:[10.1086/393436](https://doi.org/10.1086/393436)

Valentine DW, Soulé ME, Samallow P (1973). Asymmetry analysis in fishes: a possible statistical indicator of environmental stress. *Environmental Science* 71, 350-373.

Van Dongen S, Molenberghs G, Matthysen E (1999). The statistical analysis of fluctuating asymmetry: REML estimation of a mixed regression model. *Journal of Evolutionary Biology* 12, 94-102.  
doi:[10.1046/j.1420-9101.1999.00012.x](https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.1999.00012.x)

Van Dongen S (2006). Fluctuating asymmetry and developmental instability in evolutionary biology: past, present and future. *Journal of Evolutionary Biology* 19, 1727-1743.  
doi:[10.1111/j.1420-9101.2006.01175.x](https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2006.01175.x)

Van Valen L (1962). A Study of Fluctuating Asymmetry. *Evolution* 16, 125-142.  
doi:[10.1111/j.1558-5646.1962.tb03206.x](https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1962.tb03206.x)

Veldhuis H, Vosselman G (1998). The 3D reconstruction of straight and curved pipes using digital line. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53(1), 6-16.  
doi:[10.1016/S0924-2716\(97\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(97)00031-2)

Venegas C, Varas V, Vásquez JP, Marín JC (2020). Non-invasive genetic sampling of deer: a method for DNA extraction and genetic analysis from antlers. *Gayana* 84-1, 75-82.  
doi:[10.4067/S0717-65382020000100075](https://doi.org/10.4067/S0717-65382020000100075)

Vilensky JA, Gankiewicz E, Libii JN (1989). A test of Raibert's symmetry equations in animal and human running. *Physiology & Behavior* 46, 567-576.  
doi:[10.1016/0031-9384\(89\)90334-X](https://doi.org/10.1016/0031-9384(89)90334-X)

Wang CCL (2005). Parameterization and parametric design of mannequins. *Computer-Aided Design* 37(1), 83-98.  
doi:[10.1016/j.cad.2004.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.05.001)

Wang J, Oliveira MM (2007). Filling holes on locally smooth surfaces reconstructed from point clouds. *Image and Vision Computing* 25, 103-113.  
doi:[10.1016/j.imavis.2005.12.006](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2005.12.006)

Wu H, Yu Y (2005). Photogrammetric reconstruction of free form objects with curvilinear structures. *The Visual Computer* 21(4), 203-216.  
doi:[10.1007/s00371-005-0281-7](https://doi.org/10.1007/s00371-005-0281-7)

Yan YJ, Yong JH, Zhang H, Paul JC, Sun JG (2006). A rational extension of Piegl's method for filling n-sided holes. *Computer-Aided Design* 38, 1166-1178.  
doi:[10.1016/j.cad.2006.07.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2006.07.001)

Ye X, Liu H, Chen L, Chen Z, Pan X, Zhang S (2008). Reverse innovative design. An integrated product design methodology. *Computer-Aided Design* 40, 812-827.  
doi:[10.1016/j.cad.2007.07.006](https://doi.org/10.1016/j.cad.2007.07.006)

Yu C, Peng Q (2007). A unified-calibration method in FTP based 3D data acquisition for reverse engineering. *Optics and Lasers in Engineering* 45, 396-404.  
doi:[10.1016/j.optlaseng.2006.07.001](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2006.07.001)

Zitova B, Flusser J. (2003). Image registration methods, a survey. *Image and Vision Computing* 21, 977-1000.  
doi:[10.1016/S0262-8856\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9)



**ANEXOS**



# ANEXOS

## 1. ARTÍCULOS PUBLICADOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS.

1. Rubio-Paramio MA, Montalvo-Gil JM, Ramírez-Garrido JA, Martínez-Salmerón D, Azorit C (2016) An interactive photogrammetric method for assessing deer antler quality using a parametric Computer-Aided Design system (Interactive Photogrammetric Measure Method). *Biosystems Engineering* 150, 54–68.  
[doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012)
2. Montalvo-Gil JM, Azorit C, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2022) A new method for quantifying the asymmetry of biological elements by means of a photogrammetric technique using a parametric computer-aided design system. *Symmetry* 14, 2296.  
[doi:10.3390/sym14112296](https://doi.org/10.3390/sym14112296)
3. Montalvo-Gil JM, Azorit C, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2024) A new methodology, based on a CAD system, for evaluating partial and global asymmetries in deer antlers from hunting quality assessment data. *Symmetry*.  
**EN FASE DE REVISIÓN PARA PUBLICACIÓN**
4. Montalvo-Gil JM, Azorit C, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA (2024) Three 3D graphics engineering technologies for fallow deer antlers characterization in ecology and management approaches. *Discover Applied Sciences*.  
**EN FASE DE REVISIÓN PARA PUBLICACIÓN**



