



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Estimación del sexo en individuos subadultos  
Aplicación de técnicas morfogeométricas en una población mediterránea

## Estimación del sexo en individuos subadultos

Aplicación de técnicas morfogeométricas  
en una población mediterránea



**Doctorando:** Enrique José Estévez Campo

**Directora:** Inmaculada Alemán Aguilera

Granada, julio 2018

Enrique José Estévez Campo







**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

TESIS DOCTORAL:

**Estimación del sexo en individuos subadultos.  
Aplicación de técnicas morfogeométricas en una  
población mediterránea**

Programa de Doctorado en Biomedicina

AUTOR: Enrique José Estévez Campo

DIRECTORA: Dra. Inmaculada Alemán Aguilera

Granada, 2018

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autor: Enrique José Estevez Campo  
ISBN: 978-84-9163-961-9  
URI: <http://hdl.handle.net/10481/52760>





**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

**Inmaculada Alemán Aguilera**, Catedrática de la Universidad, adscrita al Departamento de Medicina Legal, Toxicología y Antropología Física de la Universidad de Granada

**Informa que:**

ENRIQUE JOSÉ ESTÉVEZ CAMPO, Graduado en Antropología, ha realizado la Tesis Doctoral “Estimación del sexo en individuos subadultos. Aplicación de técnicas morfogeométricas en una población mediterránea” en el Laboratorio de Antropología, del Departamento de Medicina Legal, Toxicología y Antropología Física de la Universidad de Granada, para aspirar al grado de Doctor, reuniendo las condiciones necesarias para ser presentada y defendida ante el Tribunal correspondiente.

Y para que así conste a los efectos oportunos, en cumplimiento de la legislación vigente, firmo el presente documento en Granada, a 16 de Abril de 2018

**Dra. Inmaculada Alemán Aguilera**





## UNIVERSIDAD DE GRANADA

El doctorando ENRIQUE JOSÉ ESTÉVEZ CAMPO y la directora de tesis INMACULADA ALEMÁN AGUILERA garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección de los directores de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

En Granada, a 16 de abril de 2018

Directora de la Tesis

Doctorando

**Dra. Inmaculada Alemán Aguilera**

**Enrique José Estévez Campo**



## Agradecimientos

Por fin ha llegado el momento de expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que me han prestado su ayuda y apoyo de manera incondicional durante este periodo. Aunque es muy enriquecedor, llevar a cabo una tesis doctoral, requiere en ocasiones afrontar muchas dificultades y mucho más en estos tiempos que corren. Por ello, contar con personas que estén dispuestas, no solo a poner sus conocimientos, sino también un poco de lo mejor de ellos y ellas, hace que sean participe tanto de mi éxito en este trabajo como en lo personal.

En primer lugar, y como no podía ser de otra forma, agradecer al Laboratorio de Antropología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Granada, por haberme permitido realizar mi trabajo durante todo este tiempo y haber puesto a mi alcance todos los medios que he necesitado. Me estoy refiriendo a los dos laboratorios en los que he desarrollado mi trabajo y que he tenido la suerte de conocer. Sería injusto olvidarse de aquel pequeño sótano en la Avenida de Madrid donde gran parte de nosotros hemos dado nuestros primeros pasitos en esto de la Antropología.

Por supuesto, mi trabajo en el laboratorio no habría podido realizarse de no ser por la total disponibilidad que he tenido de la colección osteológica del Cementerio de San José. Por lo tanto, agradecer a todo el personal de EMUCESA, por su ayuda y colaboración para la elaboración de esta colección. Muy especialmente a José Antonio Muñoz, director-gerente de EMUCESA y a Maribel Martín, coordinadora de servicios y a todas esas personas que han contribuido a que esta colección sea lo que es actualmente.

Sin duda, el alma del Laboratorio son todos los profesores y compañeros, quienes día a día hicieron que mi estancia en esta casa fuera algo muy

agradable y especial, transmitiéndome constantemente que disponía de una familia adoptiva que siempre me ha tratado con cariño.

Creo que, siendo justos, si hay que ponerse canónico y empezar por el principio, tengo que hablar de mi Danié. Ya han pasado 5 años desde que nos conocimos el primer día del master en la cafetería de la antigua facultad. ¡Y vaya si nos quedaban cosas por vivir juntos! Quién me iba a decir a mí que, cuando decidiste irte a Madrid a hacer tus cositas de enfermero, te iba a echar tanto de menos. Pero bueno, yo he perdido a alguien a quien darle la lata todos los días, pero el mundo ha ganado un gran enfermero. Gracias, por tanto.

A tí, Sandra López-Lázaro, te va a tocar otra parrafadita más de esas a las que te tengo tan acostumbrada (y sabes que no va a ser la última). Creo que no hay palabras suficientes para agradecerte que hayas sido la co-autora espiritual de esta tesis. Ya que, de no haber sido por tu paciencia en enseñarme desde cero este mundo de la morfometría geométrica, probablemente hoy todavía estaría perdido por *Matrix*. Gracias por no haberme odiado por las horas robadas y espero puedas perdonarme el haber colapsado tu bandeja de entrada con innumerables correitos de desesperación. ¡Y mira! ¡Lo hemos conseguido! Espero que sigamos con esta rachita tan productiva y sigamos trabajando juntos por muchos años más.

Y si seguimos por orden cronológico, quizás al señor dostó Javier Irurita le toca esta posición. No sé si lo recordará ya que el tiempo pasa inexorablemente para todos y ya hace cuatro o cinco años que nos conocimos, pero como buen niño de la calle solo él sabe lo que me ha ayudado en temas bibliográficos, fotográficos, estadísticos y por qué no decirlo, también en los momentos cafelísticos y cervicísticos (todos ejecutados sobresalientemente).

A Paula oh! Gracias por tantos ratitos de charlita en buena compañía, ya sea por Pedro Antonio o en los carnavales de Cai. Me queda pendiente todavía una visita a la aldea irreductible esa donde tú vives, llueve mucho y se come tan

bien. Por mi parte te compensaré con un sitito en esa ciudad que tanto te gusta para que vengas a bañarte a la playa en enero.

A Benja, porque nadie mejor que tú para compartir los momentos de DRAMA. Gracias también por haber estado presente sobre todo en estos últimos momentos de tesis y por todo el apoyo que me llevas dando desde que nos conocimos. Ah! Y no olvides que seguiremos siendo tus tutores legales para asegurarnos de que comes y duermes bien.

A Guille, otro al que le ha picado el gusanillo de la morfometría y que le va bastante bien por tierras austriacas. Dentro de nada estarás dándonos clases a todos. Muchas gracias además a ti y a Fernando por haberme enseñado a manejarme en el mundillo este del 3D y por todo el apoyo que me habéis demostrado siempre.

A Bea, Ari y Laura, por haber compartido conmigo todas esas mañanas (y tardes) de trabajo en el Laboratorio y, como olvidarlo, ¡por conseguir que nos lo pasáramos hasta bien haciendo una mudanza!

Muchas gracias también a Joan y Stefano que, aunque no hemos tenido oportunidad de coincidir mucho, han estado siempre disponibles cuando los he necesitado.

Creo que también es de justicia agradecer a “los Pepes”. Y es que cada mañana erais prácticamente los primeros que me veáis la cara de sueño y también la de agotamiento por las tardes. Menos mal que un cafelillo, una cervecita y algún que otro chiste siempre servía de buen remedio.

A Margarita. ¿Y ahora qué? Seguro que vas a echar de menos a alguien que escriba los numeritos tan pequeños como yo. Muchas gracias por haber estado ahí siempre que he necesitado algo, por aguantarme en mis interminables viajes a la osteoteca, por las charlitas y por tu cariño. Espero que me perdones que ahora por mi culpa tengas alguna que otra dioptría de más.

A Carmen García, por haberse preocupado siempre por mí. Gracias por tu generosidad y tu constante apoyo y afecto.

A Sylvia Jiménez y Rosa Maroto, por la paciencia y disponibilidad en resolver siempre mis dudas.

Supongo que no es una sorpresa, tener unas palabras especiales de agradecimiento para Miguel Botella. Y es que, como ha sucedido con muchos estudiantes que me han precedido, ha sido el principal responsable de contagiarme su verdadera pasión por la Antropología desde aquellas primeras clases de máster. Muchas gracias por aceptarme en el Laboratorio y por haber estado siempre disponible cuando te he necesitado. No olvidaré nunca tus consejos fotográficos, los cuales me han sido de gran ayuda a la hora de la elaboración de esta tesis.

A Inmaculada Alemán, mi directora de tesis. Por tu constante ayuda, por tu apoyo y por la confianza que has demostrado siempre en mí. Este trabajo no se habría podido concebir sin tu capacidad para guiarme, no solo en el desarrollo de la tesis, si no en mi formación como investigador. No sólo he tenido la suerte de conocerte profesionalmente si no como a una gran compañera y amiga. Gracias por haber estado a mi lado desde que empecé a dar mis primeros pasos en el Laboratorio. Creo que no te vas a librar de que te siga incordiando por muchos años más.

A mi amigo Javi por tu amistad y cariño, porque podría decirse que has estado en todo esto desde el principio, en los mejores y en los peores momentos y sabiendo que, siempre que te he necesitado, te tenía en 1 horita y media en la calle Canelo.

A la embajada de la URSS y sus camaradas Amina, Jari y Marcos. Mi familia en Granada. Gracias por haberme cuidado tanto y por hacerme sentir tan bien siempre que estoy con vosotras.

A los “feotes grasiosos”, Pristine, Pidre, Bictor (con B) y Glorimari porque sin nuestras tonterías y nuestras conversaciones existenciales en la esquina del “aqualund” la vida sería un rollo. Eso no se puede perder, porque sería una pena.

A Montse, Havi y Luis, grandes amigos que he tenido siempre a mi lado y en los que he podido confiar siempre. Gracias a los tres por mis más que frecuentes consultas con el inglés.

Gracias Claudia, por haber recorrido este camino conmigo desde el principio. Tengo mucha suerte de haber tenido tu mano todo este tiempo y de haber vivido a tu lado esta etapa tan importante. Has conseguido hacerme disfrutar de una manera muy especial cada instante durante estos años, así como me has aguantado y apoyado cada vez que me he tambaleado. Gracias por haberme transmitido desde el primer día, esa confianza y fuerza especial, responsables en gran parte de que hoy esté aquí. Ahora nos toca descubrir juntos que es lo que nos depara esta nueva etapa.

Y, por último, pero no por ello menos importante, tengo que agradecer la SUERTE, con mayúsculas, de tener la familia que me ha tocado, madre, padre, hermanos, abuelas y abuelos. Gracias a ellos por confiar incondicionalmente en mí, valorar lo que hago día a día y por el esfuerzo y sacrificio que han empleado en ayudarme a lograr mis objetivos. Cada meta que he alcanzado a lo largo de mi vida ha sido gracias a vosotros.

¡Muchas gracias a todos y a todas!



# Resumen

---



La Antropología Forense se encuentra dentro del marco de actuación específico de las Ciencias Forenses. Esta, ha estado siempre presente dentro de la Antropología Física, que desde sus inicios ha empleado sus conocimientos en el proceso de identificación humana.

Para la realización de esta tarea y poder responder así a los retos que se planteen en la investigación, desde la Antropología Forense se han llegado a desarrollar una serie de técnicas que centran su estudio en las diferencias entre los distintos grupos humanos, atendiendo tanto a las variables de sexo y edad como a la diversidad ínter e intrapoblacional. No obstante, este conjunto de métodos y técnicas empleados en el proceso de identificación van a variar según las características individuales del sujeto y el contexto en el que se esté investigando.

Una de las principales metas, tanto en la práctica forense, como en la arqueológica ha sido la estimación sexual precisa y repetible a partir de restos óseos. El proceso de estimación de sexo en individuos adultos no presenta una mayor complejidad siempre y cuando contemos con una muestra que esté relativamente bien conservada, ya que las zonas anatómicas del cráneo y la pelvis poseen unas características morfológicas determinadas que permiten diferenciar entre los grupos femenino y masculino. Además, gracias a los avances de los métodos de identificación en Antropología Forense se han desarrollado numerosos trabajos a través de funciones discriminantes, que permiten estimar el sexo en individuos adultos con un alto grado de fiabilidad, aun cuando el estado de conservación de los restos óseos no es óptimo.

Sin embargo, la determinación del sexo en restos óseos pertenecientes a individuos que aún no han desarrollado los caracteres sexuales secundarios, sigue siendo un reto en el campo de la Antropología Forense, ya que las características más discriminatorias entre los sexos surgen después de haber alcanzado la madurez sexual. Esto es aún más complicado debido al reducido número de colecciones osteológicas con individuos infantiles identificados en las que basar este tipo de investigaciones. Esta escasez de muestras en buen estado de conservación, sumado a la complejidad en el análisis del esqueleto subadulto, dificulta el desarrollo de nuevas metodologías focalizadas en estos grupos de edad.

Por tanto, la presente tesis doctoral nace con el objetivo de evaluar la aplicabilidad de las técnicas basadas en morfometría geométrica en el análisis del dimorfismo sexual en individuos subadultos, con la finalidad de comprobar si los tres huesos que componen el coxal de individuos en etapas tempranas del desarrollo, pueden ser de utilidad en la estimación precisa del sexo.

Para facilitar la comunicación y difusión de este trabajo, se ha optado por publicar los resultados obtenidos en dos artículos en dos revistas científicas de gran impacto y pertenecientes al primer y segundo cuartil de su grupo. A continuación, se ofrece el resumen de los objetivos y resultados obtenidos de cada uno de ellos:

- 1. Estévez EJ, López-Lázaro S, López-Morago C, Alemán I, Botella MC (2017). Sex estimation of infants through geometric morphometric analysis of the ilium. *International journal of legal medicine*, 131(6), 1747-1756.**

Tanto en el contexto arqueológico como en el forense, el análisis del ilion ha sido ampliamente utilizado con el objetivo de determinar el sexo y la edad de los individuos. Sin embargo, la estimación del sexo utilizando los restos esqueléticos pertenecientes a individuos que aún no han desarrollado los caracteres sexuales secundarios propios de la pubertad,

sigue siendo un asunto controvertido. La estimación precisa del sexo en individuos subadultos se ve, además obstaculizada, por el reducido número de estudios basados en colecciones identificadas de individuos juveniles. En esta investigación se analiza el dimorfismo sexual del ilion subadulto mediante la utilización de técnicas de morfometría geométrica y utilizando una muestra perteneciente a la colección osteológica de subadultos identificados de cementerio de San José (Granada). La muestra está compuesta por 71 huesos ilíacos izquierdos pertenecientes a 40 individuos masculinos y 31 femeninos, con edades comprendidas entre el nacimiento y el primer año de vida. Mediante el análisis de componentes principales, se muestra que tanto las variables de la *forma*, como las de *forma* y tamaño del Ilión muestran diferencias entre los grupos analizados.

2. **Estévez EJ, López-Lázaro S, López-Morago S, Alemán I, Botella MC (2018). Specific-Age group sex estimation of infants through geometric morphometric analysis of pubis and ischium. *Forensic Science International*, 286, 185-192.**

Determinar el sexo de individuos sin identificar es uno de los principales retos de la Antropología Física y Forense. En el esqueleto adulto, éste proceso se puede realizar mediante el análisis de los rasgos morfológicos y métricos de un gran número de huesos. La pelvis humana es considerada como uno de los elementos más importante para la determinación del sexo en individuos adultos. Sin embargo, estas investigaciones presentan varias limitaciones en individuos subadultos debido a la ausencia de los caracteres sexuales secundarios. En este estudio, se analiza el dimorfismo sexual del pubis y el isquion infantil, atendiendo a su *forma* (residuos de procrustes) y tamaño (tamaño del centroide), utilizando para ello, la colección osteológica de individuos subadultos identificados del cementerio de San José (Granada, España),

compuesta por 58 individuos para el pubis y 83 en el caso del isquion, con edades comprendidas entre el nacimiento y el primer año de vida. Para ello, se han aplicado técnicas basadas en morfometría geométrica y estadística multivariada. Los resultados obtenidos en el análisis del error intra e interobservador, mostraron un buen grado de acuerdo en la ubicación de las coordenadas *landmarks* y *semilandmarks*. El análisis de componentes principales atendiendo a las variables de *forma* y tamaño mostró una amplia superposición entre ambos sexos, sugiriendo un bajo grado de dimorfismo sexual. El análisis de variables canónicas no mostró cambios significativos entre las formas masculinas y femeninas. Como consecuencia, el análisis discriminante con validación cruzada dejando uno fuera, ha proporcionado unos porcentajes de clasificación correcta bajos. La inclusión del tamaño del centroide como variable discriminante no implica una mejora significativa en los resultados del análisis. Las similitudes encontradas entre los sexos evitan la consideración de la morfología del pubis y el isquión como estimador del sexo para las primeras etapas del desarrollo humano. Los autores sugieren ampliar este estudio analizando las diferentes trayectorias ontogenéticas de la forma y el tamaño entre individuos masculinos y femeninos.

Dados los resultados del presente trabajo, se confirma el gran potencial para la investigación de la identificación humana que ofrece la colección osteológica de individuos subadultos del cementerio de San José (Granada) y la utilización de las técnicas basadas en morfometría geométrica para la resolución de problemas planteados en Antropología Física y Forense infantil.





# Abstract

---



Forensic Anthropology is within the framework of specific action of Forensic Sciences. This has always been present within Physical Anthropology, which since its inception has used different methodologies in the process of human identification.

In order to carry out this task and to be able to respond to the challenges that arise in the research, Forensic Anthropology has developed a series of techniques that focus on the differences between the different human groups, taking into account both the variables of sex and age as to inter- and intra-population diversity. However, this set of methods vary according to the individual characteristics of the sample and the context in which it's being investigated.

One of the main goals, both in forensic practice and in archeology, has been the accurate sexual estimation based on skeletal remains. The process of estimating sex in adult individuals does not present a greater complexity as long as we have a sample that is relatively well preserved, since the anatomical areas of the skull and pelvis have certain morphological characteristics that allow us to differentiate between males and females. Thus, numerous methodologies have been developed through discriminant functions, which allow to estimate sex in adult individuals with a high degree of reliability, even when the state of conservation of bone remains is not optimal.

However, sex determination in skeletal remains belonging to individuals who have not yet developed secondary sexual characteristics remains a challenge in the field of Forensic Anthropology, since the most discriminatory characteristics between the sexes arise after having reached the sexual maturity. This is even more complicated due to the small number of osteological collections with identified

infants on which to base this type of research. This scarcity of samples in good state of conservation, added to the complexity in the analysis of the subadult skeleton, hinders the development of new methodologies focused on these age groups.

Therefore, the present doctoral thesis was born with the objective of evaluating the applicability of the geometric morphometrics techniques in the analysis of sexual dimorphism in subadult individuals in order to check whether the three coxal bones of individuals in early stages of development, can be useful in the accurate estimation of sex.

To facilitate the communication and dissemination of this work, we have chosen to publish the results obtained in two papers, already published in two scientific journals that belong to the first and second quartile of their group. The following is a summary of the objectives and results obtained from each of them:

- 1. Estévez EJ, López-Lázaro S, López-Morago C, Alemán I, Botella MC (2017). Sex estimation of infants through geometric morphometric analysis of the ilium. *International journal of legal medicine*, 131(6), 1747-1756.**

In archeology or forensics, the analysis of the ilia is often used to determine the age and sex of unknown individuals. However, sex determination using the skeletal remains of individuals who did not develop secondary sexual characteristics remains controversial. Accurately estimating the sex of subadults is hampered by a small number of studies based on identified skeletal collections of juvenile individuals. Here, we analyzed the sexual dimorphism of the subadult ilia using geometric morphometric techniques and individuals from the osteological collection of identified subadults from San José's graveyard (Granada). Seventy-one left ilia from 40 males and 31 females aged between birth and 1 year were included in the analysis. Three landmarks and 27 semi-landmarks of the ilia were placed. By principal component analysis, we found that the size and shape of the ilia could be used to differentiate males and females.

2. **Estévez EJ, López-Lázaro S, López-Morago S, Alemán I, Botella MC (2018). Specific-Age group sex estimation of infants through geometric morphometric analysis of pubis and ischium. *Forensic Science International*, 286, 185-192.**

Sex determination of unknown individuals is one of the primary goals of Physical and Forensic Anthropology. The adult skeleton can be sexed using both morphological and metric traits on a large number of bones. The human pelvis is often used as an important element of adult sex determination. However, studies carried out about the pelvic bone in subadult individuals present several limitations due the absence of sexually dimorphic characteristics. In this study, we analyse the sexual dimorphism of the immature pubis and ischium bones, attending to their shape (Procrustes residuals) and size (centroid size), using an identified sample of subadult individuals composed of 58 individuals for the pubis and 83 for the ischium, aged between birth and 1 year of life, from the Granada osteological collection of identified infants (Granada, Spain). Geometric morphometric methods and discriminant analysis were applied to this study. The results of intra- and inter-observer error showed good and excellent agreement in the location of coordinates of landmarks and semilandmarks, respectively. Principal component analysis performed on shape and size variables showed superposition of the two sexes, suggesting a low degree of sexual dimorphism. Canonical variable analysis did not show significant changes between the male and female shapes. As a consequence, discriminant analysis with leave-one-out cross validation provided low classification accuracy. The results suggested a low degree of sexual dimorphism supported by significant sexual dimorphism in the subadult sample and poor cross-validated classification accuracy. The inclusion of centroid size as a discriminant variable does not imply a significant improvement in the results of the analysis. The

similarities found between the sexes prevent consideration of pubic and ischial morphology as a sex estimator in early stages of development. The authors suggest extending this study by analysing the different trajectories of shape and size in later ontogeny between males and females.

Given the results of this work, it is confirmed the great potential for human identification research offered by the osteological collection of subadult individuals from the cemetery of San José (Granada) and demonstrate the promise of geometric morphometrics in Forensic Anthropology.





<b>RESUMEN</b>	<b>XV</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XXIII</b>
<b>CAPÍTULO 1. ANTROPOLOGÍA FORENSE EN INDIVIDUOS SUBADULTOS</b>	<b>3</b>
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. PRIMERAS APROXIMACIONES Y PRINCIPALES LIMITACIONES EN EL ESTUDIO DE ESQUELETOS SUBADULTOS	4
1.3. PROBLEMÁTICA EN LA ELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA	10
1.3.1. Estimación de la edad	11
1.3.2. Estimación del sexo	15
1.4. DIFERENCIAS EN EL ESTUDIO DE ESQUELETOS ADULTOS Y SUBADULTOS.	15
1.4.1. Diferencias osteológicas.	16
1.4.2. Naturaleza del tejido oseó	18
1.4.3. Diferencias en cuanto a las alteraciones óseas y su posterior interpretación	19
1.5. COLECCIONES IDENTIFICADAS E INFORMACIÓN ANTEMORTEM.	22
1.5.1. Principales colecciones identificadas	23
1.5.1.1. Colección de la iglesia de Spitalfields y Saint Bride's	24
1.5.1.2. Colección de individuos fetales Fazekas y Kosa	25
1.5.1.3. Colecciones de Lisboa y Coimbra	27
1.5.1.4. Colección prof. Dr. Rómulo Lambre	28
1.5.1.5. Colección Robert J. Terry	29
1.5.1.6. Colección Raymond Dart	29
1.5.1.7. Colección de momias del norte de Chile	30
1.5.1.8. Colección Hamann – Todd	30
1.5.1.9. La colección de individuos infantiles de San José (Granada)	30
1.5.1.10. Colección de Scheuer	32

<b>CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN A LA MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA</b>	<b>35</b>
2.1. ANTECEDENTES AL ESTUDIO DE LA REPRESENTACIÓN HUMANA	37
2.2. MORFOMETRÍA TRADICIONAL	42
2.3. MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	44
2.3.1. Adquisición de datos (Data acquisition)	45
2.3.1.1. Características de los Landmarks	45
2.3.1.2. Tipos de landmarks (LM)	47
2.3.2. Obtención de la forma	48
2.3.2.1. El concepto de tamaño y Centroid Size	49
2.3.2.2. ¿Qué entendemos por forma (shape)? La teoría de la forma	49
2.3.2.3. Espacios morfogeométricos	51
2.3.2.3.1. Espacio de configuraciones	51
2.3.2.3.2. Espacio preforma	53
2.3.2.3.3. Espacio de la forma	53
2.3.2.4. La superposición de procrustes	56
2.3.2.5. Deslizamiento de semilandmarks	58
2.3.2.6. Visualización de los cambios. La función TPS (Thin-Plate-Spline)	59
2.3.2.6.1. Deformación uniforme y no uniforme	61
2.3.2.7. Principal Warps, Partial Warps y Relative Warps	62
2.3.3. Análisis de la variación y covariación de la <i>forma</i> mediante métodos de ordenación y estadística multivariante	64
2.3.3.1. Ordination methods	64
2.3.3.1.1. Análisis de Componentes Principales; Principal Components Analysis	65
2.3.3.1.2. Análisis de Variables Canónicas; Canonical Variables Analysis	66
2.3.3.2. Asignación de significación estadística a la variación y covariación de la <i>forma</i>	67
2.3.3.2.1. Análisis multivariado de la varianza y análisis de permutación	68
2.3.3.2.2. Análisis de regresión y el estudio de la Alometría	69
2.3.3.2.3. Análisis de Mínimos Cuadrados Parciales (Partial Least Squares)	70
2.4. EVALUACIÓN DEL ERROR EN MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	71
2.4.1. El coeficiente de correlación intraclase (ICC)	74

<b>CAPÍTULO 3. ESTIMACIÓN DEL SEXO EN INDIVIDUOS INFANTILES</b>	<b>79</b>
3.1. INTRODUCCIÓN A LA ESTIMACIÓN DEL SEXO EN ANTROPOLOGÍA FORENSE	81
3.2. DESARROLLO HORMONAL EN INDIVIDUOS SUBADULTOS.	83
3.3. ESTIMACIÓN SEXUAL A PARTIR DE LA PELVIS EN INDIVIDUOS ADULTOS Y SUBADULTOS	86
3.3.1. Estimación del sexo a partir de la pelvis en individuos adultos	87
3.3.1.1. Método de Washburn (1948)	88
3.3.1.2. Método de Phenice (1969)	89
3.3.1.3. Método de Ferembach (1980)	91
3.3.1.4. Método de Buikstra y Ubelaker (1994)	91
3.3.1.5. Método de Bruzek (1996, 2002)	92
3.3.2. Estimación del sexo en individuos subadultos	93
3.3.2.1. Primeras investigaciones para la estimación del sexo en individuos subadultos	93
3.3.2.2. Método de Boucher (1955 /1957)	95
3.3.2.3. Método de Fazekas y Kósa (1978)	95
3.3.2.4. Método de Weaver (1980)	97
3.3.2.5. Método de Schutkowski (1987)	99
<b>CAPÍTULO 4. ANATOMÍA PÉLVICA</b>	<b>103</b>
4.1. ASPECTOS GENERALES	105
4.1.1. Clasificación y descripción de los huesos y nomenclatura anatómica	105
4.1.1.1. Localización	106
4.1.1.2. Posición	106
4.2. LA CINTURA PÉLVICA	108
4.2.1. Osteología del coxal	109
4.2.1.1. Ilion	110
4.2.1.2. Isquion	111
4.2.1.3. Pubis	112
4.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL COXAL EN INDIVIDUOS SUBADULTOS	114

4.4.	DESARROLLO	115
4.4.1.	Generalidades	116
4.4.2.	Periodos de osificación	120
4.4.2.1.	Centros de osificación primarios	120
4.4.2.2.	Centros de osificación secundarios	122
4.5.	FUNCIONALIDAD PÉLVICA	124
<b>CAPÍTULO 5. OBJETIVOS</b>		<b>127</b>
<b>CAPÍTULO 6. ESTIMACIÓN DEL SEXO EN INDIVIDUOS SUBADULTOS MEDIANTE ANÁLISIS MORFOGEOMÉTRICO DEL ILION</b>		<b>131</b>
<b>PRESENTACIÓN DEL ARTÍCULO</b>		<b>133</b>
<b>ÍNDICES DE CALIDAD DE LA REVISTA</b>		<b>135</b>
6.1.	RESUMEN	139
6.2.	INTRODUCCIÓN	140
6.3.	MATERIAL Y MÉTODOS	142
6.3.1.	Material	142
6.3.2.	Adquisición de los datos	143
6.3.3.	Análisis de la <i>forma</i>	146
6.4.	RESULTADOS	148
6.4.1.	Error intra-observador e inter-observador	148
6.4.2.	Escotadura ciática	148
6.4.3.	Superficie auricular	151
6.4.4.	Escotadura ciática y superficie auricular	153
6.5.	DISCUSIÓN	159
6.6.	CONCLUSIONES	163
6.7.	AGRADECIMIENTOS	163

<b>CAPÍTULO 7. ESTIMACIÓN DEL SEXO EN INDIVIDUOS SUBADULTOS MEDIANTE ANÁLISIS MORFOGEOMÉTRICO DE PUBIS E ISQUIÓN</b>	<b>165</b>
<b>PRESENTACIÓN DEL ARTÍCULO</b>	<b>167</b>
<b>ÍNDICES DE CALIDAD DE LA REVISTA</b>	<b>169</b>
7.1. RESUMEN	173
7.2. INTRODUCCIÓN	174
7.3. MATERIAL Y MÉTODOS	176
7.3.1. Muestra	176
7.3.2. Adquisición de los datos	177
7.3.3. Análisis de la <i>forma</i>	180
7.4. RESULTADOS	182
7.4.1. Error intra-observador e inter-observador	182
7.4.2. Análisis de la <i>forma</i>	183
7.4.2.1. Pubis	183
7.4.2.2. Isquion	187
7.5. DISCUSIÓN	191
7.6. CONCLUSIONES	194
7.7. AGRADECIMIENTOS	195
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES</b>	<b>197</b>
<b>CAPÍTULO 9. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS</b>	<b>207</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>211</b>



# Capítulo 1

## Antropología Forense en individuos subadultos





## 1.1. INTRODUCCIÓN

La Antropología Forense se encuentra dentro del marco de actuación específico de las ciencias forenses. Si la comparamos con el conjunto de disciplinas antropológicas, podríamos considerar a la Antropología Forense como una de las más modernas, debido a su enfoque multidisciplinario. Sus raíces, están firmemente plantadas en la investigación académica sobre la Antropología Física o Biológica a finales del siglo XIX y principios del XX. El interés por obtener información sobre poblaciones pasadas a partir de sus restos esqueléticos, modificó los estudios rutinarios sobre Osteología que, tradicionalmente, habían sido abordados por médicos y anatomistas.

No obstante, aunque no existiera como una especialidad aceptada por la comunidad científica y no se considerara la aplicación legal del conocimiento de los restos osteológicos, como se hace hoy día, ésta ha estado siempre presente dentro de la Antropología Física, que desde sus inicios ha empleado sus conocimientos en el estudio del esqueleto humano y que han sido utilizados tanto en contextos arqueológicos como en el de las ciencias forenses.

El contexto de intervención de la Antropología Forense es aquel en el que se necesita llevar a cabo el proceso de identificación de una persona fallecida o de la forma y causa de su muerte a través de sus elementos óseos. Para llevar a cabo este proceso, la Antropología Forense utiliza una serie de métodos y técnicas que permiten analizar la variabilidad humana, con el fin de conocer las características que determinan el perfil biológico humano; edad, sexo, talla,

presencia de patologías, marcadores de estrés o pertenencia a un grupo poblacional.

No obstante, este conjunto de métodos y técnicas empleados en el proceso de identificación van a variar según las características individuales del sujeto y el contexto en el que se esté investigando. Es por ello, que las diferencias existentes entre individuos adultos y subadultos impiden la utilización de las mismas metodologías para ambos grupos de edad.

Por tanto, la Antropología Forense en individuos subadultos debe ser estudiada de forma independiente a la de los adultos para, mediante metodologías específicas, hacer frente a las limitaciones que supone el estudio de aquellos individuos en etapas tempranas del desarrollo humano.

## 1.2. PRIMERAS APROXIMACIONES Y PRINCIPALES LIMITACIONES EN EL ESTUDIO DE ESQUELETOS SUBADULTOS

El esqueleto infantil proporciona al investigador valiosa información sobre su crecimiento y desarrollo, además es posible obtener datos acerca de su dieta, la edad de la muerte y los factores socioeconómicos que lo han podido exponer a un posible trauma o enfermedad en las diferentes etapas de su vida. No es posible realizar un estudio antropológico de un esqueleto subadulto sin tener en cuenta el contexto del que proviene, ya que las costumbres de numerosas culturas definen la forma y el lugar de enterramiento, e incluso cómo y cuándo pasan a ser considerados adultos (Lewis, 2006).

A partir del 1990 el estudio de la infancia y los individuos infantiles comienza a tomar fuerza, desligándose de los estudios centrados en mujeres (Derevenski, 1994, 1997; Moore y Scott, 1997). Hasta ese momento los individuos subadultos habían pasado casi desapercibidos en los estudios antropológicos, sobre todo en el ámbito arqueológico. Los niños eran considerados como

“receptores” pasivos de sus comunidades y estaban ligados completamente a las actividades femeninas (Wilkie, 2000). No se entendía al individuo infantil como poseedor de un rol independiente dentro de una sociedad, sino que era estudiado como una construcción del futuro adulto (Deverenski, 2000).

Lillehammer (1989), fue una de las primeras investigadoras en describir el rol concreto del individuo subadulto en poblaciones pasadas. Ella defendía que, a través de los enterramientos infantiles, sus restos óseos y su ajuar funerario era posible entender la relación de estos individuos con su comunidad y con el mundo adulto.

A lo largo de la historia, se han encontrado numerosos utensilios pertenecientes o manipulados por niños (Bart, 1990; Coulon, 1994; Aveling, 1997), evidencias directas de la infancia en poblaciones pretéritas. Teniendo en cuenta que la base del aprendizaje humano es el juego, “ensayo y error”, es indudable pensar en el uso de juguetes en todas las etapas de la historia. Por ello, la aparición de estos objetos se ha convertido en una de las pruebas más directas de la presencia de individuos subadultos en un yacimiento arqueológico. Este hecho tiene un problema y es que la imaginación de los niños puede convertir un palo, una piedra o un objeto cotidiano en un juguete con el que entretenerse durante días, lo que lo hará invisible a ojos del investigador (Lewis, 2006). Un montón de pequeñas piedras o un objeto de la casa, fuera de lugar pueden ser indicativo de la presencia de un niño. En yacimientos de toda Europa se han encontrado posibles juguetes, destacando las figuritas de arcilla y los pequeños cuencos descubiertos en Ovčarovo, Bulgaria o las estatuillas de barro localizadas en Platia Magoula Zarkou, en el norte de Grecia, ambas datadas como pertenecientes al Neolítico (Whittle, 1996). Además de unas muñecas de marfil encontradas en el yacimiento romano de Yverdon-les-Bains (Suiza), en un principio identificadas como objetos de culto, en vez de juguetes (Rossi, 1993).

Estas primeras investigaciones realizadas a colecciones arqueológicas, estaban impulsadas por el interés de conocer la fertilidad o la información que los individuos subadultos podían dar sobre las medidas de adaptación de los adultos (Lewis, 2006), aunque la mayoría de las veces, estos estudios se veían frustrados

por la mala conservación de los restos esqueléticos infantiles. Con el paso de los años, estos estudios fueron centrando su interés en el crecimiento y desarrollo de los niños, así como en el conocimiento de los estados de salud y enfermedad de los mismos.

Hasta los años 80, los principales autores centraron sus estudios en la estimación del sexo y la edad de individuos subadultos (Schour y Massler, 1941; Hunt y Gleiser, 1955). Por ejemplo, Balthazard y Dervieux (1921), Scammon y Calkins (1923), o ya en la década de los 60, Olivier y Pineau (1960), propusieron los primeros métodos de estimación de la edad fetal a través de las longitudes de los huesos largos. Aunque no sería hasta 1978 cuando Fazekas y Kósa publicaron su estudio para la estimación de la edad en fetos, convirtiéndose en uno de los más usados hasta hoy. Por otro lado, Boucher (1955, 1957), se basó en la escotadura ciática para la determinación del sexo en individuos infantiles. Durante los siguientes años, la mayoría de los autores se basarían en las longitudes diafisarias como método para el estudio del crecimiento y el desarrollo infantil (Johnston y Snow, 1961; Johnston, 1962, 1968; Armelagos et al., 1972; Y'Edynak, 1976; Merchant y Ubelaker, 1977). En Paleopatología, la *cribra orbitalia* y la *cribra cranii* (El-Najjar 1977a; Lallo et al., 1977), la hipoplasia del esmalte o las líneas de Harris (McHenry, 1968; McHenry y Schulz, 1976; Rose et al., 1978), como consecuencia de deficiencias nutricionales o estrés metabólicos, además de la prevalencia de estas marcas en adultos, fueron de interés de numerosos autores. Goodman y Armelagos (1989), destacaron la importancia de los estudios realizados en individuos menores de 5 años, ya que consideraban este periodo el más vulnerable a los factores culturales y medioambientales y señalaban sus consecuencias en la etapa adulta.

A partir de 1990, el material infantil se incrementó ampliamente e individuos subadultos con sexo y edad conocidos, como por ejemplo las colecciones osteológicas de *Christ Church Spitalfields* y *St. Bride's Church* de Londres (Molleson y Cox, 1993) y la perteneciente a *St. Thomas' Church* en Belleville (Saunders et al., 1993a), fueron usados para realizar nueva metodología para la estimación del sexo en individuos infantiles (De Vito y Saunders, 1990a; Mittler y

Sheridan, 1992; Schutkowski, 1993; Loth y Henneberg, 1996; Molleson et al., 1998).

A pesar de que las enfermedades crónicas necesitan largos periodos de tiempo hasta afectar al esqueleto, dificultando por lo tanto su observación en subadultos (Lewis, 2000), aumentaron los estudios sobre el diagnóstico del raquitismo y el escorbuto (Ortner y Ericksen, 1997; Orten y Mays, 1998, Ortner et al., 1999), además de la anemia, la artritis reumatoide juvenil y la lepra (Hershkovitz et al., 1997; Rothschild et al., 1997; Lewis, 1998). La edad de destete en poblaciones pasadas también fue una de las cuestiones más estudiadas durante esa década, consecuencia del auge de los análisis con isótopos (Katzenberg y Pfeiffer, 1995; Katzenberg et al., 1996; Schurr, 1997; Wright y Schwartz, 1997; Herring et al., 1998; Wright, 1998).

A día de hoy, los individuos subadultos están completamente integrados en los estudios antropológicos (Steckel y Rose, 2002; Cook y Powell, 2005) y son numerosos los manuales centrados únicamente en el estudio de esta fracción de la población (Scheuer y Black, 2004; Baker et al., 2005; Lewis, 2006).

Cuando la identificación del individuo infantil está dentro del ámbito forense (ya sea un caso de asesinato, negligencia, accidente, abuso, etc.) la intensa repercusión mediática dificulta de gran manera la identificación y el trabajo de los investigadores (Lewis y Ruttly, 2003). En estos casos nos encontramos ante la dificultad de la falta de técnicas específicas para subadultos (Kerley, 1976), consecuencia directa de la escasez de grandes colecciones infantiles con sexo, edad, ancestría y causa de la muerte conocidos (Shapiro y Richtsmeier, 1997)

Los estados de salud y enfermedad son una parte fundamental en el estudio de antiguas civilizaciones, así como necesarios para la interpretación de los modos de vida, adaptación y desaparición de esas poblaciones (Mensforth et al., 1978; Buikstra y Cook, 1980; Goodman et al., 1988; Verano y Ubelaker, 1992; Ubelaker et al., 1995; Larsen, 1997; Goodman y Martin, 2002). Hasta el siglo XX, existió una altísima tasa de mortalidad en todas las poblaciones humanas. Esta

tasa se veía aún más acentuada en individuos infantiles, debido a que sus requerimientos nutricionales eran mayores y, por lo tanto, las carencias alimenticias se hacían más evidentes (Saunders y Barrans, 1999; Lewis, 2006). A pesar de ello, ¿Por qué se excluía a los individuos subadultos de las investigaciones? Para responder a esta pregunta es necesario analizar las limitaciones específicas que presenta el estudio de individuos subadultos.

El primer paso antes de realizar cualquier estudio antropológico, es determinar el estado de preservación de los restos óseos (Katzenberg y Saunders, 2008). Muchos autores han identificado los posibles factores causantes de la poca representación infantil en cementerios y bajo porcentaje de individuos subadultos en las colecciones óseas (Jackes, 1992; Saunders y Katzenberg, 1992; Guy et al., 1997; Lewis, 2006).

La práctica de infanticidio ha sido relativamente común en muchas civilizaciones en todo el mundo (Scrimshaw, 1984; Lewis, 2006). Y tanto estas muertes deliberadas como las causadas por negligencias, han sido siempre uno de los factores de aumento de las tasas de mortalidad infantil. Ya que la mayoría de estos niños no recibían sepultura, este tipo de muertes también favorecían la baja representación infantil en los cementerios (Katzenberg y Saunders, 2008).

La definición de cuando comienza la “vida” después del nacimiento, dependía básicamente de la cultura que se tratase. Para algunas civilizaciones esta vida no comenzaba hasta pasados ciertos días, o incluso años, desde el momento del alumbramiento (Saunders y Barrans, 1999). El contexto arqueológico de los enterramientos es clave a la hora de hacer inferencias sobre infanticidio (Smith y Kahila, 1992). Por ejemplo, si tenemos en cuenta la aparición de la línea neonatal del esmalte del diente como método para determinar la edad en enterramientos infantiles, un parto donde el bebé hubiese nacido muerto, se puede confundir con un infanticidio producido poco después del nacimiento.

Los niños que morían por causas naturales eran a menudo enterrados lejos de los cementerios, bajo el suelo o en la entrada de las casas, dependiendo de la cultura. *Taran* era el término gaélico para referirse a los fantasmas de los niños no

bautizados que eran enterrados fuera de los cementerios. También se sabe que en las tribus iroquesas de Ontario (Canadá) los niños eran enterrados en los caminos para que sus almas pudiesen reintroducirse en los úteros de las mujeres que pasaban (Thwaites, 1896).

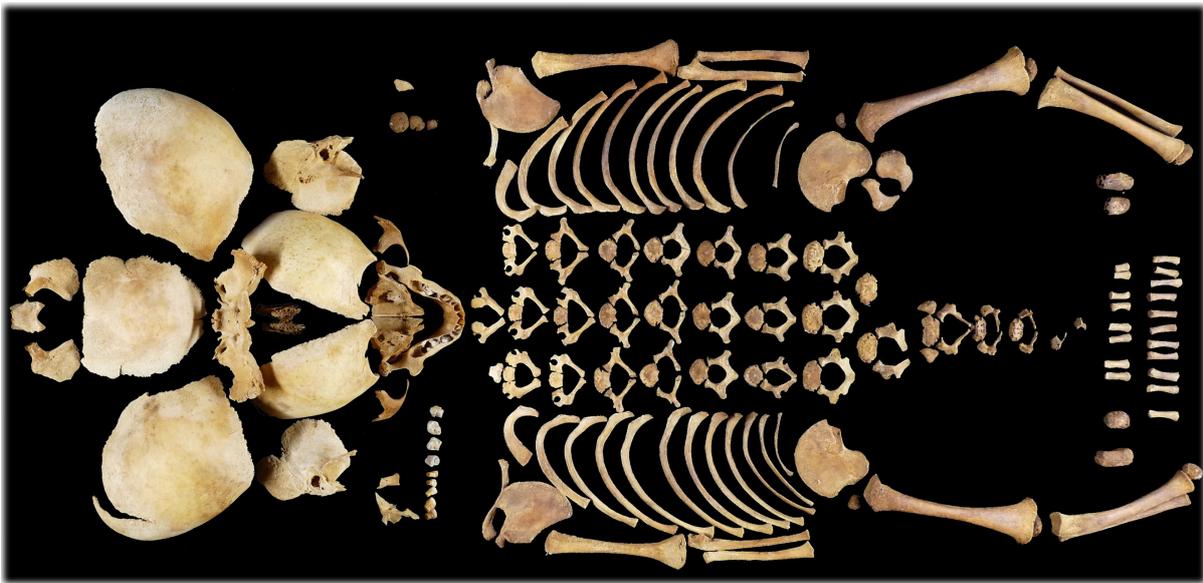
Otra de las cuestiones a tener en cuenta, es la preservación de los huesos infantiles. Su pequeño tamaño y su fragilidad, disminuyen a menudo su conservación en los procesos de excavación (Johnston y Zimmerman, 1989). Gordon y Buikstra (1981), descubrieron que la acidez del terreno estaba directamente relacionada con la conservación de los restos enterrados tanto de adultos, como de niños. Siendo estos últimos más vulnerables en sedimento con PH bajo.

Los huesos de los individuos infantiles están formados por un mayor contenido orgánico que mineral y tiene menor densidad ósea que los huesos adultos, lo que les hace más susceptibles a la descomposición (Specker et al., 1987; Currey y Butler, 1975). Estudios realizados en individuos vivos han demostrado que la densidad mineral ósea (BMD, por sus siglas en inglés) en un esqueleto infantil disminuye durante el primer año de vida, incrementándose durante el resto de la infancia y la adolescencia (Rauch y Schoenau, 2001). Este fenómeno fisiológico podría ser el causante de la desigual preservación de los huesos en función de las categorías de edad, como ya fue comprobado por numerosos autores en sus investigaciones (Walker et al., 1988; Guy et al., 1997; Jones y Ubelaker, 2001).

Además, no nos podemos olvidar de la dificultad de reconocer huesos infantiles en el lugar de excavación, donde la falta de experiencia de algunos profesionales puede ser limitada y por lo tanto perjudicar las tareas de recuperación de los restos óseos más delicados.

Por último, para que una metodología pueda considerarse válida para su aplicación en contextos forenses, esta debe estar basada en muestras de estudio contemporáneas e identificadas. El escaso número de colecciones osteológicas disponibles para su estudio que cumplan estos requisitos es relativamente

escaso y ha dificultado en parte la elaboración de distintas técnicas antropológicas y la contrastación de la validez del método en otras poblaciones. Además, debido al reducido número de individuos subadultos que componen las colecciones identificadas, las muestras no se encuentran bien distribuidas y no permitirían analizar de una manera fiable los patrones de variación entre los individuos.



*Individuo de 7 meses de edad.*

### 1.3. PROBLEMÁTICA EN LA ELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Además de las ya citadas limitaciones en el análisis de individuos subadultos, vamos a encontrar una serie de dificultades añadidas a la hora de seleccionar el método de estudio que mejor se adapte al tipo de investigación que se vaya a realizar.

### 1.3.1. Estimación de la edad

A pesar de que la determinación de la edad en individuos subadultos puede llegar a ser más exacta incluso que en adultos, son muchas las limitaciones que favorecen la presencia de errores (Katzenberg y Saunders, 2008). Entendemos estimación de la edad, como la determinación de la edad fisiológica y la posterior correlación con la edad cronológica. Es por ello que existen varias fuentes de error, como la variabilidad individual de maduración, la herencia genética o los efectos ambientales, que pueden favorecer las discrepancias entre estas dos edades.

La erupción dental es uno de los métodos más usados para la determinación de la edad en individuos, tanto en el ámbito arqueológico como en el forense. Sin embargo, existen ciertos factores que pueden alterar esta edad de emergencia dental, como una infección o la extracción temprana de los dientes deciduales (Demirjian, 1978; El-Nofely y Işcan, 1989).

Por estos motivos y por la variabilidad de la edad de erupción, la formación dental es un método más acertado para determinar la edad fisiológica de un individuo. Esto se debe a que la formación de las coronas dentales se ven mucho menos afectadas por los cambios hormonales, la nutrición o los factores ambientales y sociales, que el desarrollo del esqueleto, la estatura o el peso (Demirjian, 1978; El-Nofely y Işcan, 1989; Smith, 1991). Además, la formación dental es independiente de la maduración del resto del esqueleto y por lo tanto se aproxima más a la edad cronológica del individuo (Gran et al., 1959; 1960; Nolla, 1960; Moorrees et al., 1963a; Demirjian, 1978). Por último, la formación dental es uno de los únicos métodos para determinación de la edad aplicables desde la etapa prenatal hasta la adolescencia (Al'Qahtani, 2010; Demirjian, 1978).

Otro de los métodos usados en la determinación de la edad es la fusión de las epífisis o la longitud de los huesos largos. Debido a que las epífisis óseas se deterioran y pierden con facilidad, tanto en excavaciones arqueológicas como en otros ámbitos, la longitud diafisaria es la más usada en estos casos, pero limita

su utilidad a un rango concreto de edad: desde el nacimiento hasta aproximadamente los doce años (Katzenberg y Saunders, 2008).

La unión epifisaria, por el contrario, comienza a ser de utilidad a partir de la adolescencia. Los inconvenientes de este método radican en las diferencias sexuales que existen en este proceso y en los numerosos años que puede haber desde el principio y el final de dicha unión (McKern y Stewart, 1957).

Numerosos estudios sobre la edad epifisaria han sido realizados a lo largo de la historia (Johnston, 1962; Armelagos et al., 1972; Sundick, 1972; 'Edynak, 1976; Merchant y Ubelaker, 1977; Hoffman, 1979; Hummert y Van Gerven, 1983; Mensforth, 1985). La necesidad de estos estudios se debe a la importancia de la elección de la colección ósea usada como referencia para la muestra objeto de estudio. Ubelaker (1989) realizó un cálculo de la edad de muerte a través de la diáfisis del fémur usando diferentes poblaciones de referencia, demostrando una variabilidad de hasta 5 años entre unos métodos y otros.

