

Cartografiando la anatomía

Cartografando a anatomia

Mapping the anatomy

Julia Audije-Gil^{1,2}, Oscar Cambra-Moo², Orosia García Gil² & Armando González Martín²

1. Grupo Ibercreta, Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá, 28871 Alcalá de Henares, España
julia.audije@uah.es

2. Laboratorio de Poblaciones del Pasado (LAPP), Departamento de Biología, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, España

PALABRAS CLAVE: Macroanatomía, Microanatomía, Posición anatómica, Morfometría geométrica, Rayos X, Paleohistología

PALAVRAS CHAVE: Macroanatomia, Microanatomia, Posição anatómica, Morfometria geométrica, Raios X, Paleohistologia

KEY WORDS: Macroanatomy, Microanatomy, Standard anatomical position, Geometric morphometrics, X-rays, Palaeohistology

RESUMEN

Un mapa es una forma de comunicación en la que el mensaje sobre la información espacial se transmite mediante un lenguaje visual y escrito. Lejos de ser una herramienta exclusivamente geográfica, se trata de una representación gráfica y simbólica de cualquier realidad de la que se tenga conocimiento planimétrico. Por lo tanto, la naturaleza puede ser cartografiada a todos sus niveles y la información de la anatomía de los organismos actuales y fósiles no es una excepción.

Históricamente, se ha cartografiado la anatomía a nivel macroscópico y microscópico. Respecto a la cartografía de la macroanatomía, para que un mapa sea considerado como tal debe manifestarse en un estilo lingüístico estandarizado por convenio. Los mapas anatómicos, al igual que el resto, poseen un lenguaje de referencia específico. A partir de la Edad Moderna, en el momento en que se estandariza este lenguaje en la cartografía anatómica, se diversifican las posibilidades de investigación de la macroanatomía. Por un lado, se cambia de la ilustración o boceto clásico de la anatomía, de tipo más artístico y reflejando en muchos casos las creencias filosóficas y religiosas de la época, al dibujo de la cartografía anatómica basado en el método empírico-analítico, propio de las ciencias naturales y sociales, y que posee dicho lenguaje estandarizado. Por otro lado, a partir del siglo XVIII, se pasa de un estudio de los seres vivos a nivel individual, a un análisis que integra a los organismos en conjunto (a nivel de especies y de poblaciones), es decir se empieza a adquirir un interés evolutivo y taxonómico en los estudios anatómicos. Entonces, una disciplina incipiente, la anatomía comparada, comienza a sentar las bases de la cartografía anatómica con perspectiva ontogenética y evolutiva. Tiempo después del apogeo de ésta, a principios del siglo XX, se desarrolla una nueva fase en el estudio de la forma orgánica, en la que resurge el interés por analizar la morfología de los seres vivos y sus procesos de crecimiento desde una perspectiva matemática, a través del mapeo de estructuras y la modelización. Estas ideas fueron muy innovadoras para su época y constituyeron el punto de partida teórico para el desarrollo de otra técnica (una de las más recientes) de cartografiado anatómico de superficie: la morfometría geométrica. Todos estos métodos tradicionales para

el estudio de la anatomía macroscópica se basaban en técnicas invasivas directas (como la disección) que permitían la observación de los sistemas y órganos que componen el cuerpo humano y de otros animales. Sin embargo, a finales del siglo XIX surge una técnica que revoluciona el estudio del interior de los organismos, permitiendo su estudio con estos aún vivos y de forma no invasiva, indirecta. Este punto de inflexión es el descubrimiento de los rayos X, que permitió el desarrollo de la radiología y la tomografía.

Respecto a la anatomía microscópica o microanatomía, en ella se estudian los niveles de la organización biológica no observables a simple vista, como son el tejido, la célula y la molécula. Por lo tanto, su origen como disciplina está directamente ligado a la invención del microscopio y los primeros trabajos de exploración en histología. Esta se reveló desde sus inicios como una disciplina muy útil en el estudio de la historia del crecimiento y la evolución de las especies, desde un punto de vista actualista y también desde el histórico, gracias precisamente al mapeo y la cuantificación de las estructuras tisulares. Su principal inconveniente radica en que se basa por lo general en técnicas invasivas directas y por lo tanto, pseudodestructivas. Como sucedió para las investigaciones de macroanatomía, la búsqueda de métodos que permitieran analizar el interior de las partes de los organismos mediante técnicas no que alteraran lo mínimo posible los especímenes objeto de estudio, se investigó en el desarrollo de herramientas para el mapeo indirecto de las estructuras microanatómicas. Así, surgen las técnicas de microtomografía, de nuevo, son herederas directas de la radiografía y la tomografía y, por lo tanto, basadas también en las propiedades de los rayos X.