## 2. COMUNICACIONES PRESENTADAS EN JORNADAS Y EN CONGRESOS.

1. Montalvo-Gil JM, Rubio-Paramio MA, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C (2017). Metodología fotogramétrica integrada en un sistema CAD paramétrico y aplicaciones para el estudio de la cuerna del ciervo. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Gijón, (España).  
-Primer premio a la mejor Comunicación-.
2. Montalvo-Gil JM, Rubio-Paramio MA, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C (2019). Restitución especial a partir de dos fotografías y aplicación biológica para el estudio de la cuerna del gamo. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Logroño, (España).
3. Montalvo-Gil JM, García-Molina DF, Valderrama-Zafra JM, Azorit-Casas C, Rubio-Paramio MA (2023). Metodología para la estimación de la asimetría del ciervo rojo ibérico a partir de su caracterización CAD. Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica INGEGRAF. Cádiz, (España).

## ARTÍCULO-1

Rubio-Paramio MA, Montalvo-Gil JM, Ramírez-Garrido JA, Martínez-Salmerón D, Azorit-Casas C

**An interactive photogrammetric method for assessing deer antler quality using a parametric Computer-Aided Design system (Interactive Photogrammetric Measure Method)**

[doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.012)

2016

Estado: Publicado

Artículo JCR

Revista: Biosystems Engineering

En el ámbito de la evaluación de la cuerna de ciervo para la homologación como trofeos de caza, así como en la obtención de bases de datos biométricas para su posterior análisis en el campo de la Morfometría Geométrica, tradicionalmente se han utilizado diferentes herramientas biométricas lineales. En este estudio se han utilizado dos conjuntos de cornamentas de 29 ciervos ibéricos (*Cervus elaphus hispanicus*) para desarrollar y establecer una nueva técnica técnica fotogramétrica que crea el modelo-3D de la cuerna utilizando un sistema paramétrico de diseño 3D asistido por ordenador (CAD). Este método sencillo y fiable para la homologación de trofeos de caza de ciervos trofeos de caza se comparó con los otros dos métodos de medición de la cuerna más utilizados de medición de cornamentas, la cinta métrica tradicional y la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMM o CMA). La ventaja de este innovador método fotogramétrico es el uso de sólo dos fotografías para obtener tanto el modelo-3D como las dimensiones necesarias para la evaluación de la cuerna. Se realizó un procedimiento para comparar las longitudes y la evaluación de la cuerna como trofeo de caza. Los tres métodos mostraron una fiabilidad similar, aunque el proceso fotogramétrico con el sistema CAD 3D fue mucho más rápido y funcional que los métodos tradicionales de cinta métrica y brazo articulado. Dado que este método sólo requiere dos fotografías por individuo, hace posible el estudio de un alto porcentaje de cuernas en el campo. Este nuevo método fotogramétrico se ha utilizado con éxito en el ámbito de la biometría, pero podría convertirse en un método de uso más extendido en este y otros campos debido a su facilidad de manejo, rapidez y precisión en la recogida de datos.

## ARTÍCULO-2

Montalvo-Gil JM, Azorit-Casas C, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA

**A new method for quantifying the asymmetry of biological elements by means of a photogrammetric technique using a parametric computer-aided design system**

[doi:10.3390/sym14112296](https://doi.org/10.3390/sym14112296)

2022

Estado: Publicado

Artículo JCR

Revista: Symmetry

En el área de la zoología es de gran interés determinar el grado de asimetría existente en las diferentes estructuras animales para establecerlo como variable (biomarcador). En este estudio se propone una nueva metodología para la obtención de esta variable "Índice de Asimetría". Se han utilizado 48 cuernas de ciervo ibérico (*Cervus elaphus hispanicus*) procedentes de cotos de caza de la provincia de Jaén (España). Se ha obtenido el grado de asimetría de sus cuernas entre puntos homólogos considerados en los dos lados derecho e izquierdo de cada rama de la cuerna. La metodología se aplica dentro de un sistema CAD paramétrico de Diseño Asistido por Ordenador a partir de la restitución fotogramétrica de la cuerna a partir de dos fotografías. El procedimiento compara el grado de asimetría en el que se encuentran los puntos de cada uno de los lados derecho e izquierdo de la cornamenta mediante longitudes y ángulos respecto a un plano de referencia establecido a partir de la geometría del cráneo del ejemplar. Como resultado del estudio, se ha observado que el Índice de Asimetría obtenido es menor en aquellos ejemplares que tienen una puntuación alta en su valoración de calidad cinegética, por lo que se considera que este factor puede ser tenido en cuenta como un indicador objetivo y cuantificable (biomarcador).