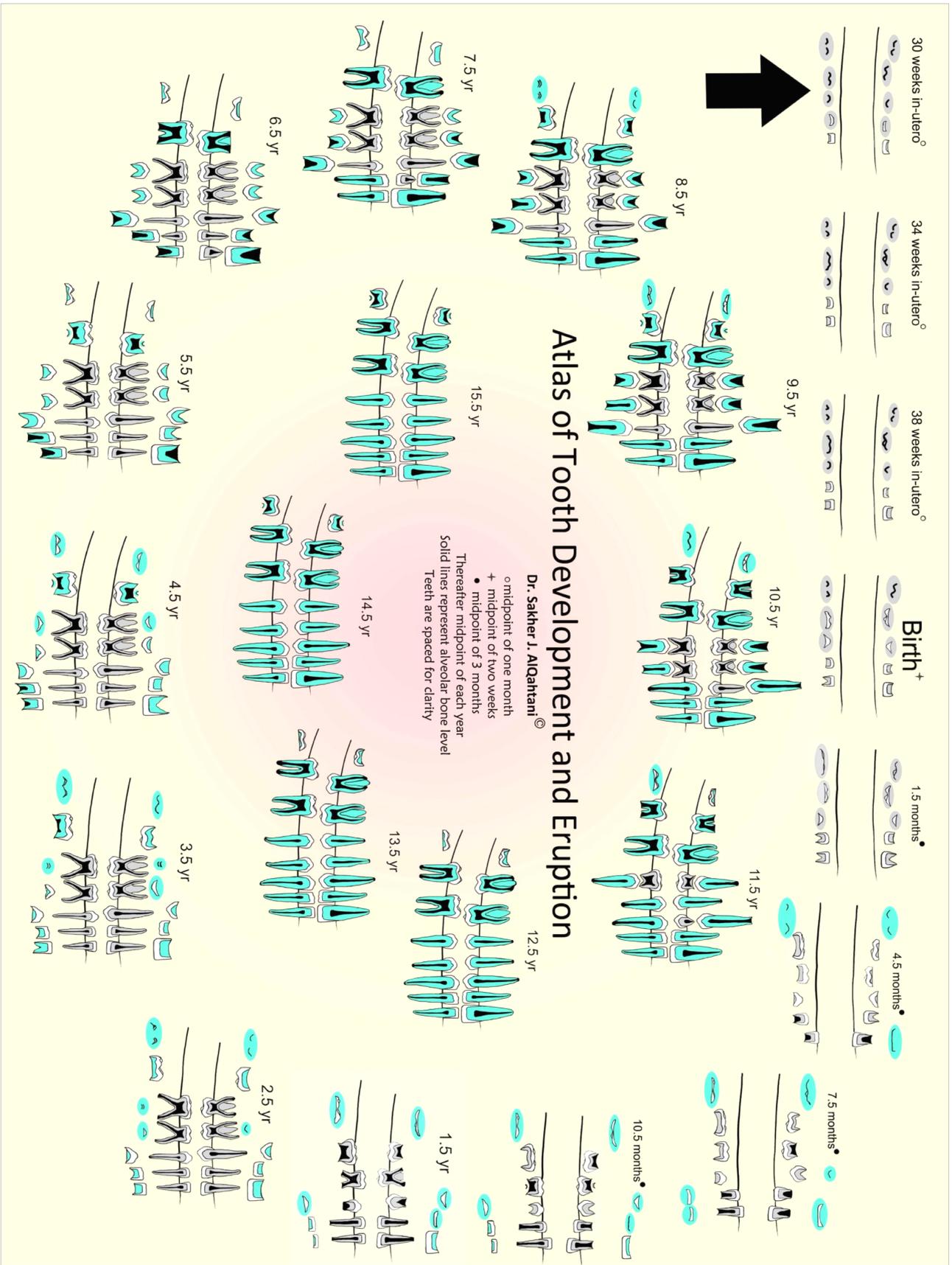
En los métodos de estimación de la edad fetal, así como en la edad de individuos perinatales propuestos por numerosos autores (Olivier y Pineau, 1960; Palkama et al., 1965; Fazekas y Kósa, 1978; Malinowski y Mlodziejowski, 1978; Scheuer et al., 1980), también encontramos discrepancias, por ejemplo, de hasta un mes lunar al usar la metodología de Fazekas y Kósa (1978), según Ubelaker (1989).

En el contexto forense, en el que la investigación está centrada en la identificación de una persona y donde los resultados que se desprendan de la investigación estarán orientados a fines judiciales, es necesario poseer una metodología con un alto grado de certeza y capacidad discriminante, que no deje lugar a dudas para ninguna de las partes implicadas. Por ello, es importante recalcar que no todos los métodos usados en Antropología Física van a poder ser de utilidad en Antropología Forense, ya que los objetivos que abordan las distintas subdisciplinas de la Antropología Física, van a ser diferentes (Cunha, 2009).

El antropólogo debe emplear una metodología que cumpla una serie de requisitos indispensables relacionados con el material usado, su publicación en

revistas científicas de alto impacto, las características de la muestra, etc. Con carácter general, las colecciones usadas en investigaciones forenses deben cumplir dos requisitos fundamentales: (1) deben ser contemporáneas, con el fin de tener unas características similares al objeto de estudio y (2) ser muestras identificadas, en las que la edad, el sexo, la causa de muerte y el origen poblacional sean conocidas para cada uno de los individuos que la forman.

Por lo tanto, además de la falta de interés en los restos infantiles en Antropología Física durante una larga etapa de la historia, como ya se mencionó anteriormente, hay que tener en cuenta la necesidad de cumplir unos requisitos mínimos para asegurar la precisión y fiabilidad en Antropología Forense. Por ello es posible concluir que la principal limitación a la hora de investigar individuos infantiles es la escasez de muestras de estudio adecuadas.



Atlas de desarrollo y erupción dental (Tomado de AlQahtani et al., 2010).

### **1.3.2. Estimación del sexo**

En el ámbito de la Antropología Forense, la correcta estimación del sexo en individuos subadultos es fundamental para llevar a cabo el proceso de identificación, debido a su relación con la estimación de los otros componentes que conforman el perfil biológico del individuo como pueden ser la edad o la estatura.

Sin embargo, esta tarea presenta severas limitaciones que dificultan la identificación de los restos esqueléticos, tanto en el contexto arqueológico como en el forense. La principal de ellas reside en la ausencia de los caracteres sexuales secundarios del esqueleto que aparecen en la pubertad (Cardoso, 2008). A esta limitación específica, debemos añadir los problemas generales asociados al estudio osteológico de individuos infantiles, como el reducido número de colecciones identificadas o su estado de conservación, lo cual dificultaría la creación de nuevas metodologías y la comparación de las mismas entre otras realizadas en distintas poblaciones.

Se han propuesto varios métodos métricos, no métricos y basados en morfometría geométrica para la estimación del sexo en individuos subadultos. Si bien algunos han demostrado tener un uso muy limitado en el campo de la Antropología Forense, otros han demostrado tener grandes ventajas.

Esta cuestión se desarrollará con amplitud en el capítulo 3.

### **1.4. DIFERENCIAS EN EL ESTUDIO DE ESQUELETOS ADULTOS Y SUBADULTOS.**

Los individuos adultos y subadultos presentan diferencias en numerosos aspectos. Éstas justifican en gran medida que se creen metodologías específicas para cada uno de los grupos analizados y que tanto individuos desarrollados como no desarrollados se estudien de manera independiente.

### 1.4.1. Diferencias osteológicas.

Podemos determinar que los huesos infantiles son diferentes a los de adulto cuanto a número, forma y tamaño:

- **Número:** El número de huesos que conforma el esqueleto infantil puede llegar a ser muy superior al del esqueleto adulto. Normalmente, y sin contar excepciones causadas por alteraciones genéticas o determinadas patologías, en el esqueleto de un subadulto se pueden contar hasta 463 huesos, reduciéndose ese número hasta los 206 huesos del esqueleto adulto (Scheuer y Black, 2004). Esto se debe a que prácticamente todos los huesos adultos han sido formados a partir de la unión u obliteración de varios centros de osificación independientes en el esqueleto infantil. Por lo tanto, a medida que el esqueleto avanza en edad, el número de huesos se va reduciendo por la unión de unos con otros (Katzemberg y Saunders, 2008).



*Epífisis de individuos infantiles.*

- **La forma:** La forma de los huesos va cambiando progresivamente según avanza el desarrollo del esqueleto. Desde que los huesos se originan como pequeños centros de osificación hasta que alcanzan su tamaño definitivo, además de variar en número, como ya se ha mencionado anteriormente, existe un cambio en sus dimensiones (Blake, 2011). Estos huesos infantiles estarán formados por un número diferente de subunidades independientes que se fusionarán de manera progresiva, y se definirán sobre ellos las inserciones musculares (Blake, 2011; Scheuer y Black, 2004). Por lo tanto, dentro de las capacidades del antropólogo estará la de discriminar entre los cambios normales que se produzcan durante el desarrollo y las alteraciones traumáticas, patológicas y/o tafonómicas que aparezcan en el hueso (Irurita, 2014).



*Mandíbula de individuo subadulto, aún sin fusionar.*

- **El tamaño:** Por último, otro de los aspectos que diferencian los huesos infantiles de los adultos es su tamaño. Esta cualidad es muy importante, sobre todo en las tareas de recuperación, identificación y análisis de los

restos óseos, ya que muchos de los huesos que componen el esqueleto infantil pueden llegar a medir escasos milímetros. Es importante prestar atención a los gérmenes dentales, falanges o epífisis, por ser las partes más pequeñas del esqueleto y las que con mayor facilidad pueden perderse entre restos de sustrato o tejidos blandos (Lewis, 2006; Katzenberg y Saunders, 2008). A pesar de la dificultad que puede presentar el trabajar con huesos de tan pequeño tamaño, existe una ventaja para el antropólogo al determinar el número mínimo de individuos en fosas comunes u osarios (Saunders y Katzenberg, 1992; Lewis, 2006). La razón es que, dada la elevada tasa de crecimiento de los huesos infantiles, el tamaño de los huesos varía mucho con la edad, y, por lo tanto, entre diferentes individuos (Lewis, 2006).

#### **1.4.2. Naturaleza del tejido oseo**

El comportamiento de los huesos humanos frente a condiciones patológicas o traumatismos estará condicionado por su naturaleza fisicoquímica. Los huesos infantiles al tener una composición distinta, reaccionarán de una manera diferente frente a estos estímulos.

Los huesos infantiles al encontrarse en proceso de desarrollo, son de menor tamaño, además de más frágiles. Pero no es sólo ésta la explicación a la debilidad de los huesos, sino que al no haber alcanzado su completo desarrollo, la proporción en materia orgánica es mayor y, por lo tanto, el contenido mineral se ve disminuido en comparación con el tejido óseo adulto (Currey et al., 1975; Specker et al., 1987).

Una de las consecuencias directas de esta mayor fragilidad en el tejido óseo infantil, es que el esqueleto de los individuos subadultos será más perecedero ante las alteraciones tafonómicas, por lo que en muchos casos la conservación se verá afectada (Johnston et al., 1989).

Además, la alta tasa de crecimiento en el hueso infantil provoca, por un lado, que cualquier afección patológica se haga más visible y de una manera más inmediata; y por otro, este hueso será capaz de recuperarse rápidamente, haciendo que estos signos, ya sean traumáticos o patológicos, desaparezcan o se hagan menos visibles con el paso del tiempo.

### **1.4.3. Diferencias en cuanto a las alteraciones óseas y su posterior interpretación**

Las alteraciones que se pueden presentar en el esqueleto pueden ser una herramienta muy útil en los casos de identificación forense, siempre que haya un historial médico previo. No obstante, debido a que los individuos subadultos rara vez sufren traumatismos o su continuo crecimiento borra los signos de estas alteraciones, este tipo de metodología no suele ser muy utilizada.

Antes las mismas situaciones, las señales dejadas en huesos adultos o infantiles pueden ser diferentes y por lo tanto la interpretación puede llegar a ser errónea.

Por ejemplo, los traumatismos en el esqueleto infantil se van a diferenciar del adulto en gravedad, localización y naturaleza. Esto se debe a que los huesos infantiles son más cartilaginosos y por lo tanto tienen una mayor elasticidad; presentan zonas más susceptibles al traumatismo, como son las metáfisis y por último, su naturaleza es altamente porosa, por lo que las fuerzas de compresión se disipan (Lewis, 2006).

En casos de maltrato infantil, situaciones en las que un estudio detallado de los traumatismos será vital para la investigación forense, existen traumatismos entre un 11% y un 15% de las veces, y un 40% de las veces estos traumatismos son observados en el cráneo. Además, en el esqueleto poscraneal las principales lesiones aparecen en las costillas, húmero, fémur, tibia o escápula (Irurita, 2014).

Los procesos infecciosos también van a afectar de manera distinta al esqueleto subadulto. La mayor extensión de la médula hematopoyética en los subadultos, provocará una mayor diseminación de la enfermedad infecciosa por todo el tejido óseo. Por lo tanto, los métodos de diagnóstico variarán entre adultos y subadultos. En cuanto a la deformación de los huesos, propia de algunas infecciones, se puede observar una fusión de las articulaciones en individuos infantiles, rara vez vista en adultos (Lewis, 2006).

Casos de desnutrición también pueden ser observados tanto en el contexto forense como en el arqueológico. Entre este tipo de enfermedades destaca el raquitismo, una enfermedad producida por un déficit de vitamina D, que provoca una desmineralización de los huesos ante la falta de calcio en el organismo. Esta enfermedad provoca serias alteraciones en el esqueleto infantil que, sin un tratamiento adecuado, puede condicionar el desarrollo normal del esqueleto humano.

Tanto las alteraciones que provoca en el esqueleto, como su posterior interpretación, van a estar muy relacionadas con la edad del individuo. Por ejemplo, en individuos perinatales, se relaciona con déficit de vitamina D en la leche materna, mientras que en individuos de más edad puede estar relacionado con el aumento del tono muscular (Ortner, 2003; Waldron, 2009).

Otra enfermedad consecuencia de déficits vitamínicos es el escorbuto, producido por una carencia de ácido ascórbico o vitamina C. En adultos, la principal manifestación visible es la presencia de encías inflamadas y sangrantes, con una posterior pérdida dental. En niños de temprana edad, ante la falta de dientes erupcionados, este tipo de síntomas no puede ser observado. En cambio, en el esqueleto infantil se observan alteraciones generalizadas que pueden ser confundidas con el raquitismo (Lewis, 2006; Waldron, 2009).

Por lo tanto, el estudio antropológico de individuos subadultos se debe realizar de manera separada al de los adultos, siendo imprescindible para ello, formación específica y una experiencia previa en individuos de este rango de edad.



*Ejemplo de raquitismo en individuo infantil.*



*Ejemplo de cribra femoralis en individuo juvenil.*



*Alteración congénita de las costillas (Modificada de Irurita, 2014).*

## 1.5. COLECCIONES IDENTIFICADAS E INFORMACION ANTEMORTEM

La elaboración de metodologías válidas en el campo de la Antropología Forense tiene como requisito fundamental que éstas se desarrollen a partir del análisis de colecciones identificadas. En ellas, debe estar recogida la mayor cantidad de información *antemortem* posible, mostrando con absoluta certeza los datos relevantes al tipo de investigación que se quiera llevar a cabo.

Disponer de información *antemortem* válida sobre los individuos que van a formar parte de la muestra de estudio es un aspecto fundamental en el desarrollo de metodologías de identificación en el campo de la Antropología Física y Forense. El origen puede variar desde los registros cementeriales, civiles o judiciales, hasta las inscripciones propias de las lápidas y ataúdes. Cualquier tipo de información sobre los sujetos que componen la muestra que pueda recuperarse puede ser válida para su utilización en la investigación, siempre y cuando cumpla con unos requisitos mínimos de fiabilidad (Bruzek, 2002).

No obstante, no debemos olvidar el carácter identitario de esta información y que, como tal, está sujeto a leyes de compromiso ético y privacidad. Es por ello, que el investigador que esté manejando este tipo de información, cumpla con los compromisos de confidencialidad y custodia de los datos personales con los que trabaja (Irurita, 2014).

La información que puede ser más relevante para el antropólogo es la que se refiere a la edad del individuo cuando le sobrevino la muerte, el sexo, la causa de la muerte y la nacionalidad.

Por ello, numerosos autores han incidido en considerar como imprescindible desde el punto de vista forense y para el desarrollo de una metodología válida, la utilización de colecciones osteológicas identificadas que contengan este tipo de información (Bruzek, 1997, 2002; Lewis, 2006; Dirkmaat, 2008; Ubelaker, 2008; Blake, 2011).

### **1.5.1. Principales colecciones identificadas**

Aunque el interés por la conservación y comparación científica de las colecciones osteológicas es de carácter relativamente reciente, la práctica de coleccionar elementos óseos humanos como trofeos de guerra o con fines religiosos ha sido muy frecuente a lo largo de la historia y en diferentes contextos socio-culturales (La Barre, 1984). En Europa, las colecciones osteológicas pertenecerían a algunas monarquías y a la Iglesia Católica, formando parte de vastos relicarios o tesoros (Walker, 2000).

No obstante, a partir del siglo XVIII las colecciones osteológicas estaban más centradas en mostrar material óseo con rasgos patológicos singulares que en la creación de colecciones documentadas de esqueletos con sexo y edad conocidos para el análisis de la variabilidad humana (Walker, 2000; García Mancuso, 2012).

Muchos de estos primeros coleccionistas eran médicos y, debido a su interés profesional en la Anatomía humana, solían conservar muestras anatómicas en sus gabinetes (Walker, 2000).

No es hasta mediados del siglo XIX, cuando los grandes museos comenzaron a mostrar interés en el análisis e investigación del cuerpo humano como disciplina académica, proporcionando un marco institucional para la conservación y preservación de colecciones esqueléticas, para su utilización con fines científicos y educativos (Walker, 2000; García Mancuso, 2012).

Actualmente, las colecciones osteológicas de individuos identificados siguen siendo muy escasas, debido a la dificultad que supone su adquisición. Estas dificultades son aún mayores al referirnos a aquellas compuestas por esqueletos de individuos infantiles.

A las limitaciones a las que nos hemos referido anteriormente, debemos añadir, en primer lugar, los condicionantes socio-culturales. Como ya hemos señalado, la validez de una colección esquelética de individuos identificados para

su utilización en el campo de la Antropología Forense, requiere de la existencia de información *antemortem*. Por tanto, no es hasta la época contemporánea que encontramos certificados de enterramiento que puedan utilizarse para la correcta clasificación de la muestra. El carácter contemporáneo de estos individuos, implica la posibilidad de que aún conserven familiares o allegados que deseen enterrarlos o conservarlos tras su muerte (Baker et al., 2005; Irurita, 2014). Por otro lado, para llevar a cabo las tareas de recuperación y preparación de la muestra es necesario disponer de sistemas de financiación adecuados, lo cual, supone un problema debido a la dificultad actual de la obtención de fondos dedicados a la investigación (Irurita, 2014).

A pesar de estas limitaciones, el desarrollo de numerosos trabajos científicos ha sido posible gracias a algunas colecciones de individuos subadultos identificados.

#### 1.5.1.1. *Colección de la iglesia de Spitalfields y Saint Bride's*

Esta colección osteológica empezó a formarse en la década de los 80, cuando se llevó a cabo la apertura y excavación de criptas de las iglesias londinenses de “*Spitalfields*” y “*Saint Bride's*”. Está compuesta por un total de 968 individuos, de los cuales, 215 son subadultos, con fechas de defunción comprendidas entre los años 1729 y 1857 (Molleson y Cox, 1993).

Sin embargo, la utilización de esta colección para el desarrollo de metodologías válidas presenta severas limitaciones. Al pobre estado de conservación de las muestras esqueléticas hay que añadir que únicamente se pudo obtener información *antemortem* en aquellos casos donde se conservaron las lápidas pertenecientes a los individuos inhumados (Molleson y Cox, 1993). Por tanto, el número de especímenes juveniles identificados y en un estado de conservación óptimo que permita su análisis, es de 17 individuos masculinos y 8 femeninos, con edades comprendidas entre los 0 y 8 años (Wilson et al., 2008, 2011).

A pesar de ello, esta colección es una de las más importantes a nivel mundial y ha sido ampliamente estudiada por numerosos investigadores, los cuales han conseguido desarrollar importantes trabajos en relación a la determinación de la edad y el sexo en individuos subadultos (Schutkowski, 1993; Scheuer y Black, 2004; Hupmfrey, 2006; Wilson, 2008).



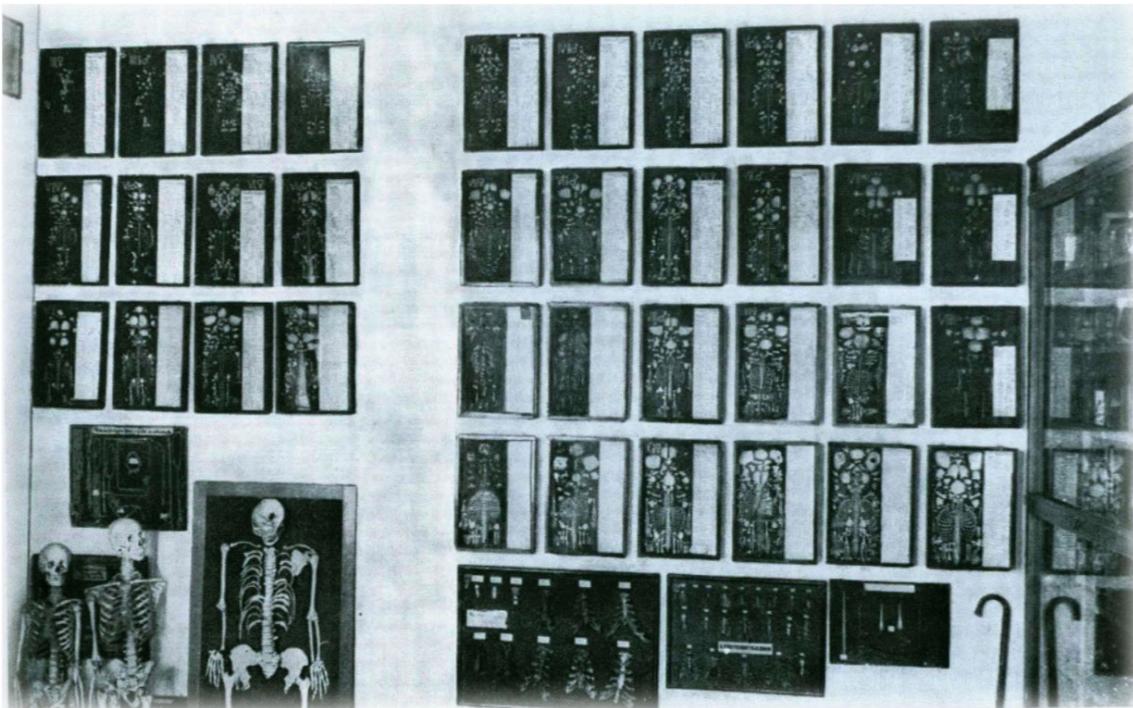
*Iglesia de Spitalfields (Tomada de Molleson et al., 2003).*

#### *1.5.1.2. Colección de individuos fetales Fazekas y Kosa*

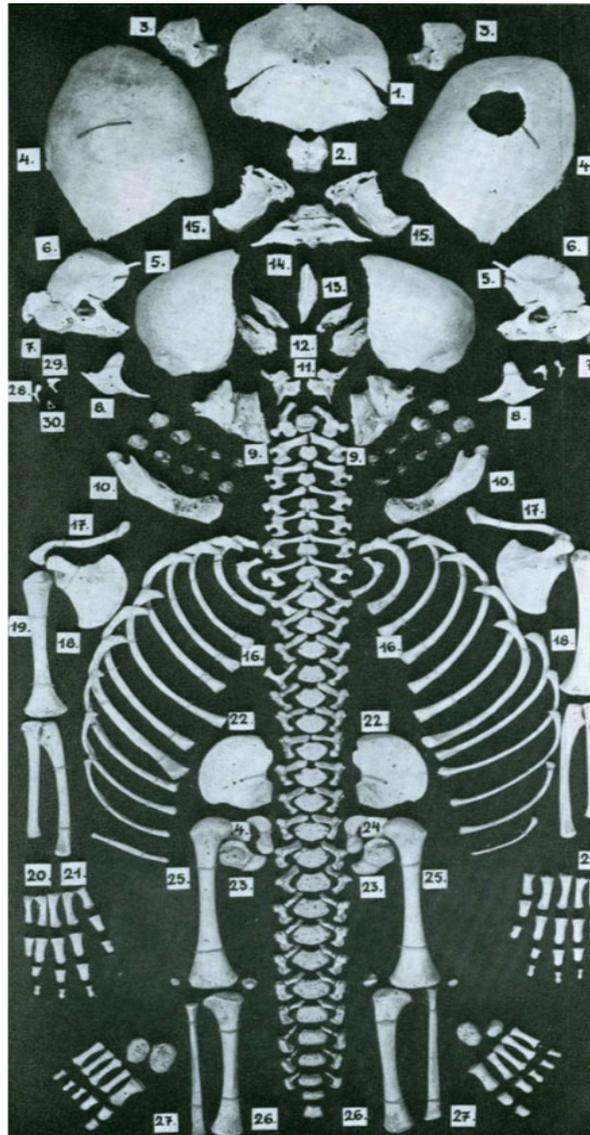
Esta colección está compuesta por 138 esqueletos de individuos fetales en perfecto estado de conservación, 71 de ellos son masculinos y 67 femeninos, con edades de gestación comprendidas entre el cuarto y el décimo mes lunar. La

muestra se encuentra localizada en el Departamento de Medicina Forense de la Universidad de Medicina de Szeged (Hungria).

Los individuos pertenecientes a esta colección provienen directamente de los propios estudios de autopsias llevados a cabo por Fazekas y Kósa. Gracias a esta muestra y una vez llevado a cabo un análisis exhaustivo de los elementos que la componen, se publicó un trabajo llamado *“Forensic Fetal Osteology”*, el cual ofrecía distintos métodos para la estimación del sexo y la edad en fetos. La publicación de este trabajo supuso un antes y un después en el campo de la Antropología Forense y en el estudio de individuos en etapas tempranas del desarrollo.



*Colección de Fazekas y Kosá (Tomada de Fazekas y Kosá, 1978).*



*Esqueleto perteneciente a la colección de Fazekas Y Kosá (Tomada de Fazekas Y Kosá, 1978).*

### 1.5.1.3. Colecciones de Lisboa y Coimbra

Esta colección comenzó a formarse en la década de 1980, de la mano de Luis López, técnico del Museo de Historia Natural en Lisboa, lugar donde actualmente se encuentra ubicada. Está compuesta por un total de 1962 esqueletos, con fechas de defunción comprendidas entre 1880 y 1975, aunque únicamente se encuentran disponibles para su estudio 669 individuos (Cardoso,

2006). Esto se debe a que muchos de éstos aún no han sido preparados para su estudio o bien, porque la información *antemortem* necesaria para la documentación de estos individuos aún no ha sido recuperada.

Los restos óseos que componen esta colección proceden de tres cementerios diferentes de Lisboa: Alto de S João, Prazeres y Ben ca. La información *antemortem* es muy completa gracias a la existencia de registros documentales de defunción (Cardoso, 2006). En lo que a individuos subadultos respecta, esta colección únicamente cuenta con 42 especímenes con edades inferiores a los 10 años, con lo cual no se puede considerar una muestra representativa para este grupo de edad (Irrurita, 2014). Trabajos como el de Black y Saunders (1996), Vlak et al. (2008); Cardoso et al. (2008, 2013) o Rissech y Malgosa (2003, 2007) han utilizado la colección de Lisboa o colección “Luis López”, para la elaboración de metodologías en la estimación del sexo y la edad esquelética en individuos subadultos.

#### 1.5.1.4. Colección prof. Dr. Rómulo Lambre

La colección “*Prof. Dr. Rómulo Lambre*” se encuentra depositada en la Catedra de Citología, Histología y Embriología de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad Nacional de La Plata (Argentina). El material osteológico proviene del Cementerio Municipal de La Plata, el cual mantiene una constante relación de colaboración con la UNLP, siendo objeto de estudio por un equipo multidisciplinar de científicos integrado por antropólogos, arquitectos, semiólogos y profesionales de Bellas Artes (Sempé et al. 2002; Sempé y Flores, 2011; García Mancuso, 2012).

Gracias a un acuerdo en el año 2005 entre la Universidad Nacional de La Plata y el Cementerio Municipal de La Plata, este último cedió los restos óseos procedentes de exhumaciones, con el objetivo de que pudieran ser utilizados con fines científicos. Es entonces cuando se planteó la posibilidad de conformar una colección osteológica que fuera contemporánea, regional y documentada.

Actualmente, la colección cuenta con 420 esqueletos, correspondientes a individuos fallecidos entre 1936 y 2001. Las principales ventajas que presenta esta colección es el carácter contemporáneo de la misma y la buena distribución de ambos sexos (60% masculino y 40% femenino). Además, se dispone de información *antemortem* de 328 de los individuos que componen la colección, gracias a la obtención de las Actas de defunción.

Con respecto a los individuos subadultos, esta colección está compuesta por 54 esqueletos fetales de los que se desconoce los meses de desarrollo gestacional y 84 individuos identificados con edades comprendidas entre los 0 y los 9 años (48 masculinos y 36 femeninos). La mayoría, se encuentran en el intervalo que comprende el nacimiento y el primer año de vida (García Mancuso, 2012).

#### 1.5.1.5. Colección Robert J. Terry

Esta colección se localiza en el Museo de Historia Natural del Instituto Smithsonian y es una de las más estudiadas del mundo. Los restos esqueléticos que la componen proceden de cadáveres no reclamados de las salas de autopsias de la Escuela de Medicina de St. Louis en Missouri (EEUU). Éstos eran utilizados por el Dr. Robert J. Terry para sus clases de Anatomía en St. Louis (Hunt y Albanese, 2005).

Actualmente, la colección cuenta con 1728 individuos identificados. Sin embargo, el número de infantiles en esta colección es muy reducido, siendo de únicamente 16, con edades comprendidas entre los 12 y 20 años.

#### 1.5.1.6. Colección Raymond Dart

Esta colección comenzó a formarse hacia el año 1923 en Johannesburgo (Sudáfrica). Se encuentra en la Escuela de Ciencias Anatómicas de la Universidad

de Witwatersrand y los esqueletos que la componen provienen de cadáveres cedidos por el Departamento de Disección Anatómica. Es muy amplia en cuanto al número de individuos que la componen; 2522, lo que la convierte en una excelente colección para su utilización en la investigación antropológica (Loth y Henneberg, 1996). Sin embargo, el número de individuos infantiles es bastante reducido, siendo únicamente de 42.

#### 1.5.1.7. *Colección de momias del norte de Chile*

Esta colección está compuesta por 85 individuos subadultos momificados. Se ha podido conocer el sexo gracias a la preservación de los órganos sexuales. Sin embargo, al ser de época pre-colombina, la información *antemortem* es inexistente, siendo imposible conocer la edad exacta de los individuos (Sutter, 2003). Aun así, esta colección ha servido para la realización de numerosos trabajos que han abordado la cuestión de la estimación sexual en individuos subadultos (Sutter, 2003; Gonzalez, 2008).

#### 1.5.1.8. *Colección Hamann – Todd*

Localizada en el Museo de Historia Natural de Cleveland (EEUU), la colección está compuesta por 3700 individuos, identificados en su gran mayoría. Cuenta con 57 individuos infantiles con edades comprendidas entre el momento del nacimiento hasta los 16 años. Además, se dispone de bastante información *antemortem* proveniente de los informes de autopsia (Blake, 2011).

#### 1.5.1.9. *La colección de individuos infantiles de San José (Granada)*

La colección osteológica de individuos infantiles de San José se encuentra depositada en el Laboratorio de Antropología Física de la Facultad de Medicina,

en la Universidad de Granada. Ésta, a su vez, pertenece a otra colección mayor de individuos identificados de todas las edades. La colección osteológica empezó a formarse en el año 1991 gracias al acuerdo de colaboración entre el Laboratorio de Antropología y el cementerio de San José, mediante el cual, se cedían para fines científicos aquellos restos óseos destinados a su incineración o acumulación en fosa común del cementerio (Alemán et al., 2012).

El cementerio con una superficie de 120.000m<sup>2</sup> tiene su origen en el año 1805, cuando, tras una epidemia de fiebre amarilla que afectó a la mortalidad de los habitantes de la ciudad, se acordó, por motivos de salubridad, instalar un cementerio a las afueras de la ciudad (Sánchez y Martín, 2006).

Actualmente, esta colección se encuentra formada por 230 esqueletos pertenecientes a individuos infantiles identificados, cuyas edades se encuentran comprendidas entre los 5 meses de gestación y los ocho años de edad. Gracias a las actas de defunción del Registro Civil y del Cementerio se cuenta con valiosa información *antemortem*, como la edad, sexo, fechas de nacimiento y de defunción, causa de la muerte y hora y lugar del fallecimiento. Además, otra de las ventajas que presenta esta colección es el carácter contemporáneo de la misma, ya que las condiciones de vida de los individuos que la componen van a ser muy similares a las de la población actual y, por tanto, los factores de carácter ambiental van a influir menos en los resultados que deriven del análisis del material óseo (Dirkmaat, 2008; Irurita, 2014).

A pesar de todas sus ventajas, esta colección también presenta algunas limitaciones; la más importante es la distribución de los individuos en los distintos grupos de edad, ya que, debido a las características de la mortalidad en la época, el grupo que más representado se encuentra es el que comprende desde el momento de nacimiento hasta el primer año de vida. Sin embargo, esta limitación no ha impedido que, gracias a esta colección, se hayan desarrollado numerosas metodologías específicas para la estimación del sexo y la edad en población mediterránea, así como de comparación de resultados con otras metodologías (Alemán, 1997; Viciano et al., 2012; Irurita, 2014).



*Cementerio de San José (Granada).*

#### *1.5.1.10 Colección de individuos subadultos de Scheuer*

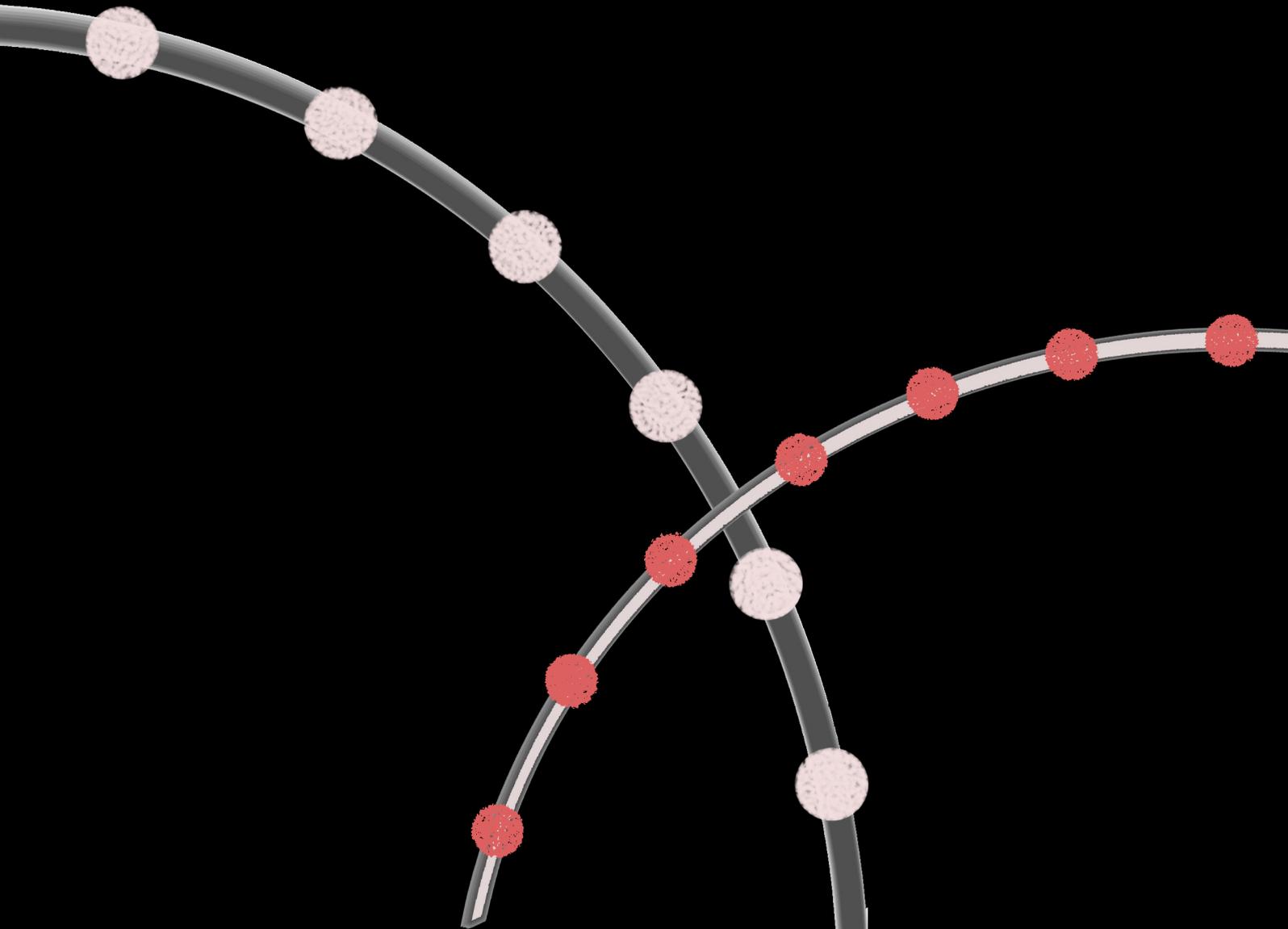
La colección de Scheuer se encuentra ubicada en el “Centre for Anatomy and Human Identification” de la Universidad de Dundee (Escocia). Actualmente, ésta se encuentra compuesta por más de 100 individuos subadultos que fueron reunidos por Louise Scheuer y Sue Black. Aunque parte del material se encuentra perfectamente identificado, la mayoría ha tenido que ser clasificado mediante el análisis de la dentición primaria, variables métricas y rasgos morfológicos. Sin embargo, la colección se encuentra en continua expansión gracias a la adquisición de nuevos elementos óseos que provienen de otros departamentos de Anatomía. Gracias al exhaustivo estudio de los individuos que la componen, lo que comenzó siendo un estudio práctico de laboratorio, ha acabado evolucionado en numerosos estudios sobre el desarrollo óseo de los individuos infantiles, entre los que destaca el trabajo “Developmental Juvenile Osteology” (Scheuer y Black, 2004).





# Capítulo 2

## Introducción a la morfometría geométrica





## 2.1. ANTECEDENTES AL ESTUDIO DE LA REPRESENTACIÓN HUMANA

El conocimiento de la forma humana y de sus proporciones ha sido un tema de especial interés a lo largo de la historia. Uno de los objetivos que han perseguido las representaciones artísticas de las distintas civilizaciones ha sido la de conseguir la reproducción más fiel de la figura humana. En la cultura del Antiguo Egipto, artesanos egipcios del Reino Medio (1986-1633 A.C.) usaban un sistema de cuadrículas y proporciones estandarizadas con el objetivo de realizar una reproducción fiable de la imagen que querían representar, estableciendo incluso diferentes fórmulas entre hombres y mujeres.



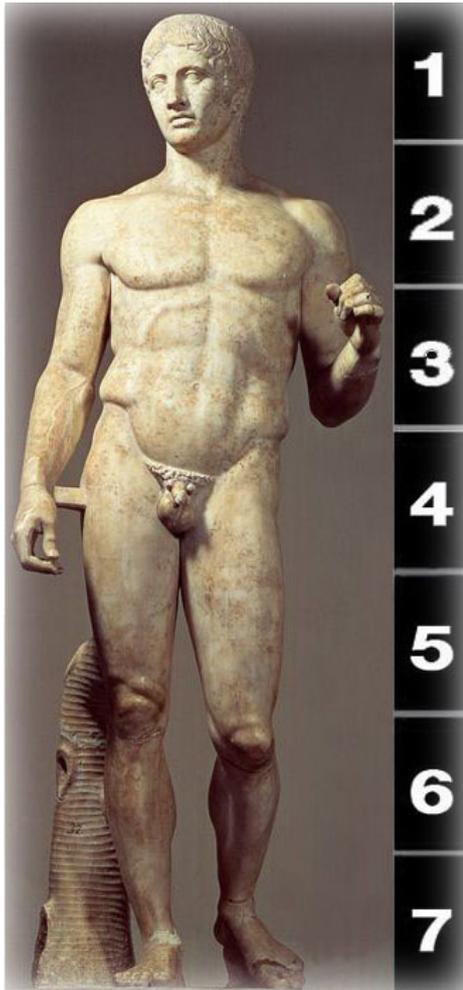
*Pintura con rejilla sobre tablero de madera de Tutmosis III. Dinastía XVIII.  
Museo Británico, EA 5601 (Tomada de Davies, 2001).*

Este sistema de dimensiones es de base antropométrica, ya que, en el canon egipcio, las relaciones de las partes del cuerpo entre sí son siempre idénticas, al contrario de lo que podría suceder en un sistema de perspectivas (Tefnin, 2000). El egipcio, es el primer canon conocido y se caracterizaba por la utilización del puño como unidad reguladora de medida, estableciendo, la longitud perfecta y proporcionada del individuo en 18 puños: 2 para la cabeza, 10 para el torso y 6 para las piernas y los pies (Davies, 2001).

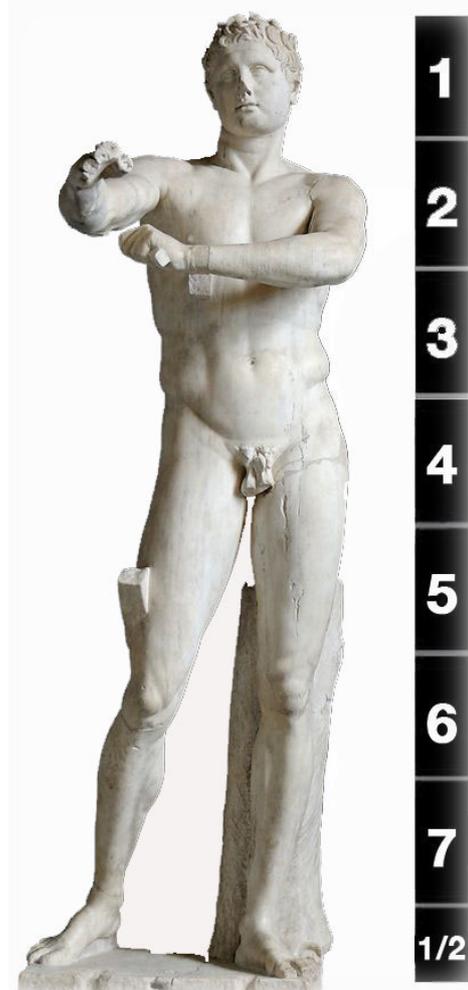
La proporcionalidad humana y su representación fueron unos de los aspectos de mayor interés en las escuelas artísticas de la antigua Grecia. La proporción, como componente fundamental de la armonía y de la simetría, se representaba geoméricamente llegando incluso a fijar un modelo anatómico ideal para el arte europeo (Sanmiguel, 2001).

Posteriormente al canon egipcio, Policleto escribió un tratado que tituló “El Canon”, en el cual estableció la regla de que, para obtener la perfecta proporción de unas partes del cuerpo respecto a otras, la figura debería medir siete cabezas y media de altura. Este sistema fue aplicado por Policleto a todas sus esculturas y fue aceptado sin discusión por todos los artistas de la época (Parramon, 1990). Posteriormente, Lisipo revisaría el canon de Policleto y aumentaría el sistema de proporciones a siete cabezas y media.

Este empeño por la proporcionalidad se trasladó a Roma de la mano de Vitruvio Polion, quien siguiendo el tratado greco-romano, propuso una fórmula matemática para la división del espacio dentro de un dibujo, conocida como la proporción áurea. (Dávila, 2005).



*Canon de proporción de siete cabezas empleado en la Antigua Grecia por Policleto.*



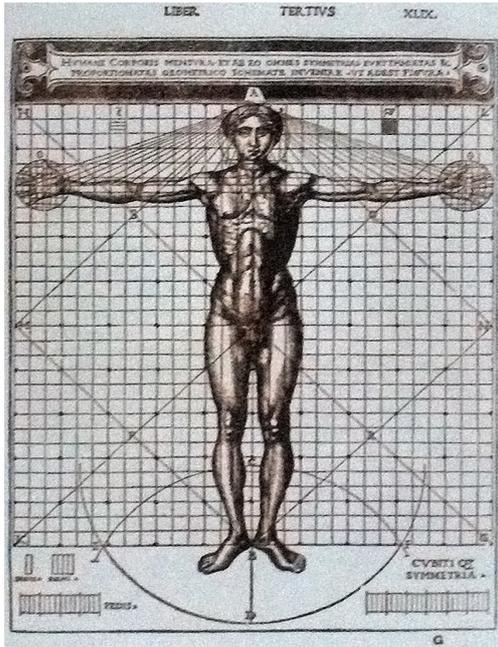
*Canon de proporción de siete cabezas y media empleado en la Antigua Grecia por Lisipo.*

Estas ideas de armonía y proporcionalidad volvieron a ponerse de manifiesto en el Renacimiento. La concepción de perfección del cuerpo humano, unida a la visión antropocéntrica de la cultura, supuso la aceptación de la teoría clásica transmitida por Vitruvio. Se produjo una revitalización de las analogías entre la arquitectura y la estructura del cuerpo humano (Cabezas, 2008). Nutriéndose de este contexto y desarrollándose paralelamente a la investigación anatómica, los artistas del Renacimiento volvieron a desarrollar diferentes cánones de proporciones, mediante los cuales representar la realidad del cuerpo humano.

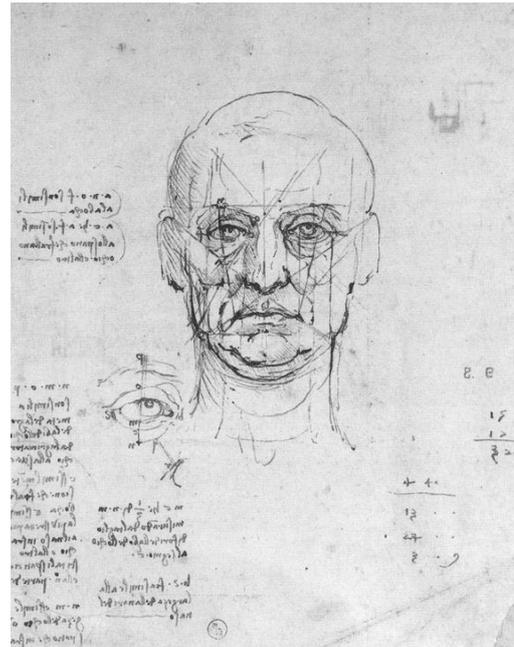
De entre todos, destaca Leonardo Da Vinci, que se inspiró retomando los análisis realizados por Vitruvio acerca de la proporcionalidad, para realizar el famoso dibujo del “Hombre Vitruviano”. Este dibujo, considerado un símbolo que conjuga las ideas del pensamiento Renacentista, es el primer gran precedente del estudio del análisis geométrico, con la finalidad de representar la anatomía humana.

No obstante, Da Vinci no fue el único en utilizar cuadrículas para la representación de la anatomía humana, ya que posteriormente muchos artistas enmarcados en este periodo histórico elaboraron sus propios modelos del hombre vitruviano (Dávila, 2005).

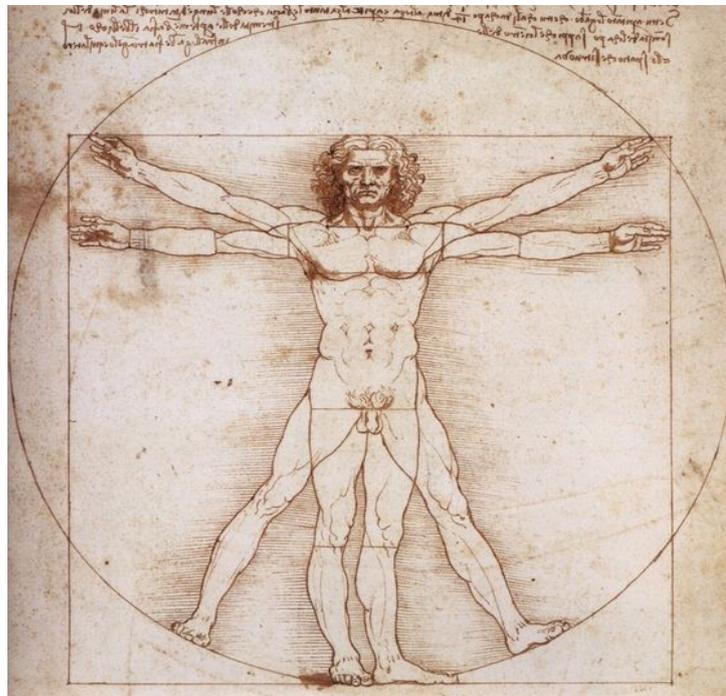
Esta manera de entender el estudio de las formas tendrá su evolución más acentuada en el siglo XVII de la mano del desarrollo de la Geometría de Descartes, como una de las obras más importantes en la historia del pensamiento matemático. La Geometría Analítica, de la cual Descartes es el máximo artífice, utiliza el Álgebra simbólica como herramienta de algoritmia básica, realizando un nuevo enfoque de la Geometría griega. Gracias a ello, Descartes liberaba a la Geometría de la dependencia a la estructura geométrica de las figuras e introdujo el Álgebra como nuevo método de solución a los problemas matemáticos (Álvarez, 2000).



*Homo ad circulum de Cesare Cesariano, 1521 (Tomada de Soger, 1987).*



*Grabado de Leonardo Da Vinci en su "Estudio de las proporciones de la cabeza y los ojos", 1490 (Tomada de Zöllner, 2000).*

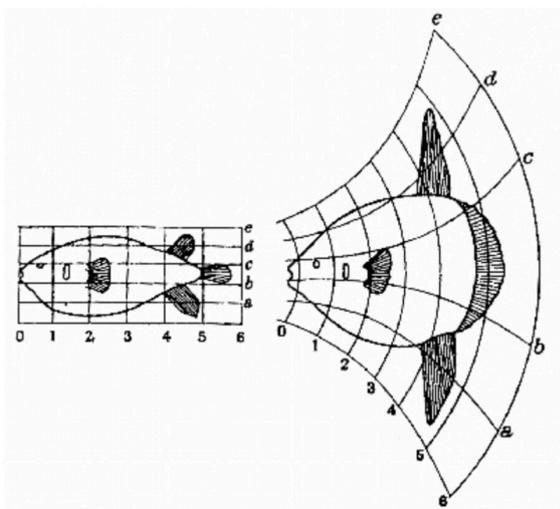


*Dibujo de Leonardo da Vinci del hombre de Vitruvio que acompaña sus notas anatómicas, 1490 (Tomada de Kemp, 2011).*

## 2.2. MORFOMETRÍA TRADICIONAL

Este conocimiento, desarrollado en el contexto filosófico y artístico fue heredado posteriormente por otras disciplinas. A principios del siglo XX, las ciencias biológicas experimentaron una transición desde la descripción cualitativa hacia otra de carácter más científico y cuantitativo. El desarrollo de los distintos métodos estadísticos como el coeficiente de correlación de Pearson (Pearson, 1895), el análisis de la variante (Fisher, 1935) y el análisis de componentes principales (Hotelling, 1933) supusieron un avance sin precedentes en términos de rigor cuantitativo. Por tanto, estos nuevos estudios morfológicos tomaron los valores medios de uno o más rasgos medibles para posteriormente describir la variación de las formas de manera intra e intergrupala, dejando de lado el sistema de descripción basado en tipos y clases de especie (Adams et al., 2004).

En los años sesenta y setenta del siglo XX, la Biometría recibió la integración de la estadística multivariante como herramienta para la explicación de los patrones de variación morfológica entre los distintos grupos. La aplicación de esta técnica es lo que hoy conocemos como “morfometría clásica o tradicional”.



*Temprano ejemplo de D'Arcy Thomson de un ejemplar de Diodon y su transformación geométrica en otra especie (1917).*

No obstante, aunque la morfometría combinó la estadística multivariante y la morfología cuantitativa, estableciendo una metodología con un alto grado de rigor científico, había muchas dificultades que seguían permaneciendo a la hora de enfocar un estudio de la manera más objetiva posible. Entre ellas destacan:

1. La falta de consenso en el método que se debía emplear para la corrección y variación del tamaño. Por tanto, esto daba lugar a que se produjesen resultados ligeramente diferentes entre los distintos estudios.
2. La dificultad para evaluar la homología entre las distancias lineales, ya que muchas de ellas no tenían por qué estar definidas por puntos homólogos (largo máximo o ancho mínimo) (Rohlf y Marcus, 1993).
3. El mismo conjunto de medidas de distancia podría obtenerse a partir de dos formas diferentes. Por ejemplo, si la longitud máxima y la anchura máxima se midieran tanto en un óvalo como en una lágrima, ambos objetos podrían tener los mismos valores de altura y anchura, pero son claramente diferentes en forma. (Adams et al., 2004).
4. Por otra parte, mediante los análisis que se realizan en morfometría tradicional a través de matrices de datos unidimensionales, no es posible generar representaciones gráficas de la forma de los organismos a partir de las distancias lineales, ya que las relaciones geométricas entre las variables no se conservan. (Rohlf y Marcus, 1993).