Gracias a la revolución tecnológica y digital de las últimas décadas, se ha producido un auge de las técnicas de cartografiado de la anatomía (a nivel macroscópico y microscópico). Las nuevas técnicas de tratamiento de imágenes, bi y tridimensionales, han conllevado un cambio en el concepto del mapa anatómico, de la ilustración o boceto clásico a la imagen cuantificable y virtual. Hoy en día, el estudio de la anatomía se ha convertido en un análisis muy versátil, utilizándose tanto las técnicas clásicas de investigación que siguen aportando información muy útil (e.g., estudios morfológicos clásicos de anatomía comparada, paleohistología). Los resultados obtenidos del ‘mapeo’ de las macro y microestructuras anatómicas tienen importantes implicaciones para la Biología Evolutiva y del Desarrollo, la Ontogenia, la Ecología y la Paleontología.

RESUMO

Um mapa é uma forma de comunicação, na qual a mensagem sobre a informação espacial é transmitida mediante uma linguagem visual e escrita. Longe de ser uma ferramenta exclusivamente geográfica, trata-se de uma representação gráfica e simbólica de qualquer realidade, da qual se tenha conhecimento planimétrico. Portanto, a natureza pode ser cartografada em todos os seus níveis, sendo que a informação sobre a anatomia dos organismos atuais e fósseis não constitui exceção.

Historicamente, cartografou-se a anatomia a nível macroscópico e microscópico. Com respeito à cartografia da macroanatomia, para que um mapa seja considerado como tal, deve manifestar-se num estilo linguístico standardizado por convénio. Os mapas anatómicos, tal como os restantes, possuem uma linguagem de referência específica. A partir da Idade Moderna, no momento em que se standardiza esta linguagem na cartografia anatómica, diversificam-se as possibilidades de investigação da macroanatomia. Por um lado, passa-se da ilustração ou esboço clássico da anatomia, de tipo mais artístico e refletindo, em muitos casos, as crenças filosóficas e religiosas da época, ao desenho da cartografia anatómica baseado no método empírico-analítico, próprio das ciências naturais e sociais, e que possui a dita linguagem standardizada. Por outro lado, a partir do século XVIII, passa-se de um estudo dos seres vivos a nível individual, a uma análise que integra os organismos em conjunto (ao nível de espécies e de populações), ou seja, começa-se a adquirir um interesse evolutivo e taxonómico nos estudos anatómicos. Deste modo, uma disciplina incipiente, a anatomia comparada, começa a estabelecer as bases da cartografia anatómica com uma perspectiva ontogenética e evolutiva. Tempos depois do apogeu desta, em princípios do século XX, desenvolve-se uma nova fase no estudo da forma orgânica, na qual ressurgue o interesse por se analisar a morfologia dos seres vivos e dos seus processos de crescimento, a partir de uma perspectiva matemática, através do mapeamento de estruturas e da modelização. Estas ideias foram muito inovadoras para a sua época e constituíram o ponto de partida teórico para o desenvolvimento de outra técnica (uma das mais recentes) de cartografia anatómica

de superfície: la morfometria geométrica. Todos estes métodos tradicionais, para o estudo da anatomia macroscópica, se baseavam em técnicas invasivas diretas (como la dissecação), as quais permitiam a observação dos sistemas e órgãos que compõem o corpo humano e o de outros animais. Não obstante, em finais do século XIX, surge uma técnica que revoluciona o estudo do interior de los organismos, permitindo o seu estudo com estes ainda vivos e de forma não invasiva, indireta. Este ponto de inflexão é o descobrimento dos raios X, que permitiu o desenvolvimento da radiologia e da tomografia.