## ARTÍCULO-3

Montalvo-Gil JM, Azorit-Casas C, García-Molina D, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA

**A new methodology, based on a CAD system, for evaluating partial and global asymmetries in deer antlers from hunting quality assessment data**

[doi:10.3390/sym16070785](https://doi.org/10.3390/sym16070785)

2024

Estado: Publicado

Artículo JCR

Revista: Symmetry

En el campo de la biología, son de gran relevancia los "biomarcadores" de las distintas especies animales, así como las relaciones entre ellas y con la calidad del hábitat. Se ha propuesto un estudio, analizando las cuernas del ciervo ibérico, para medir la asimetría bilateral de sus ramas. Las cuernas se caracterizan en un modelo-3D CAD de su estructura axial obtenido por restitución fotogramétrica a partir de dos fotografías. Este método cuantifica las asimetrías globales y parciales de los rasgos estructurales de la cuerna. La investigación evaluó 48 cuernas de ciervo procedentes de jornadas de caza y de talleres de taxidermia. Para cuantificar las asimetrías, las medidas necesarias son las mismas que las consideradas para evaluar la calidad cinegética de las astas. Las desviaciones bilaterales, sin utilizar un plano de simetría, se estiman para cada rasgo estructural y para el conjunto de la cuerna. Los resultados preliminares mostraron una convergencia entre los valores de la asimetría global y la calidad cinegética. La metodología demostró ser rápida, económica y fácil de aplicar, lo que facilita su uso en futuros estudios de asimetría de otros elementos biológicos de origen animal o vegetal. Sólo es necesario que los datos de partida, la estructura axial bilateral del elemento analizado, estén caracterizados en un modelo-3D.

## ARTÍCULO-4

Montalvo-Gil JM, Azorit-Casas C, García-Molina D, Valderrama-Zafra JM, Rubio-Paramio MA

### **Three 3D graphics engineering technologies for fallow deer antlers characterization in ecology and management approaches**

2024

Estado: En proceso de publicación

Artículo JCR

Revista: Discover Applied Sciences

Numerosos estudios abordan la creación de modelos tridimensionales de elementos biológicos para su evaluación geométrica mediante herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD). Una cuestión clave es obtener datos geométricos precisos, fáciles de obtener y rentables para el análisis. El objetivo principal es evaluar tres métodos de caracterización de la cuerna del gamo en forma de modelo-3D, en términos de precisión y complejidad, para utilizarlos como datos de entrada en análisis biológicos que permitan estimar la calidad cinegética, la asimetría y la densidad y el volumen. Se evalúan tres tecnologías: escáner de luz estructurada, fotogrametría multiimagen (SfM) (*Structure from Motion*) y restitución fotogramétrica espacial a partir de dos fotografías en un sistema-CAD de diseño asistido por ordenador. Se analiza la precisión geométrica de los modelos-3D obtenidos y la desviación entre puntos geoméricamente relacionados de la estructura de la cuerna, incluyendo la vara central, las puntas principales y la pala. Posteriormente, se estudia la idoneidad de cada modelo-3D en función del tipo de aplicación biológica al que se destine. A partir de los resultados, modelos-3D de tipo sólido y de estructura axial, se discute la aplicabilidad de las tres técnicas para el estudio de parámetros biológicos, como el cálculo del volumen, la densidad, la calidad cinegética y la asimetría. Se concluye sobre el procedimiento más adecuado que define el dato de entrada, la caracterización digital de la cuerna, en base al tipo de estudio biológico que se vaya a realizar, con el fin de lograr resultados con la precisión adecuada. La caracterización de una estructura geoméricamente compleja, como la cuerna del gamo, en forma de modelo-3D, de forma rápida y con la precisión adecuada, puede ayudar en la cuantificación de diversos biomarcadores en poblaciones de especímenes, de modo que se puedan inferir con factores de influencia internos y externos.

This is a new page that we are continually improving. [We would love to hear your feedback and suggestions.](#)



Discover Applied Sciences

[Notifications](#) [Account](#)

# Three 3d graphics engineering technologies for fallow deer antlers characterization in ecology ...

**CURRENT STATUS**

## Your submission is now in peer review

The editor has decided that your submission is suitable for peer review and is now searching for reviewers to evaluate your manuscript. The process of finding, inviting, and securing the reviewers' acceptance can take a few weeks.

We'll let you know if you need to make any revisions.

**Progress so far** [Show history](#)

- Submission received
- Technical check
- Editorial assignment
- With editor
- Peer review

### Need help?

Learn [what happens after you submit](#).

If you have any questions about this submission, you can [email the Editorial Office](#).

For general enquiries, please look at our [support information](#).

### Your submission

Title  
Three 3d graphics engineering technologies for fallow deer antlers characterization in ecology and management approaches

Type  
Research