Debido a estas dificultades, durante la década de los 80, y gracias a los trabajos de Kendall (Kendall, 1981, 1984) y Bookstein (Bookstein, 1986, 1991) surgieron métodos alternativos para la cuantificación de los datos correspondientes a la geometría de las formas morfológicas. Esta evolución dio lugar a un cambio de paradigma en el estudio de las formas biológicas, que sustituía las medidas lineales unidimensionales por un sistema de coordenadas representadas en un espacio bi o tridimensional y tomadas mediante conjuntos

de puntos de referencia. Por tanto, el objetivo de estos métodos no es el estudio de la *forma* en sí sino la relación espacial entre sus partes (Bookstein, 1991), permitiéndonos posteriormente a la realización de los análisis multivariantes, la visualización de los cambios en la morfología de las estructuras biológicas. Este nuevo enfoque, llamado “Morfometría Geométrica” fue definido por Rohlf y Marcus en 1993 como una auténtica “revolución” en el campo del estudio de las formas de los organismos biológicos.

### 2.3. MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

La morfometría geométrica (MG) es definida como el conjunto de métodos que nos permite la descripción cuantitativa, análisis e interpretación de la variación y covariación de la forma mediante la combinación de la Geometría, la Biología y la Estadística (Bookstein, 1991; Webster y Sheets, 2010).

La morfometría geométrica propone el estudio de los cambios en el tamaño y la forma de los organismos biológicos, a partir del desplazamiento bidimensional (2D) o tridimensional (3D) de un conjunto de puntos de referencia llamados “*landmarks*”, los cuales conservan toda su información geométrica durante todo el proceso de análisis y permiten “reconstruir” con precisión la forma, el tamaño y la relación espacial entre las estructuras morfológicas del espécimen estudiado (Slice, 2005).

El análisis morfogeométrico consta de tres fases:

- Adquisición de datos.
- Obtención de *forma*.
- Análisis de la variación y covariación de la *forma* mediante estadística multivariante.

### 2.3.1. Adquisición de datos (Data acquisition)

Los datos de estudio en morfometría geométrica consisten en la adquisición de unos puntos anatómicos de referencia basados en coordenadas cartesianas denominados “*landmarks*”, que corresponden a estructuras biológicas homólogas y repetibles entre los especímenes de una población de estudio en concreto (Webster y Sheets, 2010). La posición que ocupan estas coordenadas varía según el tipo de espacio en el que se encuentren con respecto a cada uno de los ejes X, Y, en un espacio bidimensional o, por otro lado, X, Y, Z, en el caso de los espacios tridimensionales).

La selección de *landmarks* juega un papel fundamental en el campo de la morfometría geométrica, ya que este conjunto de coordenadas conforma los datos primarios que posteriormente van a ser sometidos a análisis. Es por ello, que una selección apropiada es crucial, ya que de ella no dependen solo la fiabilidad de los resultados posteriores a los correspondientes análisis estadísticos, sino también la cantidad y la calidad de la información que podemos obtener de las estructuras biológicas (Toro et al., 2010).

#### 2.3.1.1. Características de los Landmarks

Los *landmarks* reúnen, o deberían reunir, una serie de criterios para que la elección de éstos como herramienta de investigación sea la más adecuada posible con el objetivo del análisis de las *formas* biológicas (Zelditch et al., 2004). Estos criterios se citan a continuación.

**Homología:** El concepto de “homología” juega un papel crucial a la hora de llevar a cabo la selección de *landmarks*. Las estructuras que pueden considerarse homólogas son aquellas que pueden ser reconocibles en todos los especímenes del grupo de estudio. Se requiere además que estos puntos sean de carácter discreto, es decir, deben ser claramente diferenciables del resto de estructuras que lo rodean (Toro et al., 2010). De este modo los puntos colocados

en esas estructuras permitan una interpretación de la variación que tenga significancia biológica. No obstante, en muchas ocasiones, hay razones para incluir determinados *landmarks* en el análisis, aunque las regiones de estudio presenten una homología de carácter dudoso entre los especímenes. Esto lleva a la inclusión de *semilandmarks* en áreas donde la localización de *landmarks* homólogos es complicada.

**Consistencia en la posición relativa:** Los métodos morfométricos deben aplicar una consistencia en cuanto a la localización de los *landmarks* se refiere. Si se produce una variación de la posición de puntos de referencia entre los distintos especímenes, se alteraría la configuración total y esta metodología no sería la apropiada para el estudio de la *forma*. Por tanto, sería imposible aplicar el análisis morfogeométrico si las estructuras de la *forma* son distintitas entre sí (Zeiditch et al., 2004).

**Cobertura adecuada de la forma:** Los *landmarks* deben representar de manera rigurosa la *forma* que se va a analizar. Por tanto, para tener una representación precisa de la estructura a analizar, la selección del número de *landmarks* debe ser adecuada. Una cantidad insuficiente de *landmarks* podría dar lugar a una pérdida de información muy valiosa, mientras que una cantidad exagerada de éstos puede dar lugar a unos resultados que no tengan un valor estadístico importante, especialmente si contamos con un tamaño muestral pequeño (Toro et al., 2010).

**Repetibilidad:** Este criterio define que la localización de *landmarks* debe realizarse sin error (Zeiditch et al., 2004). Con lo cual, éstos deben ser de fácil identificación, con el fin de evitar un resultado significativo en los análisis estadísticos de error intra e inter-observador.

**Coplanaridad:** Aunque hay métodos para analizar *landmarks* tridimensionales, su aplicabilidad aún puede estar limitada en ciertos contextos debido a su alto coste. Por tanto, el número de estudios basados en morfometría geométrica en dos dimensiones sigue siendo bastante amplio. Es en estos análisis, donde se debe tener en cuenta, la posibilidad de distorsión del análisis

de la *forma* a la hora de proyectar un organismo tridimensional en un plano bidimensional. (Zelditch et al., 2004).

### 2.3.1.2. Tipos de landmarks (LM)

La clasificación más utilizada a la hora de categorizar los diferentes tipos de *landmarks* es la propuesta en el año 1991 por Bookstein y más recientemente revisada en 2011 por Bookstein y Weber para la incorporación de los *semilandmarks*.

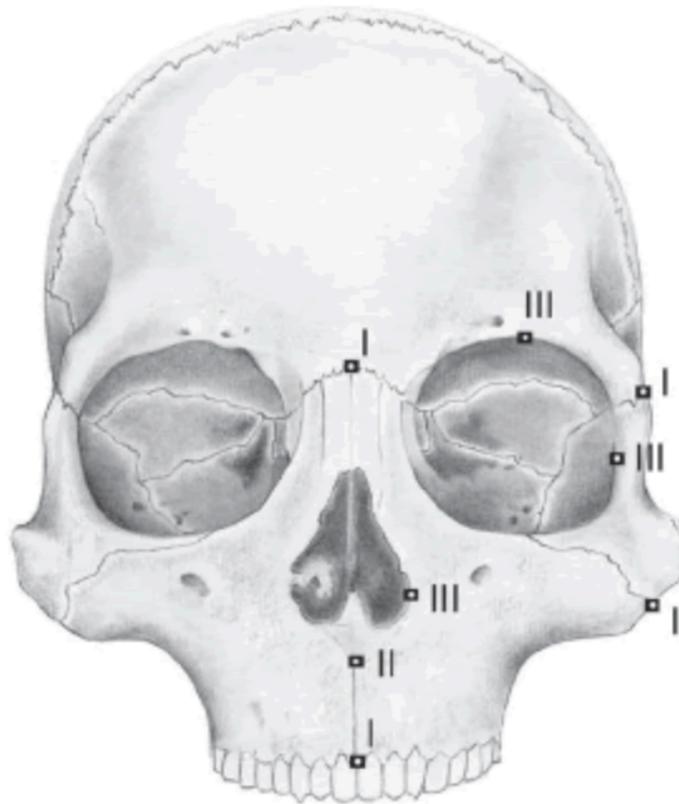
**Tipo 1:** Corresponden a puntos matemáticos cuya supuesta homología de un individuo a otro es respaldada por una sólida evidencia o significación biológica. Estos *landmarks* están situados en la yustaposición discreta de estructuras o intersecciones de curvas (Cooke y Terhune, 2015).

**Tipo 2:** Estos *landmarks* se localizan en el punto de máxima curvatura o depresión de una estructura, donde por lo general existe una implicación de fuerzas biomecánicas. Generalmente están definidos por una estructura biológica que está en una región determinada, pero que suele ocupar un área que es mayor a dicho punto (Lele y Richtsmeier, 2001).

**Tipo 3:** Son puntos extremos cuya localización se define en virtud de otra estructura distante. Estos *landmarks*, además, se caracterizan por tener al menos una coordenada deficiente (Bookstein, 1991). Gran parte de los puntos de referencias normalmente utilizados en la morfometría tradicional corresponden a este tipo (Toro et al., 2010).

**Semilandmarks:** Son puntos que se localizan a lo largo de un contorno capaz de captar información sobre una curva, lo que permite estudiar complejas morfologías curvadas donde los puntos de referencia puedan ser escasos. Aunque para considerar los *semilandmarks* sea necesario la aplicación de otros métodos específicos, sus coordenadas pueden ser analizadas como si fueran *landmarks*. La incorporación de los *semilandmarks* a la configuración de puntos

de referencia, amplía enormemente la información que atiende a la *forma*, y su inclusión cada vez se está volviendo un proceso más rutinario en los análisis morfogeométricos (Webster y Sheets, 2010).



*Ejemplo de landmarks tipo I, II y III (Tomada de Torcida y Perez, 2012).*

### **2.3.2. Obtención de la forma**

La segunda etapa del estudio morfogeométrico comprende la serie de técnicas geométricas y análisis estadísticos que se deben realizar con la finalidad de obtener toda la información cuantitativa posible de la forma que se está estudiando. Debido a que estos procedimientos están basados en una nueva definición del concepto de forma y tamaño, se hace necesaria la especificación del significado que adquieren los mismos.

La forma de un objeto (*Form*) bajo el análisis morfogeométrico está compuesta por el tamaño (*Size*) y la *forma* (*Shape*):

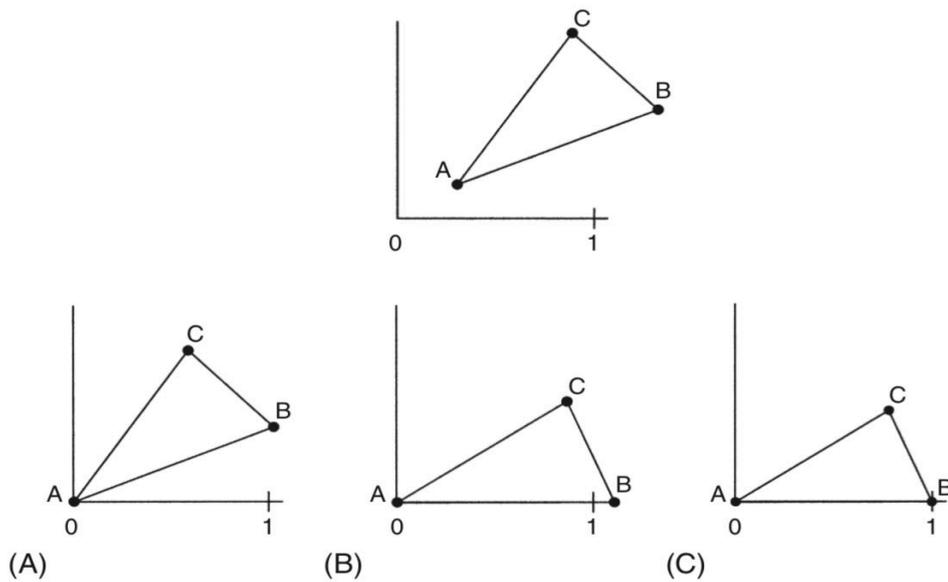
$$\mathbf{Form = Size + Shape}$$

### 2.3.2.1. El concepto de tamaño y Centroid Size

En los estudios basados en la morfometría clásica, cualquier definición sobre el concepto de tamaño está ligada al tipo de análisis que se esté llevando a cabo. Por ejemplo, el tamaño de un objeto puede estar definido como un área, una longitud, un peso, un volumen o un centroide (Slice, 2005). En morfometría geométrica el estimador de tamaño más utilizado es el tamaño del centroide, el cual es igual a la raíz cuadrada de la suma de las distancias al cuadrado desde un conjunto de *landmarks* al centroide de esa configuración. (Kendall, 1984; Bookstein, 1989, 1991). Con la utilización del tamaño del centroide podemos analizar la influencia de la variable tamaño sobre la variación de la muestra, sin comprometer los resultados que atienden a las variables de la forma biológica. Por norma general, el tamaño del centroide se establece en uno para todas las configuraciones de *landmarks*.

### 2.3.2.2. ¿Qué entendemos por forma (*shape*)? La teoría de la forma

El concepto de *forma* proviene del inglés *shape* y debido a que utilizar un equivalente en castellano puede resultar confuso, en este trabajo nos referiremos a *shape* o a *forma*, en cursiva, para diferenciarla del concepto tradicional de forma. La definición de *shape* corresponde a “toda la información geométrica que permanece cuando se eliminan los efectos de translación, rotación y escala” (Kendall, 1977).



Efectos que no alteran la forma: (A) translación, (B) Rotación y (C) Escala (Tomada de Zelditch et al., 2012).

Como se ha referido anteriormente, esta información sobre la *forma* va a ser obtenida gracias a un conjunto de puntos de referencia coincidentes entre los especímenes de la población de estudio. Si los *landmarks* no correspondieran los unos con los otros, sería imposible la comparación de *formas*. Por ello, este ejercicio se produce mediante la comparación de configuraciones completas de *landmarks* y no entre estos puntos de referencia analizados entre sí de forma individual. Estas configuraciones están comprendidas por el número de *landmarks* ( $K$ ), los cuales tienen un valor distinto de coordenadas ( $M$ ) dependiendo de si estamos trabajando con un plano bidimensional o tridimensional (Zelditch et al., 2004). Es decir, si tenemos 5 *landmarks* con dos o tres valores de coordenadas ( $X, Y$  o  $X, Y, Z$ ) no tenemos 10 o 15 variables a considerar, sino una configuración completa de *landmarks* que es analizada como un conjunto.

### 2.3.2.3. Espacios morfogeométricos

Una vez habiendo pasado por el proceso de localización de *landmarks* y a medida que se van eliminando los efectos de traslación, rotación y escala con el objetivo de llegar a la *forma*, el análisis debe pasar por los diferentes espacios morfométricos.

#### 2.3.2.3.1. Espacio de configuraciones

Este espacio representa una configuración completa de *landmarks*. Como ya hemos definido anteriormente, cada uno de estos espacios está formado por una relación completa de *landmarks* (K), que a su vez poseen un número de dimensiones determinadas (M). Esta matriz, estará representada por (K) filas y (M) columnas. Cada una de las filas representa los *landmarks* en un espécimen y cada columna las coordenadas cartesianas en las que se encuentran localizados dichos *landmarks*. Por tanto, aquellas *formas* que posean mayor similitud biológica se encontrarán localizadas en áreas comunes de este espacio. La posición del espacio de configuraciones viene dada por la localización del centroide de esa matriz. Este centroide es un vector M-dimensional (dos o tres dimensiones, dependiendo del tipo de imagen a analizar) y cuyos elementos son la media de las coordenadas de *landmarks* (X, Y o X, Y, Z) (Zelditch et al., 2004).

De los efectos que deben ser eliminados para la obtención de la *forma*, dos de ellos van a estar identificados en este espacio.

El efecto de **escala**: Como ya se ha definido previamente, el tamaño del centroide (*centroid size*) es la unidad de medida más utilizada en el campo de la morfometría geométrica, debido a que éste no conlleva una correlación entre tamaño y *forma*. Gracias a la obtención del tamaño del centroide, todas las configuraciones de *landmarks* van a ser escaladas a un tamaño común. Esto va a provocar que toda la información que engloba al tamaño sea apartada y pueda

estudiarse la *forma* de manera aislada. No obstante, el tamaño del centroide puede ser incluido como variable independiente en el análisis.

Efecto de **traslación**, ocurre cuando se produce un desplazamiento en cualquier dirección con respecto al eje de coordenadas. Para la eliminación de este efecto, se desplazarán los centroides de todos los especímenes hacia un punto común en el eje de coordenadas. En un espacio de múltiples configuraciones, el centroide es el único elemento que difiere entre ellas, por tanto, no se producirá una alteración en la *forma* si estas configuraciones son centradas y la media de todas es igual a 0.

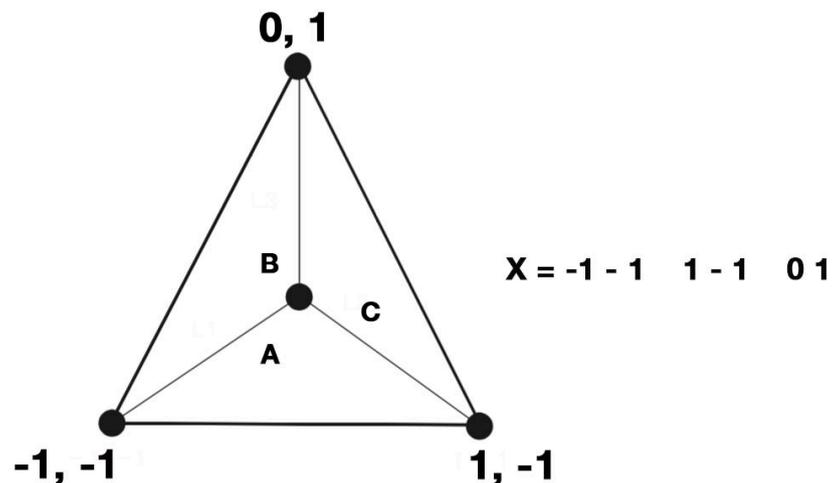


Figure 4.4. Centroid use of the triangle in Figure 4.2, calculated as the sum  $(1P + 1Q + 1R) / 3 = 2/3$ .

Ejemplo de triángulo con la matriz de configuraciones a su derecha (Modificada de Zelditch et al., 2012).

Para calcular el tamaño del centroide, tomando como ejemplo los tres lados de un triángulo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

#### 2.3.2.3.2. Espacio preforma

Previamente, hemos definido como hemos eliminado en el espacio de configuraciones los efectos de escala y traslación. Debido a este proceso, que va desde el espacio de configuraciones al espacio preforma o pre-Kendalliano, las dimensiones se han visto reducidas, dando lugar a una superposición de centroides en el origen del sistema de coordenadas. Estas nuevas coordenadas corresponden a un punto en el espacio pre-forma. Para configuraciones de *landmarks* bidimensionales el espacio pre-forma tendrá siempre  $2K-3$  dimensiones, mientras que para configuraciones tridimensionales tendrán  $3k-4$  dimensiones.

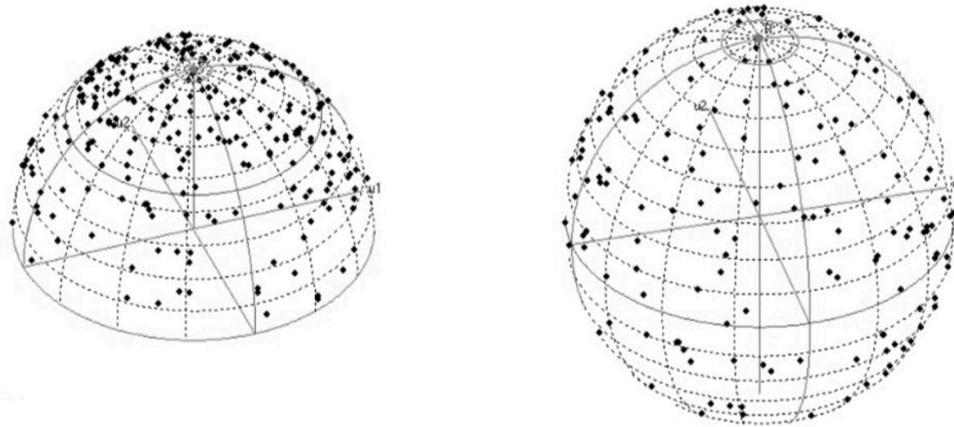
Es precisamente en este espacio pre-*forma* donde se va a eliminar el último efecto, la **rotación**. Este proceso se va a encontrar localizado de un arco circular llamado *fibras* (*fibers* en inglés) el cual comprende todas las configuraciones de puntos que pueden obtenerse en el espacio pre-forma mediante la rotación de las mismas (Zelditch et al., 2004). El objetivo final persigue rotar una matriz de configuraciones hasta que todas las *formas* se encuentren lo más cerca posible entre ellas y de lo que se conoce como una *forma* consenso.

Toda la información geométrica que permanece una vez eliminados estos efectos es lo que vamos a entender por *forma*. Este proceso da lugar a un tercer espacio, llamado espacio de la forma o espacio Kendall.

#### 2.3.2.3.3. Espacio de la forma

En morfometría geométrica este espacio también es conocido como espacio de Kendall. En este nuevo espacio, la dimensionalidad va a volver a variar, recibiendo otra reducción en sus dimensiones. Esto se debe a que a las 2 que se restan por traslación (3 en el caso de los espacios tridimensionales) y a una única dimensión que corresponde al escalamiento, tenemos que añadir las que, mediante el proceso de rotación, se han visto modificadas. Por ello,

atendiendo a los cálculos realizados en el primer espacio, en un espacio bidimensional contaríamos con  $2k-4$  dimensiones, debido a que las rotaciones de las *formas* planas se producen sobre un único eje. Por otro lado, en un espacio tridimensional, donde las *formas* rotan sobre tres ejes, su dimensionalidad se calcularía como  $3k-7$ .

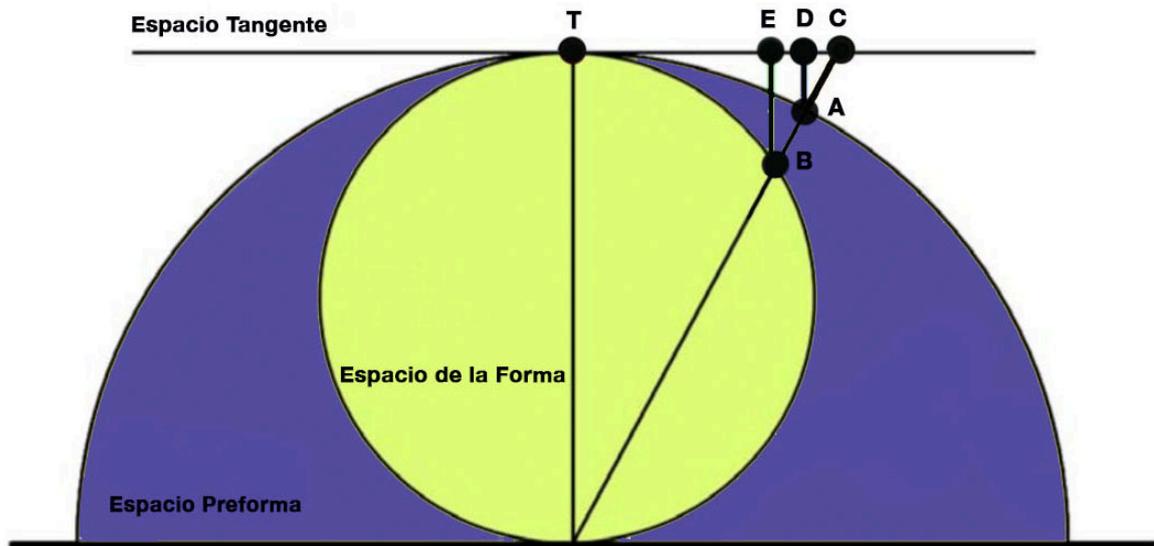


A la izquierda, ejemplo de espacio preforma; a la derecha, de espacio de la forma; ambos con 300 triángulos generados de manera aleatoria y uniforme (Modificada de López-Lázaro, 2015).

El espacio de la forma de Kendall es una superficie de carácter curvada, que viene dada por todas las configuraciones posibles de los *landmarks*. Por tanto, la dimensionalidad de este espacio carece de geometría euclidiana, es decir, lineal, por tanto, la metodología de estadística multivariante tradicional no es apropiada para el análisis de la *forma* (Zelditch et al. 2012).

En la versión más simple de este espacio (donde se examina la variación de la forma en triángulos planos) este espacio de la forma es representado por la superficie de una esfera bi dimensional. Kendall (1984) demostró que, si los vértices de una forma son variables normales esféricas distribuidas de forma independiente e idéntica, la distribución de la forma es isotrópica (Dryden y Mardia, 1998). Para analizar las configuraciones más complejas de *landmarks*, donde poseemos más de tres puntos de referencia, la representación del espacio de la *forma* y el análisis se vuelve algo más complejo. Para ello, este espacio se

proyecta en una tangente cuyo punto corresponde a la *forma* consenso. Las distancias euclidianas en este espacio tangente se asemejan a las distancias en el espacio de forma de Kendall. Esta proyección se representa de forma estereográfica, y la distribución de los puntos en este espacio se obtiene desde la superficie de la esfera hasta el espacio tangencial. De este modo, las *formas* proyectadas en el espacio tangente pueden usarse para el análisis con métodos de estadística multivariados (Mitteroecker y Gunz, 2009).



*Proyección de un punto situado en el espacio de Kendall sobre el espacio tangente. La semiesfera exterior representa las formas escalada a un único centroide; el círculo interior representa la sección de las formas centradas y alineadas. A: Posición de la forma en la semiesfera de la preforma; B: Posición de la forma en el espacio de Kendall; C: Proyección estereográfica de B en el plano tangente; D: proyección ortogonal de A en el plano tangente; E: Proyección ortogonal de B en el plano tangente (Modificada de Zelditch et al., 2012).*

Proyección de un punto situado en el espacio de Kendall sobre el espacio tangente. La semiesfera exterior representa las *formas* escalada a un único centroide; el círculo interior representa la sección de las formas centradas y alineadas. A: Posición de la *forma* en la semiesfera de la *preforma*; B: Posición de la *forma* en el espacio de Kendall; C: Proyección estereográfica de B en el plano tangente; D: proyección ortogonal de A en el plano tangente; E: Proyección ortogonal de B en el plano tangente (Tomada y modificada de Zelditch et al., 2012)

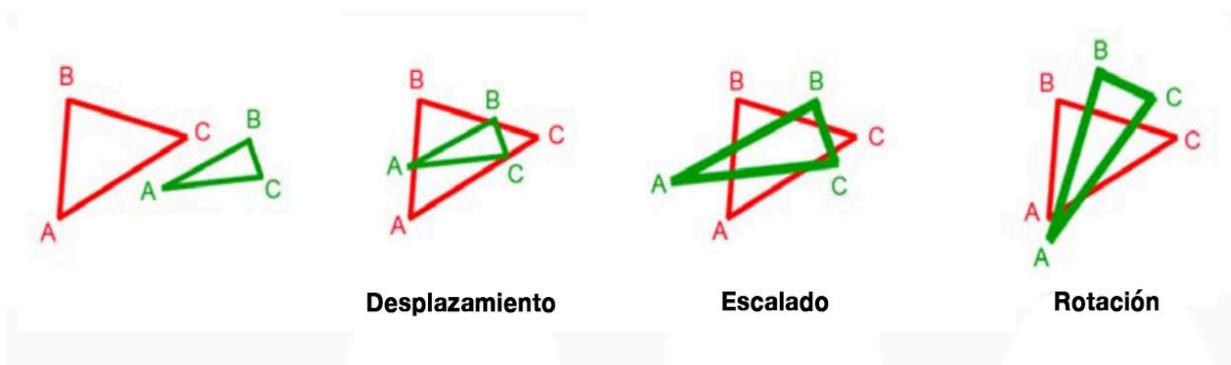
#### 2.3.2.4. La superposición de procrustes

Una vez obtenidas las coordenadas de referencia para el estudio de un conjunto de especímenes, debemos escoger un método mediante el cual llevar a cabo el análisis de la variación de la *forma*. Para ello existen cuatro métodos: de superposición, de deformación, de análisis de contornos y basados en distancias lineales.

Los métodos de superposición son los más utilizados en el campo de la morfometría geométrica. Éstos eliminan la variación no relacionada con la forma en las configuraciones de *landmarks*, superponiéndolos según un criterio de optimización. Aunque se han propuesto distintos métodos difiriendo en cómo y en qué grado los efectos de traslación, rotación y escala son eliminados, el más utilizado es el de superposición de Procrustes (Webster y Sheets, 2010). Este proceso, basado en un método generalizado de mínimos cuadrados (General Least Squares) consta de tres fases:

1. Desplazamiento de las configuraciones de *landmarks* de todos los especímenes, con la finalidad de que todas compartan el mismo centroide. Este centroide común se convierte en el nuevo origen del sistema de coordenadas.
2. Escalado de las configuraciones de referencia para que todas tengan el mismo tamaño del centroide (Centroid Size). Este corresponde a una medida de escala para las configuraciones de *landmarks*, la cual ha demostrado no tener correlación con la forma para la pequeña variación isotrópica de *landmarks* (Dryden y Mardia 1998). Como norma general, en del centroide se establece como 1 para todas sus configuraciones.
3. Se selecciona una configuración como referencia para posteriormente rotar una segunda configuración, con el objetivo de minimizar la suma de distancias cuadradas entre *landmarks* homólogos entre las *formas*. Para más de dos *formas*, este algoritmo se extiende al Análisis Generalizado de

Procrustes (GPA) (Rohlf y Slice, 1990). En primer lugar, todas las configuraciones de referencia centradas y escaladas se giran a una configuración arbitraria de la muestra, utilizando el mismo enfoque de mínimos cuadrados que el anterior. Posteriormente, se promedian las coordenadas resultantes y todas las configuraciones se giran de nuevo para ajustarse a la nueva forma consenso. Estas nuevas coordenadas sirven como un patrón actualizado para la siguiente iteración. El algoritmo deberá repetirse hasta la convergencia.



Representación esquemática del proceso de Superposición de Procrustes (Modificada de Gómez-Robles, 2010).

Las coordenadas resultantes de este proceso se van a llamar coordenadas de *forma* de Procrustes (Del inglés: *Procrustes Shape Coordinates*). La distancia euclidiana entre dos conjuntos de estas coordenadas se denomina distancia de Procrustes y tamaño denota la similitud o no en la *forma* entre dos configuraciones de puntos de referencia.

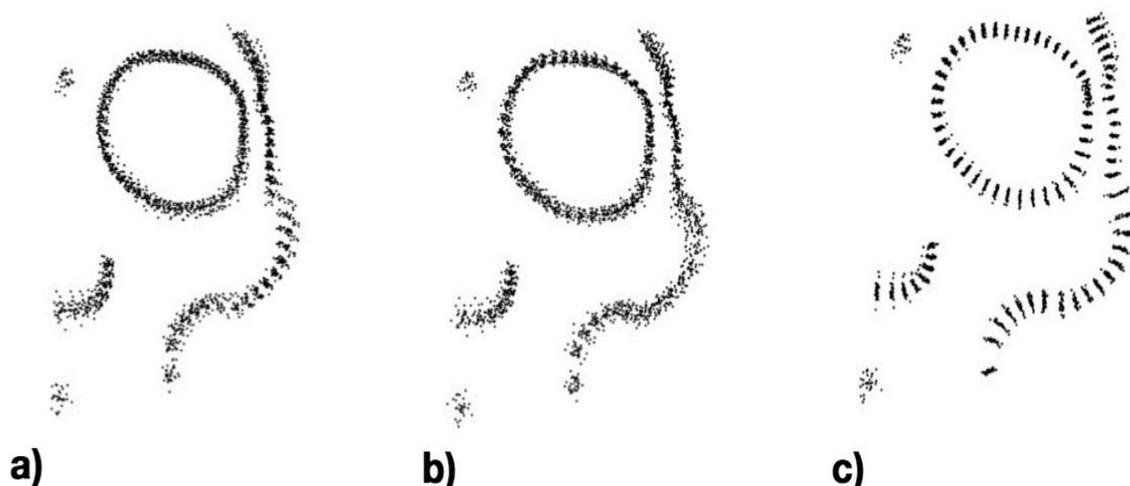
Aunque el método de Superposición de Procrustes pueda tener también algunas limitaciones, es considerado, desde el punto de vista estadístico, el más fiable para llevar a cabo un correcto análisis de la variación de la *forma*.

### 2.3.2.5. Deslizamiento de *semilandmarks*

Como hemos definido anteriormente, los *semilandmarks* no son puntos discretos, por tanto, sus coordenadas no pueden digitalizarse directamente desde los puntos de referencia emplazados en la muestra. Además, debido a la carencia de grados de libertad con respecto a los *landmarks*, éstos no pueden ser analizados utilizando los mismos métodos, ya que la cantidad de información que poseen es menor (Zelditch et al., 2004).

Para efectuar el análisis de los *semilandmarks*, es necesario llevar a cabo un proceso de superposición similar al que hemos sometido a los *landmarks*. Esto se logra permitiendo el deslizamiento (Del inglés: sliding) de los puntos a lo largo de su curva o superficie, siguiendo un método de optimización determinado. Existen dos metodologías para llevar a cabo el deslizamiento de *semilandmarks* y que difieren según el criterio de optimización empleado. El objetivo de ambos métodos es minimizar las diferencias de la *forma* entre cada espécimen y la forma consenso de la muestra (Gunz y Mittroecker, 2013):

- **Criterio de minimización de la energía de torsión:** Los *semilandmarks* son deslizados a lo largo de una línea paralela siguiendo el contorno de cada espécimen, con el objetivo de reducir la energía de torsión entre el espécimen y la *forma* consenso. En este proceso, la *forma* es tratada como un todo, por tanto, todos los *semilandmarks* influenciados por los *landmarks* anatómicos se deslizan juntos (Gunz y Mittroecker, 2013).
- **Criterio de minimización de la distancia de Procrustes:** Se elimina la diferencia entre la forma consenso y cada espécimen, estimando la dirección tangencial a la curva y eliminando los componentes de diferencia que se encuentran a lo largo de esta tangente (Perez et al., 2006). Al minimizar la distancia de Procrustes, cada *semilandmark* se desliza por separado y, aparte de la superposición estandarizada de Procrustes, el deslizamiento no se ve influenciado por los otros *landmarks* y *semilandmarks* (Gunz y Mittroecker, 2013).



*Ejemplo de distintos métodos de deslizamiento de semilandmarks en esplanocráneo (8 landmarks y 74 semilandmarks): a) Superposición de procrustes sin deslizamiento de semilandmarks; b) alineamiento mediante la minimización de la energía de torsión; c) alineamiento mediante el criterio de minimización de la distancia de Procrustes (Modificada de Pérez et al., 2006).*

Ambos criterios pueden arrojar resultados similares si la variación en la *forma* es pequeña y los *semilandmarks* no necesitan un gran deslizamiento. Sin embargo, si la variación en la forma es más grande y por tanto el deslizamiento más extenso, el método de minimización de la energía de torsión, normalmente ofrecerá resultados mejores y que correspondan en mayor medida con la homología biológica.

A través del deslizamiento, los *semilandmarks* adquieren homología geométrica y pueden usarse en análisis estadísticos posteriores como si fuesen *landmarks* tradicionales.

#### 2.3.2.6. Visualización de los cambios. La función TPS (Thin-Plate-Spline)

La visualización de los cambios y las diferencias en la *forma* son objetivo principal y una de las mayores virtudes de los análisis basados en morfometría geométrica. Para llevar a cabo una visualización global de los cambios entre las distintas configuraciones de puntos de referencia, se lleva a cabo la aplicación

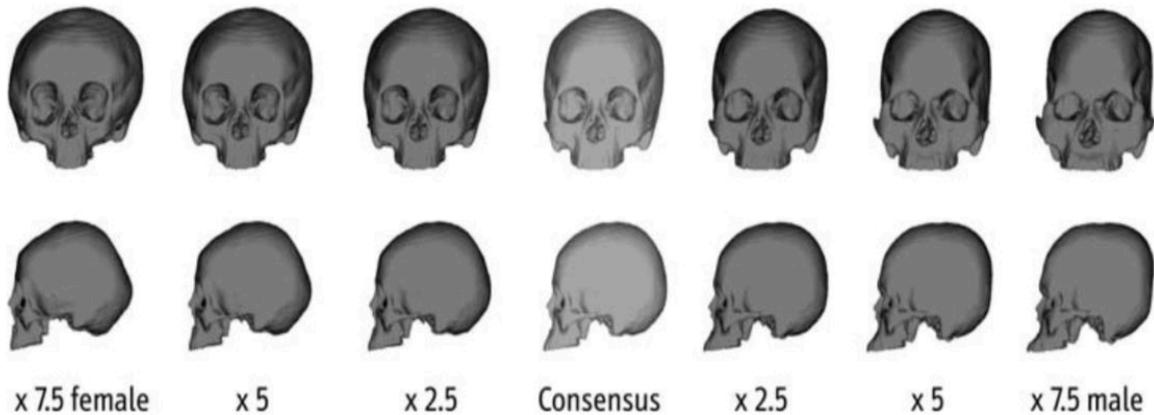
del método de deformación TPS (Thin-Plate-Spline). Este método realiza una función de interpolación, que modela las diferencias entre dos *formas* y que posteriormente permite el cálculo de las grillas de deformación (Bookstein, 1989, 1991). El TPS pretende resolver el problema planteado por D'Arcy Thompson (1942) de expresar las diferencias en la *forma* entre dos especímenes, en un espacio donde las coordenadas cartesianas de los mismos se encuentren superpuestas (Slice, 2005).

La función Thin Plate Spline (TPS) está basada en una representación metafórica donde los desplazamientos de *landmarks* se dan en una placa de metal de carácter delgado y uniforme, donde se minimiza la energía requerida para doblarla. Ésta se deformará en mayor medida si las *formas* comparadas son muy distintas.

Aunque la justificación de este método es complicada, el álgebra en el que se basa es relativamente sencillo (Slice, 2005). En primer lugar, los *landmarks* son alineados mediante el análisis generalizado de Procrustes (GPA), el cual posibilitará que los especímenes de estudio puedan ser comparados entre sí, tomando la distancia de Procrustes como unidad de medida. Posteriormente, este método toma una configuración de referencia (generalmente la forma consenso) y aquellas diferencias entre la localización de los *landmarks* a lo largo de cada eje de coordenadas ( $X$ ,  $Y$ , en el caso de estudios bidimensionales o  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , si el análisis es tridimensional) y las correspondientes a otro espécimen, son procesadas de manera individual. Para cada dimensión de coordenadas, las diferencias entre las dos configuraciones se tratan como desplazamientos en ángulo recto, fuera del plano de la configuración de referencia. Las ecuaciones derivadas de este proceso son posteriormente re combinadas para expresar la totalidad de la variación entre las dos configuraciones de *landmarks* (Slice, 2005).

Este método se traduce visualmente en las grillas de deformación, donde en cada coordenada de referencia, los *landmarks* correspondientes a los especímenes de estudio se localizarán más en los valores positivos o negativos de los ejes con respecto a la forma consenso.

Aunque la función TPS se ha empleado comúnmente para configuraciones bidimensionales, este método puede usarse para examinar la variación de la forma de un solo plano en una estructura tridimensional.



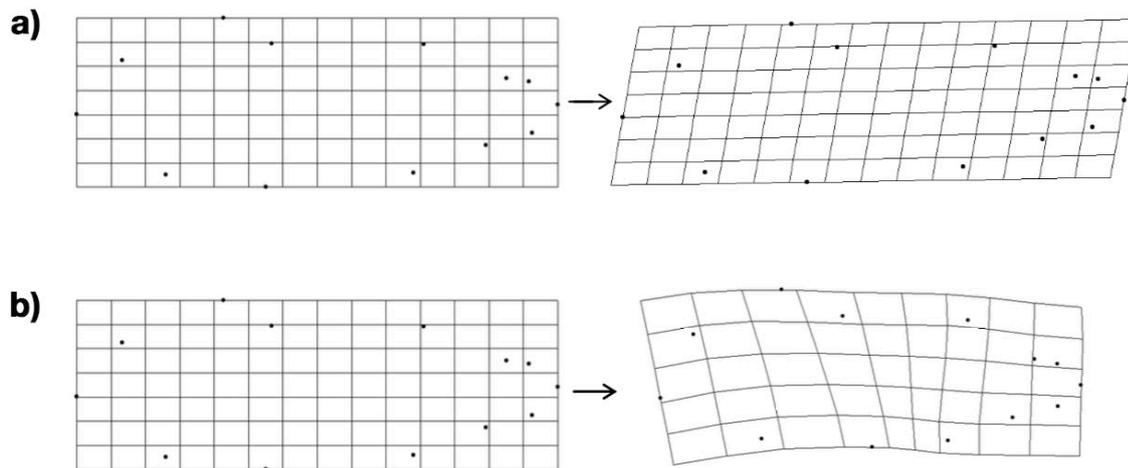
*Visualización de los cambios en el análisis del dimorfismo sexual en una muestra de 40 individuos adultos. Las diferencias en la forma se encuentran exageradas para facilitar su interpretación (Modificada de Gunz et al., 2004).*

#### 2.3.2.6.1. Deformación uniforme (Affine transformation) y no uniforme (Non-affine transformation)

Con el fin de describir de una manera precisa y sencilla la variación morfológica entre los especímenes de estudio, Bookstein (1991) propuso categorizar los resultados de la aplicación de los métodos de deformación en dos: la deformación uniforme (affine transformation) y la no uniforme (non-affine transformation):

- Deformación uniforme: Engloba a aquellas deformaciones que afectan en igual medida a todos los puntos de la *forma* que se está analizando. Cada conjunto de líneas, permanece paralelo posteriormente al proceso de deformación.

- Deformación no uniforme: Abarca las deformaciones que se producen en *landmarks* puntuales. Estas variaciones son de carácter no lineal, perdiendo así su paralelismo.



Grillas de deformación representando una transformación uniforme (a) y no uniforme (b)  
(Modificada de Van der Molen et al., 2007).

Lo más frecuente será encontrar ambos tipos de deformaciones en la mayoría de los análisis de variabilidad biológica.

Los parámetros que describen estas deformaciones son conocidos como *partial warp scores* y éstos son tratados como variables que sirven para realizar un análisis estadístico de la variación de la *forma* entre las distintas poblaciones (Adams et al., 2004).

### 2.3.2.7. *Principal Warps, Partial Warps y Relative Warps*

Como ya hemos definido anteriormente, el subespacio de la *forma* definido por la función TPS, puede descomponerse en un rango de componentes geoméricamente independientes que difieren en escala geométrica y, por tanto,

en energía de flexión. Además, pueden utilizarse para llevar a cabo análisis estadísticos con métodos de ordenación (Bookstein 1989, 1991). Según sus características, éstos se dividen en Principal Warps, Partial Warps y Relative Warps:

- **Principal Warps:** Son los *eigenvectores* de la matriz de la energía de torsión (*Bending Energy Matrix*) que resultan de la aplicación de la función TPS. Dicha matriz, codifica los aspectos locales de las diferencias en la *forma* de referencia y sus *eigenvectores* son combinaciones lineales de los desplazamientos ortogonales de los *landmarks*, pertenecientes a la configuración de referencia. Los *principal warps* se ordenan por la energía que es requerida para esos desplazamientos. Por tanto, el primer *principal warp* corresponde al que tenga el *eigenvector* más alto y así, la mayor energía de torsión (Slice, 2005).
- **Partial Warps:** Son parejas o tríos de *principal warps* que, al igual que en el caso de los *principal warps*, son obtenidos por *eigenanalysis* de la matriz de la energía de torsión y son ordenados de mayor a menor según ésta. Los *partial warps* se usan para codificar las diferencias entre especímenes individuales y la forma consenso. Sus valores están expresados en los ejes X e Y (2D) o X, Y, Z (3D). Hay tantos *partial warps* como dimensiones tiene el espacio de Kendall; por tanto, cada uno de éstos corresponde al valor perteneciente a cada individuo, para cada coordenada, y para cada eje de los *principal warps* (Slice, 2005). Estos valores en sí mismos pueden ser analizados como variables de *forma* de carácter dependiente con análisis de estadística multivariada.
- **Relative Warps:** Corresponden a los valores resultantes de un análisis bastante similar al de componentes principales, llamado *Relative Warps Analysis*. Estos componentes contienen las ponderaciones para las combinaciones lineales de las variables originales y pueden visualizarse como deformaciones de *forma* reales (Bookstein, 1991).

### **2.3.3. Análisis de la variación y covariación de la *forma* mediante métodos de ordenación y estadística multivariante**

Debido a la gran dimensionalidad de los datos que describen la *forma* de estudio, éstos pueden ser difíciles de visualizar e interpretar. Por ello, es necesario someter estos datos a diversos análisis que permitan al investigador resumir y evaluar estadísticamente la variación de la *forma*.

#### *2.3.3.1. Ordination methods*

Los dos métodos principales para describir la diversidad de la *forma* en una muestra son el análisis de componentes principales (*Principal Components Analysis* o *PCA*) y el análisis de variables canónicas (*Canonical Variables Analysis* o *CVA*). Estos métodos producen nuevos conjuntos de variables a partir de combinaciones lineales de las variables originales. Además, los resultados generados a partir de variables pueden ser utilizados para inspeccionar, de forma visual, patrones de cambio. Estas técnicas son usadas principalmente para simplificar esas descripciones, no para probar una hipótesis (Zelditch et al., 2004).

Estos análisis reciben el nombre de métodos de ordenación (*ordination methods*), debido a que los valores obtenidos en estos análisis ordenan a los individuos en función de nuevas variables.

Es de esperar que este orden revele nueva información sobre patrones en los datos, que sean relevantes a la hora de abordar cuestiones de interés biológico.

### 2.3.3.1.1. Análisis de Componentes Principales; Principal Components Analysis (PCA)

Las variables de *forma* producidas por la función TPS no son ni biológica ni estadísticamente independientes. Éstas describen la variación en regiones superpuestas de un organismo o estructura. Debido a esta superposición, las regiones están bajo la influencia del mismo proceso que produce la variación de la *forma* y, por tanto, es de esperar que las variables morfométricas (tanto geométricas como tradicionales) estén correlacionadas, ya que describen características del organismo que están en relación tanto funcionalmente como genéticamente (Zelditch et al., 2014). Este análisis de variación o covariación en la *forma* es, a menudo, difícil de interpretar.

El análisis de componentes principales (PCA) tiene como objetivo simplificar los patrones de variación de la *forma* para hacer más fácil su interpretación.

Este método de ordenación reduce la dimensionalidad del conjunto de datos, reemplazando las variables originales por otras nuevas que se basan en combinación lineal de las variables originales, y que, además, son independientes entre sí. Debido a que es un método de ordenación, cada uno de estos componentes principales define su posición de mayor a menor, según la cantidad de varianza que expliquen.

Una de las mayores virtudes del análisis de componentes principales es la representación mediante gráficos bidimensionales o tridimensionales, que permite evaluar la varianza de cada componente. El primer componente principal es alineado con el eje que representa la máxima varianza y el segundo, ortogonal al anterior, con la dirección que corresponde al siguiente con más varianza.

### 2.3.3.1.2. Análisis de Variables Canónicas; Canonical Variables Analysis (CVA)

El propósito principal del Análisis de Variables Canónicas (CVA) es simplificar la descripción de las diferencias en la forma entre grupos específicos. Este método es similar al PCA, ya que construye también un nuevo sistema de coordenadas. Los individuos vuelven a localizarse a lo largo de dos ejes, representado cada uno por una variable canónica. Estas variables son también combinaciones lineales de las variables originales y recíprocamente ortogonales (Webster y Sheets, 2010).

El análisis de variables canónicas asume la igualdad de varianzas (homocedastidad), así como una matriz de varianza-covarianza similar entre los grupos. Esto requiere que el tamaño total de individuos pertenecientes a cada grupo deba ser mayor que el número de variables a analizar (Webster y Sheets, 2010). Este requerimiento es especialmente difícil de cumplir en estudios con una muestra pequeña o que incluyan la localización de muchos *semilandmarks*. Por ello, previo al análisis de variables canónicas, se recurre a un análisis de componentes principales que reduzca la dimensionalidad de los datos, con el fin de obtener un número de componentes inferior al número de individuos del grupo con el menor tamaño muestral (López-Lázaro, 2015).

El valor de la lambda de Wilks ( $\lambda$ ) se utiliza para determinar cuántas variables canónicas son estadísticamente significativas y distintas en relación con el resto. Encontrar que una o más variables canónicas son significativas indica que, al menos uno de esos grupos puede ser diferenciado en relación a esas variables (Webster y Sheets, 2010).

La efectividad del análisis de variables canónicas en la asignación de los especímenes en los distintos grupos es determinada normalmente mediante el procedimiento de validación cruzada, mediante el cual, un pequeño número de especímenes (que suele estar comprendido entre el 1 y el 10% de la población) son omitidos del cálculo inicial de las variables canónicas y usado como un conjunto de prueba. Estos especímenes omitidos son tratados como

desconocidos, para posteriormente, ser asignados a un grupo en función de los resultados obtenidos (Webster y Sheets, 2010). Mediante la omisión y la reasignación de diferentes conjuntos de pruebas, se obtiene la tasa de asignación de validación cruzada, la cual refleja la eficacia con la que el análisis de variables canónicas va a asignar a los especímenes en los diferentes grupos.

El análisis de variables canónicas difiere del análisis de componentes principales en que el primero asume la posición de los especímenes en grupos predefinidos, para posteriormente analizar cómo el conjunto de datos puede ser usado para apoyar esa clasificación. Además, los ejes de las variables canónicas son escalados atendiendo a los patrones de variación intra-grupales y no son simples rotaciones del sistema de coordenadas original. Por último, también es necesario puntualizar que a diferencia del PCA, el CVA condensa y maximiza la descripción de las diferencias entre los grupos en relación a la varianza intra-grupal (Cooke y Terhune, 2015).

No obstante, debemos tener en cuenta que el análisis de variables canónicas no puede ser utilizado para comprobar una hipótesis. Para este propósito es necesario llevar a cabo distintas técnicas de estadística multivariada.

#### 2.3.3.2. *Asignación de significación estadística a la variación y covariación de la forma*

Los análisis a los que nos hemos referido previamente son fundamentales en el campo de la morfometría geométrica como métodos de ordenación y visualización de los patrones de variación y covariación de la *forma*. Pero como ya se ha indicado, éstos no pueden ser empleados para comprobar una hipótesis. Para lograr este objetivo, se hace necesaria la utilización de técnicas de estadística multivariada.

#### 2.3.3.2.1. Análisis multivariado de la varianza (MANOVA) y análisis de permutación

El análisis multivariado de la varianza (MANOVA) es utilizado para analizar la significación estadística de las diferencias de *forma* entre grupos, en relación a variables categóricas que serán consideradas de forma simultánea (Cooke y Tehurne, 2015). Este análisis puede ser aplicado tanto a variables de forma, proyectadas en el espacio tangente, como a los valores pertenecientes a los componentes principales.

Como ya se ha indicado anteriormente, las distancias de Procrustes son las unidades fundamentales de medida en el espacio de la *forma* de Kendall y, por tanto, ésta se puede utilizar para describir la distancia entre dos configuraciones de referencia en este espacio. En morfometría geométrica, el análisis múltiple de la varianza se lleva a cabo aplicando el test estadístico F-Goodall, que compara las distancias de Procrustes entre los valores medios de dos grupos a partir de la variación de cada grupo (Goodall, 1991). Este test representa el ratio de la variación explicada (inter-grupal) y no explicada (intra-grupal) de las distancias de Procrustes (Webster y Sheets, 2010)

Sin embargo, el test estadístico F-Goodall, refleja el grado de separación entre los grupos, sin tomar en cuenta la naturaleza de la distribución (isotrópica o no isotrópica) de los especímenes. Por tanto, asume que todos los grupos analizados tienen estructuras de covarianza similares, lo que podría llevar a suposiciones erróneas cuando los tamaños de muestra son pequeños o desiguales entre sí (Klingenberg y Monteiro, 2005).