No que respeita à anatomia microscópica ou microanatomia, nela se estudam os níveis de organização biológica não observáveis a olho nu, como o tecido, a célula e a molécula. Portanto, a sua origem como disciplina está diretamente ligada à invenção do microscópio e aos primeiros trabalhos de pesquisa em histologia. Esta revelou-se, desde o seu início, como uma disciplina muito útil no estudo da historia do crescimento e da evolução das espécies, desde o ponto de vista atualista e, também, desde o histórico, graças precisamente ao mapeamento e quantificação das estruturas dos tecidos. O seu inconveniente principal advém do facto de que se baseia, na generalidade, em técnicas invasivas diretas e, por conseguinte, pseudodestrutivas. Tal como sucedeu com as investigações de macroanatomia, a procura de métodos que permitissem analisar o interior das partes dos organismos, mediante técnicas que não alterassem o mínimo possível dos espécimes objeto de estudo, investigou-se através do desenvolvimento de ferramentas para o mapeamento indireto das estruturas microanatômicas. Surgem, assim, as técnicas de microtomografia que, de novo, são herdeiras diretas da radiografia e da tomografia e, portanto, baseadas também nas propriedades dos raios X.

Gracias à revolução tecnológica e digital das últimas décadas, registou-se um apogeu das técnicas de cartografia da anatomia (a nível macroscópico e microscópico). As novas técnicas de tratamento de imagens, bi e tridimensionais, levaram a uma mudança no conceito do mapa anatómico, da ilustração ou esboço clássico, até à imagem quantificável e virtual. Hoje em dia, o estudo da anatomia converteu-se numa análise muito versátil, utilizando-se tanto as técnicas clássicas de investigação que seguem fornecendo informação muito útil (e.g., estudos morfológicos clássicos de anatomia comparada, paleohistologia). Os resultados obtidos do ‘mapeamento’ das macro e microestruturas anatómicas têm importantes implicações para a Biologia Evolutiva e do Desenvolvimento, a Ontogenia, a Ecologia e a Paleontologia.

ABSTRACT

A map is a communication way in which the message, related to spatial information, is transmitted through a visual and a written language. Far from being an exclusively geographic tool, it is the graphic and symbolic representation of a reality of which a planimetric knowledge is known. Therefore, nature can be mapped at all levels and the information on the anatomy of extant and extinct organisms is no exception.

Along the history, anatomy has been mapped at the macroscopic and microscopic level. Regarding the cartography of the macroanatomy, a map must be express in a standardized language style. It means that anatomical maps, like other types of maps, have a specific reference language which has been reached by international consensus. This language was standardized in anatomical cartography after the Modern Age, and the research possibilities of the macroanatomy diversified. On the one hand, the classic sketch of the anatomy, of a more artistic type and reflecting in many cases the philosophical and religious beliefs of the time, changed to the drawing of anatomical cartography based on the empirical-analytical method, typical of the Natural and Social Sciences, and which possesses such standardized language.

On the other hand, from the 18th century onwards, the study of living beings at an individual level change to an analysis that integrated organisms together as a whole (at the level of species and populations). That is to say, anatomical studies began to acquire an Evolutionary and taxonomic interest. Then an incipient discipline, the Comparative Anatomy, established the foundations of anatomical cartography with an ontogenetic and evolutionary perspective. After its apogee, at the beginning of the 20th century, a new phase was developed in the study of the organic form, in which the aim was to analyze the morphology of living beings and their growth processes from a mathematical perspective through the mapping of its structures and modeling. These ideas were very innovative and constituted the theoretical

starting point for the development of another technique (one of the most recent) of surface anatomical mapping: geometric morphometrics.

All these traditional methods for the study of macroscopic anatomy were based on direct invasive techniques (such as dissection) that allowed the observation of the systems and organs of the human body and other animals. However, at the end of the 19th century a technique emerged that revolutionized the study of the organisms inside, allowing their study noninvasively and being alive (i. e., indirectly). This turning point is the discovery of X-rays, which allowed the development of radiology and tomography.