Para evaluar la significación estadística, el test F-Goodall se combina con los enfoques de permutación. La mayoría de las pruebas paramétricas requieren de significación de una hipótesis dada y una distribución isotrópica de las variables. Las pruebas de aleatorización (*randomization tests*), por el contrario, están libres de estas restricciones, siempre y cuando los casos se muestreen independientemente (Mitterocker y Gunz, 2009). Este análisis, se utiliza para determinar el rango del valor de F mediante la asignación aleatoria de

especímenes a los distintos grupos. Este método de remuestreo aleatorio permite conocer la distribución de probabilidad de las variables y obtener estimaciones sobre el error estadístico.

#### 2.3.3.2.2. Análisis de regresión y el estudio de la Alometría

La regresión es el método estadístico más apropiado para examinar la relación entre las variables de forma y una o más variables de carácter continuo. Una de las funciones más importantes de los análisis de regresión en el campo de la morfometría geométrica es examinar, de manera aislada, la relación entre las variables de *forma* y variables como: 1) el tamaño del centroide (CS) para los estudios alométricos; 2) variables extrínsecas, como el tiempo o 3) el ambiente de desarrollo (Slice, 2007). Por lo cual, la regresión de la *forma* en el logaritmo del tamaño del *centroid size* es la medida óptima para calcular los factores alométricos y sus consecuencias (Mitteroecker et al. 2004). Klingenberg (1996) define como tres los tipos de alometría existentes:

1. **Estática:** También conocida como “*size allometry*”, corresponde a la variación entre individuos de la misma población y categorizados en el mismo grupo de edad.
2. **Ontogenética:** O también llamada “*growth allometry*”, se refiere a variación y covariación presentes en el individuo a lo largo de su desarrollo etario.
3. **Evolutiva:** Refleja los cambios en los patrones de variación y covariación morfológica a lo largo de las ramas de una filogenia.

Los análisis multivariados de regresión lineal sirven para detectar la presencia de los factores alométricos en las variables dependientes (predecibles) o independientes (predictoras). Tomando como estimador del tamaño el *centroid*

size, se realiza la suma de las distancias de Procrustes al cuadrado entre la forma de referencia y la estimada, para determinar qué parte de la variación de la forma no está afectada por el tamaño (Zelditch et al., 2004). El vector resultante del coeficiente de regresión puede visualizarse como deformación de la *forma* y su significación puede verificarse mediante el test de Goodall o gracias a un test de permutación.

También es posible llevar a cabo una aplicación de regresiones lineales utilizando como variable dependiente el primer factor canónico y como dependiente el estimador de tamaño, *centroid size*. Sin embargo, aunque este método tiene la ventaja de ofrecer una visualización entre las variables mediante una gráfica bivariada de dispersión, tiene el inconveniente de no poder recoger toda la variación del conjunto de datos, al contar solo con una parte de la totalidad de variables canónicas (Jaramillo, 2005).

#### 2.3.3.2.3. Análisis de Mínimos Cuadrados Parciales (Partial Least Squares)

El Análisis de Mínimos Cuadrados Parciales (Partial Least Squares o PLS) examina la relación entre dos o más “bloques” de datos (Rohlf, 2000; Bookstein, 2003). Sin embargo, al contrario que el análisis de regresión, este método cuenta con un beneficio adicional al no asumir que las variables estén correlacionadas entre sí.

El análisis de mínimos cuadrados parciales podría aplicarse en el estudio de la relación entre la *forma* y otra variable que comprenda, por ejemplo, factores del tipo biomecánicos, ecológicos o medidas de morfometría tradicional (Corti et al, 1996).

Además, este método puede utilizarse para sintetizar información sobre morfologías tridimensionales, cuya adquisición de datos haya sido obtenida mediante dos vistas bidimensionales (Zelditch et al., 2004).

Este análisis, al igual que el de componentes principales, reduce la dimensionalidad de los datos en ejes mutuamente ortogonales para producir combinaciones lineales de los conjuntos de datos originales, que maximizan y describen los patrones de covariación entre dos o más conjuntos de variables. La descomposición del valor singular (*Singular Value Decomposition* o *SVD*) describe los datos en términos de valores para cada espécimen a lo largo de estas combinaciones lineales (*singular axes*). Éstos se ordenan por pares y atendiendo al porcentaje de variación explicada (Bookstein, 2003; Zelditch et al., 2004).

La cantidad de varianza explicada mediante la pareja de combinaciones lineales (*singular axes*), el coeficiente de RV y el test de permutación, nos va a permitir asignar la significación estadística de los valores observados (Klingenberg, 2009; Cooke y Terhune, 2015;).

A diferencia del análisis de componentes principales, la aplicación de este método no implica la inversión de la matriz de variación-covariación. Además, ésta no se descompone mediante *eigenvalues*, sino que se utiliza el ya mencionado SVD para lograr este fin. Éste se utiliza para explicar la covariación entre los bloques en vez de dentro de un único bloque, como ocurre en el PCA (Slice, 2005).

## 2.4. EVALUACIÓN DEL ERROR EN MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

Como en toda investigación, la validez de los resultados obtenidos está condicionada por la fiabilidad en la adquisición de los mismos. Por ello, es necesario llevar a cabo una serie de metodologías que permitan cuantificar la precisión que ofrecen los análisis llevados a cabo por los investigadores.

En el campo de la morfometría, el error de medición (EM) se define como la desviación en las mediciones repetidas de un carácter determinado de un espécimen con respecto al valor real de su medición y en relación a su variabilidad

entre grupos (Bailey y Byrnes, 1990; Rabinovich, 1995). Este puede ser de dos tipos:

1. **Aleatorio:** Corresponde a una desviación de las medias en la varianza de los patrones estimados. Es introducido de manera aleatoria y distribuido en relación al verdadero valor de la cantidad medida y que puede originar falsos modelos. (Goodall y Mardia, 1993; Mardia y Dryden 1994, Gómez-Robles, 2010).
2. **Sistemático:** Introduce una parcialidad constante con respecto al valor verdadero de la medición mediante una desviación direccional y repetida de las medias y de carácter no aleatorio (Arnqvist y Martensson, 1998).

Estos errores podrían implicar una serie de problemas debido al hecho de que las desviaciones sistemáticas de los valores verdaderos podrían llevarnos a analizar aproximaciones falsas de la *forma* (Arnqvist y Martensson, 1998).

La precisión en la adquisición de los datos en las investigaciones que han utilizado la morfometría como herramienta de estudio, va a variar según una serie de factores que es necesario tener constantemente en cuenta: En primer lugar, (a) el error instrumental y su utilización para la toma de medidas; (b) el error en la metodología adecuada para la muestra de estudio; (c) la variabilidad intra-grupal existente entre los individuos que componen la muestra; (d) el error personal, relacionado con el conocimiento y la experiencia previa del investigador o los investigadores (Rabinovich, 1995).

Aunque pueda parecer que las técnicas basadas en morfometría geométrica, generalmente tienen menos problemas con respecto al error de medición que la morfometría tradicional, lo cierto es que en el proceso de adquisición de datos también estamos añadiendo oportunidad a la subjetividad y a la posibilidad de inducción de error.

Además, en la toma de datos y el posterior análisis morfogeométrico existen fuentes de error específicas de este tipo de metodologías:

1. El estado de conservación de la muestra podría dar lugar a una distorsión en la reproducción digital del espécimen que provocase a su vez ligeras variaciones en la toma de datos.
2. La translación de estructuras tridimensionales a un plano bidimensional provoca la reducción en la dimensionalidad de datos. Esto podría provocar un error en el alineamiento del espécimen en los ejes principales (x, y) al aplicar la reducción de la tercera dimensión (z) (Bookstein, 1991).
3. La distorsión óptica de la lente utilizada para la digitalización de las imágenes, ya sea mediante una cámara fotográfica, un microscopio electrónico o un escáner laser 3D de superficie (Rohlf, 1990).
4. Distorsión en la reproducción digital, la cual podría variar según el tipo de herramienta que se utilice para llevar a cabo el post-procesado y análisis de las imágenes (Rohlf, 1990).
5. La correcta selección en la definición y posterior localización de los *landmarks* y *semilandmarks*.
6. El incremento en la varianza fenotípica total con respecto a la *forma*, al introducirse un componente de ruido residual en nuestros datos que puede alterar la relación entre varianza “explicable” y “residual” (Bailey y Birnes; 1990, Lee, 1990; Marcus et al., 1996).

Al igual que puede ocurrir con cualquier otra técnica o metodología para la recogida de datos en una investigación científica, la morfometría geométrica debe ser evaluada con la finalidad de garantizar que pueda ser reproducible y repetible.

Sin embargo, en el campo de la morfometría geométrica, aún no se ha llegado a un consenso general entre los investigadores para la evaluación de la

fiabilidad en la adquisición de datos mediante la localización de *landmarks* y *semilandmarks*.

Numerosos investigadores han ofrecido diferentes metodologías para la evaluación del error mediante métodos de superposición de configuración de *landmarks*, como puede ser el análisis generalizado de Procrustes o mediante una comparativa en los valores del análisis de componentes principales, con el objetivo de reducir la dimensionalidad de los datos (O'Higgins y Jones, 1998); realizando un proceso repetido de localización de *landmarks* y *semilandmarks* con el objetivo de analizar sus coordenadas en bruto (von Cramon-Taubadel et al., 2007); mediante las distancias euclidianas que existen entre una configuración de *landmarks* y *semilandmarks* su centroide (Singleton, 2002).

Debido a esta falta de consenso, para llevar a cabo el análisis del error intra e inter-observador, en la presente investigación se ha optado por realizar un análisis de las de las coordenadas en bruto para valorar el posible error que pudiese existir en la localización de los *landmarks* y *semilandmarks*. Para ello, se ha utilizado el coeficiente de correlación intraclase, el cual estima el promedio de las correlaciones entre todas las posibles combinaciones entre los pares de observaciones disponibles (Shrout y Fleiss, 1979).

#### **2.4.1. El coeficiente de correlación intraclase (ICC)**

El coeficiente de correlación intraclase (ICC) se utiliza con frecuencia para evaluar el índice de concordancia para datos de carácter continuo.

Éste fue introducido originariamente por Fisher en 1954, como una reformulación del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$  de Pearson) y tiene como objetivo evaluar la variabilidad y la concordancia entre dos o más observaciones mediante la estimación del promedio de correlaciones entre todos los pares de observaciones disponibles (Fernández *et al.*, 2003)

Esta variabilidad en las mediciones se debe, fundamentalmente, a cuatro fuentes de error diferentes: (1) la experiencia previa de los observadores; (2) los instrumentos empleados (3) las diferencias entre los sujetos y (4) los residuos que representan la variación no explicada (Michael et al., 1981 the biostatistics of concordance).

Existen diferentes variantes a la hora de aplicar el coeficiente de correlación intraclase a un conjunto de datos. Dado que las diferencias entre estos tipos pueden implicar suposiciones distintas en sus cálculos y podrían dar lugar a diferentes interpretaciones, es importante conocer la aplicación correcta de cada variante del coeficiente de correlación intraclase.

La selección sobre el método correcto para analizar la fiabilidad en el estudio responde a tres aspectos que tienen como objetivo responder a las preguntas planteadas para la investigación (Koo y Li, 2016):

#### **A. Modelo:**

- 1) Unidireccional, efectos aleatorios: Cada sujeto es evaluado por un grupo de diferentes observadores que han sido seleccionados aleatoriamente de una población más amplia.
- 2) Bi direccional, efectos aleatorios: Cada uno de los sujetos son seleccionados de manera aleatoria de una población mayor de observadores con características similares. Éstos van a ser evaluados por el mismo número de observadores que a su vez hayan sido seleccionados al azar.
- 3) Bi direccional, efectos combinados: Este modelo solo se utiliza si los observadores seleccionados son los únicos interesantes para el estudio que se está llevando a cabo. Cada sujeto de una población, es evaluado por un grupo de observadores que representan a la totalidad de la población disponible.

**B. Tipo:**

- 1) Medidas únicas: Medidas tomadas por un único observador como base de la evaluación.
- 2) Medidas promedio: Promedio de las medidas tomadas por un número determinado de investigadores como base de la evaluación.

**C. Definición:**

- 1) Acuerdo de consistencia: Considera únicamente el error aleatorio.
- 2) Acuerdo absoluto: Considera el error aleatorio y el error sistemático.

La selección y combinación de estas opciones son las que dan lugar a los diferentes modelos matemáticos que se pueden aplicar al coeficiente de correlación intraclase.

**Fórmulas para calcular el coeficiente de correlación intraclase y equivalencia entre los modelos de Shrout y Fleiss (1979) y McGraw y Wong (1996).**

Mc Graw y Wong (1996)	Shrout y Fleiss (1979) <sup>a</sup>	Fórmula <sup>b</sup>
Unidireccional, efectos aleatorios, acuerdo absoluto, medida única	ICC (1,1) <sup>c</sup>	$\frac{MS_R - MS_W}{MS_R + (k + 1)MS_W}$
Bi direccional, efectos aleatorios, consistencia, medida única	-	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E}$
Bi direccional, efectos aleatorios, acuerdo absoluto, medida única	ICC (2,1)	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E + \frac{k}{n}(MS_C - MS_E)}$
Bi direccional, efectos mixtos, consistencia, medida única	ICC (3,1)	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E}$
Bi direccional, efectos mixtos, acuerdo absoluto, medida única	-	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E + \frac{k}{n}(MS_C - MS_E)}$
Unidireccional, efectos aleatorios, acuerdo absoluto, medidas promedio	ICC (1,k)	$\frac{MS_R - MS_W}{MS_R}$
Bi direccional, efectos aleatorios, consistencia, medidas promedio	-	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R}$
Bi direccional, efectos aleatorios, acuerdo absoluto, medidas promedio	ICC (2,k)	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + \frac{MS_C - MS_E}{n}}$
Bi direccional, efectos mixtos, consistencia, medidas promedio	ICC (3,k)	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R}$
Bi direccional, efectos mixtos, acuerdo absoluto, medidas promedio	-	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + \frac{MS_C - MS_E}{n}}$

<sup>a</sup>ICC = Coeficiente de correlación intraclase

<sup>b</sup>Las 6 formas definidas por Shrout y Fleiss (1979) son representadas mediante dos números entre paréntesis. El primer número hace referencia al modelo (1, 2 y 3) y el segundo número se refiere al tipo, el cual puede ser de medida única (1) o medida promedio (k).

<sup>c</sup> $MS_R$  = Cuadrados medios entre sujetos;  $MS_W$  = Cuadrados medios de la fuente residual de la varianza entre sujetos;  $MS_E$  = Cuadrados medios del error;  $MS_C$  = Cuadrados medios del estudio

(Modificado de Koo y Li, 2016).



# Capítulo 3

## Estimación del sexo en individuos infantiles





### 3.1. INTRODUCCIÓN A LA ESTIMACIÓN DEL SEXO EN ANTROPOLOGÍA FORENSE

Una de las principales metas, tanto en la práctica forense, como en la arqueológica ha sido la estimación sexual precisa y repetible a partir de restos óseos. Este proceso es esencial a la hora de llevar a cabo la reconstrucción del perfil biológico de un individuo y es posible debido a la expresión morfológica de las diferencias fenotípicas presentes entre los individuos de distinto sexo dentro de la misma especie. (Klepinger, 2006; Lewis, 2006).

Antes de seguir avanzando en el desarrollo de este capítulo, es necesario desde un punto de vista conceptual, hacer hincapié en la significación de los términos “sexo” y “género”, ya que éstos se han confundido más de una vez en la extensa literatura antropológica (White y Folkens, 2005). Estos términos en Antropología reciben una significación distinta, no son sinónimos y deben usarse indistintamente. El “género” conforma la identidad social y cultural del individuo, mientras que el “sexo” se refiere a la identidad biológica. Esta distinción es muy importante en aquellas investigaciones relacionadas con el campo de la Antropología (Walker et al., 1997)

Las investigaciones basadas en el estudio de la pelvis, los huesos largos y el cráneo han sido las que han arrojado mejores resultados y, por tanto, las que mejor aceptación han tenido dentro de la comunidad científica. Sí se dispone del esqueleto completo en buen estado de conservación, la combinación de estas técnicas puede llevar a un porcentaje de fiabilidad en la estimación del sexo

cercano al 100% (Krogman e Iscan, 1986). Es por ello, que la clasificación sexual en adultos mediante rasgos morfológicos, variables métricas y morfometría geométrica ofrece unos estándares de fiabilidad bastante aceptables, debido principalmente a la cantidad y a la calidad de las metodologías que se han desarrollado dentro del campo de la Antropología Física y Forense.

Sin embargo, para desarrollar una metodología fiable y repetible que permita una correcta estimación del sexo o la edad, es necesario disponer de una colección osteológica que disponga de información *antemortem* de cada uno de los individuos que van a componer la muestra. Esto, puede suponer un problema ya que, en comparación con otras disciplinas científicas, la Antropología Física cuenta un número más reducido de colecciones documentales disponibles tanto para la elaboración como para la validación de diferentes metodologías. Este número es mucho menor si tenemos en cuenta aquellas que disponen de individuos infantiles o juveniles.

La determinación del sexo, en individuos subadultos es esencial a la hora de diseñar nuevos métodos que investiguen la evolución en el desarrollo del esqueleto humano. Por tanto, las investigaciones y metodologías acerca del desarrollo biológico del individuo, los impactos de la salud en el crecimiento, comportamientos culturales o variabilidad en la dieta entre los distintos grupos poblacionales, no pueden verse limitadas por métodos imprecisos de determinación sexual (Mays, 2010).

En contraste con los bien establecidos y altamente precisos métodos para estimar el sexo en individuos adultos, la identificación del sexo en individuos subadultos es ampliamente reconocida en el campo de la Antropología como una tarea que presenta muchas limitaciones de carácter metodológico y que aún tiene que enfrentarse a una serie de desafíos para alcanzar unos estándares de fiabilidad aceptables para su uso en el ámbito forense (Wilson, 2017). A las limitaciones contempladas previamente, debemos añadir algunas específicas propias en este intervalo de edad en cuanto a la estimación sexual se refiere.

La aparición de los caracteres fisiológicos que presentan el mayor grado de dimorfismo sexual se produce principalmente como resultado de los cambios hormonales durante la pubertad. Por tanto, la ausencia de caracteres sexuales secundarios va a motivar que los patrones de variación antes de que el individuo alcance la madurez sexual no sean muy elevados (Lewis, 2006; Schaefer et al., 2009). Esto impide que las metodologías que se aplican a adultos, con unos resultados en la determinación sexual bastante aceptables, no puedan ser utilizadas para la identificación en subadultos. Además, otros indicadores que pueden ayudar a estimar el sexo en adultos como son las diferencias químicas en la composición del hueso, basadas en los niveles de calcio, fósforo, citrato y estroncio, tampoco van a ser observables en subadultos debido a que éstos no van a ponerse de manifiesto hasta que los individuos no hayan alcanzado la edad reproductiva (Lewis, 2006; Irurita 2016).

Además, debido a su relación con la determinación de otros aspectos primordiales como la edad, la estatura o la aparición de determinadas patologías, la estimación del sexo supone un aspecto de vital importancia tanto en el campo forense como en el ámbito bioarqueológico (Cardoso, 2008).

### 3.2. DESARROLLO HORMONAL EN INDIVIDUOS SUBADULTOS.

A la hora de diseñar métodos para la estimación del sexo en individuos cuyo desarrollo hormonal se encuentra en constante evolución, es necesario realizar un análisis minucioso del efecto que producen las hormonas que influyen en el crecimiento y desarrollo específico en cada sexo.

El crecimiento es un proceso que se encuentra regulado por el sistema endocrino. Una vez que el individuo nace, se produce una aceleración en el sistema de desarrollo del individuo para, gradualmente, estabilizarse alrededor de los 3 años de edad. Durante la pubertad, hay otro episodio de aceleración del crecimiento que vuelve a ralentizarse cuando se produce la fusión de los extremos epífisarios de los huesos largos (Ulijaszek et al., 1998). No obstante, el resultado

final del crecimiento de un individuo es el resultado de una interacción compleja entre factores genéticos y ambientales (Hanneberg, 1997).

La hormona del crecimiento o "*growth hormone*" (GH) es una proteína producida por la glándula hipófisis, localizada en la base del cerebro. Ésta circula por el torrente sanguíneo regulando el metabolismo y el crecimiento del individuo. Además de permitir el crecimiento de los niños en estatura (crecimiento lineal), esta hormona también es responsable de la división celular y la regeneración de tejidos, así como provocar la mineralización del tejido óseo y la retención de calcio en relación al desarrollo esquelético (Ulijaszek et al. 1998; Lampl et al. 2003; Baker, 2005). A su vez, esta hormona se encuentra regulada por los distintos niveles de hormonas sexuales presentes en el organismo (Ulijaszek et al. 1998; Baker, 2005).

Tras el nacimiento, la "GH" va a ser la principal reguladora del crecimiento humano, aunque su acción es de carácter indirecto, ya que su principal función es facilitar la secreción de otros factores del crecimiento como las somatomedinas o "*Insulin Growth Factors*" (IGF) (Holder y Preece, 1981). Estos factores, permiten la incorporación de sulfato al cartílago de crecimiento además de tener un efecto anabolizante y lipogénico.

Las hormonas sexuales son las responsables del desarrollo de los caracteres sexuales secundarios de los individuos. Al poco tiempo de producirse el momento del nacimiento, se produce una activación del eje que corresponde al hipotálamo, la glándula pituitaria y las glándulas gónadas (HPG). El eje (HPG) desempeña un papel crítico en el desarrollo y la regulación del sistema reproductivo e inmunológico. Las fluctuaciones que se producen en este eje causan los cambios en las hormonas producidas por cada glándula, produciendo varios efectos locales y sistémicos en el cuerpo humano. En este proceso, el hipotálamo segrega la hormona liberadora de gonadotropina (GnRH), que a su vez produce un aumento en la frecuencia de la hormona luteinizante (LH) y la hormona folículo-estimulante (FSH) (Mann y Fraser, 1996; Main et al., 2006). Esto provoca un incremento de las hormonas reproductivas como la testosterona, los

estrógenos, la inhibina B y la hormona anti-Mülleriana (Winter, 1982; Forest, 1990; Mann y Fraser, 1996; Lee, 1996; Main et al., 2006).

En varones, se produce un aumento de los niveles de testosterona presentes en el desarrollo fetal entre la décima y decimosexta semana de gestación, alcanzando cuotas similares a las que podemos encontrar en individuos adultos masculinos. Estos niveles vuelven a estabilizarse poco antes del nacimiento (Andersson et al., 1998; Sutter, 2003; Saunders, 2008). Esta secreción de testosterona, determina la diferenciación del sexo masculino (Weaver, 1980), lo que sugiere una alta presencia de hormonas masculinas en el desarrollo fetal y que, por lo tanto, podría evidenciar dimorfismo sexual en el esqueleto desde fases tempranas del desarrollo (Reynolds, 1945; Black, 1978; Moore y Persaud, 1998, 2004)

Durante la segunda semana del desarrollo post-natal vuelve a producirse un incremento hormonal tanto en individuos masculinos como en femeninos, alcanzando su máximo punto entre el segundo y cuarto mes después del nacimiento, para ir posteriormente reduciéndose hasta estabilizarse sus niveles alrededor del primer año de vida (Forest, 1990; Saunders, 2008). Los niveles hormonales entre individuos de diferente sexo se mantendrán similares y estables durante toda la infancia hasta su reactivación durante la pubertad (Mann y Fraser, 1996; Lunn et al., 1997). Esta activación hormonal temprana, parece ser importante en el desarrollo de los caracteres sexuales secundarios en los primeros meses de la vida post-natal (Lunn et al., 1997; Andersson et al., 1998).

No obstante, aunque se haya podido demostrar que la secreción de testosterona producida por las gónadas sexuales fetales es determinante a la hora de configurar el sexo del individuo y lleva por tanto a la manifestación de algunos rasgos sexuales discriminantes en el esqueleto y la dentición juvenil (Reynolds, 1945; Black, 1978; Moore y Persaud, 2016), es importante considerar que esa diferenciación podría estar condicionada por factores de estrés ambiental (Pucciarelli et al., 1996), los cuales podrían estar llevando a cabo una intervención temprana desde el desarrollo fetal (García Mancuso, 2012).

### 3.3. ESTIMACIÓN SEXUAL A PARTIR DE LA PELVIS EN INDIVIDUOS ADULTOS Y SUBADULTOS

La morfología de las estructuras que conforman el coxal femenino, así como la manera en la que éstas se articulan, es el resultado del equilibrio adaptativo que se produce entre las necesidades biomecánicas que impone el bipedalismo (el mantenimiento de la postura erecta y el equilibrio) y la función biológica del embarazo y el parto (Scheuer y Black, 2004; Bruzek y Murail 2006). Por este motivo, la pelvis es la región del esqueleto humano que presenta el mayor grado de dimorfismo sexual. Esto es provocado en gran medida por el grado de amplitud de la estructura interna de la cavidad pélvica en la formación del canal del parto, lo cual es imprescindible para la gestación y posterior nacimiento de un feto a término (García Mancuso, 2012).

Las diferencias sexuales entre los coxales masculino y femenino han sido objeto de estudio desde hace siglos. Una de las primeras investigaciones en abordar esta cuestión data del siglo XVI. Mateo Realdo Colombo, cirujano y profesor de Anatomía en la Universidad de Padua, sugirió que existían diferencias sexuales notables y observables en la morfología de la pelvis humana (Rissech, 2001).

Posteriormente, empezaron a surgir nuevas investigaciones que no solo afirmaban y validaban las diferencias sexuales en la morfología del pubis y el ilion, sino que también se ponían de manifiesto la importancia de otras regiones del esqueleto como el cráneo y la mandíbula para la correcta identificación del sexo en individuos adultos.

La elección de estos elementos para llevar a cabo la determinación del sexo no es casual. Debido a las complicaciones que puede presentar la variación individual intra-sexual entre los individuos a la hora de elaborar una metodología, los investigadores que han analizado los patrones discriminantes humanos, han comprobado que los mejores resultados se daban al utilizar aquellos elementos

del esqueleto en los que las diferencias sexuales específicas eran más acusadas, como en el caso del cráneo, la mandíbula y el coxal (White y Folkens, 2005).

Investigaciones posteriores que basaron sus estudios en el análisis de la pelvis, demostraron que con ella se puede alcanzar un porcentaje de determinación correcta del sexo con una exactitud de hasta el 98%, lo cual ratifica la importancia de la pelvis como la región que presenta mayor índice de dimorfismo sexual (Washburn, 1949; Genoves, 1959; Phenice 1969; Kelley, 1979). Estos métodos se centran en el análisis de las zonas biológicamente relacionadas con la función reproductora como son la escotadura ciática, la rama isquiopúbica y aquellos elementos óseos relacionados con el parto (Bruzek, 1992).

La mayoría de estos métodos para la determinación del sexo están basados en la evaluación visual de los patrones de variación biológica entre los sexos, los cuales no son difíciles de evaluar para un observador experimentado (Walker, 2008). Los métodos cuantitativos han sido desarrollados con el objetivo de reducir el grado de subjetividad del investigador con el que cuenta la metodología cualitativa. Sin embargo, estos resultados han mostrado en algunas ocasiones limitaciones debido a la dificultad que supone describir milimétricamente lo que en un principio puede ser evidente de manera visual (Walker, 2008). Además, numerosos investigadores han dado cuenta de que existe cierta variación en los patrones de variación dimórfica entre distintas poblaciones. No obstante, siempre y cuando los elementos óseos cumplan unos requisitos de conservación aceptables, esta variación no parece haber sido un factor que dificultara la correcta determinación sexual (Boucher, 1957; Bruzek, 2002; Patriquin et al. 2003, 2005; Garvin et al 2014).

### **3.3.1. Estimación del sexo a partir de la pelvis en individuos adultos**

Como ya hemos definido anteriormente, la identificación del sexo en adultos no presenta un gran problema, siempre y cuando dispongamos del esqueleto completo para su análisis o, en su defecto, cuando los elementos óseos

con los que contemos se encuentren en buen estado de conservación. Además, gracias a las diferencias morfológicas entre hombres y mujeres que presenta la pelvis humana, cuando contemos con ésta para el análisis, la determinación del sexo puede efectuarse con una fiabilidad cercana al 98% (Alemán et al., 2013).

Sin embargo, tanto en el contexto arqueológico como en el forense, éstos no siempre van a presentar unas condiciones de conservación óptimas que puedan mostrar de una manera clara y eficiente los rasgos que permitan la correcta discriminación sexual. Por tanto, se han desarrollado muchos métodos a partir de diferentes regiones aisladas o fragmentadas del esqueleto humano adulto, tanto mediante metodologías de carácter cuantitativo como cualitativo.

#### 3.3.1.1. *Método de Washburn (1948)*

Desarrollado por Washburn en el año 1948, ha sido considerado uno de los pioneros en establecer una metodología científica capaz de sexar pelvis masculinas y femeninas. Este estudio se caracterizó por la investigación exhaustiva de los patrones discriminantes de la pelvis en adultos. Para su desarrollo, se utilizó la colección de material osteológico identificado “*Hamann-Todd*”, la cual permanece en el Museo de Historia Natural de Cleveland. En su investigación, Washburn encontró diferencias sexuales y poblacionales entre los individuos analizados, describiendo un alargamiento del cuerpo y rama púbicos en dirección medio-lateral, en individuos femeninos. Este estiramiento implica el incremento en la amplitud del ángulo subpúbico, el cual es más ancho en mujeres, mientras que es mucho más estrecho en hombres (Washburn, 1948).

La fiabilidad de la determinación del sexo al analizar el índice isquio-púbico se encuentra por encima del 90%. Sin embargo, ésta podía llegar casi al 100% al añadir la escotadura ciática en el análisis.

### 3.3.1.2. Método de Phenice (1969)

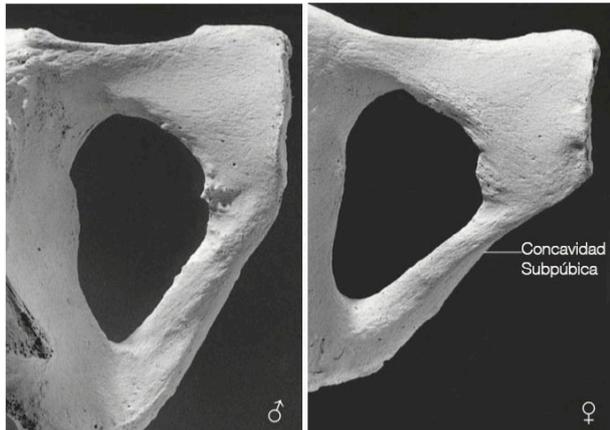
El método desarrollado por Phenice (1969) es quizás uno de los más populares y utilizados en el campo de la Antropología Física y Forense. Su trabajo, “*A newly developed visual method of sexing the os pubis*” propuso el método más preciso conocido hasta la fecha para la determinación del sexo en esqueletos adultos (Blake). Antes de la publicación de este trabajo, este proceso estaba ligado a los métodos tradicionales de asignación del sexo mediante los caracteres morfológicos de la pelvis. Por lo cual, el porcentaje de éxito al clasificar un hueso como hombre o mujer, dependía en gran parte de la subjetividad y la experiencia previa del investigador en la utilización de esos métodos.

El método de Phenice, cambió esa situación, permitiendo una determinación del sexo mucho más rápida y precisa, siempre y cuando la región del pubis estuviese intacta (White y Folkens, 2005). Phenice, analizó de manera visual tres elementos del pubis:

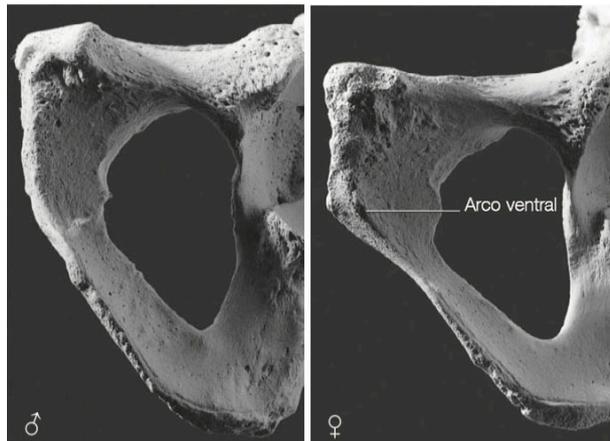
- Arco ventral en la superficie del pubis: Presente →Femenino; Ausente - →Masculino.
- Concavidad subpúbica: Presente →Femenino; Ausente → Masculino.
- Aspecto medial de la rama isquiopúbica: Cresta medial presente → Femenino; Cresta medial ausente → Masculino.

Este método basado en una muestra de 275 individuos, alcanzó unos porcentajes de éxito de hasta el 96%. Sin embargo, estudios posteriores han mostrado resultados menos optimistas que los obtenidos por Phenice. Por ejemplo, Sutherland y Suchey (1991) utilizaron esta técnica en una muestra de 1284 pubis. Aunque la evaluación de la presencia del arco ventral si alcanzó un alto porcentaje de éxito, similar al de Phenice (96%), en relación al aspecto medial de la rama isquiopúbica únicamente un 70% de los individuos pudo ser clasificado correctamente. Lowell (1989) apunta en su investigación, que el

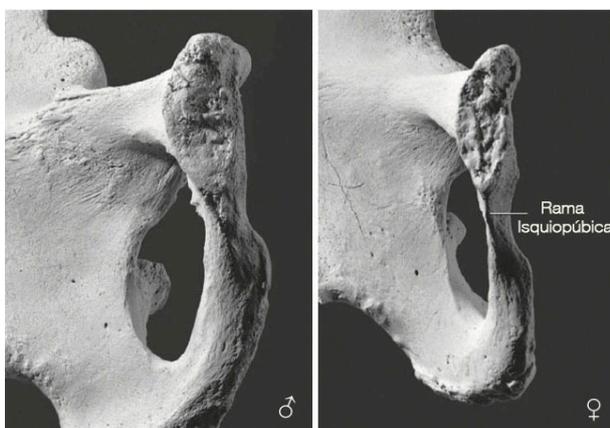
porcentaje de éxito del método de Phenice, puede verse reducido para aquellos individuos que se encuentren en edades más avanzadas. Además, trabajos posteriores como el de McLaughlin y Bruce (1990) ponen de manifiesto la utilidad de este método en muestras de origen europeo.



*Método de estimación del sexo para individuos subadultos de Phenice, 1969; Concavidad subpúbica (Modificada de White y Folkens, 2005).*



*Método de estimación del sexo para individuos subadultos de Phenice, 1969; Arco ventral (Modificada de White y Folkens, 2005).*



*Método de estimación del sexo para individuos subadultos de Phenice, 1969; Rama isquiopública (Modificada de White y Folkens, 2005).*

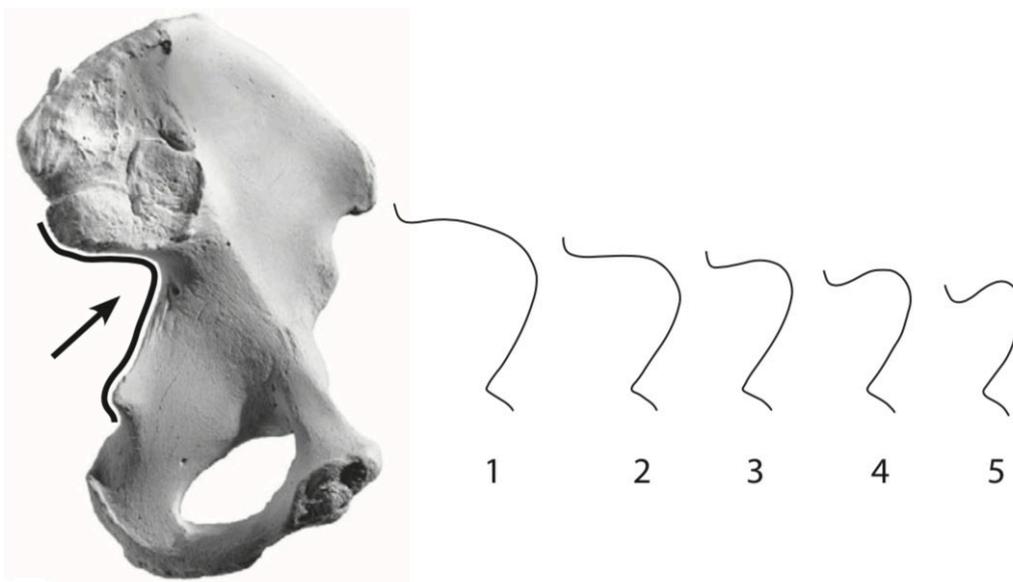
### 3.3.1.3. Método de Ferembach (1980)

El método de Ferembach, se utiliza para determinar el sexo a partir de la observación directa de 11 caracteres sexualmente dimórficos y mediante la valoración de éstos en una escala comprendida entre el valor -2 y +2 y donde un extremo está relacionado con los individuos hiperfemeninos y el otro con los hipermasculinos.

### 3.3.1.4. Método de Buikstra y Ubelaker (1994)

Buikstra y Ubelaker publicaron en 1994 unos esquemas estandarizados para la determinación del sexo mediante la pelvis (*“Ubelaker’s Standard’s volume, 1994”*). Éstos estaban basados en las diferencias existentes en la morfología de la escotadura ciática entre hombres y mujeres. Ésta suele mostrarse más amplia en mujeres mientras que en hombres es más estrecha y pronunciada. Sin embargo, estas diferencias no son tan fiables como aquellas presentes en la región subpúbica (White y Folkens, 2005).

Para obtener los mejores resultados hay que sostener el coxal en la misma posición que nos muestra el gráfico y realizar un ejercicio de comparación entre el hueso y el esquema hasta determinar cuál es el que presenta una morfología más similar (Buikstra y Ubelaker, 1994; White y Folkens, 2005).



*Método para la estimación del sexo mediante la morfología de la escotadura ciática de Buikstra y Ubelaker, 1994 (Modificada de White y Folkens, 2005).*

### 3.3.1.5. Método de Bruzek (1996, 2002)

Dos nuevos métodos fueron propuestos por Jaroslav Bruzek y colaboradores en 1996 y 2002. En el primero de ellos, el autor se centra en el análisis de la superficie auricular, evaluando tres rasgos de la misma: El ángulo en la curvatura de la superficie auricular, la depresión y su elevación.

El método elaborado en 2002 extiende el análisis a la evaluación del coxal en su conjunto, evaluando principalmente cinco caracteres: Morfología de la superficie preauricular (evaluando el aspecto de la región, la presencia de cavidades y la presencia o no del tubérculo piriforme), la amplitud y profundidad de la escotadura ciática mayor, la articulación sacroiliaca, la pelvis inferior y la proporción isquiopúbica.

Este método cuenta con unos porcentajes de casi el 98% en cuanto a la correcta determinación del sexo. Además, como analizaremos posteriormente, muchos de los estudios llevados a cabo en individuos subadultos, han tomado

los caracteres morfológicos propuestos por Bruzek y colaboradores para realizar validaciones del método en fases tempranas del desarrollo humano (Bruzek et al., 1996; Bruzek, 2002)

### **3.3.2. Estimación del sexo en individuos subadultos**

Como ya se ha puesto de manifiesto a lo largo de este trabajo, la estimación del sexo en individuos que aún no han alcanzado la madurez sexual ha sido y sigue siendo uno de los mayores retos que presenta la Antropología Física y la Antropología Forense.

A pesar de las limitaciones que conlleva el estudio de los individuos subadultos, esto no ha impedido el desarrollo de numerosas investigaciones que, siguiendo las precisas y fiables metodologías de estimación sexual en adultos, analicen los patrones de variación dimórfica entre la morfología de la pelvis, algunos elementos del cráneo y de la mandíbula en individuos fetales y juveniles. Sin embargo, debido a la calidad de la muestra, metodologías empleadas, el objetivo de la correcta determinación del sexo aún se encuentra en proceso de consecución.

#### *3.3.2.1. Primeras investigaciones para la estimación del sexo en individuos subadultos*

Aunque la mandíbula ha sido estudiada con buenos resultados (Loth y Henneberg, 1996), la observación completa de sus patrones de variación exige que para llevar a cabo el análisis de las dos hemimandíbulas (derecha e izquierda) éstas se encuentren fusionadas (García Mancuso, 2012), aunque esto no ocurre hasta alrededor del primer año de vida postnatal (Scheuer y Black, 2004). Además, debido a su estructura y morfología, la mandíbula aún en proceso de desarrollo presenta un índice de conservación muy bajo, y rara vez puede encontrarse en perfecto estado para su análisis (Loth y Henneberg, 1996). La

pelvis, por el contrario, y especialmente el ilion presenta una morfología que favorece su conservación, aún en condiciones adversas (Wilson, 2008).

Por ello, el hueso ílaco ha sido el elemento del esqueleto que mayor atención ha recibido en el intento de llevar a cabo una metodología fiable que pueda estimar el sexo en individuos subadultos, ya sea mediante la utilización de patrones cuantitativos, cualitativos o morfometría geométrica. Esto se debe en parte, a que prácticamente todos los elementos y características del hueso adulto se encuentran presentes desde el nacimiento gracias a su temprana osificación durante el proceso del desarrollo fetal.

Los estudios de los patrones de variación morfológica del hueso innominado entre individuos infantiles incluyen la amplitud y el ángulo de la escotadura ciática, la curvatura de la cresta ílaca, el criterio del arco y el borde de la superficie auricular, así como el ángulo subpúbico del pubis y la longitud del isquion (Blake, 2011)

Aunque se han llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones atendiendo a los patrones de variación morfológica de la pelvis subadulta, estos resultados han sido bastante ambiguos (Thomson 1899; Reynolds, 1945, 1947; Washburn 1948; Boucher 1957; Weaver, 1980; Schutkowski 1993; Holcomb y Konigsberg, 1995; Cardoso, 2008; Wilson et al., 2008). Esta variedad en los resultados deriva de la diferencia en los distintos enfoques que se han utilizado a la hora de elaborar la metodología de la investigación y de la evaluación de características subjetivas donde la experiencia previa del investigador puede influir en los resultados (Blake, 2011). Además, esta problemática puede verse agravada por el hecho de que las muestras de subadultos con edad y sexo conocidos son raras y generalmente compuestas por un número de individuos muy reducido, que imposibilita la elaboración de una metodología apta para su utilización.

La mayoría de estas muestras eran muy pequeñas y no se realizaron comparaciones entre distintas poblaciones. Además, varios investigadores experimentaron dificultades para replicar los resultados de estudios previos sobre

diferentes muestras ancestrales (Sutter 2003; Cardoso y Saunders 2008; Vlæk et al., 2008).

### 3.3.2.2. *Método de Boucher (1955 /1957)*

El primer trabajo importante que abordó la búsqueda de los patrones de variación discriminantes de la pelvis en individuos juveniles fue el llevado a cabo en individuos fetales de origen británico y americano por B. Boucher (1955-1957). Además, su investigación ha marcado y definido en gran medida aquellas desarrolladas posteriormente por numerosos autores (García Mancuso, 2012). La autora, analizó una serie de índices que definían la amplitud y profundidad de la escotadura ciática y el ángulo sub-púbico.

La investigación mostró diferencias significativas en las muestras fetales analizadas, indicando un índice de escotadura ciática considerablemente mayor en los individuos femeninos pertenecientes las colecciones tanto británica como negroide-americana (Boucher, 1957). Sin embargo, esta característica morfológica no se repitió en la colección blanca-americana.

A pesar de estas diferencias poblacionales, Boucher (1957) sugiere que los andrógenos son directamente responsables del desarrollo de los caracteres sexuales masculinos y que, desde etapas tempranas del desarrollo individual, éstas son capaces de crear diferencias sexuales en el esqueleto fetal (Weaver, 1980).

### 3.3.2.3. *Método de Fazekas y Kósa (1978)*

En 1978, Fazekas y Kósa publicaron el trabajo "*Forensic Fetal Osteology*". Es el resultado del análisis exhaustivo de la colección de individuos no natos "Fazekas y Kósa", perteneciente al Departamento de Medicina Forense de la Universidad de Medicina de Szeged, Hungría. La colección está compuesta por

138 individuos, 71 pertenecientes al sexo masculino y 67 al femenino, y que abarcan edades de gestación desde el tercer mes lunar hasta el décimo (Fazekas y Kosa, 1978).

La dura labor que llevaron a cabo en la recolección de los distintos elementos del esqueleto, con el objetivo de que éstos estuviesen completos para su análisis, es bastante importante debido a las características osteológicas que presentan los individuos nonatos en cuanto al tamaño y fragilidad de los huesos.

Este trabajo se basa en la evaluación de casi 90 medidas llevadas a cabo en el esqueleto subadulto, gracias a las cuales se pudo ofrecer una metodología para la estimación de la edad y el sexo en individuos desde etapas tempranas del desarrollo fetal.

En cuanto a la estimación sexual, sus investigaciones indicaron diferencias significativas en la amplitud y profundidad de la escotadura ciática, siendo ésta más ancha en individuos femeninos y más profunda en masculinos (Fazekas y Kosa, 1978), consiguiendo una clasificación correcta de entre el 70-80% de los especímenes evaluados.

Para llevar a cabo su análisis, los autores siguieron la técnica propuesta por Boucher (1957), realizando una observación directa del hueso iliaco en posición dorsal.

Este trabajo supuso uno de los mayores avances en el campo de la Antropología Forense, debido a la complejidad y calidad de la metodología y la muestra empleada. Sin embargo, la aplicación de este método es únicamente válida en individuos que no han terminado su desarrollo fetal, lo cual dificulta la comparación con otras colecciones, debido a la escasez de las mismas que cuenten con suficientes especímenes comprendidos en ese intervalo de edad.

#### 3.3.2.4. *Método de Weaver (1980)*

La técnica desarrollada por Weaver (1980) tiene como objetivo analizar el dimorfismo sexual en el ilion basándose en seis variables métricas y una de carácter cualitativo y morfológico. Para ello, utilizó los individuos provenientes de la Colección osteológica de individuos fetales depositada en el instituto Smithsonian, en la que se evaluaron los siguientes elementos:

1. El ilion se coloca directamente sobre una plancha milimétrica y orientado de tal manera que el borde posterior de la escotadura ciática mayor esté en la base de los ejes de la plancha. Ambos bordes, anterior y posterior de la escotadura ciática se sitúan a lo largo del eje horizontal.
  - a. Anchura de la escotadura ciática mayor: Medida tomada horizontalmente entre los extremos posterior y anterior de la escotadura ciática.
  - b. Profundidad de la escotadura ciática: El punto de mayor profundidad perpendicular al eje horizontal trazado previamente en la escotadura ciática.
  - c. Longitud iliaca anterior: La extensión anterior máxima del ilion medida desde el origen de los ejes.
  - d. Longitud iliaca posterior: La extensión posterior máxima del ilion medida desde el origen de los ejes.
2. Posteriormente, el ilion se coloca sobre la plancha de modo que el punto más posterior de la superficie auricular y de la región acetabular descansen sobre el eje horizontal.

- a. Altura iliaca: La altura máxima tomada perpendicularmente al eje horizontal.
  - b. Anchura iliaca: La anchura máxima tomada paralelamente al eje horizontal.
3. Finalmente, se evalúa mediante observación directa si la superficie auricular se encuentra elevada a lo largo de su longitud y de los bordes anterior y posterior.

Las diferencias entre individuos masculinos y femeninos atendiendo a las variables métricas tomadas fueron significativas. Únicamente la anchura ilíaca mostró resultados estadísticamente significantes. Por otro lado, las basadas en análisis no métricos alcanzaron resultados notables, mejor en niños (91.7% en individuos fetales; 73.1% en neonatos; 90.6% en 6 meses de edad) que en niñas (75%, 54.2% y 43.5% en individuos fetales, neonatos y 6 meses de edad respectivamente).

Sin embargo, los intentos de aplicar estos criterios a niños mayores de 6 años no han mostrado resultados muy exitosos debido a la dificultad que supone la recolección de las medidas propuestas por Weaver (Hunt, 1990; Mittler y Sheridan, 1992).

Hunt (1990) revisó el estudio llevado a cabo por Weaver utilizando 275 ilion pertenecientes a tres muestras americanas distintas. El autor no fue capaz de encontrar ninguna correlación con respecto al sexo. Además, desde este estudio se sugiere, que las diferencias en la elevación de la superficie auricular estarían más relacionadas con la edad que con el sexo.

Posteriormente, Mittler y Sheridan (1992), evaluaron también la elevación de la superficie auricular en una muestra de restos esqueléticos momificados procedentes de una colección medieval de Nubia. De una muestra de 58 individuos con edades comprendidas entre el nacimiento y los 18 años, los autores consiguieron estimar el sexo de aproximadamente el 85% de los

individuos masculinos, mientras que en los femeninos solo alcanzaron el 58% de fiabilidad. Además, el estudio da cuenta del incremento en el porcentaje de acierto a partir de los 9 años de edad, sugiriendo que, esta región del ilion, presenta una morfología plana durante la infancia temprana, y que no se muestra elevada hasta alcanzar la infancia tardía (Mittler y Sheridan, 1992).

### 3.3.2.5. Método de Schutkowski (1987)

Siguiendo el trabajo propuesto por Fazekas y Kósa (1978), H. Schutkowski (1987) elaboró un método que permite también la correcta determinación del sexo en individuos en el desarrollo fetal. Para ello, Schutkowski analizó el hueso ilíaco en cuanto a su anchura y longitud y, por otro lado, en cuanto a la morfología de la escotadura ciática. El autor, establece que la escotadura ciática es la parte analizada que mejor discrimina entre sexos, obteniendo un porcentaje de acierto más alto al ser combinado con el índice ilíaco (anchura y longitud máxima).

Sin embargo, uno de los métodos más conocidos y utilizados en la estimación del sexo en individuos subadultos es el realizado posteriormente en el año 1993. Sobre una muestra de 61 individuos (37 masculinos y 24 femeninos) provenientes de la colección de la Iglesia de Spitafield's en Londres y con edades comprendidas entre los 0 y 11 años, Schutkowski propuso una metodología de carácter cualitativo, que analiza la variación sexual en el ilion infantil. Para ello, se lleva a cabo el análisis de cuatro áreas determinadas:

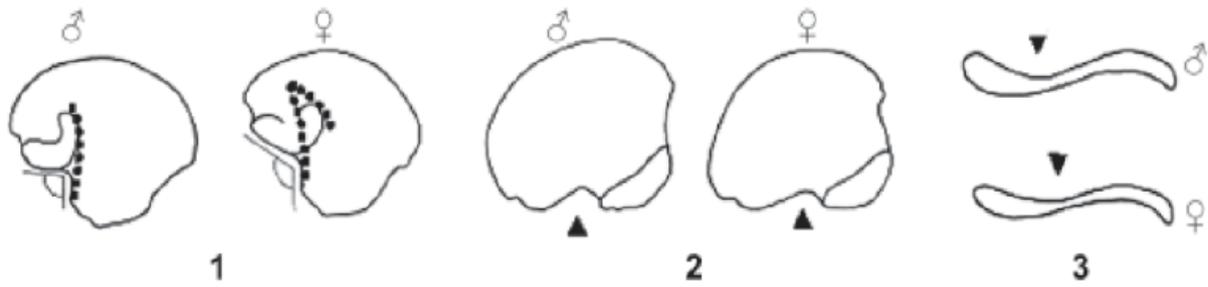
- El ángulo de la escotadura ciática mayor. Visto el hueso desde su aspecto ventral y posicionándolo de tal manera, que la superficie auricular quede alineada verticalmente con el borde anterior de la escotadura ciática. Ésta mostraría un ángulo de inclinación cercano o similar a  $90^\circ$  en el caso de los individuos masculinos y superior a  $90^\circ$  en el caso de los femeninos.
- Criterio del arco: También desde una vista ventral, este parámetro se analiza trazando una línea verticalmente desde el lado inferior de la

escotadura ciática mayor que cruza la superficie auricular en niñas o pasa sobre el borde anterior en niños.

- Profundidad de la escotadura ciática mayor: En este caso, el ilion se posiciona con la espina iliaca posterior y el borde dorsal de la región dorsal apoyados sobre una superficie plana. La escotadura ciática mayor, mostraría una mayor profundidad en el caso de los niños que en las niñas.
- Curvatura de la cresta ilíaca: Vista desde la parte superior del ilion con la superficie dorsal alineada horizontalmente, la cresta iliaca muestra una “S” pronunciada en niños y menos sinuosa en niñas.

A partir del análisis de estos patrones, este estudio arroja resultados satisfactorios de clasificación correcta, que van desde un máximo del 95% para la escotadura ciática atribuida a los individuos masculinos, a un bajo 62% en la atribución a las niñas de la cresta ilíaca con la forma “S” menos sinuosa. La validez del trabajo de Schutkowski ha sido revisada por numerosos estudios que han comprobado la validez dimórfica de estos caracteres, especialmente la escotadura ciática y la superficie auricular (Sutter, 2003; Gonzalez, 2009; Blake, 2011)

Desafortunadamente, investigaciones llevadas a cabo posteriormente han reportado valores de asignación inferiores a los alcanzados en el estudio de Schutkowski (González, 2006; Wilson et al., 2008; Irurita y Alemán, 2016). Además, algunos autores han indicado la problemática de extrapolar la metodología y sus resultados a otras poblaciones (Loth y Henneberg, 2001).



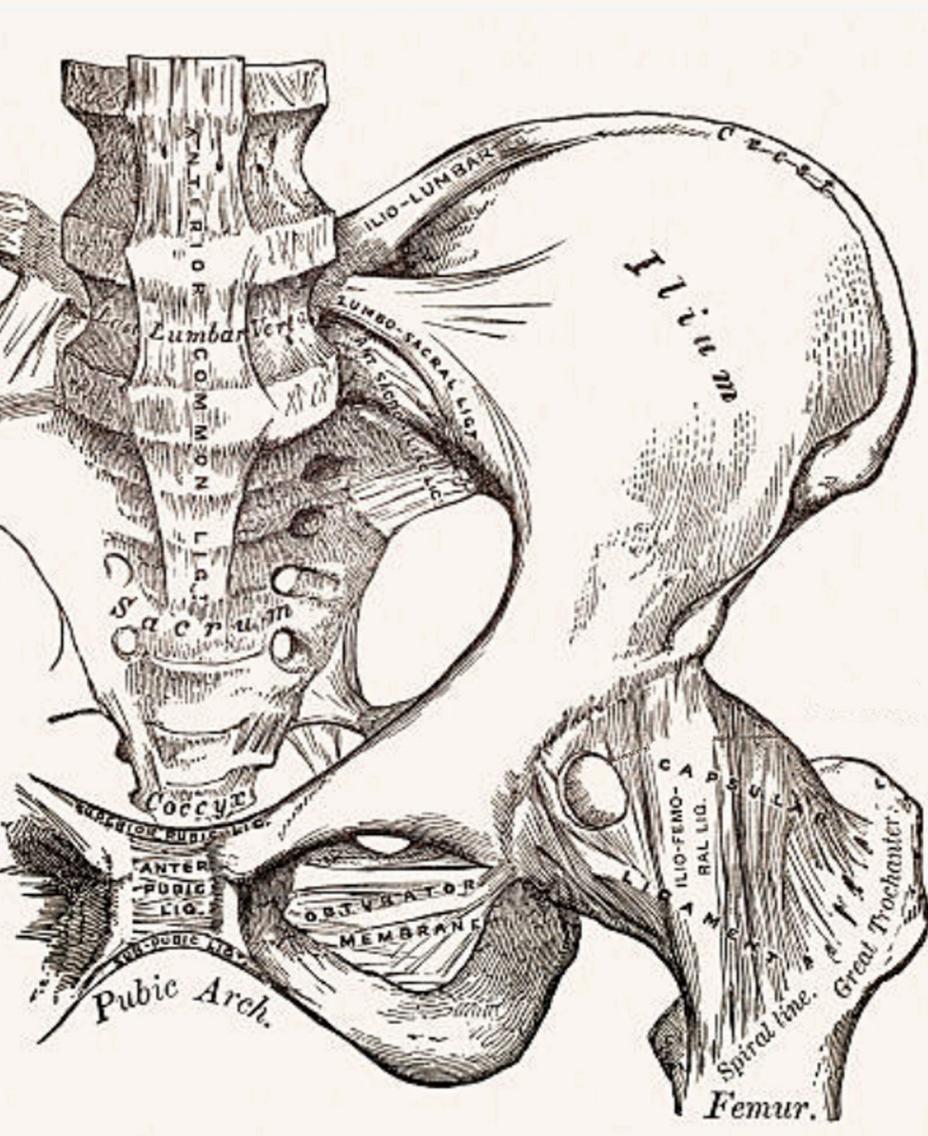
*Método para estimar el sexo en individuos subadultos mediante la pelvis propuesto por Schutkowski, 1987: (1) Ángulo de la escotadura ciática y criterio del arco; (2) Profundidad de la escotadura ciática; (3) Curvatura de la cresta ilíaca (Tomada de Schutkowski, 1987).*

A pesar de estas limitaciones, el método propuesto por Schutkowski sigue siendo ampliamente utilizado para diagnosticar el sexo en individuos en periodo fetal, perinatal y juvenil y continúa siendo la única técnica basada en el análisis de rasgos cualitativos mencionada en los manuales de Antropología Forense (Krenzer, 2006).



# Capítulo 4

## Anatomía pélvica





## 4.1. ASPECTOS GENERALES

El estudio osteológico del ser humano implica necesariamente describir los componentes del esqueleto y relacionar entre sí los elementos que lo componen. Por ello y atendiendo a los conceptos que se van a utilizar a lo largo de este trabajo, es necesario hacer una breve clasificación y descripción osteológica, así como definir la terminología que se va a aplicar según la posición que ocupan los huesos en el esqueleto.

### **4.1.1. Clasificación y descripción de los huesos y nomenclatura anatómica**

La terminología anatómica para el estudio de los homínidos supone una posición estandarizada del cuerpo que se denomina “posición anatómica”. Esta posición es la de un ser humano en pie, mirando hacia delante con los pies juntos, los brazos a lo largo del tronco con las palmas orientadas hacia adelante y los pulgares hacia el exterior del cuerpo. Gracias a esta posición, el investigador consigue una visión completa del cuerpo humano, evitando que ninguno de los huesos largos se cruce desde su perspectiva (White y Folkens, 2005).

Los huesos del sistema óseo humano pueden ser categorizados según su localización y posición.

#### 4.1.1.1. Localización

Según la localización de los huesos en el tronco el esqueleto puede dividirse en:

- Esqueleto apendicular: Comprende el conjunto de huesos implicados principalmente en el movimiento del esqueleto. Está formado por los miembros superiores, los miembros inferiores y por dos regiones llamadas cinturas. En primer lugar, la cintura escapular, donde se insertan los miembros superiores y por otro lado la cintura pélvica, donde se insertan los miembros inferiores. El esqueleto apendicular se encuentra conformado por 126 huesos, los cuales se encuentran organizados por pares y de manera bilateral.
- Esqueleto axial: Compuesto por 80 huesos, son los situados en el eje central del esqueleto humano y la estructura que da sujeción al esqueleto apendicular y protege los órganos internos. El esqueleto axial está compuesto por el cráneo, los huesos auditivos, el hueso hioides, la columna vertebral, el esternón y las costillas.

#### 4.1.1.2. Posición

Podemos distinguir diversas partes dependiendo desde donde observemos el elemento o desde donde se haga la descripción. Para referirnos a los elementos que componen el esqueleto humano se utiliza la siguiente terminología:

##### 1. Plano sagital:

- Medial: Se refiere a las estructuras localizadas sobre la línea media del esqueleto.

- Lateral: Hace referencia a las estructuras ubicadas en el mismo lado del esqueleto.
- Contralateral: Indica las estructuras situadas a distintos lados del esqueleto.

**2. Plano transversal:**

- Superior o cefálico: Cuando el elemento está cercano al cráneo.
- Inferior o podálico: Hace referencia a los elementos situados cerca de la parte inferior del esqueleto.

**3. Plano coronal:**

- Anterior o ventral: Indica la parte del cuerpo que mira hacia delante una vez se ha colocado al individuo en posición anatómica.
- Posterior o dorsal: Apunta hacia la parte dorsal del individuo colocado en posición anatómica.

Respecto a las estructuras localizadas en las extremidades podemos encontrar los siguientes términos:

- Proximal: Estructuras más cercanas al tronco o al punto de unión con el esqueleto.
- Distal: Indica lejanía al tronco o a la unión de una estructura anatómica con el resto del esqueleto.

A lo largo de este trabajo, se hará uso de esta terminología cuando se haga referencia a los distintos elementos que componen el esqueleto humano y su identificación.

## 4.2. LA CINTURA PÉLVICA

El conjunto óseo de la región pélvica está conformado por tres huesos separados; los dos huesos coxales, el sacro y el cóccix. Los dos huesos coxales se encuentran unidos posteriormente por las dos anfiartrosis de las articulaciones sacroilíacas y anteriormente por la sínfisis del pubis, formando una estructura anular que, rodea los órganos internos y transmite el peso corporal hacia los miembros inferiores (Gilroy et al., 2009). El coxal humano, a su vez, está compuesto ontogénicamente por tres partes diferenciadas, ilion, isquion y pubis, los cuales se unen en el acetábulo. Éstos, debido a su morfología, son clasificados como curvos y planos.

A su vez, la pelvis está dividida en dos partes:

- Pelvis mayor o pelvis falsa: Es la parte superior o más ancha y en la cual se encuentran los órganos abdominales. Está compuesta por la parte superior del hueso sacro, la parte superior de la sínfisis púbica y las fosas ilíacas.
- Pelvis menor o pelvis verdadera: Parte inferior y más estrecha de la estructura del hueso. En ella podemos encontrar la vejiga urinaria, los órganos genitales y el recto, así como las ramas isquiopúbicas, parte del hueso sacro y el vértice del cóccix.

El sacro está compuesto por cinco vertebrae fusionadas mientras que al cóccix lo conforman 4 vértebras coccígeas. Las facetas auriculares de cada uno de los huesos ilíacos se articulan con el sacro en sentido posterior mediante las articulaciones sacroilíacas sinoviales y fibrosas. Por otro lado, el fémur se articula

en la fosa acetabular de la cara lateral del coxal mediante la articulación coxofemoral.

#### 4.2.1. Osteología del coxal

Como ya hemos referido anteriormente, el hueso coxal está formado ontogénicamente por la fusión de tres huesos separados, ilion, isquion y pubis, los cuales se unen por la región acetabularia durante la pubertad, siendo mostrados en la etapa adulta como un único hueso. Al nacer, estos tres elementos se encuentran ya presentes y son perfectamente reconocibles, mostrando unas características morfológicas muy similares a las que encontraremos en la edad adulta.



*Ilion, isquion y pubis de un feto a término.*

Los primeros huesos de esta región en fusionarse son el isquion y el pubis a través la rama isquiopúbica, entre los 4 y 8 años de edad. Posteriormente, entre los 11 y los 15 años en individuos femeninos y de 14 a 17 en individuos masculinos, el ilion se fusiona con la región isquiopúbica en la región acetabular, permitiendo la formación completa del coxal (Scheuer y Black, 2004). No obstante, los centros secundarios de osificación van a estar en desarrollo hasta

la edad adulta, etapa en la que el crecimiento y la fusión de estos elementos finaliza (Gilroy et al., 2009).

Para entender el desarrollo del coxal, su funcionalidad y su importancia biológica es necesario considerar cada uno de los huesos de manera separada.

#### 4.2.1.1. *Ilion*

El ilion es el hueso más grande y superior de la pelvis. Durante los primeros años de vida, el hueso tiende a mostrar una morfología plana, pero a medida que el individuo es influenciado por aspectos hormonales y funcionales, el ilion se altera y se curva. De todos los huesos que componen el coxal humano, el ilion es el primero que empieza su osificación, alrededor del 2 o 3 mes del desarrollo fetal, siendo perfectamente reconocible entre el 4 y 6 mes de gestación (Fazekas y Kosa, 1978)

Está compuesto por una extremidad superior, llamada cresta iliaca y una extremidad inferior que comprende, algo menos de dos quintos de la superficie articular del acetábulo, el borde anterior y posterior y las superficies iliacas, glúteas y sacropélvicas (Woodburne y Burkel, 1988).

El borde superior del hueso ilíaco se caracteriza por tener una superficie metafisaria en forma de S, conocida comúnmente como cresta ilíaca. Ésta cambia longitudinalmente, presentando unas regiones más gruesas que otras. Muchos de los músculos abdominales se originan precisamente en estas regiones.

La cresta ilíaca consta de dos extremos: 1) En la región posterior, conocido como espina ilíaca posterior superior y 2) otro en su borde anterior, llamado espina ilíaca anterior superior.

La tuberosidad que forma la morfología de la espina iliaca posterior inferior es fácilmente identificable como un pequeño saliente localizado de manera postero-inferior a la superficie auricular.

Por otro lado, la protuberancia correspondiente al borde inferior de la espina anterior no se encuentra todavía desarrollada en edades tempranas del desarrollo del individuo. No obstante, es fácilmente distinguible hacia los dos años de edad, como un pequeño saliente como en el borde anterior del ilion, justo superior a la región acetabular (Scheuer y Black, 2004).

En la región postero-medial del hueso, encontramos un surco con forma de L llamado superficie auricular, o cara auricular. Esta región se divide a su vez en dos secciones, la craneal, la cual articula con la primera de las vértebras sacras y la caudal, que articula con la segunda o tercera vértebra sacra (Ali, 1989) para formar la articulación sacro-ilíaca.

En la región inferior a la superficie auricular se puede observar la gran escotadura ciática. Ésta se encuentra presente y es perfectamente reconocible desde una etapa muy temprana en el desarrollo fetal (Schaefer et al., 2009). Esta región es el conducto principal entre las estructuras de la cadera y el miembro inferior, pasando por ella el músculo piriforme, los vasos glúteos y los nervios ciáticos (Mac Laughlin y Bruce, 1986).

Justo en el centro del ilion se localiza el agujero nutricio, encargado de la irrigación del hueso (Williams et al., 1995).

La región acetabular, presenta durante los primeros años de vida del individuo una morfología redondeada y protuberante. Esta región se fusiona durante la pubertad con el pubis y el isquion formando el acetábulo.

#### 4.2.1.2. *Isquion*

El isquion forma la región postero-inferior del hueso coxal. Éste contribuye sustancialmente a la formación del acetábulo y sus bordes superiores forman los bordes laterales e inferiores del foramen obturador (Baker et al., 2005). Al igual que el ilion, es reconocible desde etapas tempranas del desarrollo del individuo,

mostrando una morfología en forma de gancho o de coma que se hace más evidente al transcurrir los primeros meses de vida.

El isquion comienza su formación alrededor del cuarto y quinto mes del desarrollo fetal, siendo perfectamente reconocible entre el sexto y octavo mes de gestación (Scheuer y Black, 2004).

La superficie medial del isquion es lisa y relativamente carente de rasgos. El agujero nutricio está localizado al nivel de la espina isquiática (Frazer, 1948).

Lateralmente, en la parte superior del hueso, con forma de media luna, se encuentra localizada la superficie articular, la cual articula posteriormente con la cabeza femoral.

En la región posterior superior, justo al lado de la superficie articular, se encuentra la fosa acetabular. Ésta se muestra como una leve depresión durante las etapas tempranas de la infancia del individuo, haciéndose más profunda a medida que el hueso se desarrolla.

En la parte superior podemos encontrar dos superficies epifisarias contiguas. La más grande es la epífisis postero-superior, la cual se fusiona con el ilion, mientras que la superficie anterior, algo más pequeña, va unida al pubis (Baker et al., 2005). Por otro lado, la región antero-inferior del isquion presenta una rama que se fusiona con el pubis entre los 5 y los 8 años de vida, dando lugar a la rama isquiopúbica. En la parte posterior de esta rama, se puede distinguir una protuberancia ovalada de morfología rugosa conocida como la tuberosidad isquiática (Schaefer et al., 2009).

#### 4.2.1.3. *Pubis*

El pubis conforma la parte más anterior de los tres huesos que componen el coxal, articulando en el plano medial con su lado opuesto, superiormente con la región acetabular (que a su vez sirve como unión con el ilion y el isquion) e

inferiormente con el isquion mediante la rama isquiopúbica, conformando el borde inferior del foramen obturador (Schaefer et al., 2009).

El pubis es el último de los tres huesos innominados en empezar la osificación, demorándose hasta el 5 o 6 mes fetal (Scheuer y Black, 2004). Por ello, la morfología característica en forma de gancho que presenta este hueso va a tener un carácter menos robusto que en el caso del isquion durante los últimos meses del desarrollo fetal y después del nacimiento.

En fetos a término y neonatos, el pubis está comprendido únicamente de la superficie acetabular, la sínfisis púbica y la rama pélvica superior.

Al igual que ocurre en el isquion, la superficie medial o pélvica del pubis presenta una estructura lisa, carente de rasgos característicos (Scheuer y Black, 2004).

La región acetabular, localizada en el extremo superior del hueso consta de una superficie articular dividida a su vez en dos superficies metafisarias: la metáfisis superior, para el ilion, y la medial, para el isquion. Esta zona forma parte de la superficie lunar que forma el acetábulo y que a su vez articula con la cabeza femoral. En el centro del extremo acetabular, existe una pequeña superficie vascular donde se insertan los ligamentos que unen al pubis con la cabeza femoral (Katzenberg y Saunders, 2008).

La rama púbica superior (o rama iliopúbica) surge de la parte lateral del cuerpo púbico que forma el límite superior del agujero obturador y abarca la distancia entre la superficie articular acetabular y el cuerpo púbico (White y Folkens, 2005). El borde anterosuperior del cuerpo púbico constituye la cresta del pubis, y en su extremo lateral, se encuentra una proyección denominada espina púbica. Ésta conforma el comienzo de la cresta pectínea, la cual, se extiende en dirección superolateral a lo largo de la rama superior para fusionarse con la línea arcuata del ilion (Tortora et al., 2006).

Aunque no es fácilmente observable en individuos neonatos, en la parte superior de la rama iliopúbica se puede distinguir la cresta obturadora en la rama

superior, que se extiende entre el extremo acetabular y la sínfisis púbica (Baker et al., 2005).

La rama púbica inferior se osifica desde la parte inferior del cuerpo púbico, justo bajo la sínfisis púbica y se extiende posteriormente para fusionarse con la rama isquiática hacia los 8 años de edad, formando el foramen obturador.

La sínfisis púbica es la articulación entre los dos pubis de los huesos de la cadera; por debajo de ésta, convergen las ramas inferiores de los dos huesos del pubis para formar el arco del pubis (Tortora et al., 2006). Durante la infancia y la pubertad, ésta va a presentar la apariencia característica de una superficie epifisaria y va a estar en constante cambio a lo largo de toda la vida (Scheuer y Black, 2004).

#### 4.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL COXAL EN INDIVIDUOS SUBADULTOS

El coxal, en individuos subadultos adopta en sus centros primarios de osificación, morfologías muy parecidas a las de los adultos, ya desde un desarrollo fetal temprano (Scheuer y Black, 2004; Baker et al. 2005). Por tanto, el establecimiento de la lateralidad en los huesos aún sin fusionar no tiene por qué presentar grandes dificultades para el antropólogo.

Sin embargo, el ilion, isquion y pubis pertenecientes a individuos subadultos presentan unas características específicas de identificación de la lateralidad con respecto a los adultos y deben ser analizados de manera independiente.

Podemos llevar a cabo la lateralización del ilion identificando, en primer lugar, sus rasgos morfológicos más característicos, los cuales son perfectamente reconocibles alrededor del cuarto y quinto mes del desarrollo fetal (Scheuer y Black, 2004; Baker et al., 2005). Estos rasgos, son la cresta ilíaca, la escotadura ciática, la superficie auricular y la región acetabular. Colocando el ilion en posición

medial, tanto la superficie auricular, como la escotadura ciática estarán localizadas del lado correspondiente al del hueso.

Las regiones que nos permiten reconocer el isquion suelen ser perfectamente visibles entre el sexto y octavo mes del desarrollo fetal (Baker et al., 2005). Por tanto, no supone ningún problema identificar la superficie isquiática, la fosa acetabular, la cara articular, así como la rama isquiática. Si colocamos este hueso en posición lateral con la región acetabular de frente y hacia arriba, la rama isquiopúbica estará situada abajo, orientada hacia el lado correspondiente al que pertenece el hueso. Por motivos tafonómicos, la fragmentación de la rama isquiopúbica es relativamente frecuente, por ello, se pueden dar situaciones donde nos encontremos únicamente con la región acetabular como única región a identificar. En ese caso, sostendremos el hueso de igual manera, para que la parte inferior de la superficie articular apunte hacia el lado correspondiente del que pertenezca el hueso.

Es bastante probable que el pubis sea la región del hueso coxal más difícil de identificar. Esto se debe a la similitud que pueden presentar la superficie lateral y acetabular con respecto a la sínfisis púbica antes del nacimiento, e incluso durante los primeros meses de vida del individuo. No obstante, es un proceso relativamente sencillo, incluso en etapas tempranas del desarrollo fetal y primera infancia, examinando la cara lateral de la superficie y el borde lineal, observaremos cómo se describe una espiral que permite el paso del nervio obturador y los vasos sanguíneos. Desde esta posición, la sínfisis púbica estaría orientada hacia el lado correspondiente del que es el hueso (Baker et al., 2005).

#### 4.4. DESARROLLO

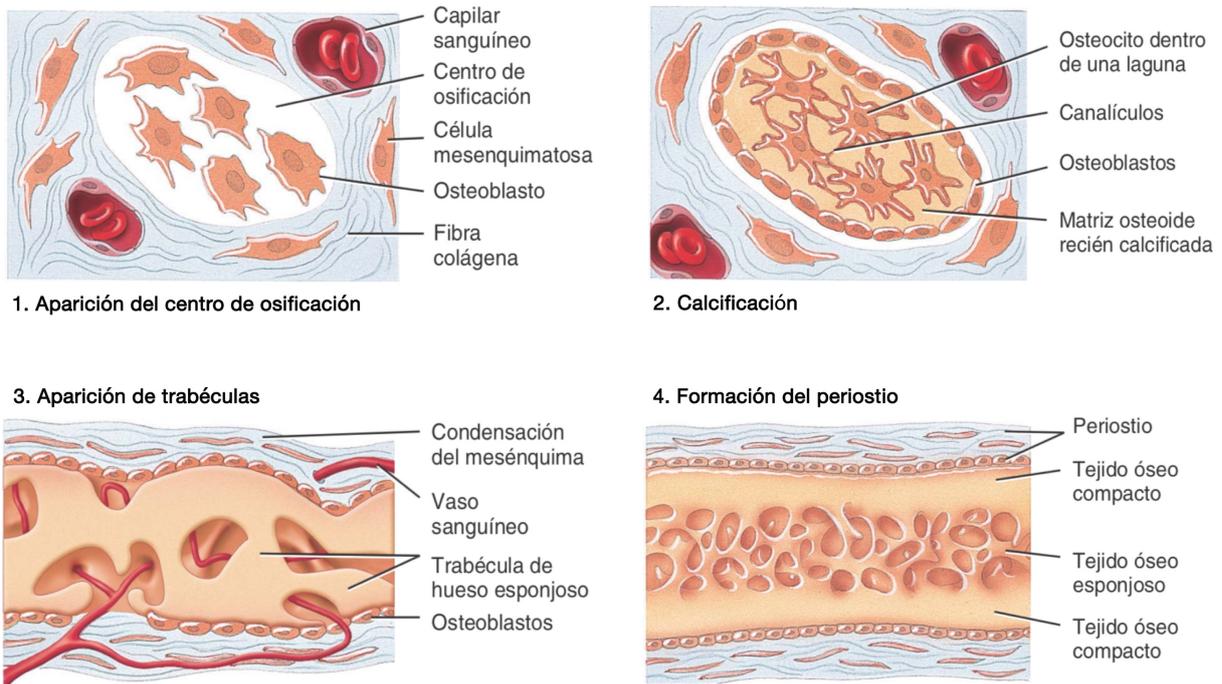
El estudio del desarrollo del esqueleto en individuos subadultos puede aportar una información muy valiosa para entender los cambios osteológicos que se producen mediante el desarrollo ontogénico del ser humano.

#### **4.4.1. Generalidades**

La osificación u osteogénesis, es el proceso biológico que se encarga de transformar en hueso los tejidos cartilagosos hialinos que conforman el precursor del esqueleto durante la etapa embrionaria.

El desarrollo del esqueleto empieza alrededor de las 12 semanas de la vida fetal, e implica tanto la osificación intramembranosa (dentro de la membrana) como la endocondral (dentro del cartílago) (Mc. Auley y Uthoff 1990).

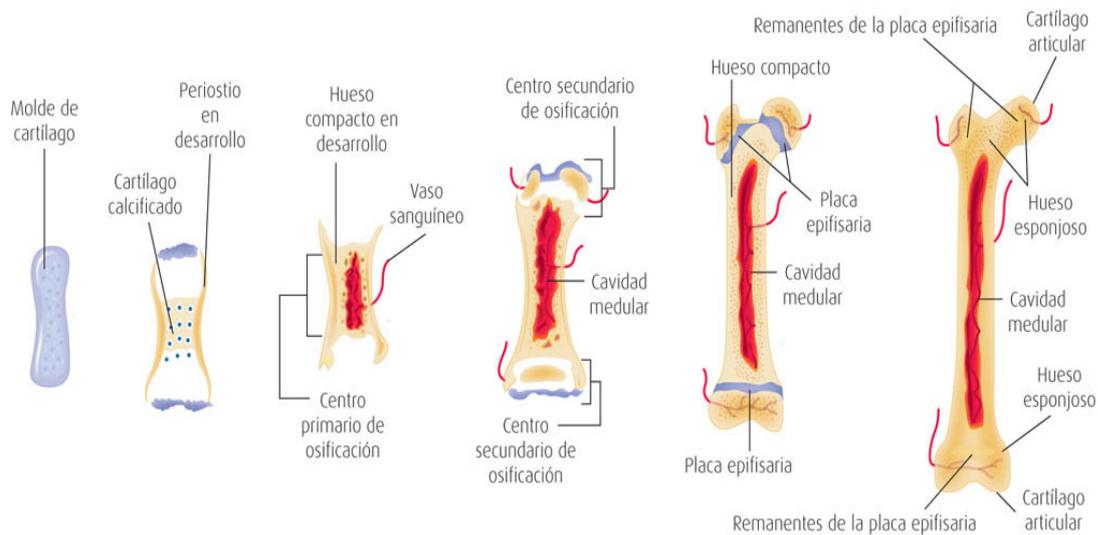
En la osteogénesis membranosa o directa, el hueso se origina a partir de una membrana de tejido conjuntivo. Durante este proceso, las células que forman estas membranas, se transforman en osteoblastos, las cuales construyen una matriz de osificación alrededor de la cual se irá formando el hueso. Una vez rodeada, los osteoblastos se transforman en osteocitos, los cuales son encargados de depositar calcio y sales minerales que favorecerán el endurecimiento del tejido óseo (Gilroy et al., 2009). Posteriormente, las espículas óseas van a conformar una única estructura en forma de hueso esponjoso, la cual está recubierta a su vez por dos láminas de tejido óseo compacto. Este proceso origina los huesos planos del neurocráneo, mandíbula y parte de la clavícula, además de ser un proceso fundamental en la curación de fracturas óseas (O' Rahilly et al., 1998).



*Osteogénesis membranosa (Modificada de Tortora et al., 2006).*

En el caso de la osteogénesis endocondral o indirecta, las células mesenquimatosas embrionarias crean unas estructuras de cartílago hialino que servirán como “modelo” para el desarrollo del hueso. (O’ Rahilly et al., 1998; Steiniche y Hauge, 2003). Posteriormente, este modelo, rodeado por el pericondrio y posteriormente por el periostio, desarrolla un collar donde los osteoblastos empiezan a producir tejido óseo mientras que los condroblastos maduran y degeneran. Poco después, el cartílago comienza a calcificarse y los vasos sanguíneos se estructuran para producir, cerca del centro de la diáfisis, los centros primarios de osificación (Saavedra, 2012). Aunque algunos huesos comienzan su osificación a partir de un único centro, es bastante frecuente que haya una coalescencia de varios centros hasta formar uno solo (Gilroy et al., 2009; Ross y pawlina, 2009; Saavedra, 2012). Este proceso, continua a medida que los vasos sanguíneos se forman en los extremos de la diáfisis, formando los centros secundarios de osificación, o epífisis. Los huesos largos, las vértebras, la pelvis y

los huesos de la base del cráneo crecen mediante este tipo de osificación endocondral.



*Osteogénesis endocondral del hueso (Modificada de Saavedra, 2012).*

Una vez finalizada la formación de tejido óseo, el hueso seguirá su desarrollo hasta la etapa adulta. El crecimiento de estos huesos viene dado por dos tipos de mecanismos diferentes:

- **Crecimiento intersticial:** Permite a los huesos largos crecer en longitud. Se lleva a cabo mediante un proceso de mitosis de las células cartilaginosas. Los condrocitos, se dividen en grupos más pequeños denominados isogénicos, los cuales descienden a su vez de otros condrocitos que han sufrido también varias divisiones mitóticas. Posteriormente el citoplasma de esas células en proceso de división se contrae, desarrollando una capa de sustancia intercelular entre ellas que produce la separación de las células hijas, las cuales pueden asociarse en una sola dirección (grupo isogénico axial) o en todos los sentidos (grupo isogénico coronario) (Ateshian y Ricken, 2010).

- Crecimiento aposicional: Permite a los huesos crecer en espesor. Este proceso se lleva a cabo a partir de los condroblastos, los cuales van a producir nuevas capas de cartílago en la vertiente interna del pericondrio. Gracias a la superposición continua de esas capas se va a producir un crecimiento del cartílago hacia el exterior. A medida que los condroblastos vayan distanciándose del pericondrio, éstos irán transformándose en condrocitos, permitiendo el crecimiento del hueso tanto en diámetro como del canal medular. (Tortora et al., 2006).

Ya sea por crecimiento intersticial o aposicional, y conforme el hueso aumenta de tamaño, se va a producir la unión entre los centros de osificación adyacentes, dando lugar a suturas o a la fusión completa de los huesos. Los centros primarios y secundarios van a estar separados por una región denominada “placa de crecimiento” o “placa epifisiaria” intercalada entre la epífisis y la diáfisis.

Una vez la diáfisis ha alcanzado su longitud máxima, los condrocitos dejan de dividirse y esa placa empieza a disminuir debido a que la deposición ósea ha superado la tasa de proliferación del cartílago. Es entonces cuando se produce la desaparición de la “placa de crecimiento” y comienza la fusión entre la diáfisis y la epífisis.

Cada uno de los centros de osificación de los huesos que componen el esqueleto humano se originan a una edad determinada; por lo tanto, el estudio de la aparición de los mismos puede proporcionar información muy valiosa para la estimación de la edad, y resulta una herramienta fundamental a la hora de desarrollar métodos de investigación donde el desarrollo ontogénico de los individuos subadultos sea de especial relevancia.

#### 4.4.2. Periodos de osificación

La osificación de los elementos que componen el esqueleto pélvico comienza alrededor del tercer mes del desarrollo fetal (Scheuer y Black., 2004). Cada uno de los huesos que componen el coxal van a osificarse a partir de ocho centros de osificación; tres centros primarios, para el ilion, isquion y pubis y cinco centros secundarios, para la espina ilíaca, cresta ilíaca, tuberosidad isquiática, sínfisis púbica y el cartílago trirradiado del centro del acetábulo. La posición que van a ocupar estos huesos, va a coincidir con los centros de condricación tempranos ya presentes desde el primer mes de gestación (Laureson, 1964).

##### 4.4.2.1. Centros de Osificación primarios

El primer centro de osificación en aparecer al finalizar la etapa embrionaria es el del Ilion. Éste se pone de manifiesto alrededor del segundo y tercer mes de gestación intra-uterina (Laureson, 1964; Fazekas y Kosa, 1978). Al cuarto y quinto mes fetal, el ilion ya puede ser reconocible debido a la presencia del borde superior de la escotadura ciática y la característica cresta iliaca (Laureson, 1963).

Al nacer, el ilion ha adoptado la mayoría de las características morfológicas del hueso adulto. Las espinas iliacas anterior y posterior superiores se encuentran bien desarrolladas en esta etapa, mientras que la región de la espina iliaca anterior inferior se encuentra todavía en un estado de desarrollo incompleto. No obstante, los cambios más significativos en el desarrollo de la osificación iliaca tienen lugar en la superficie acetabular.

Durante el nacimiento, esta región se encuentra definida por una estructura de carácter redondeado y abultado y con una ligera depresión en el centro de la misma (Verbruggen y Nowlan, 2017). A la edad de 6 meses, el ilion va a mostrar una prominencia en la depresión de la extremidad acetabular, formada por el desarrollo de la prominencia iliopectínea. Posteriormente, a los 4 o 5 años de

edad, esta superficie va a mostrar una morfología triangular y a su vez, va a comenzar el desarrollo de la placa no-articular (Laurenson, 1964; Scheuer y Black, 2004).

El isquion puede ser identificable en el tercer mes del desarrollo fetal como una estructura en forma de coma, la cual es más ancha en su parte superior y se estrecha hacia la rama inferior y se encuentra localizada de manera inferior con respecto a la posición del acetábulo (Francis, 1951; LaVelle, 1995).

El primer centro de osificación aparece alrededor de los 4 o 5 meses intrauterinos, siendo el hueso perfectamente reconocible de manera aislada entre el 6 y 8 mes prenatales.

Al nacer, el isquion se encuentra bien desarrollado y, al igual que en el caso del ilion, su morfología no va a variar mucho durante la infancia. A los 6 meses de edad, el borde superior modifica su ángulo de modo que en la parte anterior se encuentra el lugar donde se va a articular el pubis y en la superior el ilion.

Al llegar al primer año de edad, la espina isquiática se encuentra bien desarrollada y el borde superior del isquion pasa a tener una morfología cuadrada (Verbruggen y Nowlan, 2017).

El pubis comienza su osificación alrededor del quinto y sexto mes intrauterino, lo cual lo convierte en el último hueso del coxal en ser reconocible. Es el hueso pélvico más pequeño y frágil y, por tanto, raramente puede ser recuperado entre los restos fetales (Fazekas y Kosa 1978). Su osificación comienza en la región superior de la rama púbica, próximo a los nervios femorales y obturadores (Frazer, 1948).

A pesar de su tardía osificación, al nacimiento el hueso se encuentra bien desarrollado y es fácilmente identificable. En esta etapa, la superficie acetabular se muestra como una estructura ovalada y abultada. A los 6 meses de edad esta superficie va a mostrar una elevación que va a provocar la aparición de dos superficies metafisarias, las cuales van a articular de forma superior y medial con el ilion e inferior y medial con el isquion. Sin embargo, la demarcación entre estas

dos regiones no será evidente hasta los 3 o 4 años de edad (Scheuer y Black, 2004). A su vez, es en este periodo cuando empieza la fusión de la rama isquiopúbica, la cual concluye generalmente entre los 5 y 8 años de edad (Frazer, 1948; Fazekas y Kosa, 1978).

#### 4.4.2.2. Centros de Osificación secundarios

Al llegar a la pubertad, el ilion, el isquion y el pubis, todavía separados por el cartílago trirradiado, van a unirse mediante la fusión de tres epífisis acetabulares en forma de Y, adyacentes a las superficies de los tres elementos óseos:

1. *Os acetabuli* o Acetábulo: Es la primera de las epífisis acetabulares en osificarse. Este centro aparece alrededor de los 9-10 años de edad y comprende un área cartílago articular, formando el aspecto anterior del borde acetabular, entre el ilion y el pubis (Harrison, 1957; Ponseti 1978a, b). La epífisis *Os acetabuli* se extiende hasta fusionarse con la epífisis superior del acetábulo y con la parte anterior del cartílago trirradiado.
2. Epífisis posterior: Es la segunda epífisis en empezar su osificación y aparece entre los 10 y 11 años de edad. Esta epífisis acetabular comprende además del borde posterior del acetábulo, parte de la superficie articular del isquion y del ilion (Flecker, 1932; Cardoso, 2008).
3. Epífisis superior: Es la última de las epífisis acetabulares en empezar su osificación, la cual tiene lugar alrededor de los 12-14 años de edad. Forma parte del borde superior del acetábulo, así como gran parte de la parte de la región superior de la epífisis acetabularia. (Johnstone et al., 1982; Cardoso, 2008).

La fusión de los tres elementos que componen el hueso coxal junto con la unión de estas epífisis, va a verse completada normalmente alrededor de los 15

años de edad en individuos femeninos y 17 en individuos masculinos (Cardoso, 2008). Además, la lenta progresión en el proceso de osificación de esta zona permite, durante todo el proceso de crecimiento en la infancia, la expansión del acetábulo con el objetivo de adaptarse a su vez a la cabeza femoral (Harrison, 1961, 1957).

El orden de fusión de los otros centros secundarios y sus epífisis es bastante variable, pero normalmente se acepta de primero a último el siguiente orden: espina iliaca anterior inferior, cresta iliaca, tuberosidad isquiática y sínfisis púbica (Johnston, 1961)

**La epífisis de la espina iliaca anterior inferior** comienza su osificación alrededor de los 10-13 años de edad y termina su fusión a los 20 (Francis, 1940; Schaefer et al., 2009). Numerosos estudios han indicado que la osificación de este centro puede ocurrir de manera aislada o como una extensión desde el centro de la epífisis superior del *os acetabuli* (Scheuer y Black, 2004).

La osificación de **la epífisis en la cresta ilíaca** comprende dos centros de osificación diferenciados. Por un lado, con una epífisis anterior que conforma la espina iliaca antero-superior y mitad anterior de la cresta ilíaca, y, por otro lado, una epífisis posterior que desarrolla el área postero-superior de la espina iliaca y la mitad posterior de la cresta iliaca (Stevenson, 1924). Las dos epífisis terminan su desarrollo en el centro de la cresta, formando su punto más alto (Birkner, 1978). Su desarrollo comienza alrededor de los 12-13 años en niñas y 14-15 en niños; sin embargo, su tiempo de fusión puede variar en un rango entre los 16 y los 22 años, habiendo ocurrido con total seguridad a la edad de 23 años para ambos sexos. (Francis, 1940, Schaefer et al., 2009).

**La epífisis isquiática** aparece en la parte superior de la tuberosidad isquiática entre los 13 y los 16 años de edad (Francis, 1940). Esta epífisis se desarrolla alrededor de la superficie de la tuberosidad y a lo largo de la rama isquiática (Jit y Singh, 1971; Scheuer y Black, 2004). La fusión completa de la epífisis en la superficie de la tuberosidad isquiática se completa entre los 16 y 18

años, mientras que la parte que comprende a la rama mantiene una osificación más lenta que completa su unión entre los 20 y 23 años (Jit y Singh, 1971)

La osificación secundaria en la **sínfisis púbica** sigue un patrón complejo que comienza con una etapa pre-epifisaria caracterizada por la apariencia discernible de crestas horizontales separadas por surcos en la superficie sinfisaria (Meindl et al., 1985). Durante esta etapa, no hay nódulos óseos que se fusionen con la superficie y los extremos y delimitaciones de la epífisis aún no van a encontrarse muy definidos en el tubérculo púbico (Katz y Suchey, 1986; Scheuer y Black, 2004). Este aspecto morfológico no va a cambiar hasta aproximadamente los 20 años de edad, cuando la superficie sinfisaria empieza a rellenarse con una fina formación ósea en su límite dorsal (Todd, 1920). A partir de los 23 años aparecen los nódulos óseos (epifisarias) y los márgenes dorsales empiezan a definirse. La delimitación de las extremidades en la sínfisis púbica comienza a definirse entre los 23 y 27 años de edad, siendo la inferior normalmente la primera en iniciar su formación (Todd, 1920; Meindl et al., 1985; Scheuer y Black, 2004). Estas extremidades normalmente comienzan a fusionarse con los extremos de la superficie sinfisaria entre los 24 y 35 años de edad, encontrándose generalmente perfectamente definidos entre los 27 y 37 años (Todd, 1920), aunque se han descrito casos en los que este proceso no tiene por qué llegar a completarse (Katz y Suchey, 1986; Scheuer y Black, 2004).

#### 4.5. FUNCIONALIDAD PÉLVICA

La cintura pélvica homínida desempeña varias funciones de alta importancia biológica debido a los diversos compromisos evolutivos realizados mediante el proceso de selección natural. Estas funciones son numerosas y variadas, pero los factores más importantes en los seres humanos son los siguientes:

- Es la región encargada de sostener el peso del cuerpo, transmitido mediante la columna vertebral al sacro y a su vez, mediante las articulaciones sacroiliacas a los dos huesos coxales y de ahí a los dos fémures, estando en posición erguida o a las tuberosidades isquiáticas en caso de estar sedentes (Katzenbeg y Saunders, 2008).
- Debido a su rígida y fuerte estructura ósea, permite sostener y proteger los órganos internos (Gilroy et al., 2009; Verbruggen y Nowlan, 2017).
- Con respecto a la locomoción humana, la pelvis permite la inserción de los músculos relacionados con la estabilización del tronco durante la marcha bípeda (White y Folkens, 2010).
- Debido a la forma y el tamaño de la pelvis femenina, ésta, además de proporcionar sujeción ósea al parto, refleja su compromiso funcional entre los refinamientos biomecánicos impuestos por el bipedalismo y los requerimientos biológicos que garantizan una gestación fetal segura. (Gilroy et al., 2009; Scheuer y Black, 2004).

Debido a esta última particularidad y como analizaremos posteriormente, la pelvis ha sido ampliamente utilizada en el campo de la Antropología Forense para diversos estudios de estimación sexual en individuos adultos y subadultos.



# Capítulo 5

## Objetivos





El objetivo principal de esta tesis doctoral es analizar el dimorfismo sexual de la región pélvica en individuos subadultos de origen mediterráneo, mediante la utilización de morfometría geométrica y evaluar si la aplicabilidad de sus técnicas presenta unos estándares de fiabilidad suficientes que permita su uso en el ámbito forense.

Para la consecución del objetivo general planteado en este estudio, es necesario lograr los siguientes objetivos específicos:

1. Establecer una combinación de coordenadas (*landmarks* y *semilandmarks*) que permitan la discriminación sexual de un individuo subadulto a partir de los huesos del coxal.
2. Determinar las regiones que presentan una mayor información en relación al dimorfismo sexual existente mediante el estudio de la *forma*.
3. Estimar el grado de dimorfismo sexual diferencial y la fiabilidad en su clasificación mediante el análisis de la variable forma, así como las de *forma* y tamaño en su conjunto.
4. Evaluar la repetibilidad y reproducibilidad del método mediante el cálculo del error intra e inter-observador.
5. Justificar si la utilización de técnicas morfogeométricas suponen un avance respecto a otras metodologías empleadas.
6. Comparar con estudios similares que se hayan hecho hasta la fecha, para comprobar si es posible añadir información a las propuestas de diferentes investigaciones.



## Capítulo 6

Estimación del sexo en individuos subadultos mediante análisis morfogeométrico del ilion





## PRESENTACIÓN DEL ARTÍCULO

El artículo que se presenta a continuación ha sido publicado en la revista científica de alto impacto "*International Journal of Legal Medicine*", la cual se encuentran entre las primeras dentro de su categoría en publicaciones que abordan la temática de la Antropología Forense. Esta publicación ha sido indexada bajo las categorías de Medicina Legal y Ciencias Forenses.

Este trabajo nace con el objetivo de valorar el alcance y las limitaciones de la morfometría geométrica en la estimación precisa del sexo en individuos subadultos. Esta cuestión sigue siendo actualmente uno de los mayores retos que plantea la Antropología Forense y por ello es importante valorar que las técnicas empleadas en el proceso de identificación humana, cumplan con unas condiciones mínimas que garanticen su fiabilidad.

Para lograr este objetivo, se ha utilizado la colección osteológica de individuos subadultos de San José (Granada), una de las más importantes a nivel mundial en cuanto a número de individuos identificados. Se ha optado por analizar el ilion subadulto, debido a su extendida utilización en las investigaciones que han abordado el tema de la estimación sexual en individuos infantiles.

Siguiendo este planteamiento, se han considerado las técnicas de morfometría geométrica como las más apropiadas para llevar a cabo este tipo de estudio, debido a las ventajas que ofrece al poder analizar de manera precisa la forma y el tamaño de los especímenes. Aunque en un principio se valoró llevar a cabo un análisis morfogeométrico tri-dimensional, finalmente se decidió aplicar la

morfometría bi-dimensional, ya que la metodología de esta segunda técnica requiere de un material más accesible para el resto de la comunidad científica, lo cual facilita la aplicabilidad del método en cualquier contexto donde se requiera.

El doctorando Enrique José Estévez Campo, como primer firmante de este artículo, ha sido responsable de llevar a cabo aquellas tareas necesarias para su composición. Estas incluyen, la toma de fotografías, el análisis morfogeométrico y los análisis de estadística multivariada. Sin embargo, el resto de coautores ha realizado una labor imprescindible en el diseño y corrección del mismo, así como en la repetición en la toma de datos para el cálculo del error inter-observador o la aportación de referencias bibliográficas.

## ÍNDICES DE CALIDAD DE LA REVISTA

Full Journal title: International Journal of Legal Medicine

ISO Abbrev. Title: Int. J. Legal. Med.

JCR Abbrev. Title: INT J LEGAL MED

ISSN: 0937-9827

ISSUES/YEAR: 6

LANGUAGE: English

Journal Country: Germany

Publisher: Springer

Publisher address: 233 Spring St, New York, NY 10013

Subjects Categories: MEDICINE, LEGAL, PATHOLOGY

Total Cites: 3501

Impact Factor: 2.382

5- Year Impact Factor: 2.289

Immediacy Index: 0.422

Citable Items: 204

Cited Half-Life: 6.5

Citing Half-Life: 8.5

Source Normalized Impact per Paper (SNIP): 1.276

SCImago Journal Rank (SJR): 1.210

Category Name: MEDICINE, LEGAL

Total Journals in Category: 15

Journal Rank in Category 2

Quartile in Category: Q1



**Sex estimation of infants through geometric morphometric analysis of the ilium.**

**Revista en la que se ha publicado:**

International Journal of Legal Medicine. 131:1747–1756

**Recibido:** 18 de enero de 2017

**Aceptado:** 27 de julio de 2017

**Publicado online:** 11 de agosto de 2017

**Autores:**

Enrique José Estévez Campo

Sandra López Lázaro

Claudia López-Morago Rodríguez

Inmaculada Alemán Aguilera

Miguel Cecilio Botella López

**Palabras Clave:** Morfometría geométrica, estimación del sexo, juvenil, subadulto, Ilium, Antropología Forense.



## 6.1. RESUMEN

Tanto en el contexto arqueológico como en el forense, el análisis del ilion ha sido ampliamente utilizado con el objetivo de determinar el sexo y la edad de los individuos. Sin embargo, la estimación del sexo utilizando los restos esqueléticos pertenecientes a individuos que aún no han desarrollado los caracteres sexuales secundarios propios de la pubertad, sigue siendo un asunto controvertido. La estimación precisa del sexo en individuos subadultos se ve, además obstaculizada, por el reducido número de estudios basados en colecciones identificadas de individuos juveniles. En esta investigación se analiza el dimorfismo sexual del ilion subadulto mediante la utilización de técnicas de morfometría geométrica y utilizando una muestra perteneciente a la colección osteológica de subadultos identificados de cementerio de San José (Granada). La muestra está compuesta por 71 huesos ilíacos izquierdos pertenecientes a 40 individuos masculinos y 31 femeninos, con edades comprendidas entre el nacimiento y el primer año de vida. Mediante el análisis de componentes principales, se mostró que el tamaño y la *forma* del ilion mostraban una leve superposición de individuos, mientras que el de variables canónicas constata la separación entre ambos grupos. El análisis discriminante, mediante validación cruzada, incluyendo las variables de *forma*, arroja un porcentaje de correcta asignación del 78,9% de los individuos, mayor en los masculinos (82,5%) que en los femeninos (78,2%). Al incluir la variable de tamaño del centroide se obtienen resultados ligeramente superiores, con una clasificación correcta del 81,7%, mejor en los masculinos (85%) que en los femeninos (77,4%). Tanto las variables de la *forma*, como las de *forma* y tamaño del ilion muestran diferencias entre los grupos analizados.

## 6.2. INTRODUCCIÓN

Una de las principales metas, tanto en la práctica forense, como en la arqueológica, ha sido la estimación sexual precisa y repetible a partir de restos óseos. Esto es aún más complicado debido al reducido número de colecciones osteológicas con individuos infantiles identificados en las que basar este tipo de investigaciones (Baker et al., 2005; Lewis, 2007; Saunders, 2008). Esta escasez de muestras en buen estado de conservación, sumado a la complejidad en el análisis del esqueleto subadulto, dificulta el desarrollo de nuevas metodologías focalizadas en estos grupos de edad (Lewis, 2008). La determinación del sexo en restos óseos pertenecientes a individuos que aún no han desarrollado los caracteres sexuales secundarios, sigue siendo un reto en el campo de la Antropología Forense, ya que las características más discriminatorias entre los sexos surgen después de haber alcanzado la madurez sexual (Scheuer y Black, 2004).

La región pélvica se ha utilizado tradicionalmente para la determinación del sexo debido a su alto poder discriminante, siendo éste el más dimórfico del cuerpo humano. Por lo tanto, existen varios métodos válidos para la estimación del sexo en adultos (Ferembach et al., 1980; Buikstra y Ubelaker, 1994; Bruzek, 2002; Albanese, 2003). Para la determinación del sexo en individuos sub-adultos se han desarrollado diferentes técnicas centrándose en la morfología y las medidas del esqueleto craneofacial, la dentición y el coxal (Boucher, 1957; Weaver, 1980; Schutkowski, 1993; Sutter, 2003; Cardoso, 2008). Estos estudios han tenido como objetivo analizar si las diferencias morfológicas entre hombres y mujeres permiten o no una estimación precisa del sexo.

Debido al alto porcentaje de éxito para estimar el sexo en individuos adultos mediante la utilización de la pelvis, un número considerablemente amplio de estudios han investigado los rasgos morfológicos del ilion para el diagnóstico del sexo de los individuos juveniles. Estos métodos abarcan desde un enfoque cuantitativo basado en mediciones lineales (Weaver, 1980; Vlak et al., 2008), rasgos no métricos (Schutkowski, 1993; Cardoso y Saunders, 2008) o técnicas

morfogeométricas (Gonzalez et al., 2005; García Mancuso y González, 2013; Wilson et al., 2008; Wilson et al., 2011; Wilson et al., 2015).