Concerning the microscopic anatomy or microanatomy, it is the study of the levels of biological organization not observable to the naked eye, such as the tissue, the cell and the molecule. Therefore, its origin as a discipline is linked directly to the invention of the microscope and the first works of exploration in histology. This was revealed from the outset as a very useful discipline in the study of the history of growth and evolution of species, thanks precisely to the mapping and quantification of tissue structures. Its main problem is that it is usually based on direct invasive and, therefore, pseudo-destructive techniques. As it was the case for macroanatomy investigations, the search for methods that allowed the analysis of the inside of the organisms (by means of techniques that did not alter the specimens), tools for the indirect mapping of Microanatomic structures were investigated. Thus, microtomography techniques arise, which are direct heirs of the X-rays and the tomography (based too on the properties of the X-rays).

Thanks to the technological and digital revolution of the last decades, there has been a rise in the techniques of mapping of the macroscopic and microscopic anatomy. The new bi and three-dimensional imaging techniques have entailed a change in the concept of the anatomical map, from the classic illustration or sketch to the quantifiable and virtual image. Nowadays, the study of anatomy has become a very versatile analysis, using both classic research techniques, that continue to provide useful information (e.g., classical morphological studies of comparative anatomy, paleohistology), such as new tools (e.g., geometric morphometrics, tomography and microtomography). The results obtained from the mapping of macro and microstructures have important implications for Evolutionary and Developmental Biology, Ontogeny, Ecology and Paleontology.

1. INTRODUCCIÓN

«Cuando era pequeño tenía pasión por los mapas. Me pasaba horas y horas mirando Sudamérica, o África, o Australia, y me perdía en todo el esplendor de la exploración. En aquellos tiempos había muchos espacios en blanco en la tierra, y cuando veía uno que parecía particularmente tentador en el mapa (y cuál no lo parece), ponía mi dedo sobre él y decía: “Cuando sea mayor iré allí”.» (*El corazón de las tinieblas*, Conrad, 1899).

Si atendemos a la significación más reconocida del concepto de mapa, éste es “una representación geográfica de la Tierra o parte de ella en una superficie plana” (DRAE, 2017). Como en el texto del relato de Joseph Conrad (1857-1924), un mapa ha sido considerado tradicionalmente como la representación de una superficie terrestre o marítima, el resultado de la exploración y estudio de esos ‘espacios en blanco’ o desconocidos de la Tierra. La propia palabra “mapa” procede del bajo latín, *mappa*, que era un dibujo del plano de una finca o un territorio (Diccionario esencial latino-español, 2005). Sin embargo, hoy en día, el término “mapa” trasciende su significado latino y castellano, utilizándose como sinónimo de representación espacial de cualquier elemento de la naturaleza. La exploración de los ‘espacios en blanco’ que hay en un sistema o una estructura determinados da información relativa a su distribución espacial, el cambio con el tiempo, la relación de los espacios con los otros adyacentes, etc., sin ser necesario que se trate meramente del dibujo de una

superficie geográfica. Por ello, se podría decir que un mapa es, *sensu lato*, una representación gráfica y simbólica del conocimiento de una realidad espacial.

Partiendo de esta idea de que la naturaleza puede ser cartografiada a todos sus niveles, la información espacial de la anatomía de los organismos actuales y fósiles no puede suponer una excepción. La Anatomía se ubica en la rama de las ciencias morfológicas e investiga “las características morfológicas del cuerpo de los seres vivos y de la forma, situación y relaciones de las diferentes partes que lo componen” (REAL ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA, 2012). Por lo tanto, la propia definición del término posee de manera inherente un matiz topográfico y de análisis espacial de la forma orgánica. En la anatomía estrictamente topográfica se describen las estructuras y se interpretan sus relaciones. Es con el desarrollo de esta rama cuando la anatomía alcanza la madurez como ciencia y el momento en que se vincula la comprensión de la arquitectura orgánica con la comprensión de la función. Este análisis de la forma orgánica, de gran interés para la Biología del Desarrollo y Evolutiva, se realiza a varios niveles de la organización biológica, la cual se establece de forma ordenada y jerárquica, de lo más complejo a lo más simple: del organismo al sistema, al órgano, al tejido, a la célula, al orgánulo y a la molécula. De modo que la anatomía se puede estudiar a un nivel macroscópico (macroanatomía), lo que sería la anatomía a un nivel general, observable a simple vista (el organismo, los sistemas y los órganos); y también a un nivel microscópico (microanatomía), lo que supone el estudio de estructuras demasiado pequeñas para ser observadas a ojo desnudo (el tejido, la célula y la molécula).

Gracias a la revolución tecnológica y digital de las últimas décadas, se ha producido un auge de las técnicas de “cartografiado” de la anatomía (a nivel macroscópico y microscópico). Las nuevas técnicas de tratamiento de imágenes, bi y tridimensionales, han conllevado un cambio en el concepto del mapa anatómico, de la ilustración o boceto clásico a la imagen cuantificable y virtual, permitiendo ‘explorar’ y ahondar en regiones del mapa de los organismos hasta ahora ‘en blanco’. El estudio de la anatomía confluye así con la renovación de sus metodologías y con la innovación.

2. LA ANATOMÍA COMO REALIDAD CARTOGRAFIABLE

A pesar de que pueda parecer una visión innovadora o rompedora, el estudio de la anatomía animal y humana ha estado históricamente ligado a la noción de mapa. Es muy conocido el hecho de que cuando se asientan las bases de la anatomía occidental como disciplina a partir del final de la Edad Media, se vuelve imprescindible asociar la descripción anatómica con la ilustración (TSAFRIR & OHRY, 2001). Es entonces cuando estas estampas descriptivas y representaciones de los organismos, los “mapas anatómicos”, se comienzan a reunir en los famosos atlas de anatomía (VESALIUS, 1543; GRAY, 1918; NETTER, 2007). Estos no son otra cosa que colecciones de láminas de anatomía descriptiva en un libro, del mismo modo que los atlas de geografía reúnen colecciones de láminas de mapas geográficos o temáticos. Ejemplo de ello son las célebres ilustraciones de las láminas de anatomía de Leonardo da Vinci (1452-1519; Figura 1a), las cuales muestran un profundo conocimiento de la anatomía humana y de otros animales (KEMP, 1998).

Es necesario señalar que la noción de plano o planimetría y de mapa es de carácter un tanto ambivalente en el ámbito de la anatomía. Mientras que, de modo general, un plano es una representación esquemática de una superficie en dos dimensiones y a una determinada escala, un mapa es una representación de la proyección de una superficie, generalmente curva, también en dos dimensiones y a una determinada escala, lo que lleva en ocasiones al cambio en las proporciones auténticas