Estos métodos han obtenido por lo general resultados contradictorios. Estas diferencias pueden deberse principalmente a las diferencias en las muestras, los métodos de análisis y la interpretación de los resultados (Olivares y Aguilera, 2016). Por ejemplo, Schutkowski, analizó las diferencias morfológicas de la escotadura ciática, la superficie auricular y la cresta ilíaca en individuos masculinos y femeninos, a partir de una muestra ósea procedentes de la iglesia de Spitafields, Londres. Basado en metodologías de determinación del sexo mediante la evaluación visual de la escotadura ciática, este estudio logró el 95% de la asignación correcta en hombres y el 71.4% en mujeres. Siguiendo una metodología similar, Sutter (2003) también evaluó la morfología de la región iliaca en una colección esquelética de momias subadultas de la región del desierto de Atacama en Chile. Las diferencias sexuales en la escotadura ciática fueron similares a las descritas por Schutkowski y lograron altos porcentajes de asignación correcta tanto para individuos masculinos (71.4%) como para los femeninos (95.2%).

Weaver (1980) analizó el ilion subadulto basándose en seis caracteres métricos y un rasgo no métrico. Las diferencias entre hombres y mujeres con respecto a las medidas lineales fueron insignificantes. Por otro lado, los rasgos no métricos alcanzaron mejores resultados, siendo superiores en niños (91.7% fetales, 73.1% recién nacidos, 90.6% individuos de 6 meses) que en niñas (75%, 54.2% and 43.5% en fetos, recién nacidos e individuos de 6 meses de edad respectivamente).

Wilson (2008) analizó los patrones de variación en la *forma* del ilion basándose en un análisis de morfometría geométrica bidimensional. Este método se aplicó a la escotadura ciática, la superficie auricular y la cresta iliaca. La precisión en la identificación sexual mediante estos rasgos osciló entre el 64 y 96% para individuos masculinos y el 25 y 87.5% para los femeninos. En este estudio, la escotadura ciática mayor se mostró como la más dimórfica de los elementos analizados.

A pesar del amplio rango de resultados, estas investigaciones podrían sugerir que las diferencias en la morfología iliaca pueden ser reconocibles desde una edad temprana. Sin embargo, los métodos basados en la evaluación cualitativa de estructuras óseas mediante asignación visual, tienen importantes limitaciones debido al alto grado de subjetividad que implica su utilización. Por tanto, estos enfoques pueden ser inexactos y tener un grado elevado de error intra e inter-observador.

Para atenuar esta problemática, en este estudio se utilizan técnicas de morfometría geométrica, con el objetivo de describir el tamaño y la forma del ilion, utilizando un enfoque basado en coordenadas cartesianas (Zelditch et al., 2012).

## 6.3. MATERIAL Y MÉTODOS

### 6.3.1. Material

El material que se va a utilizar como objeto de estudio para este trabajo, procede de la colección osteológica de individuos infantiles identificados del cementerio de San José de Granada. Actualmente, ésta cuenta con 230 esqueletos, en buen estado de conservación, con edades comprendidas entre los 5 meses de gestación y los 8 años de edad. Los dos sexos se encuentran bien representados al contar con un mínimo de 128 individuos masculinos y 93 femeninos. Gracias a su carácter relativamente reciente, siglo XX, se ha dispuesto de información *antemortem* muy completa, gracias a la existencia de actas de defunción, enterramiento e informes forenses (Alemán et al., 2012). Para llevar a cabo el estudio morfogeométrico se han seleccionado solo aquellos individuos que no han presentado alguno los siguientes criterios de exclusión: estado de conservación del hueso poco aceptable que dificultara la localización precisa de los *landmarks*, desconocimiento del sexo o la edad de muerte y presencia de patologías que pudiese afectar al desarrollo normal de la región anatómica. Posteriormente a la realización de este proceso, la muestra ha quedado

constituida por 71 individuos, 40 niños y 31 niñas, con edades comprendidas entre el nacimiento y el primer año de vida.

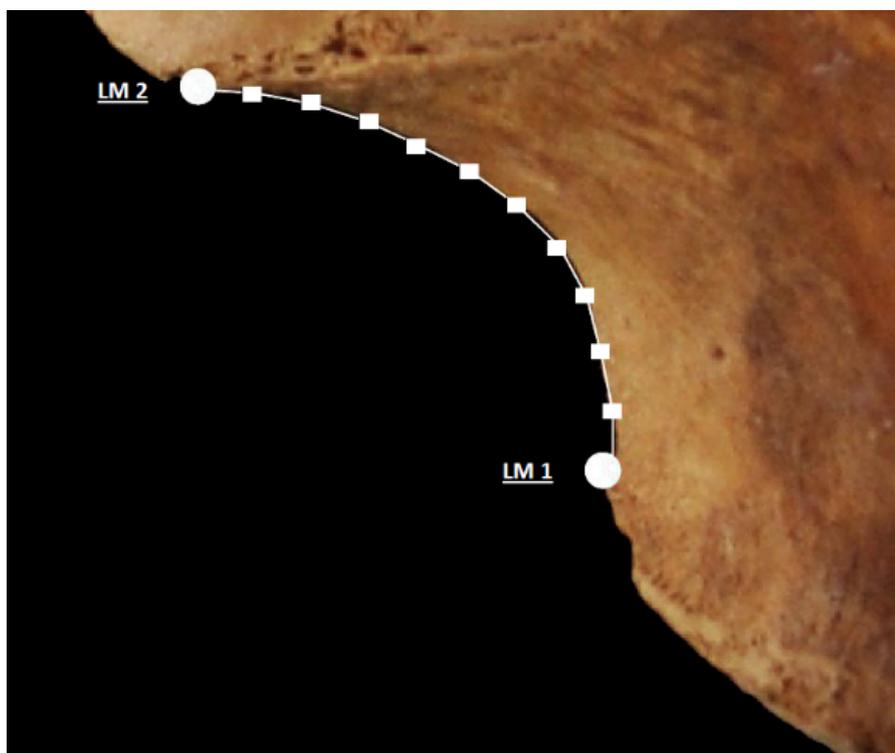
### 6.3.2. Adquisición de los datos

Para el análisis morfogeométrico, en primer lugar, se han tomado fotografías en 2D de la cara ventral del ilion izquierdo infantil con una cámara digital Nikon D-90. Este proceso ha seguido un patrón estándar para la toma de fotografías: la cámara se ha fijado a un trípode en una posición específica en relación al hueso, que a su vez se ha colocado sobre un fondo oscuro con el fin de obtener mayor contraste y junto a un testigo métrico. La distancia entre la lente de la cámara y la muestra ha sido de 0.7m. Para el análisis se ha seleccionado preferentemente el ilion izquierdo, excepto en cuatro casos en que el hueso estaba ausente o en mal estado (en estos casos, el ilion derecho fue fotografiado en su lugar y reflejado digitalmente). Basándonos en estudios previos, 3 *landmarks* y 27 *semilandmarks* fueron incluidos en las imágenes (fig. 1).

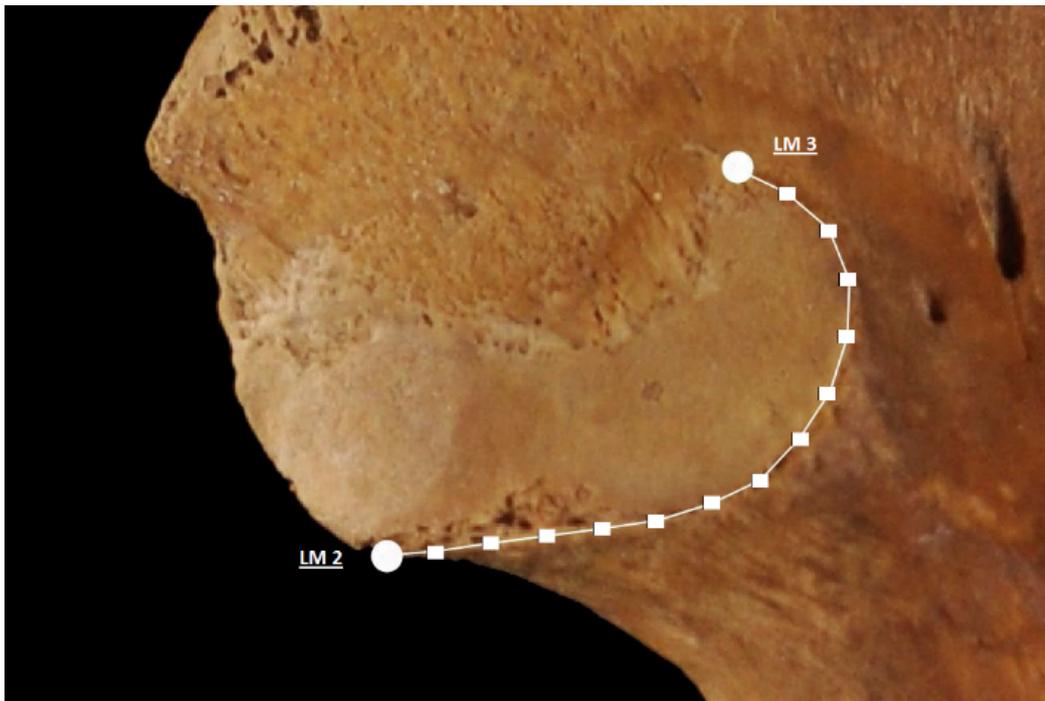


**Figura 1:** Patrón fotográfico estándar del ilion izquierdo. Posición ventral. La distancia entre la lente y la muestra es de 0.7 m. El espécimen (G-190) fue obtenido de la colección de San José (Granada).

El primer *landmark* se ha situado en uno de los extremos de la escotadura ciática, tomando como punto anatómico de referencia, el vértice inferior (fig. 2). Cuando éste ha estado ausente, la localización del *landmark* se ha situado al final de la escotadura ciática, justo antes del inicio de la curva que describe la región acetabular. El segundo *landmark* se encuentra emplazado en el otro extremo de la escotadura ciática, el punto más cercano al borde inferior de la superficie auricular (fig. 2 y 3). El tercero, se localiza en el punto más cercano a la cresta ilíaca, en la parte superior de la superficie auricular (fig. 3). Los *semilandmarks* disponen una línea de puntos equidistantes localizados entre los *landmarks* que describen la curvatura de la escotadura ciática, donde se han colocado 10 *semilandmarks* y de la superficie auricular, en la cual se han localizado 15 (fig. 2). Estos *landmarks* y *semilandmarks* han sido digitalizados mediante el programa tpsDig2 (Rohlf, 2005).



**Figura 2:** Ilustración de landmarks y semilandmarks localizados en la escotadura ciática. Los puntos circulares representan los landmarks. Los cuadrados blancos indican una curva de 10 semilandmarks equidistantes. El espécimen (G-190) fue obtenido de la colección de San José (Granada).



**Figura 3:** Ilustración de landmarks y semilandmarks localizados en la superficie auricular. Los puntos circulares representan los landmarks. Los cuadrados blancos indican una curva de 15 semilandmarks equidistantes. El espécimen (G-190) fue obtenido de la colección de San José (Granada).

Se ha utilizado una submuestra aleatoria de 10 individuos para analizar el error al localizar los *landmarks* y *semilandmarks*. Los *landmarks* y *semilandmarks* se colocaron durante cinco días consecutivos en cada una de las imágenes, seguido de un periodo de dos días de descanso. Este proceso se llevó a cabo durante cinco semanas consecutivas. Para llevar a cabo el error intra-observador, las coordenadas fueron tomadas por un investigador. En el caso del error inter-observador, se necesitó de un segundo investigador para comparar los resultados. Después de verificar los supuestos de la varianza y normalidad, se utilizó el coeficiente de correlación intra-clase (ICC) para probar la fiabilidad de las observaciones (Gonzalez et al., 2011) mediante la clasificación según la escala de Fleiss (Fleiss, 2011; Fleiss et al., 2013), donde  $<0.4$  es un acuerdo pobre y  $>0.75$  es un acuerdo excelente. Todos estos análisis se realizaron con el programa IBM SPSS v.22 (Corp. IBM, 2013).

### 6.3.3. Análisis de la *forma*

Posteriormente a la digitalización de *landmarks* y *semilandmarks*, los datos adquiridos fueron sometidos al proceso de análisis mediante el método de superposición de Procrustes y técnicas de deformación.

Para la eliminar la variación no relacionada con la *forma*, las coordenadas brutas de los *landmarks* fueron analizadas mediante el Análisis Generalizado de Procrustes (Adams et al., 2004) y utilizando el criterio de mínimos cuadrados (Bookstein, 1997). Gracias a este proceso, se eliminan los efectos de translación, rotación y escala. El tamaño del centroide fue seleccionado como variable de medida (Bookstein, 1997), utilizando el programa Coordgen (Sheets, 2003). Con respecto al método de deslizamiento de *semilandmarks*, se ha llevado a cabo aplicando el método de minimización de la energía de torsión, empleando para ello el programa tpsRelw (Rohlf, 2007); la segunda coordenada de cada landmark fue eliminada mediante tpsUtil (Rohlf, 2009).

Las grillas de deformación han sido representadas mediante la función *thin-plate-splines* (TPS). Ésta provee una descripción visualmente interpretable de las deformaciones en la *forma*, utilizando para ello la información perteneciente a las coordenadas de los *landmarks* (Webster y Sheets, 2010). Este análisis se realizó considerando el mismo número de variables como de grados de libertad, utilizando la distancia de Procrustes como unidad de medida (Zelditch et al., 2012).

Las tendencias de variación de *forma* entre individuos masculinos y femeninos se han estudiado mediante un análisis de componentes principales. Los componentes principales simplifican la dimensionalidad de la variación de datos entre los individuos, reduciendo ésta en un número más pequeño de dimensiones ortogonales (Zelditch et al. 2012). Gracias a un gráfico de dispersión y una grilla de deformación de la muestra en un plano de deformación bidimensional que responde a los ejes x e y, podemos observar los cambios de *forma* entre los grupos masculino y femenino y la *forma* consenso. El primer componente principal es alineado con el eje que representa la máxima varianza y

el segundo con la dirección que corresponde al siguiente con más varianza. Para llevar a cabo este análisis se han utilizado los programas PCAgen (Sheets, 2003) y MorphoJ (Klingenberg, 2008).

Tanto el análisis de variables canónicas, como el gráfico de dispersión y deformación a lo largo de dichas variables se han obtenido con el programa CVAGen (Sheets, 2003). Este análisis se realizará con la finalidad de saber la posición de los individuos en relación a esas variables. Debido al número tan amplio de variables obtenidas en el proceso de la localización de los *landmarks* y *semilandmarks*, se ha tenido que reducir la dimensión de los datos originales en base a un número de componentes principales inferior al tamaño muestral del grupo minoritario.

Para obtener la significación estadística se ha ejecutado un análisis multivariado de la varianza (MANOVA). En primer lugar, se han probado los supuestos de normalidad, distribución de la muestra y homogeneidad de las matrices de varianza y covarianza con el test de Kolmogorov-Smirnov, la prueba de Levene y la M de Box. El análisis discriminante por sexo se ha llevado a cabo por el método de la validación cruzada dejando uno fuera, incluyendo en primer lugar únicamente las variables de *forma* y posteriormente añadiendo la variable del tamaño del centroide. El objetivo de este análisis es lograr una clasificación predictiva de la pertenencia de los individuos a un grupo. El valor F de la lambda de Wilks' va a arrojar el poder discriminante de las variables. Todos estos análisis han sido llevados a cabo con el programa estadístico IBM SPSS v.22 (Corp. IBM, 2013).

El test de remuestro permite diferenciar entre las *formas* de referencia medias de cada grupo. Este análisis basado en un test de permutación de remuestros aleatorios (N=4900), se ha realizado con el programa Two Groups (Sheets, 2003).

## 6.4. RESULTADOS

### 6.4.1. Error intra-observador e inter-observador

Atendiendo a la valoración del coeficiente de correlación intraclase (ICC), el error inter-observador e intra-observador asociado a la posición relativa de los *landmarks* ha mostrado un grado de acuerdo excelente en el análisis entre todas sus comparaciones (tab 1 y 2).

**Tabla 1.** Error intra-observador

	Valor de consistencia	Grado de acuerdo
<b>LM1</b>	1,000	EXCELENTE
<b>LM2</b>	0,965	EXCELENTE
<b>LM3</b>	0,852	EXCELENTE
<b>SML (27)</b>	0,933	EXCELENTE

LM, Landmark; SML, Semilandmark.

**Tabla 2.** Error inter-observador

	Valor de consistencia	Grado de acuerdo
<b>LM1</b>	0,962	EXCELENTE
<b>LM2</b>	1,000	EXCELENTE
<b>LM3</b>	0,837	EXCELENTE
<b>SML (27)</b>	0,949	EXCELENTE

LM, Landmark; SML, Semilandmark.

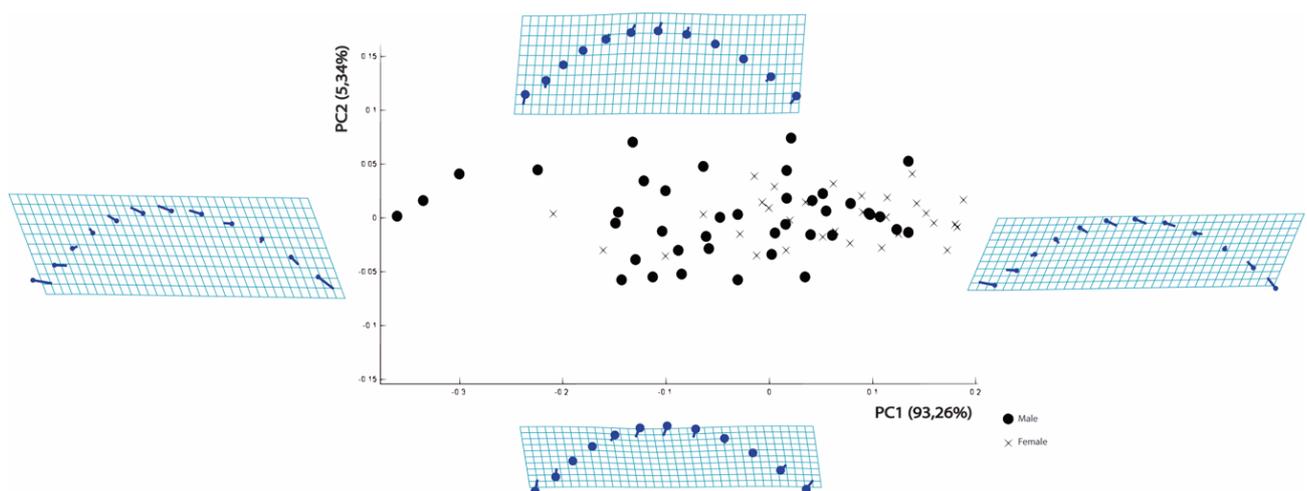
### 6.4.2. Escotadura ciática

La varianza de la escotadura ciática, es explicada en más de un 95% por los 2 primeros componentes principales.

La figura número 4 muestra el primer componente principal con mayor varianza acumulada (93.26%, representada en el gráfico a lo largo del eje X). Por

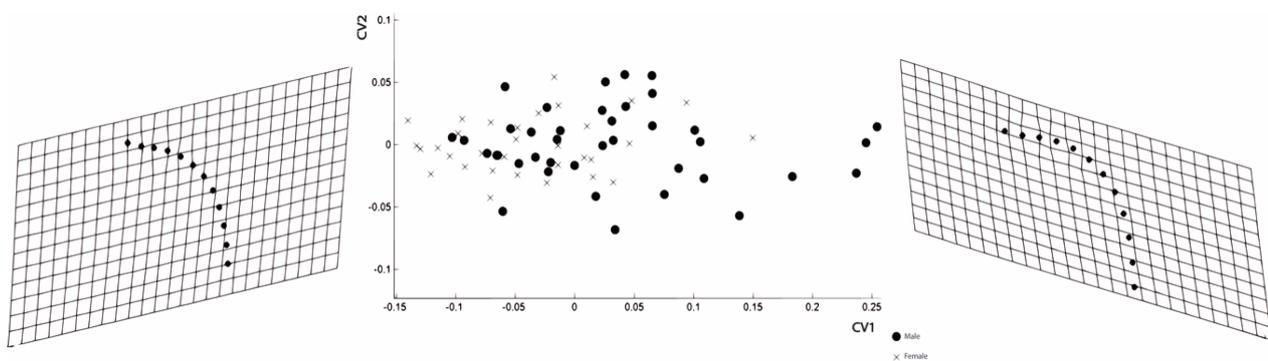
tanto, las deformaciones a lo largo del eje, muestran los cambios morfológicos en el primer componente principal. Los valores negativos (fig. 4) representan una escotadura ciática con un ángulo más estrecho y cuyo punto de máxima profundidad se encuentra desplazado de manera superior hacia la cresta iliaca. Por el contrario, en los valores positivos, la escotadura ciática describe una curvatura más amplia que tiene su punto de máxima profundidad desplazado hacia la región acetabular. El segundo componente principal, que cuenta con un 5.34% de la varianza acumulada, muestra unas deformaciones mucho menos pronunciadas, como consecuencia de un solapamiento de los individuos a lo largo del eje Y. Sin embargo, sí se puede apreciar como los individuos localizados en la parte positiva muestran una curvatura en la escotadura ciática más estrecha que aquellos individuos concentrados en los valores negativos.

El gráfico de dispersión resultante del análisis de componentes principales muestra superposición de individuos (fig. 4). Los individuos de sexo masculino se dispersan a lo largo de todo el eje X. Por otro lado, los de sexo femenino se localizan en gran medida en los valores positivos del eje. Sin embargo, a lo largo del eje Y, tanto individuos masculinos como femeninos se concentran principalmente en torno al valor 0.



**Figura 4:** Análisis de componentes principales de la escotadura ciática. El gráfico de dispersión muestra la posición relativa de los individuos respecto a los dos primeros componentes principales. Las grillas de deformación TPS representa la variación a lo largo de PC1 y PC2.

El análisis de variables canónicas muestra la dispersión de individuos masculinos a lo largo de la variable canónica (fig. 5), mientras los individuos femeninos están principalmente concentrados alrededor de los valores negativos. Como consecuencia, la grilla de deformación derecha (que representa a los masculinos) describe la escotadura ciática mayor con un ángulo más cerrado, lo que se traduce en una curvatura más pronunciada que en individuos femeninos.



**Figura 5:** Análisis de variables canónicas de la escotadura ciática. El gráfico de dispersión muestra la posición de los individuos en relación con la variable canónica. Las grillas de deformación TPS representan la variación a lo largo de la CV.

El valor de la F-Goodall ( $p > 0.002$ ) indica que la *forma* de la escotadura ciática difiere entre ambos sexos. El análisis discriminante, atendiendo a las variables de la *forma*, muestra un 66.1% y un 61.9% de asignación correcta respectivamente para variables originales y validación cruzada (tabla. 3). Al incluir la variable del tamaño del centroide, estos valores se ven incrementados en 67.6% [+1.5%] y 64.8% [+2.9%], respectivamente (tabla 4).

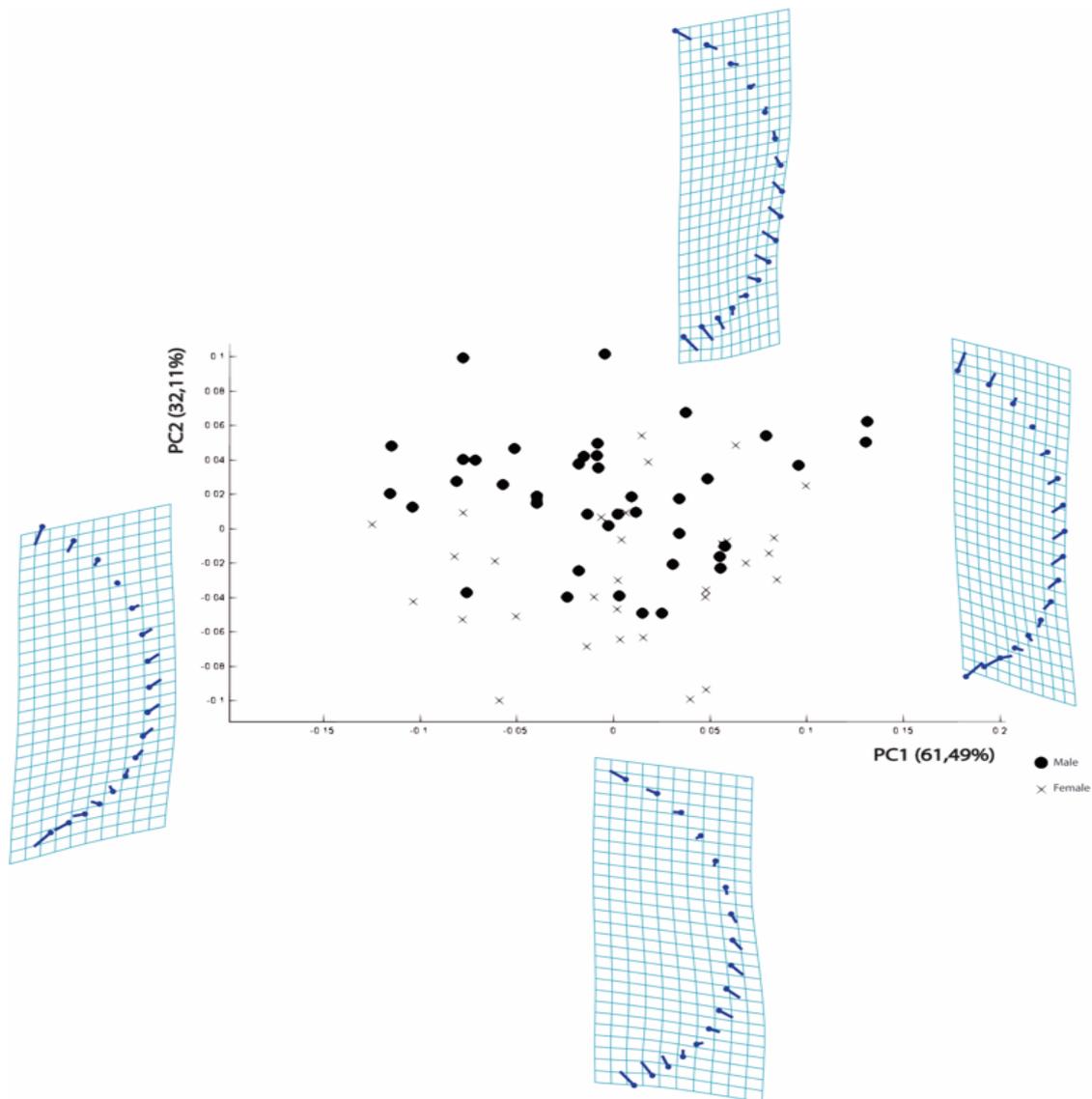
### 6.4.3. Superficie auricular

Con respecto a la superficie auricular, el 95% de la varianza se explica mediante los tres primeros componentes principales.

Los valores positivos del primer componente principal (que cuenta con un 61.49% de varianza acumulada) describen un desplazamiento de los *semilandmarks* localizados en el borde posterior y en la parte superior de la superficie auricular, tienden a moverse ligeramente hacia la región anterior del hueso (fig. 6), mientras que aquellos localizados en el área central de la curvatura, se desplazan hacia el margen posterior. En los valores negativos, los *semilandmarks* localizados en el borde central se encuentran desplazados hacia la región anterior, mientras que sus extremos se alejan hacia la región anterior.

El segundo componente principal (que cuenta con el 32.11% de la varianza) resalta el desplazamiento de los márgenes inferiores de la superficie auricular hacia la región acetabular (valores positivos) o hacia la región posterior (valores negativos). El borde central tiende a estrecharse en la dirección positiva y a ensancharse en la negativa.

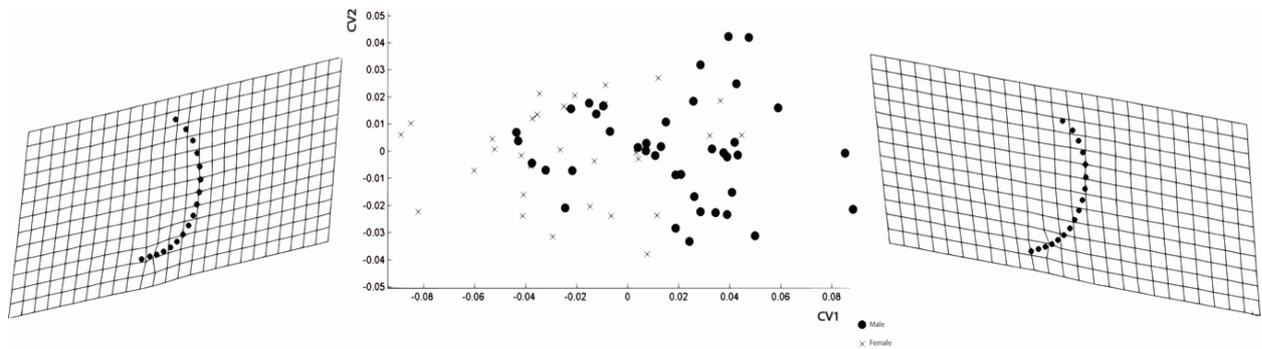
En el gráfico resultante del análisis de componentes principales, se puede observar una superposición homogénea de los individuos, cuya dispersión en ambos sexos abarca todo el eje X. Con respecto al eje Y, los individuos masculinos se encuentran concentrados mayoritariamente a lo largo de los valores positivos mientras que los femeninos se encuentran en los negativos.



**Figura 6:** Análisis de componentes principales de la superficie auricular. El gráfico de dispersión muestra la posición relativa de los individuos respecto a los dos primeros componentes principales. Las grillas de deformación TPS representa la variación a lo largo de PC1 y PC2.

Atendiendo al análisis de variables canónicas (fig. 7) los individuos femeninos se encuentran, en su mayoría localizados en el segmento negativo, mientras que los masculinos lo hacen en los positivos. Las grillas de deformación describen la tendencia mostrada en la fig. 6 a lo largo del primer componente

principal y pone de manifiesto las diferencias a lo largo del margen inferior y en la profundidad del punto de máxima curvatura.



**Figura 7:** Análisis de componentes principales de la escotadura ciática y la superficie auricular. El gráfico de dispersión muestra la posición relativa de los individuos respecto a los dos primeros componentes principales. Las grillas de deformación TPS representa la variación a lo largo de PC1 y PC2.

El valor de la F-Goodall ( $p < 0.0024$ ) indica que la *forma* de la superficie auricular difiere entre los sexos. Mediante el análisis discriminante de las variables de *forma*, el 85.9% y el 61.9% de los individuos fueron clasificados correctamente atendiendo a las variables originales y a la validación cruzada respectivamente. Al incluir el tamaño del centroide como variable, estos valores se reducen en 84.5% [+1.5%] en el caso de las variables originales o incrementan a 64.8% [+2.9] mediante validación cruzada (tabla 4).

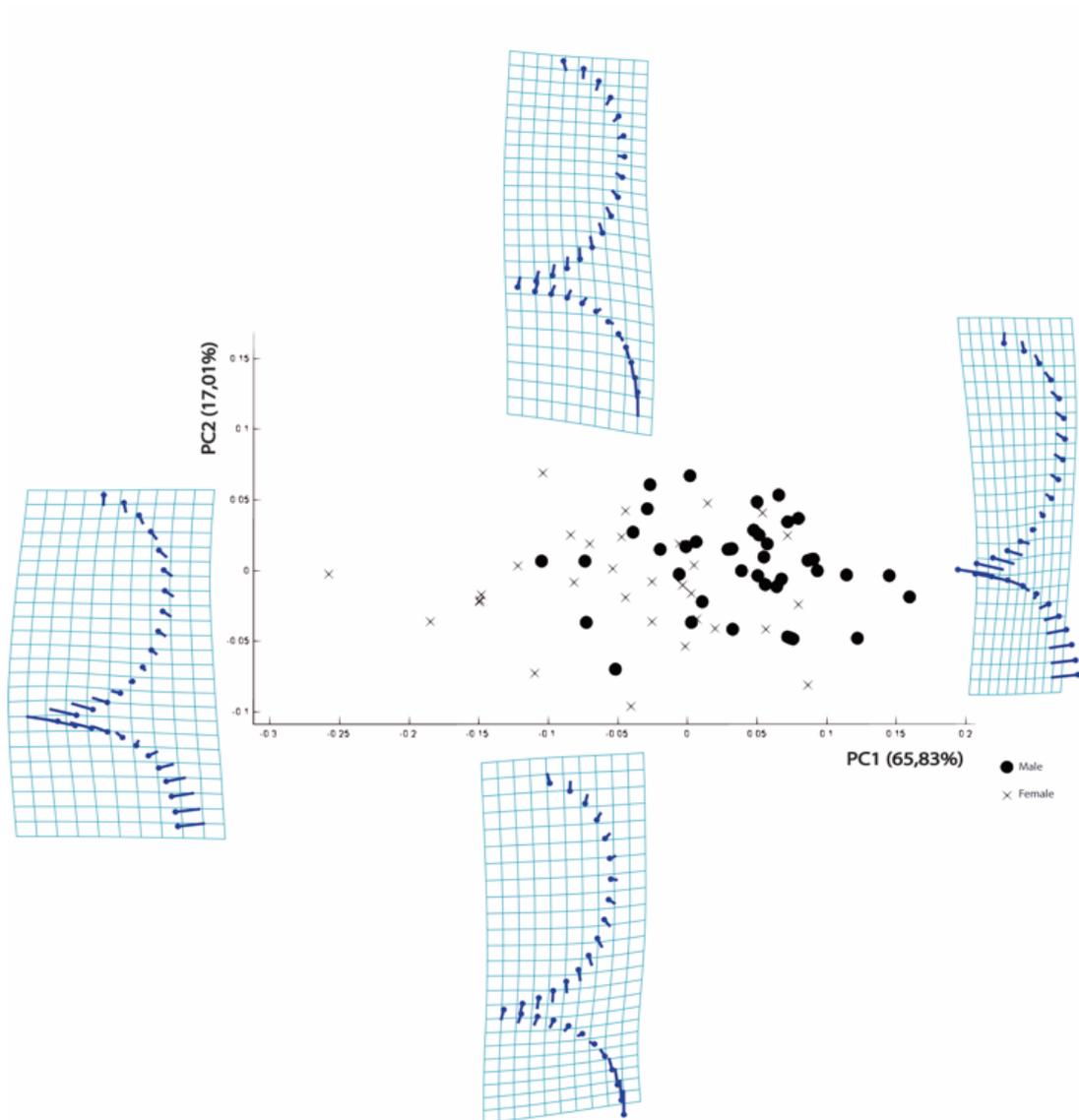
#### 6.4.4. Escotadura ciática y superficie auricular

Los seis primeros componentes principales explican más del 95% de la varianza. Al analizar las dos regiones en combinación, los valores positivos del primer componente principal (65,83% de la varianza) muestran cómo los *landmarks* y *semilandmarks* del margen inferior de la escotadura ciática tienden a desplazarse hacia la región posterior del hueso, mostrando un ángulo de apertura

más cerrado que en la *forma* consenso (fig. 8). Podemos observar también un desplazamiento del margen inferior de la superficie auricular hacia la región anterior y cómo los *semilandmarks* situados en la parte central se posicionan levemente hacia la región posterior. Los valores negativos, en cambio, señalan un desplazamiento del margen inferior de la escotadura ciática hacia la parte anterior, definiendo una estructura más abierta que en la dirección positiva. La superficie auricular, sin embargo, muestra el desplazamiento del margen inferior hacia la región posterior del hueso, produciéndose una leve expansión hacia la región anterior de la parte central de la misma.

El segundo componente principal (17,01 % de la varianza), representa regiones muy simétricas entre sí. La dirección positiva de la negativa puede diferenciarse fundamentalmente en el desplazamiento del margen inferior de la escotadura ciática hacia la región acetabular, en contraste con los valores negativos, que lo hacen en dirección contraria. Los puntos localizados en la superficie auricular tienden a contraerse en los valores positivos mientras que se expanden levemente en los negativos (fig. 8).

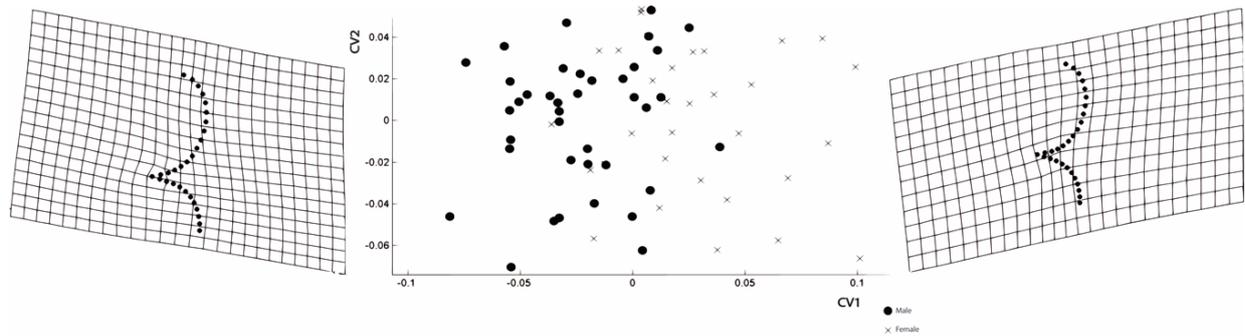
En el gráfico resultante del análisis de componentes principales, se puede observar una distribución relativamente homogénea de los individuos a lo largo de ambos ejes (fig. 8). Se muestra una amplia dispersión de los individuos por los dos primeros componentes principales. Hay un gran número, tanto de individuos masculinos, como de femeninos que se localizan en torno al valor 0 del eje X. Sin embargo, el gráfico describe una tendencia de separación entre los grupos, siendo posible localizar mayoritariamente a los individuos femeninos en los valores negativos del primer componente y a los masculinos en los positivos, mostrando diferencia entre sexos. La distribución de individuos a lo largo del segundo componente principal es más uniforme, localizándose mayoritariamente en el valor 0 del eje Y. Los masculinos se sitúan principalmente en los valores positivos del eje Y; por el contrario, los femeninos se localizan a lo largo de todo el segundo componente principal.



**Figura 8:** Análisis de variables canónicas de la escotadura ciática. El gráfico de dispersión muestra la posición de los individuos en relación con la variable canónica. Las grillas de deformación TPS representan la variación a lo largo de la CV.

El gráfico de variables canónicas muestra una clara separación por sexos, situando a la mayoría de los individuos en su conjunto del sexo femenino en la dirección positiva de la variable canónica y a los masculinos en la negativa (fig. 9). Los valores masculinos, se relacionan con una escotadura ciática más cerrada que en los individuos femeninos. La superficie auricular, por el contrario, es más abierta en la curvatura de su ángulo y presenta una morfología más estrecha en

los individuos situados en la parte positiva, en contraste con la negativa, la cual describe en su curva un ángulo más cerrado en el margen inferior y que tiende a ensancharse en su parte central.



**Figura 9:** Análisis de variables canónicas de la escotadura ciática. El gráfico de dispersión muestra la posición de los individuos en relación con la variable canónica. Las grillas de deformación TPS representan la variación a lo largo de la CV.

El valor del test estadístico F de Goodall indica que los individuos masculinos y femeninos difieren ( $p < 0.0006$ ). El gráfico de dispersión de variables canónicas también muestra una clara separación de sexos en el eje X. El análisis discriminante, atendiendo a las variables de *forma*, muestra un porcentaje total de clasificación correcta del 98,6% y del 70,4% mediante validación cruzada. Sin embargo, al añadir la variable del tamaño del centroide éstos cambian ligeramente, disminuyendo a un 94,3% [-4,3%] al analizar las variables canónicas y aumentando a un 78,9% [+8,5%] mediante validación cruzada (tabla 4).

**Tabla 3.** Resultados del análisis discriminante basado en variables de *forma*.

	Variables originales			Validación cruzada		
	Asignación correcta	Asignación incorrecta	Asignación correcta (%)	Asignación correcta	Asignación incorrecta	Asignación correcta
<b>Escotadura</b>						
<b>ciática</b>						
<b>M</b>	29	12	70.7	27	14	65.9
<b>F</b>	18	12	60	17	13	56.7
<b>Total</b>	47	24	66.1	44	27	61.9
<b>Superficie</b>						
<b>auricular</b>						
<b>M</b>	33	8	82.5	28	13	68.2
<b>F</b>	28	2	93.3	16	14	53.3
<b>Total</b>	61	10	85.9	44	27	61.9
<b>EC + SA</b>						
<b>M</b>	39	2	97.5	31	10	75.6
<b>F</b>	30	0	100	19	11	63.3
<b>Total</b>	69	2	98.6	50	21	70.4

M, Masculino; F, Femenino; EC, Escotadura ciática; SA, Superficie auricular.

**Tabla 4.** Resultados del análisis discriminante basado en variables de *forma* y tamaño.

	Variables originales			Validación cruzada		
	Asignación correcta	Asignación incorrecta	Asignación correcta (%)	Asignación correcta	Asignación incorrecta	Asignación correcta (%)
<b>Escotadura</b>						
<b>ciática</b>						
<b>M</b>	28	13	68.3	27	14	65.9
<b>F</b>	20	10	66.7	19	11	63.3
<b>Total</b>	48	23	67.6	46	25	64.8
<b>Superficie</b>						
<b>auricular</b>						
<b>M</b>	33	8	80.5	29	12	70.7
<b>F</b>	27	3	90	17	13	56.6
<b>Total</b>	60	11	84.5	46	25	64.7
<b>EC + SA</b>						
<b>M</b>	38	3	92.6	34	7	82.9
<b>F</b>	29	1	96.6	22	8	73.3
<b>Total</b>	67	4	94.3	56	15	78.9

M, Masculino; F, Femenino; EC, Escotadura ciática; SA, Superficie auricular.

## 6.5. DISCUSIÓN

Esta investigación se ha centrado en ofrecer una aportación más al estudio de uno de los mayores problemas a los que se ha tenido que enfrentar la Antropología Forense, la estimación de sexo en individuos subadultos mediante la utilización del ilion. Como se ha referido anteriormente, esta cuestión ha sido estudiada haciendo uso de diferentes metodologías que, basándose en las definiciones cualitativas y la morfometría tradicional, cuentan con una serie de limitaciones que dificultan la fiabilidad de sus análisis, lo cual supone un problema a la hora de elaborar nuevas técnicas para su uso en el contexto arqueológico y forense. Los altos porcentajes de fiabilidad que pueden ofrecer las técnicas de morfometría geométrica, permiten un enfoque muy preciso en el desarrollo de los métodos para la determinación del sexo.

Gracias a este estudio se pudo detectar dimorfismo sexual tanto en el análisis independiente de las regiones iliacas, como en el análisis del hueso en su conjunto, demostrando que existe un mayor poder discriminante cuando la escotadura ciática y la superficie auricular son evaluadas de manera conjunta.

Estudios anteriores han citado el valor de estas regiones para estimar el sexo en subadultos. Schutkowski (1993) propuso un método para la determinación del sexo en subadultos, que sigue siendo ampliamente utilizado en el campo de las Ciencias Forenses. En una muestra de 61 individuos (0-11 años) y siguiendo una metodología cualitativa, no métrica, Schutkowski demostró la importancia de la escotadura ciática y la superficie auricular del ilion subadulto para la estimación del sexo. El estudio de Spitalfields logró resultados satisfactorios de clasificación de sexo al analizar el ángulo y la profundidad de la muesca ciática (81.6 y 79.6% para hombres y mujeres, respectivamente). Atendiendo a las características morfológicas de la superficie auricular, Schutkowski pudo clasificar satisfactoriamente el 81.5% de los individuos masculinos y el 60% de los femeninos.

Posteriormente, Vlcek y colaboradores (2008) volvieron a evaluar los estudios de Schutkowski (1993) y Sutter (2003) obteniendo valores con bajo porcentaje de acierto de clasificación en el estudio de la escotadura ciática. Del mismo modo, estudios posteriores han encontrado tasas inferiores de éxito a las de Schutkowski al analizar la superficie auricular (Cardoso y Saunders, 2008).

Nuestros resultados parecen ser consistentes con estas investigaciones que resaltaron la importancia de la escotadura ciática y de la superficie auricular como buenos indicadores para la estimación del sexo en individuos subadultos. Sin embargo, han alcanzado valores inferiores a aquellos descritos por Schutkowski (1993). Además, es necesario resaltar que las comparaciones directas con metodologías cualitativas mediante asignación visual son complicadas, debido a las diferencias existentes entre técnicas utilizadas para el análisis y las características de la muestra. A esta cuestión hay que añadir el problema adicional que podría suponer el no tener en cuenta la experiencia previa del observador en el análisis del dimorfismo sexual mediante la pelvis subadulto (Gonzalez et al., 2009).

Un estudio realizado recientemente en la colección de subadultos del Cementerio de San José, ha destacado las limitaciones del método de Schutkowski (Olivares y Aguilera, 2016). Además, debido a la subjetividad de la metodología, el acuerdo intra e inter-observador fue bajo. Esto concuerda con nuestro estudio, ya que las tasas de éxito obtenidas al clasificar los individuos de una muestra similar, fueron más bajas que las obtenidas por Schutkowski en la colección de Spitfields.

Nuestros análisis están en línea con el estudio de García Mancuso y González (2013), también llevados a cabo mediante técnicas de morfometría geométrica. Atendiendo a los patrones de variación de la *forma* de distintas regiones del ilion subadulto, los autores resaltaron la importancia de la escotadura ciática como el rasgo más dimórfico del esqueleto subadulto, logrando además un alto porcentaje de éxito en la clasificación. Esto también concuerda con los resultados previamente expuestos, que mostraron resultados similares al analizar tanto la escotadura ciática como la superficie auricular.

Con respecto al ilion en su totalidad, Wilson y colaboradores (2008) describieron previamente una metodología de alta precisión para determinar el dimorfismo sexual en individuos subadultos, basada en enfoques morfogeométricos. Al igual que Wilson y colaboradores, nuestros resultados obtuvieron porcentajes de clasificación más altos para la escotadura ciática que para la superficie auricular. Sin embargo, como resultado de investigaciones posteriores (Wilson et al., 2011; Wilson et al., 2015), Wilson y colaboradores sugieren que la variabilidad en la morfología masculina y femenina puede verse afectada por el rango y distribución de los grupos de edad analizados. Por lo tanto, el análisis de las diferentes trayectorias en la ontogenia entre hombres y mujeres podría proporcionar una base fiable para establecer nuevas metodologías para la determinación del sexo en individuos en etapas tempranas del desarrollo (Wilson et al., 2011).

Los resultados anteriormente expuestos, mostraron ligeras diferencias cuando el tamaño del centroide fue incluido como variable de tamaño. Por tanto, debería considerarse la realización de nuevas investigaciones que incluyan la edad como una variable continua e independiente (Olivares y Aguilera, 2016).

Las diferencias observadas entre estos estudios y los diferentes resultados logrados, probablemente se deban a las diferencias de las muestras, los métodos de análisis y la interpretación de los resultados. Sin embargo, atendiendo a las similitudes, podemos concluir que los rasgos morfológicos más fiables para la determinación del sexo son, por un lado, el ángulo y la profundidad de la escotadura ciática y por otro, el análisis combinado de esta última y la superficie auricular (Olivares y Aguilera, 2016).

Los resultados de este estudio, indican que el uso de *landmarks* y *semilandmarks* que describen la *forma* de la escotadura ciática han alcanzado altos valores de clasificación correcta en individuos masculinos (82.9%) y en femeninos (73.3%), cuando tanto las variables de *forma* como de tamaño han sido analizadas en combinación. Además, los gráficos de dispersión han mostrado una significativa separación de individuos a lo largo de los ejes, tanto en el análisis de componentes principales como en las variables canónicas. Por

lo tanto, y acorde a investigaciones previas, los individuos masculinos subadultos han mostrado escotaduras ciáticas más profundas y estrechas que los individuos femeninos. Además, la superficie auricular en las niñas muestra una trayectoria en su margen inferior paralela a la escotadura ciática, dibujando un ángulo de apertura más cerrado que en niños. La incorporación de ambas regiones en el análisis morfogeométrico puede proporcionar información adicional sobre los patrones morfológicos de la variación del ilion subadulto en el intervalo del primer año de vida.

Asimismo, este enfoque permite la cuantificación de la *forma* de las estructuras morfológicas, lo que es difícil de obtener mediante mediciones lineales (Gonzalez et al., 2009).

Aunque estos resultados deben tratarse con precaución hasta que puedan confirmarse en otras muestras más grandes, es posible asumir el potencial de la morfometría geométrica en el campo de la Antropología Forense (Slice, 2006).

Confiamos en la fiabilidad de nuestros datos, debido a la calidad de la colección utilizada (Alemán et al., 2012). Sin embargo, es importante probar si estos hallazgos pueden reproducirse en otras poblaciones.

Al mismo tiempo, las diferencias detectadas entre los sexos, con respecto a los patrones de variación de *forma* y tamaño, sugieren que la madurez sexual debe incluirse como una variable a considerar en el estudio de la determinación del sexo en los restos óseos (Wilson et al., 2011). Es por ello necesario, la realización de un estudio dirigido a establecer las diferencias ontogénicas del ilion infantil para la colección de individuos subadultos del cementerio de San José, el cual pudiese otorgar una mayor fiabilidad a la hora de conformar un estudio sobre la determinación del sexo en individuos infantiles.

## 6.6. CONCLUSIONES

Haciendo uso de la colección osteológica de los subadultos identificados del Cementerio de San José, se han comparado las características morfológicas del ilion masculino y femenino. Las técnicas basadas en morfometría geométrica, al contrario de las técnicas no métricas, son altamente replicables y se pueden aplicar ampliamente con mayor precisión. La alta calidad de la muestra utilizada nos ha permitido contar con una muestra elevada, a pesar de haber pasado por el proceso de exclusión de individuos patológicos o de estado de conservación pobre. Por ello, la representatividad de la población no se ha visto comprometida con los estándares de fiabilidad básicos a la hora de elaborar nuevas metodologías en el campo de la Antropología Física y Forense. Los resultados alcanzados necesitan complementarse con un mayor número de casos y la ampliación del rango etario, a fin de conocer la variación ontogénica con el crecimiento. Además, se considera fundamental que los resultados obtenidos aquí, puedan ser contrastados con otros estudios desarrollados a partir de muestras de diferente origen. Esta investigación, lejos de considerarse completa, tiene la finalidad de servir como aporte a uno de los mayores retos en el campo de la Antropología Física y Forense, la identificación del sexo en individuos subadultos.

## 6.7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a D. José Antonio Muñoz, Director Gerente, Dña. Maribel Martín, Coordinadora de Servicios, y a todo el personal de EMUCESA del cementerio de San José de Granada por su asistencia; al Juez Magistrado (Juzgado de Primera Instancia nº 5) responsable de la Oficina de Registro de Granada y a los revisores anónimos por sus sugerencias e indicaciones. Este trabajo pertenece a los estudios de doctorado del autor en el programa de Biomedicina (B11.56.1) en la Universidad de Granada.



## Capítulo 7

Estimación del sexo en individuos subadultos de un grupo de edad específico mediante análisis morfogeométrico de pubis e isquion





## **PRESENTACIÓN DEL ARTÍCULO**

El artículo que se presenta a continuación ha sido publicado en la revista científica de alto impacto "*Forensic Science International*", la cual se encuentran entre las primeras dentro de su categoría en publicaciones que abordan la temática de la Antropología Forense. Esta publicación ha sido indexada bajo las categorías de Medicina Legal y Ciencias Forenses y Patología.

Este trabajo coincide con el del anterior en cuanto a que tiene como objetivo, valorar las numerosas posibilidades de análisis que presentan las técnicas de morfometría geométrica en la estimación del sexo biológico de los individuos subadultos.

En esta ocasión se han seleccionado los elementos restantes pertenecientes al hueso coxal, el isquion y el pubis. La muestra de estudio tiene su origen, nuevamente, en la colección osteológica de individuos subadultos de San José (Granada). Gracias a los altos índices de calidad que ofrece esta colección, ha sido posible excluir aquellos individuos que presentaran características patológicas o cuyo estado de conservación comprometiese la adquisición fiable de los datos.

Siguiendo el esquema del artículo anterior y dadas las ventajas que ofrece en el estudio de la forma y el tamaño de los organismos, se ha optado por la

aplicación de las técnicas de morfometría geométrica bi-dimensionales sobre un grupo de edad específico que comprende el primer año de vida del individuo.

Sin embargo, este trabajo ha contado con dos limitaciones añadidas. En primer lugar, la dificultad que supone el análisis de estos elementos óseos, ya que, debido a su tamaño y su fragilidad, éstos no siempre se encuentran en las condiciones óptimas de conservación como para llevar a cabo un proceso de toma de datos fiable. Esto ha provocado que el proceso de exclusión de individuos de la muestra final haya sido mayor que en el estudio anterior. Además, debido a las prácticamente inexistentes investigaciones que se han realizado abordando el análisis del isquion y el pubis infantil mediante morfometría geométrica, la comparativa con otras metodologías de investigación y los resultados derivados de estas, ha sido más complicada.

Estas limitaciones ponen aún más de manifiesto la necesidad de adaptar aquellas metodologías habitualmente empleada por la Antropología Forense a las necesidades actuales, desarrollando nuevas técnicas específicas para diferentes grupos poblacionales, lo que permitiría realizar una estimación del sexo con mayor fiabilidad

El doctorando Enrique José Estévez Campo, como primer firmante de esta publicación, ha sido el encargado de la realización de las tareas de toma de fotografías, adquisición de datos, análisis morfogeométrico y análisis de estadística multivariante. Una vez más, la colaboración del resto de coautores, expertos en la elaboración de metodologías en el campo de la Antropología Forense y técnicas morfogeométricas, ha sido imprescindible, contribuyendo en la repetición de la toma de datos para valorar el posible grado de subjetividad de la misma, así como de la revisión bibliográfica y la corrección en la redacción del artículo.

## ÍNDICES DE CALIDAD DE LA REVISTA

Full Journal Title: Forensic Science International

ISO Abbrev. Title: Forensic Sci. Int

JCR Abbrev. Title: FORENSIC SCI INT

ISSN: 0379-0738

Issues/Year: 12

Language: English

Journal Country: Ireland

Publisher: Elsevier Ireland LTD

Publisher address: Elsevier House, Brookvale Plaza, East Park, Shannon, Co. Clare, Ireland

Subjects: MEDICINE, LEGAL

Total Cites: 12323

Impact Factor: 1.989

5- Year Impact Factor: 2.307

Immediacy Index: 0.411

Citable Items: 416

Cited Half-Life: 8.0

Citing Half-Life: 9.3

Source Normalized Impact per Paper (SNIP): 1.336

SCImago Journal Rank (SJR): 1.078

Category Name: MEDICINE, LEGAL

Total Journals in Category: 15

Journal Rank in Category: 5

Quartile in Category: Q2



**Specific-age group sex estimation of infants through geometric morphometrics analysis of pubis and ischium.**

**Revista en la que se ha publicado:**

Forensic Science International. 286:185–192

**Recibido:** 1 de diciembre de 2017

**Aceptado:** 8 de marzo de 2018

**Publicado online:** 16 de marzo de 2018

**Autores:**

Enrique José Estévez Campo

Sandra López Lázaro

Claudia López-Morago Rodríguez

Inmaculada Alemán Aguilera

Miguel Cecilio Botella López

**Palabras clave:** Morfometría Geométrica, estimación del sexo, dimorfismo sexual juvenil, pubis, isquion, Antropología Forense.



## 7.1. RESUMEN

Determinar el sexo de individuos sin identificar es uno de los principales retos de la Antropología Física y Forense. En el esqueleto adulto, este proceso se puede realizar mediante el análisis de los rasgos morfológicos y métricos de un gran número de huesos. La pelvis humana es considerada como uno de los elementos más importante para la determinación del sexo en individuos adultos. Sin embargo, estas investigaciones presentan varias limitaciones en especímenes infantiles debido a la ausencia de los caracteres sexuales secundarios. En este estudio, se analiza el dimorfismo sexual del pubis y el isquion infantil, atendiendo a su *forma* (residuos de procrustes) y tamaño (tamaño del centroide), utilizando para ello, la colección osteológica de individuos subadultos identificados del cementerio de San José (Granada, España), compuesta por 58 individuos para el pubis y 83 en el caso del isquion, con edades comprendidas entre el nacimiento y el primer año de vida. Para ello, se han aplicado técnicas basadas en morfometría geométrica y estadística multivariada. Los resultados obtenidos en el análisis del error intra e inter-observador, mostraron un buen grado de acuerdo en la ubicación de las coordenadas *landmarks* y *semilandmarks*. El análisis de componentes principales, atendiendo a las variables de *forma* y tamaño, mostró una amplia superposición entre ambos sexos, sugiriendo un bajo grado de dimorfismo sexual. El análisis de variables canónicas no mostró cambios significativos entre las formas masculinas y femeninas. Como consecuencia, el análisis discriminante con validación cruzada dejando uno fuera, ha proporcionado unos porcentajes de clasificación correcta bajos. La inclusión del tamaño del centroide como variable discriminante no implica una mejora significativa en los resultados del análisis. Las similitudes encontradas entre los sexos evitan la consideración de la morfología del pubis y el isquion como estimador del sexo para las primeras etapas del desarrollo humano. Los autores sugieren ampliar este estudio analizando las diferentes trayectorias ontogénicas de la *forma* y el tamaño entre individuos masculinos y femeninos.

## 7.2. INTRODUCCIÓN

La estimación precisa del sexo a partir de los restos esqueléticos es uno de los principales objetivos de la Antropología Física y Forense. Este desafío implica a uno de los componentes más importantes del perfil biológico. Debido a la importancia que supone, tanto para fines forenses como arqueológicos, llevar a cabo una estimación precisa del sexo, se han desarrollado un amplio número de metodologías y técnicas destinadas a obtener los rasgos más dimórficos del esqueleto humano. En adultos, la región pélvica y el cráneo han sido utilizados tradicionalmente como los estimadores del sexo más precisos (Buikstra y Ubelaker, 1994; Iscan y Steyn, 2013). Por otro lado, en individuos subadultos, las investigaciones que han abordado esta cuestión han enfocado su análisis en el hueso coxal y la mandíbula (Fazekas y Kosa, 1978; Schutkowski, 1993; Ferembach et al., 1980). Las metodologías basadas en los rasgos morfológicos, medidas métricas, y técnicas morfogeométricas del hueso pélvico adulto son ampliamente aceptadas en el campo de la Antropología Forense (Phenice, 1969; Bruzek, 2002; Albanese, 2003; Velemínska et al., 2013); sin embargo, este proceso se hace más complejo en individuos subadultos, debido a que los caracteres secundarios relacionados con la variabilidad sexual no presentan su completo desarrollo hasta la pubertad (Scheuer y Black, 2000).

Además, la dificultad de encontrar diferencias morfológicas entre los sexos se ve obstaculizada por el reducido número de estudios basados en colecciones esqueléticas identificadas de individuos juveniles (Baker et al., 2005; Kewis, 2007). Por tanto, esto representa una limitación muy significativa para el trabajo de campo forense y bioarqueológico (Baker et al., 2005).

El coxal humano está compuesto por tres huesos, el ilion, el isquion y el pubis, los cuales, se encuentran osificados y con todos sus componentes óseos bien representados en el momento del nacimiento (Scheuer y Black, 2000). Sin embargo, la mayoría de los patrones de variación sexual entre individuos en esta región ocurren durante la adolescencia, periodo en el que se producen los

cambios en el desarrollo del crecimiento acetabular, la longitud del pubis, la cavidad pélvica y la concavidad subpúbica. Por tanto, el análisis de los rasgos más dimórficos en individuos en etapas más tempranas de desarrollo sigue siendo un importante desafío en el campo de la Antropología Forense (Baker et al., 2005; Saunders, 2008).

Debido al alto porcentaje de éxito y precisión que ofrece la estimación del sexo en individuos adultos a partir de la pelvis, numerosos estudios han analizado los patrones de variación sexual entre los rasgos morfológicos de la pelvis subadulta y más específicamente, del ilion. Tradicionalmente, los patrones de variación más dimórficos se han evaluado mediante una aproximación de carácter cualitativo, basada en el análisis visual de rasgos morfológicos (Schutkowski, 1993; Cardoso y Saunders, 2008) o de manera cuantitativa, a partir de mediciones lineales (Weaver, 1980; Vlak et al., 2008). Sin embargo, analizar la forma original de los organismos biológicos es difícil, si no imposible, utilizando los métodos morfométricos tradicionales (Adams et al., 2004). El uso de la evaluación morfológica de las características sexuales discriminantes puede inducir a problemas asociadas con la subjetividad de la observación, especialmente atendiendo a la formación y experiencia previa de los investigadores (González et al., 2009). Por otro lado, las variables métricas implican la aplicación de procedimientos de estadísticos multivariantes a un número determinado de relaciones de distancia; esta literalidad en las diferentes mediciones podría excluir información sobre la forma original de la estructura biológica analizada (Slice, 2006).

Estas complicaciones pueden resolverse aplicando la morfometría geométrica en el estudio de la pelvis subadulta (González et al., 2005; García Mancuso y González, 2013; Wilson et al., 2008; Wilson et al., 2011; Wilson et al., 2015; Estévez et al., 2017). La morfometría geométrica es un conjunto de técnicas populares y de efectividad demostrada en el análisis de los patrones de variación entre individuos en el campo de la Antropología Física y Forense. Gracias a la información obtenida sobre la relación espacial entre los puntos de referencia, es posible realizar una representación gráfica de los patrones de variación de la

*forma* (Webster y Sheets, 2010). Estas técnicas ofrecen grandes ventajas, ya que, no solo puede ofrecer una descripción más precisa de la *forma* analizada, sino que, simplifica la visualización, interpretación y comunicación de los resultados (Richtsmeier, 2002).

Numerosos son los estudios que han intentado analizar el crecimiento del pubis y del isquion para determinar la edad y el sexo de los individuos adultos y sus diferentes patrones de variación entre las formas masculina y femenina (Kelley, 1978; Ubelaker y Volk, 2002; Klales et al., 2012; Seider, 1980; Miles y Bulman, 1995; Rissech et al., 2003; Rissech y Malgosa, 2007). Sin embargo, debido a la morfología y el tamaño del pubis y el isquion en etapas tempranas del desarrollo, encontrar esos elementos en condiciones óptimas para su análisis es todo un desafío (Lewis, 2007), impidiendo el desarrollo de numerosos estudios sobre las diferencias entre individuos masculinos y femeninos durante el primer año de vida.

El objetivo de este estudio es analizar el dimorfismo sexual del pubis y el isquion subadulto en un pequeño grupo de edad específico en una muestra de origen mediterráneo, mediante técnicas basadas en morfometría geométrica.

## 7.3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.3.1. Muestra

Este estudio ha tomado su muestra de análisis de la colección osteológica de individuos subadultos identificados del cementerio de San José (Granada, España). Esta colección está compuesta por una gran cantidad de individuos juveniles enterrados en el Cementerio de San José durante el siglo XX. Debido a su carácter relativamente reciente, se ha obtenido información *antemortem* fiable a partir de los registros cementeriales (Alemán et al., 2012).

En el momento en que se llevó a cabo este estudio, la colección estaba compuesta por 230 esqueletos juveniles bien conservados con edades comprendidas entre los 5 meses de gestación y los 8 años de edad. Sin embargo, el número final de especímenes que compusieron la muestra se ha visto reducido debido a la aplicación de los siguientes criterios de exclusión: ausencia del hueso, alteraciones tafonómicas, sexo o edad de muerte desconocida y presencia de patologías que pudiesen afectar el crecimiento normal de esta región anatómica.

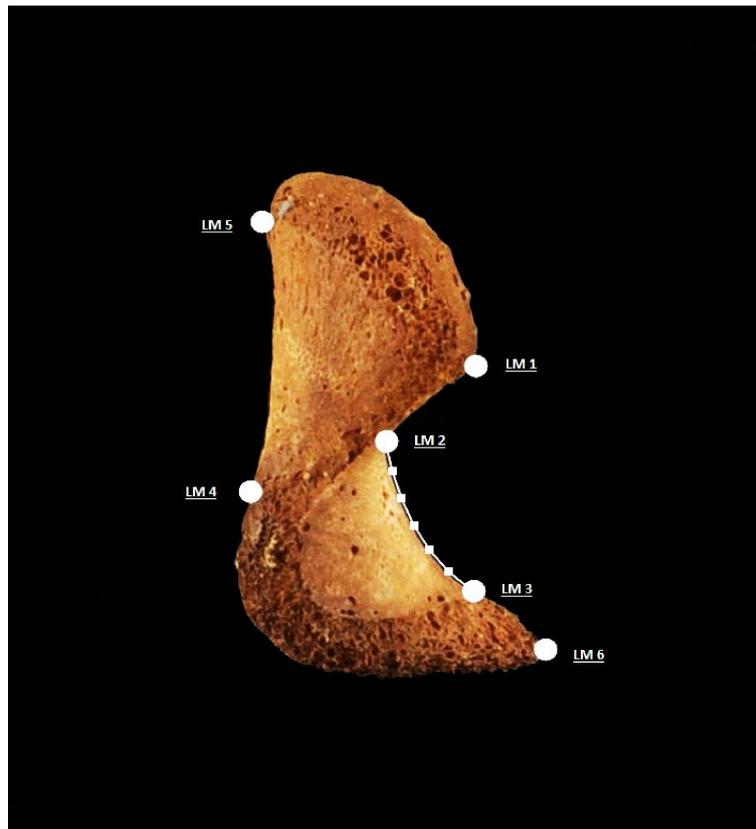
La composición final de la muestra consistió en 58 individuos (38 masculinos y 20 femeninos) para el pubis y 83 individuos (56 masculinos y 27 femeninos) para el isquion, con un rango de edad comprendido entre el nacimiento y el primer año de vida.

### 7.3.2. Adquisición de los datos

Se seleccionaron preferentemente los isquion y pubis del lado izquierdo. Sin embargo, en 6 casos diferentes el pubis izquierdo se encontraba ausente o presentaba un estado de conservación no adecuado para su análisis. Por tanto, en esos casos, el pubis derecho se reflejó digitalmente y se utilizó como sustituto. Cada una de las muestras se orientó y fotografió de forma consistente utilizando una cámara digital Nikon D-90 con una lente Nikon de 18-55 mm. La distancia entre la muestra y la lente fue de 0.7 m.

Se colocaron 6 *landmarks* para delimitar la región del área púbica. El primer *landmark* (LM 1) se coloca en un extremo de la rama postero-superior del pubis, utilizando la superficie acetabular como punto de referencia anatómica. El segundo punto de referencia (LM 2) se coloca en la intersección de la línea pectínea y la línea del cuerpo púbico. El tercer punto de referencia (LM 3) está en el extremo opuesto de la rama inferior del pubis. El cuarto *landmark* (LM 4) se asignó a la parte más superior y anterior de la sínfisis púbica. Un quinto punto de referencia (LM 5) se colocó en la parte antero-superior del pubis, utilizando de nuevo, la superficie acetabular como punto de referencia anatómica. El sexto

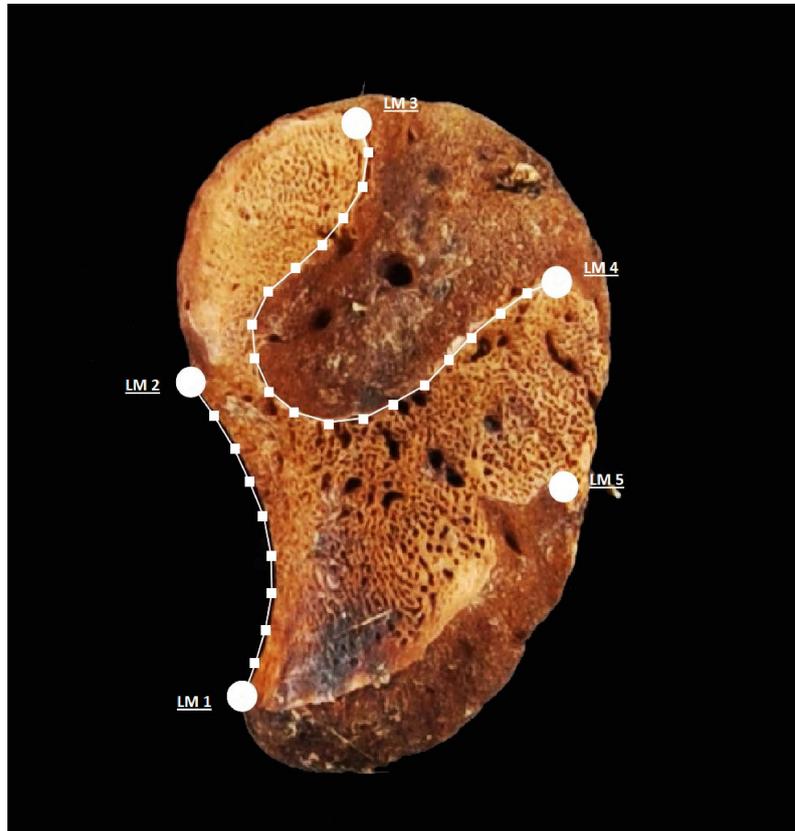
*landmark* (LM 6) se posicionó en la parte más posterior de la sínfisis púbica. También se seleccionaron 5 *semilandmarks* para analizar la variación en la curvatura de la región del foramen obturador correspondiente al hueso púbico (figura 1).



**Figura 1:** Landmarks y semilandmarks localizados en el pubis. Los puntos circulares indican los landmarks. Los cuadrados blancos una curva de 5 semilandmarks equidistantes entre ellos. El espécimen G-166 ha sido tomado de la colección de individuos subadultos de San José (Granada).

En el caso del isquion, la curvatura que define la región del foramen obturador, se definió mediante la colocación de dos *landmarks* (LM1 y LM2). El primer punto de referencia se localiza en el límite de la rama isquiática, mientras que el segundo se colocó en la base de la región del tubérculo obturador posterior. Además, se colocaron 8 *semilandmarks* entre los dos primeros puntos de referencia. Posteriormente, se colocaron otros dos *landmarks* (LM3 y LM4) y

una curva de 18 *semilandmarks* para delimitar la morfología de la región de la superficie semilunar. Finalmente, se ha posicionado un quinto *landmark* (LM5) en la parte más superior y posterior de la tuberosidad isquiática (figura 2).



**Figura 2:** Landmarks y *semilandmarks* localizados en el isquion. Los puntos circulares indican los landmarks. Los cuadrados blancos una curva de 8 *semilandmarks* equidistantes entre ellos. El espécimen G-387 ha sido tomado de la colección de individuos subadultos de San José (Granada).

Estos *landmarks* y *semilandmarks* se obtuvieron mediante la utilización del programa tpsDig2 (Rohlf, 2005).

Se ha utilizado una submuestra aleatoria de 10 individuos para analizar el error al localizar los *landmarks* y *semilandmarks*. Los *landmarks* y *semilandmarks* se colocaron durante cinco días consecutivos en cada una de las imágenes, seguido de un periodo de dos días de descanso. Este proceso se llevó a cabo durante cinco semanas consecutivas. Para llevar a cabo el error intraobservador,

las coordenadas fueron tomadas por un mismo observador (EJ.E.). En el caso del error interobservador, se necesitó de un segundo investigador para comparar los resultados (C.LM). Después de verificar los supuestos de la varianza y normalidad, se utilizó el coeficiente de correlación intra-clase (ICC) para probar la fiabilidad de las observaciones (Gonzalez et al., 2011), clasificando los resultados mediante la escala de Fleiss (Fleiss, 2011; Fleiss et al., 2013), donde  $<0.4$  es un acuerdo pobre y  $>0.75$  es un acuerdo excelente. Todos estos análisis se realizaron con el programa IBM SPSS v.22 (Corp. IBM, 2013).

### **7.3.3. Análisis de la forma**

Posteriormente a la digitalización de los *landmarks*, los datos fueron sometidos a un análisis de la *forma* basado en la evaluación de técnicas morfogeométricas bidimensionales (Zelditch et al., 2012), métodos de deformación y técnicas de estadística multivariada.

En primer lugar, se realizó un análisis generalizado de procrustes (GPA) para eliminar los efectos no relacionados con la *forma* de translación, rotación y escala. Este proceso superpone configuraciones matemáticamente óptimas al minimizar las distancias de procrustes mediante el criterio de mínimos cuadrados. El tamaño del centroide se tomó como variable de tamaño de medición (Bookstein, 1997) mediante la utilización del programa Coordgen (Sheets, 2003). Se seleccionó el método de energía mínima de torsión para llevar a cabo el deslizamiento de los *semilandmarks*, utilizando para este proceso el programa tpsRelw (Rohlf, 2007); la segunda coordenada de cada *landmark* fue eliminada mediante tpsUtil (Rohlf, 2009).

La función *thin-plate spline* (TPS) tiene como objetivo la realización de una representación visual de las diferencias en la *forma* entre dos especímenes o entre un espécimen y la configuración consenso. Este proceso, se llevó a cabo teniendo en cuenta el mismo número de variables que existen con respecto a los

grados estadísticos de libertad y empleando las distancias de procrustes como variable métrica (Zelditch et al., 2012).

El análisis *eigenshape* se realizó con el fin de determinar un conjunto de *eigenscores* que analizara la covarianza entre sus funciones y las formas observadas. Los patrones principales de variación morfológica entre individuos masculinos y femeninos se analizaron mediante un análisis de componentes principales (PCA). El análisis de componentes principales simplifica la dimensionalidad de la variación de datos entre los individuos al reducirlo a un número menor de dimensiones ortogonales e independientes (Zelditch et al., 2012). Gracias a los gráficos bi dimensionales de dispersión y grillas de deformación, se ponen de manifiesto los patrones de variación y covariación en la *forma*.

El análisis de variables canónicas (CVA) se realizó con el fin de comprender la variabilidad de la muestra dentro de los grupos (Zelditch et al., 2012). Debido al gran número de variables consideradas en este estudio, esas variables se redujeron mediante el análisis de componentes principales. El análisis y las grillas de deformación, tanto de éste como del análisis de componentes principales, se han realizado mediante el programa MorphoJ (Klingenberg, 2008).

Posteriormente, se realizó un análisis multivariante de la varianza (MANOVA) de los componentes principales que representan el 95% de la varianza acumulada, con el objetivo de identificar las diferencias estadísticamente significativas entre sexos y para lograr una clasificación precisa de individuos pertenecientes a un grupo. Una vez evaluados los supuestos de normalidad, distribución de muestras y homogeneidad de la matriz de varianzas y covarianzas con la prueba de Kolmogorov-Smirnov y M Box, se realizó un análisis discriminante por sexo utilizando la Lambda de Wilks y el método de validación cruzada dejando uno fuera, incluyendo primero las variables de *forma* y, posteriormente, el tamaño del centroide como variable de tamaño. Todos estos análisis se realizaron utilizando SPSS v.22 (Corp. IBM, 2013)

También se realizó un análisis de remuestreo para evaluar las diferencias entre las *formas* de referencia media para cada grupo. El análisis se realizó en base a un análisis de permutación aleatoria (N = 4900) mediante la utilización del programa Two Groups (Sheets, 2003).

## 7.4. RESULTADOS

### 7.4.1. Análisis del error

Los resultados obtenidos en el análisis del error intra e inter-observador, tanto en el pubis como en el isquion, han mostrado en general un grado de fiabilidad aceptable con respecto al coeficiente de correlación intercalase (ICC) en el proceso de colocación de los *landmarks* y *semilandmarks*.

**Tabla 1.** Error intra-observador e inter-observador del pubis

	Análisis del error intra-observador		Análisis del error inter-observador	
	Valor de consistencia	Grado de acuerdo	Valor de consistencia	Grado de acuerdo
<b>LM1</b>	0.877	EXCELENTE	0.712	BUENO
<b>LM2</b>	0.912	EXCELENTE	0.751	EXCELENTE
<b>LM3</b>	0.622	BUENO	0.525	BUENO
<b>LM4</b>	0.855	EXCELENTE	0.769	EXCELENTE
<b>LM5</b>	0.731	BUENO	0.688	BUENO
<b>LM6</b>	0.821	EXCELENTE	0.725	BUENO
<b>SML(5)</b>	0.823	EXCELENTE	0.729	BUENO

LM, Landmark; SML, Semilandmark.

**Tabla 2.** Error intra-observador e inter-observador del isquion

	Análisis del error intra-observador		Análisis del error inter-observador	
	Valor de consistencia	Grado de acuerdo	Valor de consistencia	Grado de acuerdo
<b>LM1</b>	0.942	EXCELENTE	0.850	EXCELENTE
<b>LM2</b>	1.000	EXCELENTE	1.000	EXCELENTE
<b>LM3</b>	0.896	EXCELENTE	0.888	EXCELENTE
<b>LM4</b>	1.000	EXCELENTE	0.988	EXCELENTE
<b>LM5</b>	0.923	EXCELENTE	0.781	EXCELENTE
<b>SML(5)</b>	0.946	EXCELENTE	0.821	EXCELENTE

LM, Landmark; SML, Semilandmark.

#### 7.4.2. Análisis de la forma

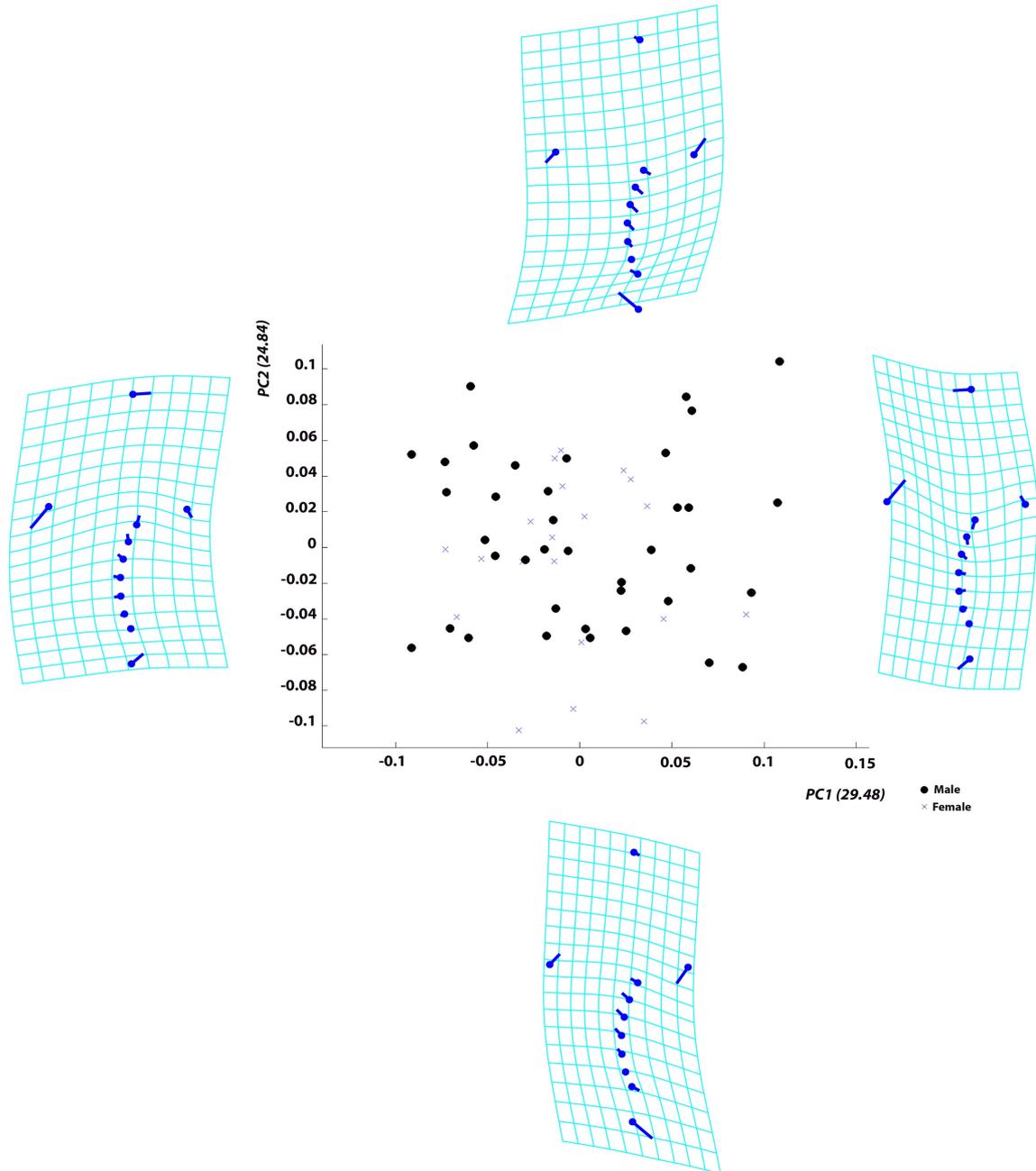
##### 7.4.2.1. Pubis

Los primeros 7 componentes principales (PC1-PC7) explican más del 95% de la varianza. Los especímenes con valores positivos de PC1 (que representan el 29.48% de la varianza) muestran cómo la curvatura del foramen obturador describe un ligero desplazamiento hacia la región posterior del hueso (figura 3). Esta curva se caracteriza por mostrar una forma más rectilínea que la de los individuos mostrados como valores negativos, los cuales, describen un desplazamiento en la parte superior de la curvatura hacia los márgenes postero-superior del pubis, describiendo una curva más pronunciada. Además, los individuos asignados en la dirección positiva muestran una contracción de la parte superior de la rama púbica y del borde portero-superior de la sínfisis púbica. Por otro lado, en los valores negativos del primer componente principal, este

desplazamiento implica una ligera apertura hacia los márgenes exteriores. La rama púbica inferior y la parte antero-superior de la superficie acetabular, también exhiben desplazamientos opuestos entre las direcciones positiva y negativa.

El segundo componente principal (que representa el 24.84% de la varianza) destaca el desplazamiento hacia los bordes de la rama púbica superior y la sínfisis púbica en los valores positivos (figura 3). Por otro lado, esas regiones muestran una contracción en los valores negativos. La curvatura del foramen obturador muestra cómo el borde superior se desplaza ligeramente hacia la región postero-inferior, mostrando una curvatura más ancha que en aquellos individuos asignados a los valores negativos, cuyo desplazamiento se produce hacia la región antero-superior.

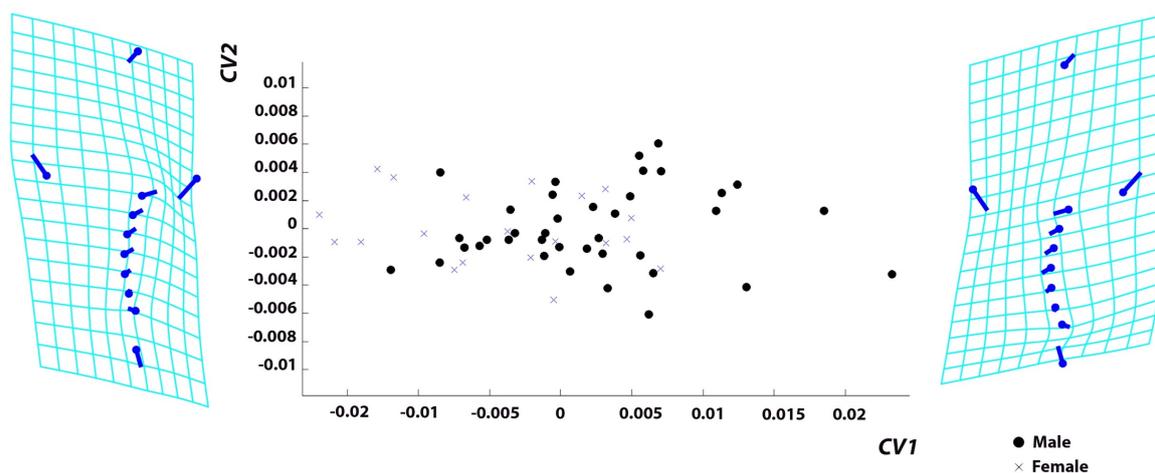
El gráfico muestra una amplia dispersión de los individuos a lo largo del eje x, superponiéndose los dos sexos a lo largo del primer componente principal. Para el eje y, los individuos masculinos se encuentran dispersos a lo largo de todo el eje, mientras que los femeninos se concentran principalmente alrededor de los valores positivos del segundo componente principal.



**Figura 3:** Análisis de componentes principales del pubis. El gráfico de dispersión muestra la posición relativa de los individuos respecto a los dos primeros componentes principales. Las grillas de deformación TPS representa la variación a lo largo de PC1 y PC2.

El gráfico de dispersión del análisis de variables canónicas sitúa a la mayoría de los individuos femeninos en la dirección negativa, mientras que los masculinos lo hacen a lo largo de toda la variable canónica (figura 4). Esto resulta en la superposición de individuos de ambos grupos alrededor del valor 0 y la

separación de los mismos en los extremos. Los valores positivos muestran cómo los *semilandmarks* localizados en la parte superior de la curvatura que describe el foramen obturador se desplazan ligeramente hacia la región anterior, mientras que los valores negativos muestran lo opuesto. Además, el vértice de la rama superior se encuentra desplazado hacia la zona externa en aquellos individuos localizados en la dirección positiva y hacia la interior en los situados en la negativa. Otra diferencia la podemos encontrar en el desplazamiento del margen perteneciente a la rama inferior púbica, hacia la parte interna del hueso en valores positivos y al contrario en negativos.



**Figura 4:** Análisis de variables canónicas del pubis. El gráfico de dispersión muestra la posición de los individuos en relación con la variable canónica. Las grillas de deformación TPS representan la variación a lo largo de la CV.

El valor de la Lambda de Wilk's muestra la ausencia de significación discriminante ( $p \leq 0.05$ ) entre las variables, tanto para el análisis de *forma*, como de *forma* + tamaño (tabla 3 y tabla 4). El análisis discriminante según las variables originales muestra un porcentaje total de clasificación correcta de 77.6% y 50% mediante validación cruzada (tabla 3). Sin embargo, estos valores cambian a

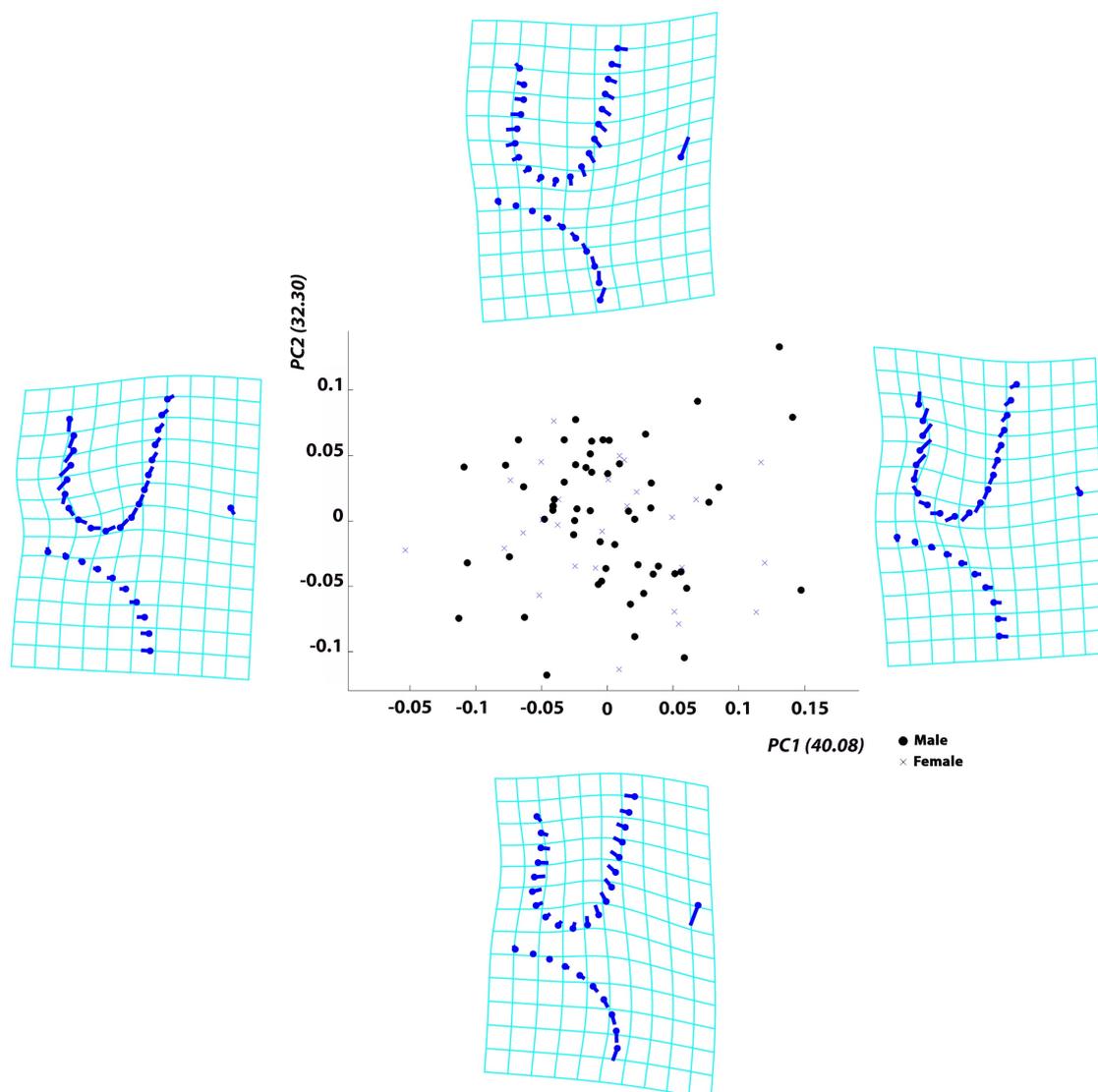
82.8% [+ 5.2%] y 48.3% [-1.7%], respectivamente, al añadir la variable del tamaño del centroide en el análisis (tabla 4).

El valor del test de remuestreo de F-Goodall ( $F = 1.44$ ) y el nivel de significación ( $p \leq 0.05$ ) indican que la *forma* del pubis no difiere entre los sexos.

#### 7.4.2.2. Isquion

Los resultados del análisis de componentes principales, revelan que los primeros tres componentes principales (PC1, PC2 y PC3) describen más del 95% de la varianza. Los valores positivos del primer componente principal (44.08% de la varianza) muestran un ligero desplazamiento en el margen inferior de la curvatura del foramen obturador hacia la cara interna del cuerpo isquiático, mientras que los valores negativos, señalan el deslizamiento de este margen hacia la región anterior del hueso (figura 5). La superficie semilunar describe una morfología más reducida en los valores positivos del primer componente principal, que en aquellos individuos situados en la dirección negativa, debido, al desplazamiento de sus bordes hacia la parte interior de la superficie. Los valores positivos correspondientes al segundo componente principal (32.30% de la varianza) resaltan la expansión de la superficie de la superficie semilunar hacia el margen externo, mientras que los valores negativos describen el desplazamiento de su borde hacia la parte interna de la región. La tuberosidad isquiática también muestra desplazamientos opuestos entre las dos direcciones.

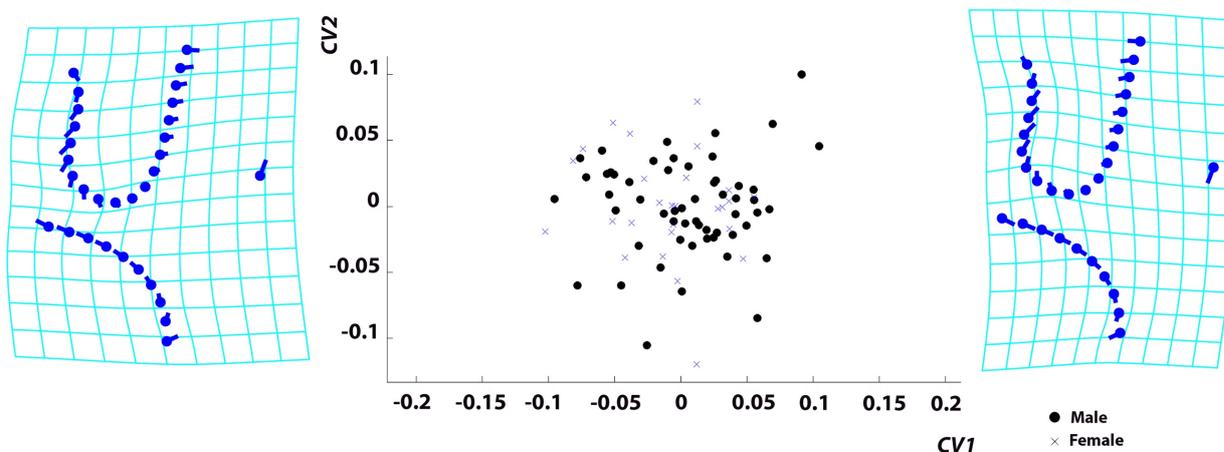
El diagrama de dispersión muestra una gran superposición de individuos a lo largo de los dos componentes principales. Los individuos masculinos se ubican principalmente alrededor del valor 0 del gráfico, con una mínima dispersión de individuos en el extremo positivo del primer componente principal. Del mismo modo, los femeninos se concentran en el centro del gráfico y, en este caso, los individuos más extremos se sitúan en la dirección negativa del primer componente principal.



**Figura 5:** Análisis de componentes principales del isquion. El gráfico de dispersión muestra la posición relativa de los individuos respecto a los dos primeros componentes principales. Las grillas de deformación TPS representa la variación a lo largo de PC1 y PC2.

El análisis de las variables canónicas no muestra una clara influencia de la variable sexo en la distribución de los individuos. Sin embargo, los individuos masculinos tienen una mayor presencia en los valores positivos, mientras que los femeninos lo hacen en el negativo (figura 6).

Las grillas de deformación muestran un desplazamiento de los márgenes anterior y posterior de la superficie semilunar con respecto a la forma consenso; el desplazamiento hacia la zona interna se asocia con los valores positivos de la variable canónica, y hacia la zona externa en la dirección negativa. Por tanto, se observa una morfología más estrecha para los individuos localizados en la dirección positiva con respecto a aquellos ubicados en la negativa.



**Figura 6:** Análisis de variables canónicas del isquion. El gráfico de dispersión muestra la posición de los individuos en relación con la variable canónica. Las grillas de deformación TPS representan la variación a lo largo de la CV.

El valor de la Lambda de Wilk's muestra la ausencia de significación discriminante ( $p \leq 0.05$ ) entre las variables para el análisis de *forma* y *forma* y tamaño (tabla 3; 4). El análisis discriminante atendiendo a las variables originales muestra un total de 68.7% y 59% de clasificación correcta mediante validación cruzada (tabla 3). Sin embargo, estos valores cambian (a 71.1% [+ 2.4%] y 54.2% [-4.8%], respectivamente) al añadir la variable del tamaño de centroide (tabla 4). El valor del test de remuestreo de F-Goodall ( $F = 1.97$ ) y el nivel de significación ( $p \leq 0.05$ ) indican que la *forma* del isquion no difiere entre los sexos.

**Tabla 3.** Resultados del análisis discriminante de las variables canónicas originales (CVA) y mediante validación cruzada basado en las variables de *forma*.

	Lambda de Wilks		Variables Originales			Validación Cruzada		
	$\lambda$	Sig.	Asignación Correcta	Asignación Incorrecta	Asignación Correcta (%)	Asignación Correcta	Asignación Incorrecta	Asignación Correcta (%)
	<b>Pubis</b>							
M			29	9	76.3	21	17	55.3
F	0.666	0.386	16	4	80	8	12	40
Total			45	13	77.6	29	29	50
<b>Isquion</b>								
M			39	17	69.6	34	22	60.7
F	0.840	0.533	18	9	66.7	15	12	55.6
Total			57	26	68.7	49	34	59

M, Masculino; F, Femenino

**Tabla 4.** Resultados del análisis discriminante de las variables canónicas originales (CVA) y mediante validación cruzada basado en las variables de *forma* y tamaño.

	Lambda de Wilks		Variables Originales			Validación Cruzada		
	$\lambda$	Sig.	Asignación Correcta	Asignación Incorrecta	Asignación Correcta (%)	Asignación Correcta	Asignación Incorrecta	Asignación Correcta (%)
	<b>Pubis</b>							
M			30	8	78.9	20	18	52.6
F	0.612	0.245	18	2	90.1	8	12	40
Total			48	10	82.8	28	30	48.3
<b>Isquion</b>								
M			40	16	71.4	31	25	55.4
F	0.837	0.598	19	8	70.4	14	13	51.9
Total			59	24	71.1	45	38	54.2

M, Masculino; F, Femenino

## 7.5. DISCUSIÓN

A pesar de la dificultad que supone la estimación del sexo en individuos subadultos, debido, a la falta de caracteres sexuales secundarios bien desarrollados (Scheuer y Black, 2000), la literatura médica ha señalado diferencias entre los sexos que comienzan en el útero y que continúan durante todo el desarrollo (Stull y Godde, 2013). La pelvis es una región esquelética en constante investigación debido a su alto grado de dimorfismo sexual. Sin embargo, la dificultad añadida que han experimentado los investigadores que han abordado esta cuestión podría ser una consecuencia de la divergencia tardía en las tasas de crecimiento entre hombres y mujeres (Cardoso y Saunders, 2008; Humphrey, 1998). Por lo tanto, los elementos óseos pertenecientes al desarrollo más temprano del esqueleto, presentan generalmente menor grado de dimorfismo sexual que aquellos que se desarrollan en etapas posteriores (Humphrey, 1998; Schultz, 1962).

Debido a estas limitaciones, la precisión en las metodologías de estimación sexual es indudablemente menor en individuos subadultos y el porcentaje de fiabilidad considerado como aceptable para este grupo de edad debe ser de al menos del 75% (De Vito y Saunders, 1990). De acuerdo con estos mínimos, los bajos porcentajes de clasificación obtenidos (<75%), añadido a la ausencia de diferencias en la *forma* significativas entre los grupos, invalidan la utilización del pubis y el isquion como un estimador del sexo fiable en las primeras etapas del desarrollo humano. Las similitudes encontradas entre los sexos se muestran tanto en el análisis de *forma* como en el análisis conjunto de *forma* y el tamaño, ya que la inclusión del tamaño del centroide no implica una mejora significativa en los resultados de clasificación.

Los resultados obtenidos en este estudio parecen presentar consistencia con un estudio llevado a cabo recientemente por Klales y colaboradores (Klales y Burns, 2017), quienes señalaron al hueso púbico subadulto como un indicador deficiente para la estimación del sexo en individuos subadultos. En este estudio se aplica una versión modificada del método de Phenice (1969), a una muestra

de individuos en etapas tempranas del desarrollo. La técnica propuesta por Phenice es una de las más populares para la determinación sexual del pubis adulto, basada en los rasgos morfológicos del arco ventral, el aspecto medial de la rama isquiopúbica y la región subpúbica. Basándose en un análisis radiográfico, el estudio de Klaes y colaboradores (2017) logró una tasa de asignación correcta del 85.3% para individuos que se encontraban en una etapa de adolescencia temprana y del 97.2% en adolescencia tardía. Sin embargo, similar a nuestro estudio, cuando se examinaron las etapas más tempranas del desarrollo humano, las clasificaciones exitosas disminuyeron a 53.9% en la primera infancia y a 59.1% en la infancia posterior. Por tanto, se concluyó que este método sólo presenta un alto porcentaje de fiabilidad después de la pubertad.

Del mismo modo, Bilfeld y colaboradores (Bilfeld et al., 2013) evaluaron la morfología del pubis y las diferencias en su morfología durante el desarrollo esquelético. Este estudio, basado también en técnicas de morfometría geométrica, encontró diferencias estadísticamente significativas entre la morfología del pubis entre hombres y mujeres únicamente en el grupo de edad de 13 años. Sin embargo, en concordancia con el presente estudio, los autores notaron diferencias entre sexos en el primer grupo de edad analizado (1 año), principalmente en la posición del punto de mayor profundidad de la curvatura que define el foramen obturador. Esto, puede sugerir que la magnitud en la diferencia entre los sexos aumenta a lo largo de las etapas de desarrollo hasta que el dimorfismo en la forma adulta se hace evidente.

Los resultados obtenidos en la presente investigación no han mostrado ninguna diferencia significativa en la superficie semilunar del isquion entre las *formas* masculina y femenina durante el primer año de vida.

Sin embargo, estos resultados se muestran contrarios a los obtenidos por Majó y colaboradores (Majó, 2000), quienes encontraron dimorfismo sexual en el índice isquio-púbico durante los primeros años del desarrollo esquelético. Además, nuestros resultados son menos prometedores que aquellos ofrecidos por Reynolds (Reynolds, 1945, 1947), los cuales señalaron la existencia de

dimorfismo sexual en el cartílago del isquion y el índice isquio-púbico durante el primer año de vida, siendo significativo desde el nacimiento. Ambos estudios encontraron diferencias en el tamaño del isquion y el pubis entre los grupos; sin embargo, nuestros análisis han mostrado unos resultados similares tanto al analizar la variable *forma* como las variables *forma* y tamaño en conjunto.

Aunque la pelvis subadulta es el área más utilizada para estimar el sexo en individuos subadultos, la mayoría de investigaciones se han centrado únicamente en el análisis del ilion (García Mancuso y González. 2013; Wilson et al., 2008; Wilson et al., 2011; Wilson et al., 2015). De hecho, un estudio reciente llevado a cabo por los mismos autores que el presente artículo (Estévez et al., 2017) y utilizando la misma muestra, demostró la efectividad de la morfometría geométrica para estimar con precisión el sexo de las personas en etapas tempranas del desarrollo mediante el análisis del ilion infantil. Los resultados obtenidos después de aplicar la misma metodología mostraron diferencias significativas entre los sexos durante el primer año de vida. Sin embargo, esto contrasta con los resultados obtenidos en la actual investigación, donde no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas en la *forma* y el tamaño entre los sexos para el mismo rango de edad analizado. Esta disparidad en los estimadores del sexo entre regiones del mismo hueso indica la existencia de diferenciación sexual entre los individuos subadultos de la colección osteológica de San José, (Granada), aunque la magnitud de la misma difiere antes de la pubertad.

Hasta donde llega el conocimiento de los autores, con excepción del presente trabajo, no se han realizado estudios de estimación del sexo del pubis y el isquion subadultos en individuos menores de un año de edad mediante la utilización de técnicas de morfometría geométrica. Esta carencia de material científico puede estar causada por la escasez de muestras esqueléticas de sexo conocido (Rogers, 2009), atribuido a las consideraciones de preservación más limitadas de huesos más pequeños y más frágiles (Olivares et al., 2014).

Aunque el presente estudio, tiene como objetivo la incorporación de nuevos datos que pueda hacer frente a ese vacío, también asume debilidades importantes.