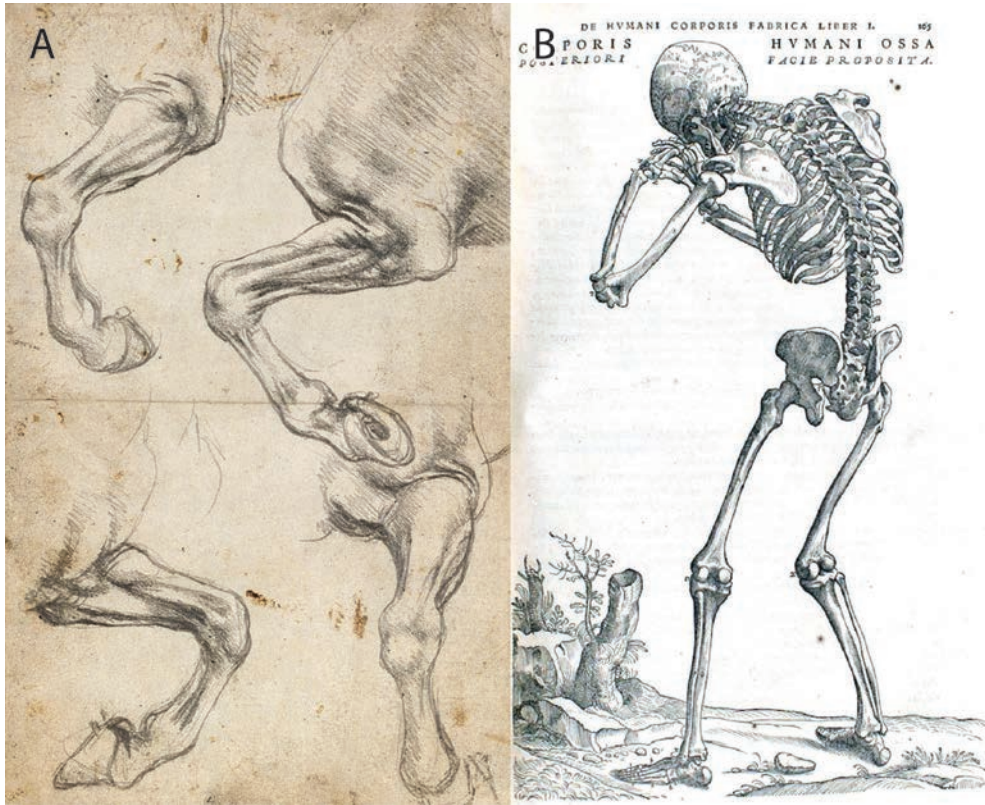


Figura 1. De la anatomía científico-artística a la anatomía puramente científica. (A) Láminas de anatomía animal de Leonardo da Vinci. (B) Ilustración de esqueleto humano en *De humani corporis fabrica* (VESALIUS, 1543), aun con una visión un tanto artística de la anatomía.

de la realidad espacial que proyecta. En Anatomía, independientemente de lo que se represente, secciones en corte de los organismos (planas) o superficies curvas, los términos de planimetría y mapa suelen ser permutables, haciendo referencia a la representación de una realidad espacial anatómica de forma esquemática o simplificada y además mensurable.

2.1. Mapas de anatomía general o macroanatomía

2.1.1. Del dibujo artístico de la anatomía, al científico

La Anatomía surge como disciplina incipiente en occidente en el mundo helénico, a través de la descripción de las estructuras y de la disposición de las partes de los organismos. Sin embargo, es en el paso de la Edad Media a la Edad Moderna cuando ésta se establece como ciencia formal, extendiendo además su investigación a la relación entre las partes y la evolución de su morfología (TSAFRIR & OHRY, 2001). Fue el médico Andrés Vesalio (1514-1564) quien fundó las bases de la anatomía moderna, revolucionando la disciplina tal y como se la conocía. Es el autor de uno de los libros sobre anatomía (en este caso anatomía humana) más influyentes de la historia: *De humani corporis fabrica* (“Sobre la estructura del cuerpo humano”; VESALIUS, *Memorias R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 2ª ép., 14, 2017

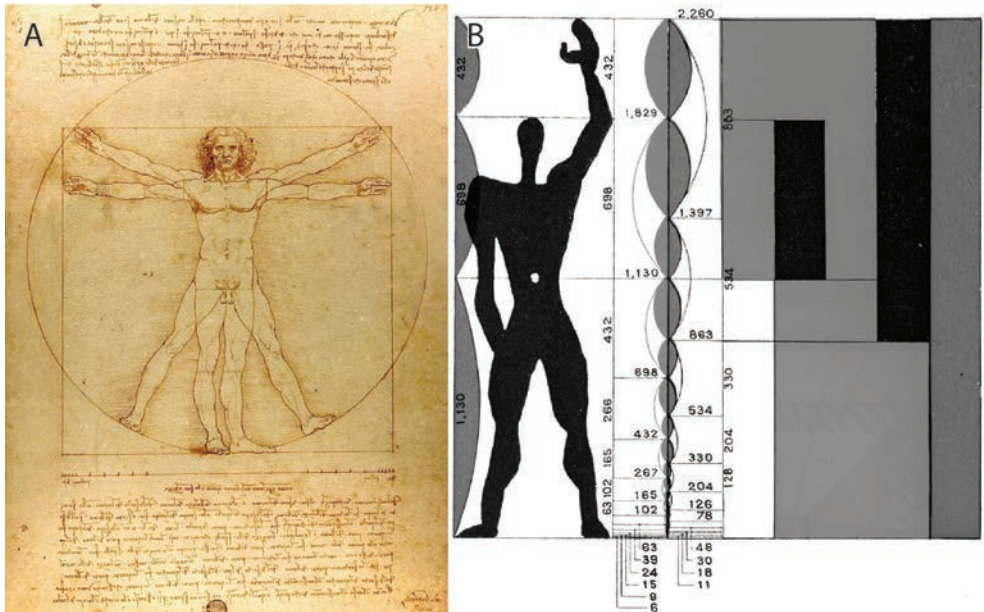


Figura 2. Cánones de proporciones y belleza. (A) *El hombre de Vitruvio*, Leonardo da Vinci (circa 1487; fotografía de Luc Viatour tomada de www.lucnix.be), que representa una visión ideal de las proporciones del cuerpo humano reflejando un concepto de belleza idílica en la organización anatómica humana. (B) El canon de proporciones conocido como el *Modulor*, de Le Corbusier (1887-1965), que representa una visión matemática, muy utilizada en arquitectura, de las medidas del ser humano respecto al número áureo (imagen tomada de CÁCERES, 2004).