La variación en la madurez sexual debería incluirse como una variable continua cuando se desarrolle una metodología para estimar con precisión el sexo de los individuos subadultos. Esto, se debe a que las diferencias intra e inter-poblacionales en la *forma* o el tamaño entre sexos pueden llegar a inducir un índice de variación que no se tiene en cuenta al realizar grupos de edad específicos, induciendo otra fuente de variación que puede afectar a la fiabilidad de los resultados (Webster, 2010). Por lo tanto, analizar las diferentes trayectorias en la *forma* y el tamaño en la ontogenia posterior entre hombres y mujeres puede proporcionar una base fiable y una visión holística de la estimación del sexo en individuos subadultos.

## 7.6. CONCLUSIONES

En el presente estudio, se ha llevado un análisis específico en un grupo de edad determinado, de estimación de sexo utilizando el isquión y el pubis subadulto. Para ello se ha utilizado una de las colecciones más importantes de esqueletos identificados de individuos subadultos. Este método ha presentado un buen grado de fiabilidad atendiendo a los resultados del análisis del error intra e inter-observador. Los resultados obtenidos presentan concordancia con estudios previos que han señalado que el dimorfismo sexual en la *forma* y el tamaño del isquion y el pubis en individuos subadultos es prácticamente irrelevante. Se deben realizar investigaciones de la ontogenia de los huesos del coxal en la colección de individuos subadultos de San José para abordar los cambios relacionados con la edad en el dimorfismo sexual y mejorar la fiabilidad en la estimación del sexo.

## 7.7. AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen a D. José Antonio Muñoz, Director Gerente, Dña. Maribel Martín, Coordinadora de Servicios, y a todo el personal de EMUCESA del cementerio de San José de Granada por su asistencia; al Juez Magistrado (Juzgado de Primera Instancia nº 5) responsable de la Oficina de Registro de Granada y a los revisores anónimos por sus sugerencias e indicaciones. Este trabajo pertenece a los estudios de doctorado del autor en el programa de Biomedicina (B11.56.1) en la Universidad de Granada.



# Capítulo 8

## Conclusiones





1. El análisis del error intra-observador muestra un alto grado de fiabilidad y reproducibilidad en la localización de los *landmarks* y *semilandmarks* en los tres huesos analizados.
2. El análisis del error inter-observador muestra un grado elevado de acuerdo entre los investigadores e indica una elevada fiabilidad y reproducibilidad en la localización de los *landmarks* y *semilandmarks* en los tres huesos analizados.
3. El ilion es el hueso que presenta mayores diferencias sexuales entre los elementos analizados del coxal subadulto.
4. Las regiones que han logrado el mejor grado de clasificación discriminante han sido la escotadura ciática y la superficie auricular analizadas en su conjunto, mostrando unos resultados de:
  - a. 98.6% para el análisis de la *forma* a partir de variables originales y 70.4% mediante validación cruzada.
  - b. 94.3% para el análisis de la *forma* y el tamaño (CS) a partir de variables originales y 78.9% mediante validación cruzada.
5. Ninguna de las regiones analizadas en el isquion y el pubis ofrecen resultados concluyentes que permitan la discriminación sexual.

6. Las regiones analizadas del isquion subadulto, atendiendo a las variables de *forma*, presentan unos porcentajes de clasificación del 68.7% y 58% para variables originales y validación cruzada respectivamente. Añadiendo la variable de tamaño del centroide (CS) se obtiene un 71.1% para variables originales y un 54.2% mediante validación cruzada.
7. Las regiones analizadas del pubis subadulto, respecto a las variables de *forma*, ofrecen unos porcentajes de clasificación del 77.6% y 50% para variables originales y validación cruzada respectivamente. Al incluir la variable del tamaño del centroide (CS) se alcanza un 82.8% para variables originales y un 48.3% mediante validación cruzada.
8. Los resultados de clasificación muestran, en líneas generales, que el porcentaje de acierto en los individuos masculinos es más elevado que en los femeninos.
9. La inclusión de la variable del tamaño del centroide (CS) supone variabilidad en los resultados, indicando que su análisis no tiene por qué suponer una mejora directa de los resultados.
10. Los resultados obtenidos para la estimación del sexo en individuos subadultos en el ilion, son similares a los obtenidos por otros autores mediante técnicas basadas en morfometría geométrica. Sin embargo, estos datos deben tomarse con precaución, debido al diferente origen poblacional de las muestras y su distribución por edad y sexo.
11. La utilización de la morfometría geométrica ofrece un método alternativo para la estimación del sexo en individuos subadultos, que reduce el grado de subjetividad con respecto a las técnicas de asignación sexual mediante el análisis cualitativo de la muestra.

- 12.** A pesar de la calidad de la colección y la muestra utilizada para este trabajo, sería recomendable la realización de nuevos estudios con mayores tamaños muestrales y una distribución etaria más amplia.
- 13.** Para llevar a cabo una correcta validación del método, se hace necesaria la aplicación de la metodología en otras poblaciones con el objetivo de evaluar su reproducibilidad y la repetibilidad en los resultados.
- 14.** Los altos porcentajes de clasificación, precisión y fiabilidad obtenidos para el hueso iliaco no parecen haber sido alcanzados por otros métodos similares en el grupo de edad analizado en este trabajo, siendo esta muestra, a fecha de hoy, la más representativa disponible para individuos subadultos de origen mediterráneo.
- 15.** Atendiendo a los resultados obtenidos en esta investigación, la morfometría geométrica ha demostrado la consecución de los objetivos planteados y la gran potencialidad de sus técnicas y herramientas en el campo de la Antropología Física y Forense.



1. The intra-observer analysis shows high reliability and reproducibility in the location of landmarks and semilandmarks in the three analyzed bones.
2. The inter-observer analysis shows high reliability and reproducibility in the location of landmarks and semilandmarks in the three analyzed bones.
3. Subadult Iliac shows the major differences between sexes between the analyzed elements of the subadult coxa.
4. Regions that have achieved better classification accuracy have been the sciatic notch and the auricular Surface analyzed together:
  - a. 98.6% for shape analysis by means of the original variables and 70.4% through cross-validation.
  - b. 94.3% for shape and size analysis (CS) by means of the original variables and 78.9% through cross-validation.
5. None of the analyzed regions in the ischium and pubis yield conclusive results that allows the sexual discrimination between sexes.
6. The analyzed regions of the subadult ischium, taking into account the shape variables, present a classification success rate of 68.7% and 58% by means of the original variables and cross validation respectively. When including the centroid size variable, results achieve 71.1% by means of the original variables and 54.2% through cross-validation.

- 7.** The analyzed regions of the subadult pubis, based on shape variables, achieve a classification success rate of 77.6% and 50% by means of the original variables and cross validation respectively. When including the centroid size variable, results obtained are 71.1% by means of the original variables and 48.3% through cross-validation.
- 8.** The classification results show, in general terms, that the percentage of success in male individuals are higher than in female.
- 9.** The inclusion of the centroid size variable (CS) achieves mixed results, indicating that its analysis does not suppose an improvement of the classification success rates.
- 10.** The results obtained for the estimation of sex in subadult individuals in the ilium, are similar to those obtained by other authors using techniques based on geometric morphometrics. However, these data should be taken with caution, due to the different population origin of the samples and their age and sex distribution.
- 11.** The use of geometric morphometrics offers an alternative method for estimating sex in subadult individuals, which reduces the degree of subjectivity with respect to sex assignment techniques through qualitative analysis of the sample.
- 12.** Despite the quality of the collection and the sample used for this work, it would be advisable to carry out new studies with larger sample sizes and a broader age distribution.
- 13.** To carry out a correct validation of the method, it is necessary to apply the methodology in other populations in order to evaluate its reproducibility and repeatability in the results.
- 14.** The high percentages of classification, accuracy and reliability obtained for the human ilia do not seem to have been reached by other similar methods in the age group analyzed in this work, being this sample, to date, the most representative available for subadult individuals of Mediterranean origin.

**15.** In response to the results obtained in this research, geometric morphometrics has demonstrated the achievement of the objectives previously set and the great potential of its techniques and tools in the field of Physical and Forensic Anthropology.



# Capítulo 9

## Líneas de investigación futuras





1. Una posible ampliación de la colección de individuos identificados subadultos del Cementerio de San José (Granada), que aumente la distribución de individuos en la muestra, permitirá en un futuro, seguir profundizando sobre las variaciones sexuales entre niños y niñas entre los diferentes rangos de edad.
2. La aplicación de esta investigación a otros grupos poblacionales, permitiría resaltar las diferencias y semejanzas morfológicas observadas entre muestras de distinto origen.
3. El perfeccionamiento y accesibilidad de los medios que realizan imágenes tridimensionales, podrían facilitar el uso de la morfometría geométrica en 3D en elementos esqueléticos de reducido tamaño, como es el caso de los individuos subadultos, permitiendo mediante este enfoque, la evaluación de las diferencias morfológicas de un mismo elemento óseo en su conjunto.
4. Debido a que la variabilidad morfológica masculina y femenina podría verse afectada por el rango y la distribución de los grupos de edad analizados en la muestra, un análisis de las diferentes trayectorias ontogénicas entre los sexos podría proporcionar una base fiable a la hora de elaborar nuevas metodologías para la asignación del sexo durante la etapa de crecimiento.



# Bibliografía



Adams DC, Rohlf FJ, Slice DE (2004). Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology* 71(1), 5-16.

Albanese J (2003). A metric method for sex determination using the hipbone and the femur. *Journal of Forensic Sciences* 48(2), 263–273.

Alemán I (1997). Determinación del sexo en el esqueleto postcraneal. Estudio de una población mediterránea actual (Tesis doctoral, Universidad de Granada).

Alemán I, Irurita J, Valencia AR, Martínez A, López-Lázaro S, Viciano J, Botella MC (2012). Brief communication: The Granada osteological collection of identified infants and young children. *American Journal of Physical Anthropology* 149(4), 606–610.

Alemán I, Botella MC, Viciano J (2013). Estimación del sexo. En: Recomendaciones en Antropología Forense. Asociación Española de Antropología y Odontología Forense. Coordinador: Serrulla F. Valpapeis p 56-69.

Al Qahtani SJ, Hector MP, Liversidge HM (2010). Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. *American Journal of Physical Anthropology* 142(3), 481-490.

Álvarez C (2000). Descartes y la ciencia del siglo XVII. C. Álvarez, R. M. Enríquez (eds.). Siglo XXI.

Andersson AM, Toppari, J, Haavisto, AM, Petersen JH, Simell T, Simell O, Skakkebaek NE (1998). Longitudinal reproductive hormone profiles in infants: peak of inhibin B levels in infant boys exceeds levels in adult men. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 83(2), 675-681.

Anderson MJ (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral ecology* 26(1), 32-46.

Armelagos G, Mielke J, Owen K (1972). Bone growth and development in prehistoric populations from Sudanese Nubia. *Journal of Human Evolution* 1:89-119.

Arnqvist G, Martensson T (1998). Measurement error in geometric morphometrics: empirical strategies to assess and reduce its impact on measures of shape. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 44(1-2), 73-96.

Aveling E (1997). Chew, chew, that ancient chewing gum. *British Archaeology* 21:6-7.

Baart J (1990). Ceramic consumption and supply in early modern Amsterdam; local production and long-distance trade. En: P. Corfield y D. Keene (eds.). *Work in Towns 850-1850*. Leicester: Leicester University Press.

Bailey RC, Byrnes J (1990). A new, old method for assessing measurement error in both univariate and multivariate morphometric studies. *Systematic Zoology* 39(2), 124-130.

Baker BJ, Dupras TL, Tocheri MW (2005). *The osteology of infants and children* (No. 12). Texas A&M University Press.

Balthazard T, Dervieux H (1921) *Etudes anthropologiques sur les foetus humain*. *Annales Medecine Legale* 1:37-42.

Bilfeld MF, Dedouit F, Sans N, Rousseau H, Rougé D, Telmon N (2013). Ontogeny of size and shape sexual dimorphism in the ilium: a multislice computed tomography study by geometric morphometry. *Journal of Forensic Sciences* 58(2), 303-310.

Birkner R (1978). *Normal radiographic patterns and variances of the human skeleton— an X-ray atlas of adults and children*. Baltimore (Munich): Urban and Schwarzenberg.

Black S, Scheuer L, (1996). Occipitalization of the atlas with reference to its embryological development. *International Journal of Osteoarchaeology* 6:189 – 194.

Boucher BJ (1955). Sex differences in the foetal sciatic notch. *Journal of Forensic Medicine* 2:51-54.

Boucher BJ (1957) Sex differences in the foetal pelvis. *American Journal of Physical Anthropology* 15(4), 581–600.

Bookstein, FL (1986). Size and shape spaces for landmark data in two dimensions. *Statistical Science*. p 181-222.

Bookstein FL (1991). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge University Press, Cambridge.

Bookstein FL (1997). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge University Press, Cambridge.

Bruzek J (2002). A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology* 117(2), 157–168.

Bruzek J, Murail P (2006). Methodology and reliability of sex determination from the skeleton. En: *Forensic anthropology and medicine*. Humana Press. p. 225-242.

Buikstra J, Cook D, (1980). Palaeopathology: an American account. *Annual Review of Anthropology* 9:433–470.

Buikstra JE, Ubelaker DH (1994). Standards for data collection from human skeletal remains: proceedings of a seminar at the Field Museum of Natural History. Arkansas Archeological Survey, Fayetteville, AR.

Cabezas L (2008). El dibujo como invención: idear, construir, dibujar. Cátedra. Madrid.

Cardoso HF (2008). Sample-specific (universal) metric approaches for determining the sex of immature human skeletal remains using permanent tooth dimensions. *Journal of Archaeological Science* 35(1), 158-168.

Cardoso HF, Saunders SR (2008). Two arch criteria of the ilium for sex determination of immature skeletal remains: a test of their accuracy and an assessment of intra- and inter-observer error. *Forensic Science International* 178(1), 24–2916.

Cook D, Powell M (2005). *The Myth of Syphilis: The Natural History of Treponematosi*s in North America. Gainesville: University of Florida Press.

Cooke SB, Terhune CE (2015). Form, function, and geometric morphometrics. *The Anatomical Record* 298(1), 5-28.

Corp IBM (2013). IBM SPSS Statistics for Mac OSX, Version 22.0

Coulon G (1994). *L'Enfant en Gaule et Romaine*. Paris: Editions Errance.

Cunha E, Baccino E, Martrille L, Ramsthaller F, Prieto J, Schuliar Y, Lynnerup C, Cattaneo C (2009). The problem of aging human remains and living individuals: a review. *Forensic science international* 193(1), 1-13.

Currey J, Butler G (1975). The mechanical properties of bone tissue in children. *Journal of Bone and Joint Surgery* 57-A:810–814.

Davies WV (2001). Colour and painting in ancient Egypt. British Museum Press.

Dávila FB (2005). Las proporciones divinas. *Cirugía Plástica* 15(2), 118-124.

Demirjian A (1978). Dentition. En: F. Falkner (ed.). *Human growth*. US: Springer.

Dereveski JS (1994). Perspectives on children and childhood. *Archaeological Review from Cambridge* 13(2).

Dereveski JS (1997). Engendering children, engendering archaeology. En: J. Moore y E. Scott (eds.). *Invisible people and processes*. Leicester: Leicester University Press.

Dereveski JS (2000). Material culture shock: confronting expectations in the material culture of children. En: J.S. Devereski (ed.). *Children and Material Culture*. Londres: Routledge.

De Vito C, Saunders SR (1990). A discriminant function analysis of deciduous teeth to determine sex. *Journal of Forensic Science* 35(4), 845-858.

Dirkmaat D, Cabo L, Ousley S, Symes S (2008). New Perspectives in Forensic Anthropology. *Yearbook of Physical Anthropology* 51: 33-52.

Dryden IL, Mardia KV (1993). Multivariate shape analysis. *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A*. p 460-480.

El-Najjar MY (1977). Maize, malaria and the anemias in the pre-Columbian New World. *Yearbook of Physical Anthropology* 20: 239-337.

El-Nofely AA, Iscan MY (1989). Assessment of age from the dentition in children. *Iscan MY: Age markers in the human skeleton*. Springfield. p 237-253.

Estévez EJ, López-Lázaro S, López-Morago C, Alemán I, Botella MC (2017). Sex estimation of infants through geometric morphometric analysis of the ilium. *International Journal of Legal Medicine* 131(6), 1747-1756

Estévez EJ, López-Lázaro S, López-Morago C, Alemán I, Botella MC (2018). Specific-Age group sex estimation of infants through Geometric Morphometrics Analysis of pubis and ischium. *Forensic Science International* 286, 185-192

Fazekas IG, Kósa F (1978). *Forensic fetal osteology*. Akadémiai Kiadó.

Ferembach D, Schwindezky I, Stoukal M. (1980). Recommendation for age and sex diagnoses of skeletons. *Journal of Human Evolution* 9:517-549

Flecker H (1932). Roentgenographic observations of the times of appearance of epiphyses and their fusion with the diaphyses. *Journal of anatomy* 67(Pt 1), 118.

Fleiss JL (2011). *Design and analysis of clinical experiments*, vol 73. John Wiley & Sons, Hoboken

Fleiss JL, Levin B, Paik MC (2013). *Statistical methods for rates and proportions*. Wiley, Hoboken

Forest MG (1990). Pituitary gonadotropin and sex steroid secretion during the first two years of life. *Control of the Onset of Puberty* 451-477.

Francis CC (1940). Appearance of centres of ossification from 6-15 years. *American Journal of Physical Anthropology* 27: 127-138

Francis CC (1951). Appearance of centres of ossification in human pelvis before birth. *American Journal of Roentgenology* 27: 778-783.

Frazer JE (1948). *The Anatomy of the Human Skeleton*, 4<sup>th</sup> edition. London: Churchill.

García Mancuso R (2012). Análisis bioantropológico de restos esqueléticos de individuos subadultos (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Naturales y Museo).

García Mancuso R, González PN (2013). Reconocimiento de rasgos dimórficos en ilion infantil mediante el uso de morfometría geométrica. *Ciencias Morfológicas* 15(1):1–11

Garvin HM, Sholts SB, Mosca LA (2014). Sexual dimorphism in human cranial trait scores: effects of population, age, and body size. *American Journal of Physical Anthropology* 154(2), 259-269.

Genovés S (1959). L'estimation des différences sexuelles dans l'os coxal: différences métriques et différences morphologiques. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* 10(1).

Gilroy AM, MacPherson BR, Ross LM, Schünke M, Schulte E, Schumacher U (2009). *Prometheus: Atlas de anatomía (Vol. 2)*. Editorial Médica Panamericana.

Gonzalez A (2008). Mitos y realidades en torno a la excavación, el tratamiento y el estudio de los restos arqueológicos no-adultos. En: *Nasciturus, infans, puerulus vobis mater terra: la muerte en la infancia / coord. por Francesc Gusi Jener, Susanna Muriel, Carmen Rosa Olaria Puyoles*. ISBN 978-84-96372-62-7 p 57–76

González PN, Bernal V, Barrientos G (2005). Estimación del dimorfismo sexual en el esqueleto pélvico y mandibular de individuos subadultos: comparación de técnicas visuales y de morfometría geométrica. *Werken* 6:49–61

Gonzalez PN, Bernal V, Perez SI (2009). Geometric morphometric approach to sex estimation of human pelvis. *Forensic Science International* 189(1), 68–74

Gonzalez PN, Bernal V, Perez SI (2011). Analysis of sexual dimorphism of craniofacial traits using geometric morphometric techniques. *International Journal of Osteoarchaeology* 21(1), 82–91

Goodall C (1991). Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 285-339.

Goodman AH, Brooke-Thomas R, Swedlund AC, Armelagos GJ (1988). Biocultural perspectives on stress in prehistoric, historical and contemporary population research. *Yearbook of Physical Anthropology* 31:169–202.

Goodman AH Armelagos GJ (1989). Infant and childhood morbidity and mortality risks in archaeological populations. *World Archaeology* 21:225-243.

Goodman AH, Martin DL (2002). Reconstructing health profiles from skeletal remains. *The Backbone of history: Health and nutrition in the Western hemisphere*, 2, 11.

Gordon CC, Buikstra J (1981). Soil pH, bone preservation and sampling bias at mortuary sites. *American Antiquity* 48:566–571.

Guy H, Masset C, Baud CA (1997). Infant taphonomy. *International Journal of Osteoarchaeology* 7:221–229

Harrison TJ (1957). Pelvic growth. PhD dissertation, University of Belfast.

Harrison TJ (1961). The influence of the femoral head on pelvic growth and acetabular form in the rat. *Journal of Anatomy* 95(Pt 1), 12.

Herring D, Saunders S, Katzenberg M (1998). Investigating the weaning process in past populations. *American Journal of Physical Anthropology* 105:425-439.

Hershkovitz I, Rothschild B, Latimer B (1997). Recognition of sickle cell anemia in skeletal remains of children. *American Journal of Physical Anthropology* 104:213-226.

Hoffman JM (1979). Age estimations from diaphyseal lengths: two months to twelve years. *Journal of Forensic Sciences* 24:461-469.

Holcomb S, Konigsberg LW (1995). Statistical study of sexual dimorphism in the human fetal sciatic notch. *American Journal of Physical Anthropology* 97(2), 113-125.

Holder M, Lewis PO (2003). Phylogeny estimation: traditional and Bayesian approaches. *Nature Reviews Genetics* 4(4) p 275.

Hummert JR, Van Gerven DP (1983). Skeletal growth in a medieval population from Sudanese Nubia. *American Journal of Physical Anthropology* 62:471-478.

Fernández S, Pérttega Díaz S, Rodríguez Maseda E (2003). La fiabilidad de las mediciones clínicas: el análisis de concordancia para variables numéricas. *Cuadernos de Atención Primaria* 10:290-296.

Johnston FE (1962). Growth of the long bones of infants and young children at Indian Knoll. *American Journal of Physical Anthropology* 20:249-254

Humphrey LT (1998). Growth patterns in the modern human skeleton. *American Journal of Physical Anthropology* 105(1), 57-72.

Hunt DR (1990). Sex determination in the subadult ilia: an indirect test of Weaver's nonmetric sexing method. *Journal of Forensic Science* 35(4), 881-885.

Hunt DR, Albanese J (2005). History and Demographic Composition of the Robert J. Terry Anatomical Collection. *American Journal of Physical Anthropology* 127:406–417

Hunt E, Gleiser I. (1955). The estimation of age at death and ages of formation of traverse lines from measurements of human long bones. *American Journal of Physical Anthropology* 54:461-469.

Irurita J (2014). Estimación de la edad de individuos infantiles en antropología forense. Resultados para la edad dental en una muestra de origen mediterráneo (Tesis doctoral, Universidad de Granada).

Irurita J, Alemán I, Viciano J, De Luca S, Botella MC (2014). Evaluation of the maximum length of deciduous teeth for estimation of the age of infants and young children: proposal of new regression formulas. *International Journal of Legal Medicine* 128(2), 345-352.

Irurita J, Alemán I (2016) Validation of the sex estimation method elaborated by Schutkowski in the Granada Osteological Collection of identified infant and young children: analysis of the controversy between the different ways of analyzing and interpreting the results. *International Journal of Legal Medicine* 130(6), 1623–1632.

Iskan MY, Steyn M (2013). *The human skeleton in forensic medicine*. Charles C Thomas Publisher.

Jackes M (1992). Paleodemography: problems and techniques. *Skeletal biology of past peoples: research methods*, p 189-224.

Jit I, Singh B (1971). A radiological study of the time of fusion of certain epiphyses in Punjabees. *Journal of the Anatomical Society of India* 20(1), 27.

Johnston FE (1961). Sequence of epiphyseal union in a pre-historic Kentucky population from Indian Knoll. *Human Biology* 33(1), 66-81.

Johnston FE, Snow C (1961). The reassessment of the age and sex of the Indian Knoll skeletal population: demographic and methodological aspects. *American Journal of Physical Anthropology* 19:237-244.

Johnston FE (1968). Growth of the skeleton in earlier peoples. En: D. R. Brothwell (ed.). *The Skeletal Biology of Past Human Populations*. London: Pergamon Press.

Johnstone WH, Keats TE, Lee ME (1982). The anatomic basis for the superior acetabular roof notch "Superior acetabular notch". *Skeletal radiology* 8(1), 25-27.

Johnston FE, Zimmerman LO (1989). Assessment of growth and age in the immature skeleton. En: M. Y. Iscan and K. A. R. Kennedy (eds.) *Reconstruction of Life from the Skeleton*. New York: Alan R. Liss, p 11-21.

Jones E, Ubelaker D (2001). Demographic analysis of the Voegtly cemetery sample, Pittsburgh, Pennsylvania. *American Journal of Physical Anthropology Suppl.* 32:86.

Katz D, Suchey JM (1986). Age determination of the male os pubis. *American Journal of Physical Anthropology* 69(4), 427-435.

Katzenberg MA, Pfeiffer S (1995). Nitrogen isotope evidence for weaning age in a nineteenth century Canadian skeletal sample. En: A.L. Grauer (ed.). *Bodies of Evidence: Reconstructing History through Skeletal Analysis*. Nueva York: Wiley-Liss.

Katzenberg MA, Herring A, Saunders S (1996). Weaning and infant mortality: evaluating the skeletal evidence. *Yearbook of Physical Anthropology* 39:177-1999.

Katzenberg MA, Saunders RS (2008). *Biological anthropology of the human skeleton*. Nueva Jersey: Wiley-Liss.

Kelley MA (1978). Phenice's visual sexing technique for the os pubis: A critique. *American Journal of Physical Anthropology* 48(1), 121-122.

Kelley MA (1979). Sex determination with fragmented skeletal remains. *Journal of Forensic Science* 24(1), 154-158.

Kelley MA (1979). Parturition and pelvic changes. *American Journal of Physical Anthropology* 51(4), 541-545.

Kemp M (2011). *Leonardo da Vinci: Las maravillosas obras de la naturaleza y el hombre* (Vol. 79). Ediciones AKAL.

Kendall DG (1981). The statistics of shape. *Interpreting multivariate data*, 75-80.

Kendall DG (1984). Shape manifolds, procrustean metrics, and complex projective spaces. *Bulletin of the London Mathematical Society* 16(2), 81-121.

Kerley E (1976). Forensic anthropology and crimes involving children. *Journal of Forensic Sciences* 21:333-339.

Klales AR, Ousley SD, Vollner JM (2012). A revised method of sexing the human innominate using Phenice's nonmetric traits and statistical methods. *American Journal of Physical Anthropology* 149(1), 104-114.

Klales AR, Burns TL (2017). Adapting and Applying the Phenice (1969) Adult Morphological Sex Estimation Technique to Subadults. *Journal of Forensic Sciences* 62(3), 747-752.

Klepinger LL (2006). *Fundamentals of forensic anthropology* (Vol. 1). John Wiley & Sons.

Klingenberg CP (2008). *Morpho J*. Faculty of Life Sciences. University of Manchester, Manchester.

Koo TK, Li MY (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine* 15(2), 155-163.

Kramer MS, Feinstein AR (1981). Clinical biostatistics: LIV. The biostatistics of concordance. *Clinical Pharmacology & Therapeutics* 29(1), 111-123.

Krenzer U (2006). Compendio de métodos antropológico forenses para la reconstrucción del perfil osteo-biológico: Estimación de la edad osteológica en subadultos. CAFCA, Centro de Análisis Forense y Ciencias Aplicadas.

Krogman WM, İşcan MY (1986). *The human skeleton in forensic science*. CC Thomas: Springfield.

La Barre W. (1984). *Muelos: a Stone Age superstition about sexuality*. Columbia University Press.

Lallo JW, Armelagos JG, Mensforth RP (1977). The role of diet, disease and physiology in the origin of porotic hiperostosis. *Human Biology* 49:471-483.

Lampl M, Jeanty P (2003). Timing is everything: a reconsideration of fetal growth velocity patterns identifies the importance of individual and sex differences. *American Journal of Human Biology* 15(5), 667-680.

Larsen CS (1997) *Bioarcheology: Interpreting Behavior from the Human Skeleton*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Laurenson RD (1963). The chondrification and primary ossification of the human ilium (Doctoral dissertation, University of Aberdeen).

Laurenson RD (1964). The chondrification of the human ilium. *The Anatomical Record* 148(2), 197-202.

La Velle M (1995). Natural selection and developmental sexual variation in the human pelvis. *American Journal of Physical Anthropology* 98(1), 59-72.

Lee JC (1990). Sources of extraneous variation in the study of meristic characters: the effect of size and of inter-observer variability. *Systematic Zoology* 39(1), 31-39.

Lee MM, Donahoe PK, Hasegawa T, Silverman B, Crist GB, Best S, Hasegawa Y, Noto RA, Schoenfeld D, MacLaughlin, DT (1996). Mullerian inhibiting substance in humans: normal levels from infancy to adulthood. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 81(2), 571-576.

Lele SR, Richtsmeier JT (2001). *An invariant approach to statistical analysis of shapes*. CRC Press.

Lewis B (1998). Prehistoric juvenile rheumatoid arthritis in a Precontact Louisiana Native population reconsidered. *American Journal of Physical Anthropology* 106:229-248.

Lewis ME (2000). Non-adult paleopathology: current status and future potential. En: M. Cox y S. Mays (eds.). *Human Osteology in Archaeology and Forensic Science*. London: Greenwich Medical Media.

Lewis ME, Rutty G. (2003). The endangered child: the personal identification of children in forensic anthropology. *Science and Justice* 43:201–209.

Lewis ME (2006). *The bioarchaeology of children: perspectives from biological and forensic anthropology* (Vol. 50). Cambridge University Press.

Lillehammer G (1989). A child is born: the child's world in an archaeological perspective. *Norwegian Archaeological Review* 22:89-105.

López-Lázaro S (2016). *Análisis de morfometría geométrica en dentición humana. Estimación del sexo en población mediterránea* (Tesis doctoral, Universidad de Granada).

Loth SR, Henneberg M (1996) Mandibular ramus flexure: a new morphologic indicator of sexual dimorphism in the human skeleton. *American Journal of Physical Anthropology* 99(3), 473-485.

Loth SR, Henneberg M (2001). Sexually dimorphic mandibular morphology in the first few years of life. *American Journal of Physical Anthropology* 115(2), 179-186.

Louise S, Sue B (2004). *Developmental juvenile osteology*. Academic, Department of Anatomy and Developmental Biology, Royal Free and University College Medical School, London InterScience.

Lunn SF, Cowen GM, Fraser HM (1997). Blockade of the neonatal increase in testosterone by a GnRH antagonist: the free androgen index, reproductive capacity and postmortem findings in the male marmoset monkey. *Journal of Endocrinology* 154(1), 125-131.

MacLaughlin SM, Bruce MF (1986). The sciatic notch/acetabular index as a discriminator of sex in European skeletal remains. *Journal of Forensic Science* 31(4), 1380-1390.

MacLaughlin SM, Bruce MF (1990). The accuracy of sex identification in European skeletal remains using the Phenice characters. *Journal of Forensic Science* 35(6), 1384-1392.

Mann DR, Fraser HM (1996). The neonatal period: a critical interval in male primate development. *Journal of Endocrinology* 149(2), 191-197.

Main KM, Schmidt IM, Skakkebaek NE (2000). A possible role for reproductive hormones in newborn boys: progressive hypogonadism without the postnatal testosterone peak. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 85(12), 4905-4907.

Main KM, Schmidt IM, Toppari J, Skakkebaek NE (2002). Early postnatal treatment of hypogonadotropic hypogonadism with recombinant human FSH and LH. *European Journal of Endocrinology* 146(1), 75-79.

Main KM, Jensen RB, Asklund C, Hoi-Hansen CE, Skakkebaek NE (2006). Low birth weight and male reproductive function. *Hormone Research in Paediatrics*, 65(Suppl. 3) p 116-122.

Majó T (2000). L'os coxal non-adulte: approche méthodologique de la croissance et de la diagnose sexuelle. Application aux enfants du paléolithique moyen (Doctoral dissertation).

Marcus LF, Corti M, Loy A, Naylor GJ, Slice DE (Eds.). (2013). *Advances in morphometrics* (Vol. 284). Springer Science & Business Media.

Mays S (2010). *The archaeology of human bones*. Routledge.

Mays S, Gowland R, Halcrow S, Murphy E (2017). *Child Bioarchaeology: Perspectives on the Past 10 Years*. *Childhood in the Past*, p 1-19.

McAuley JP, Uthoff HK (1990). The development of the pelvis. In *The Embryology of the Human Locomotor System*. Springer Berlin Heidelberg. p 107-116.

McHenry H (1968). Transverse lines in long bones of prehistoric California Indians. *American Journal of Physical Anthropology* 29:1-18.

McHenry HM, Schulz PD (1976). The association between Harris lines and enamel hypoplasia in prehistoric California Indians. *American Journal of Physical Anthropology* 44:507-512.

McKern TW, Stewart TD (1957). Skeletal age changes in young American males analysed from the standpoint of age identification.

Meindl RS, Lovejoy CO, Mensforth RP, Walker RA (1985). A revised method of age determination using the os pubis, with a review and tests of accuracy of other current methods of pubic symphyseal aging. *American Journal of Physical Anthropology* 68(1), 29-45.

Mensforth RP (1985). Relative tibia long bone growth in the Libben and Bt-5 prehistoric skeletal populations. *American Journal of Physical Anthropology* 68:247-262.

Mensforth RP, Lovejoy CO, Lallo JW, Armelagos GJ (1978). Part two: the role of constitutional factors, diet, and infectious disease in the etiology of porotic hyperostosis and periosteal reactions in prehistoric infants and children. *Medical Anthropology* 2(1), 1-59.

Merchant VL, Ubelaker DH (1977). Skeletal growth of the protohistoric Arikara. *American Journal of Physical Anthropology* 46:61-72.

Miles AEW, Bulman JS (1995). Growth curves of immature bones from a Scottish island population of sixteenth to mid-nineteenth century: Shoulder girdle, ilium, pubis and ischium. *International Journal of Osteoarchaeology* 5(1), 15-27.

Mittler DM, Sheridan SG (1992). Sex determination in subadults using auricular surface morphology: a forensic science perspective. *Journal of Forensic Science* 37(4), 1068-1075.

Molleson T, Cox M (1993). *The Spitafields Project, vol. 2, The Middling Sort*, Research Report no. 86. York: Council for British Archaeology.

Molleson T, Cruse K, Mays S. (1998). Some sexually dimorphic features of the human juvenile skull and their value in sex determination in immature skeletal remains. *Journal of Archaeological Science* 25:719-728.

Moore J, Scott E (1997). *Invisible People and Processes*. Leicester: Leicester University Press.

Moore K, Persaud TVN (2016). *Embriología clínica*. Elsevier Brasil.

Moorrees CF, Fanning EA, Hunt EE Jr (1963). Age variation of formation stages for ten permanent teeth. *Journal of Dental Research* 42:490-502.

Nolla C (1960). The development of the permanent teeth. *Journal of Dentistry for Children* 27:254-256.

O'Higgins P, Jones N (1998). Facial growth in *Cercocebus torquatus*: an application of three-dimensional geometric morphometric techniques to the study of morphological variation. *Journal of Anatomy* 193:251-272.

Olivier G, Pineau H (1960). Nouvelle détermination de la taille foetale d'après les longueurs diaphysaires des os longs. *Annales de Médecine Légale* 40:141–144.

O'rahilly R, Müller F (1996). *Human embryology & teratology*. New York: Wiley-Liss. p 274-277.

Ortner DJ, Eriksen MF (1997). Bone changes in the human skull probably resulting from scurvy in infancy and childhood. *International Journal of Osteoarchaeology* 7:212-220.

Ortner DJ, Mays S (1998). Dry-bone manifestations of rickets in infancy and early childhood. *International Journal of Osteoarchaeology* 8:45-55.

Ortner DJ, Kimmerle E, Diez M (1999). Probable evidence of scurvy in subadults from archaeological sites in Peru. *American Journal of Physical Anthropology*, 108:321-331.

Ortner DJ (2003). Identification of Pathological Condition. En: *Human Skeletal Remains*. Academic Press, New York, p 453–463.

Palkama A, Hopsu V, Takki S, Takki K (1965). Children's age and stature estimated from femur diameter. *Annales de Médecine Experimentalis et Biologiae Fenniae* 44:86–87.

Parramón JM (1990). *Cómo dibujar la figura humana: estudio teórico y práctico de las dimensiones y proporciones, la perspectiva, la anatomía y el dibujo en todo su valor de la figura humana*. Parramón Ediciones, SA.

Patriquin ML, Loth SR, Steyn M (2003). Sexually dimorphic pelvic morphology in South African whites and blacks. *HOMO-Journal of Comparative Human Biology* 53(3), 255-262.

Patriquin ML, Steyn M, Loth, S. R. (2005). Metric analysis of sex differences in South African black and white pelvis. *Forensic Science International* 147(2), 119-127.

Perez SI, Bernal V, Gonzalez PN (2006). Differences between sliding semi-landmark methods in geometric morphometrics, with an application to human craniofacial and dental variation. *Journal of Anatomy* 208(6), 769-784.

Phenice TW (1969). A newly developed visual method of sexing the os pubis. *American Journal of Physical Anthropology* 30(2), 297-301.

Ponseti IV (1978). Morphology of the acetabulum in congenital dislocation of the hip. Gross, histological and roentgenographic studies. *The Journal of Bone and Joint Surgery, American Volume* 60(5), 586-599.

Ponseti, IV (1978). Growth and development of the acetabulum in the normal child. Anatomical, histological, and roentgenographic studies. *The Journal of Bone and Joint Surgery, American Volume* 60(5), 575-585.

Pucciarelli HM, Carnese FR, Guimarey LM (1996). Desnutrición y dimorfismo sexual. *Ciencia Hoy* 6(34).

Rabinovich S (1995). *Measurement errors. Theory and practice*. New York: American Institute of Physics.

Rauch F, Schoenau E (2001). Changes in bone density during childhood and adolescence: an approach based on bone's biological organization. *Journal of Bone and Mineral Research* 16(4), 597-604

Reynolds EL (1945). The bony pelvic girdle in early infancy. A roentgenometric study. *American Journal of Physical Anthropology* 3(4), 321-354.

Reynolds EL (1947). The bony pelvis in prepuberal childhood. *American Journal of Physical Anthropology* 5(2), 165-200.

Richtsmeier JT, Burke Deleon V, Lele SR (2002). The promise of geometric morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology* 119(S35), 63-91.

Rissech C, Garcia M, Malgosa A. (2003). Sex and age diagnosis by ischium morphometric analysis. *Forensic Science International* 135(3), 188-196.

Rissech C, Malgosa A (2007). Pubis growth study: applicability in sexual and age diagnostic. *Forensic Science International* 173(2), 137-145.

Robles AG (2010). Análisis de la forma dental en la filogenia humana. Tendencias y modelos evolutivos basados en métodos de morfometría geométrica (Tesis doctoral, Universidad de Granada).

Rogers TL (2009). Sex determination of adolescent skeletons using the distal humerus. *American Journal of Physical Anthropology* 140(1), 143-148.

Rohlf FJ, Bookstein FL (1990). An overview of image processing and analysis techniques for morphometrics. En: *Proceedings of the Michigan Morphometrics Workshop*. Univ. Michigan Mus. Zool. Spec. Pub (Vol. 2, p 37-60).

Rohlf FJ, Marcus LF (1993). A revolution morphometrics. *Trends in Ecology & Evolution* 8(4), 129-132.

Rohlf FJ (2005). tpsDig, digitize landmarks and outlines, version 2.05. Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, New York.

Rohlf FJ (2007). tpsRelw version 1.45. Department of Ecology and Evolution. State University of New York, Stony Brook.

Rohlf FJ (2009). tpsUtil version 1.44. New York State University at Stony Brook  
Rose J.C., Armelagos G.J. y Lallo J.W. (1978). Histological enamel indicator of childhood stress in prehistoric skeletal samples. *American Journal of Physical Anthropology* 49:511-519.

Ross MH, Pawlina W (2007). *Histología*. Ed. Médica Panamericana.

Rossi F (1993). Deux poupées en ivoire d'époque romaine à Yverdon-les-Bains VD. *Archäologie der Schweiz* 16:152-157.

Rothschild BM, Hershkovitz I, Bedford L, Latimer B, Dutour O, Rothschild C, Jellema LM (1997). Identification of childhood arthritis in archaeological material: juvenile rheumatoid arthritis versus juvenile spondyloarthritis. *American Journal of Physical Anthropology* 102(2), 249-264.

Saavedra JS (2012). *Texto atlas de histología: biología celular y tisular*. McGraw-Hill Interamericana.

Sánchez D, Martín M (2006). *Historia y Contenido de un Lugar para la Memoria y Culto en Memoria de Granada*. ed. EMUCESA, Granada. p 19–39.

Sanmiguel D (2001). *Anatomía artística*. Parramón Ediciones, SA.

Saunders SR, Hoppa R, Southern R (1993). Diaphyseal growth in a nineteenth century skeletal sample of subadults from St. Thomas' Church, Belleville. *International Journal of Osteoarchaeology* 3:265-281.

Saunders SR, Barrans L (1999) What can be done about the infant category in skeletal samples? En: R. D. Hoppa and C. M. Fitzgerald (eds.) *Human Growth in the Past: Studies from Bones and Teeth*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, p 183–209.

Saunders SR (2008). Juvenile skeletons and growth-related studies. En: Katzenberg MA, Saunders SR (eds) *Biological anthropology of the human skeleton*, 2nd edn. Wiley-Liss, New York, p 117–146.

Scammon R, Calkins L (1923). New empirical formulae for expressing the linear growth of human fetus. *Anatomical Record* 25:148-149.

Schaefer M, Black SM, Scheuer L (2009). *Juvenile osteology: a laboratory and field manual*. Elsevier, Academic Press.

Scheuer L, Musgrave JH, Evans SP (1980). The estimation of late fetal and perinatal age from limb bone length by linear and logarithmic regression. *Annals of Human Biology* 7:257–265.

Scheuer L, Black S (2004). *Developmental juvenile osteology*. Academic Press, Cambridge.

Schour I, Massler M (1941). The developmental of human dentition. *Journal of the American Dental Association* 28:1153-1160.

Schurr M (1997). Stable nitrogen isotopes as evidence for age of weaning at the Angel Site: a comparison of isotopic and demographic measures of weaning age. *Journal of Archaeological Science* 24:919-927.

Schultz AH (1962). Metric age changes and sex differences in primate skulls. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie* (H. 3), 239-255.

Schutkowski H (1987). Sex determination of fetal and neonate skeletons by means of discriminant analysis. *International Journal of Anthropology* 2(4), 347-352.

Schutkowski H (1993). Sex determination of infant and juvenile skeletons: I. Morphognostic features. *American Journal of Physical Anthropology* 90(2), 199–205

Scrimshaw S (1984). Infanticide in human populations: societal and individual concern. In G. Hausfater and S.B. Hardy (eds.) *Infanticide*. New York: Aldine, p 439–462.

Sempé MC, Flores O (2011). *El cementerio de La Plata y su contexto histórico*. La Plata: El Autor.

Seidler H (1980). Sex-diagnosis of isolated os coxae by discriminant functions. *Journal of Human Evolution* 9(8), 597-600.

Shapiro D, Richtsmeier J (1997) Brief communication: a sample of pediatric skulls available for study. *American Journal of Physical Anthropology* 103:415– 416.

Slice DE (2006) *Modern morphometrics in physical anthropology*. Springer Science & Business Media, Berlin.

Sheets HD (2003) *IMP-integrated morphometrics package*. Department of Physics, Canisius College, Buffalo, NY.

Shrout, PE, Fleiss JL (1979). Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychological bulletin* 86(2), 420.

Shrout PE (1998). Measurement reliability and agreement in psychiatry. *Statistical Methods in Medical Research* 7(3), 301-317.

Singleton M (2002). Patterns of cranial shape variation in the Papionini (Primates: Cercopithecinae). *Journal of Human Evolution* 42(5), 547-578.

Smith P Kahila G (1992). Identification of infanticide in archaeological sites: a case study from the Late Roman–Early Byzantine periods at Ashkelon, Israel. *Journal of Archaeological Science* 19:667–675.

Soger ST (1987). *An Illustrated of History Architecture Style*, Omega Books.

Specker BL, Brazerol W, Tsang RC, Levin R, Searcy J, Steichen J (1987). Bone mineral content in children 1 to 6 years of age: detectable sex differences after 4 years of age. *American Journal of Diseases of Children* 141(3), 343-344

Steckel R, Rose JC (2002). *The Backbone of History: Health and Nutrition in the Western Hemisphere*. Cambridge: Cambridge University Press.

Steiniche T, Hauge EM (2003). Normal structure and function of bone. In *Handbook of Histology Methods for Bone and Cartilage*. Humana Press. p 59-72.

Stevenson PH (1924). Age order of epiphyseal union in man. *American Journal of Physical Anthropology* 7(1), 53-93.

Stull KE, Godde K (2013). Sex estimation of infants between birth and one year through discriminant analysis of the humerus and femur. *Journal of Forensic Sciences* 58(1), 13-20.

Sundick R (1972). Human skeletal growth and dental development as observed in the Indian Knoll population. (Thesis dissertation, University of Toronto, Canada).

Sutherland LD, Suchey JM (1991). Use of the ventral arc in pubic sex determination. *Journal of Forensic Science* 36(2), 501-511.

Sutter RC (2003). Nonmetric subadult skeletal sexing traits: I. A blind test of the accuracy of eight previously proposed methods using prehistoric known-sex mummies from northern Chile. *Journal of Forensic Sciences* 48(5), 927–935

Tefnin R (2000). Reflexiones sobre la imagen egipcia antigua: La medida y el juego. *Arte y sociedad del Egipto antiguo*, 171, 15.

Thomson A (1899). The sexual differences of the foetal pelvis. *Journal of Anatomy and Physiology*, 33(Pt 3), 359.

Torcida S, Perez SI (2012). Análisis de Procrustes y el estudio de la variación morfológica. *Revista Argentina de Antropología Biológica* 14(1), 131-141.

Toro Ibacache, MV, Manriquez Soto G, Suazo Galdames I (2010). Morfometría geométrica y el estudio de las formas biológicas: de la morfología descriptiva a la morfología cuantitativa. *International Journal of Morphology* 28(4), 977-990.

Tortora GJ, Grabowski, SR, Werneck AL, Esbérard CA, Passos MAF (2006). *Principios de anatomía y fisiología* (Vol. 7). Oxford University Press.

Todd TW (1921). Age change in the pubic bone, *American Journal of Physical Anthropology* 4(1), 1-70

Ubelaker DH, Katzenberg MA, Doyon LG (1995). Status and diet in precontact highland Ecuador. *American Journal of Physical Anthropology* 97(4), 403-411.

Ubelaker DH, Volk CG (2002). A test of the Phenice method for the estimation of sex. *Journal of Forensic Science* 47(1), 19-24.

Ulijaszek SJ, Johnston FE, Preece MA (1998). *The Cambridge encyclopedia of human growth and development*. Cambridge University Press.

Velemínská J, Krajíček V, Dupej J, Gómez-Valdés JA, Velemínský P, Šefčáková A, Pelikán G, Sánchez-Mejorada J, Brůžek J (2013). Geometric morphometrics and sexual dimorphism of the greater sciatic notch in adults from two skeletal collections: The accuracy and reliability of sex classification. *American Journal of Physical Anthropology* 152(4), 558-565.

Verano JW, Ubelaker DH (1992). *Disease and demography in the Americas*. Washington: Smithsonian Institution Press.

Verbruggen, SW, Nowlan NC (2017). Ontogeny of the human pelvis. *The Anatomical Record* 300(4), 643-652.

Viciano J, Alemán I, D'Anastasio R, Capasso L, Botella MC (2012). Odontometric Sex Discrimination in the Herculaneum Sample (79 AD, Naples, Italy), with Application to Juveniles. *American Journal of Physical Anthropology* 145: 97–106.

Viciano, J (2013). *Métodos odontométricos para la estimación del sexo en individuos adultos y subadultos*. (Tesis doctoral, Universidad de Granada).

Vlak D, Roksandic M, Schillaci MA (2008). Greater sciatic notch as a sex indicator in juveniles. *American Journal of Physical Anthropology* 137(3), 309–315.

von Cramon-Taubadel N, Frazier BC, Lahr MM (2007). The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods, and modifications. *American Journal of Physical Anthropology* 134(1), 24-35.

Walker P, Johnson J, Lambert P (1988). Age and sex biases in the preservation of human skeletal remains. *American Journal of Physical Anthropology* 76:183–188.

Walker PL (2000). Bioarchaeological ethics: a historical perspective on the value of human remains. *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, 3, p 40.

Walker PL (2008). Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. *American Journal of Physical Anthropology* 136(1), 39-50.

Washburn SL (1948). Sex differences in the pubic bone. *American Journal of Physical Anthropology* 6:199–208.

Weaver DS (1980). Sex differences in the ilia of a known sex and age sample of fetal and infant skeletons. *American Journal of Physical Anthropology* 52(2), 191–195

Webster M, Sheets HD (2010). A practical introduction to landmark-based geometric morphometrics. *Quantitative Methods in Paleobiology* 16:168–188.

White TD, Black MT, Folkens PA (2005). *Human osteology*. Academic press.

Walker PL, Cook DC, Lambert PM (1997). Skeletal evidence for child abuse: a physical anthropological perspective. *Journal of Forensic Science* 42(2), 196-207.

Whittle A (1996). *Europe in the Neolithic: The creation of New Worlds*. Cambridge: Cambridge University Press.

Wilkie L (2000). Not merely child's play: creating a historical archaeology of children and childhood. En: J. Sofaer Derevenski (ed.). *Children and Material Culture*. London: Routledge.

Winter JS, Hughes IA, Reyes FI, Faiman C (1976). Pituitary-gonadal relations in infancy: 2. Patterns of serum gonadal steroid concentrations in man from birth to two years of age. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 42(4), 679-686.

Winter JS (1982). Hypothalamic—pituitary function in the fetus and infant. *Clinics in Endocrinology and Metabolism* 11(1), 41-55.

Wilson LA, MacLeod N, Humphrey LT (2008). Morphometric criteria for sexing juvenile human skeletons using the ilium. *Journal of Forensic Sciences* 53(2), 269–278

Wilson LA, Cardoso HF, Humphrey LT (2011). On the reliability of a geometric morphometric approach to sex determination: a blind test of six criteria of the juvenile ilium. *Forensic Science International* 206(1), 35– 42.

Wilson LA, Ives R, Cardoso HF, Humphrey LT (2015). Shape, size, and maturity trajectories of the human ilium. *American Journal of Physical Anthropology* 156(1), 19–34

Wilson LA, Humphrey, LT (2017). Voyaging into the third dimension: A perspective on virtual methods and their application to studies of juvenile sex estimation and the ontogeny of sexual dimorphism. *Forensic Science International* 278, 32-46.

Wright LE (1998). Stable carbon and oxygen isotopes in human tooth enamel: identifying breastfeeding and weaning in prehistory. *American Journal of Physical Anthropology* 106:1-18.

Wright LE Schwartz H (1997). Weaning in prehistory: a new isotopic method. *American Journal of Physical Anthropology Suppl* 24:246.

Woodburne RT (1961). *Essentials of Human Anatomy*. *Academic Medicine* 36(5), 556.

Y'Edynak G (1976). Long bone growth in Western Eskimo and Aleut skeletons. *American Journal of Physical Anthropology* 45:569-574.

Zelditch ML, Swiderski DL, Sheets HD (2012). Geometric morphometrics for biologists: a primer. Academic Press.