1543; citado por TSAFRIR & OHRY, 2001) (Figura 1b). Con él se pasó de una anatomía puramente descriptiva de los seres vivos, a la observación y descripción profunda de la forma, la estructura de los organismos y de las partes que los componen, así como de los cambios que se producen en ellos a lo largo del tiempo a nivel del crecimiento del propio organismo (ontogenia) y de su especie (evolución).

Las primeras representaciones anatómicas hasta la llegada de los trabajos de Vesalio (y muchas de este mismo autor) eran más bien concepciones de tipo artístico (Figura 1a-b; TSAFRIR & OHRY, 2001). Los 'espacios en blanco' se rellenaban con las observaciones y deducciones que hacían los autores de la morfología los organismos, reflejando en muchos casos las creencias filosóficas y religiosas de la época. En este sentido, en el caso de los dibujos de anatomía humana, destaca el hecho de que generalmente las ilustraciones anatómicas reflejaban, no tanto la noción de sí mismos que tenían los seres humanos, sino la visión idealizada del cuerpo, esto es, los cánones de proporciones y belleza (Figura 2). Estos diseños muestran una parte de la historia de su época, la idea que de la naturaleza y de los seres vivos se tenía en el momento. Con el paso del tiempo, del método intuitivo y fenomenológico utilizado en los estudios anatómicos se pasa al empírico-analítico, propio de las ciencias naturales y sociales. Los estudiosos en Anatomía advierten entonces el interés de hacer disecciones (que, si bien se realizaban con anterioridad, se incrementa su prestigio tras la Edad Media), para conocer gracias a la observación directa los sistemas y órganos que componen el cuerpo humano y el de otros animales, así como conocer las relaciones de unas estructuras con otras. Comienzan en aquel momento a surgir diversas ramas de la Anatomía como la anatomía de superficie, la topográfica, la sis-

témica, la comparada, la del desarrollo, la funcional, etc. (MOORE *et al.*, 2010; DYCE *et al.*, 2012). Las dos mencionadas en primer lugar son las más relacionadas con la configuración morfológica y espacial de los organismos y las partes que los componen. Así, la anatomía de superficie estudia las estructuras de los organismos de forma no invasiva, únicamente visualizándolas; y la anatomía topográfica o regional estudia la organización del organismo en relación a las partes que lo componen, de forma invasiva directa o indirecta.

Con la aparición de esta anatomía, que podríamos denominar “postvesaliana” (más basada en el hecho empírico), el lenguaje simbólico de los mapas y la forma de transmisión de la información espacial anatómica se estandariza. Todos los mapas (geográficos, históricos, geológicos, etc.) transmiten los datos cartográficos a través de un lenguaje visual (imágenes y signos de diferentes colores y formas) y escrito (la leyenda, que permite la interpretación de la codificación de un mapa). Para que un mapa sea considerado como tal debe manifestarse en un estilo lingüístico estandarizado por convenio. Los mapas anatómicos, al igual que el resto, poseen un lenguaje de referencia específico.

Desde la antigüedad, los mapas geográficos se ilustran orientados hacia el norte (salvo excepciones de algunos mapas de la Edad Media, representados con otras orientaciones) (TOBLER, 1966). Del mismo modo, existe un concepto de planimetría anatómica y de lenguaje cartográfico anatómico estandarizado. Este estándar de referencia para la orientación de los organismos y de las partes que los componen se denomina la posición anatómica (MOORE *et al.*, 2010; DYCE *et al.*, 2012) (Figura 3a-b). A modo de ejemplo, en el caso concreto de los humanos (Figura 3b), la posición anatómica toma como referencia, igual que para otros vertebrados, el eje de la médula espinal (el neuro-eje) y consiste en un individuo de pie con la cabeza y la mirada hacia delante, los brazos y piernas extendidos, y con las palmas de las manos y los dedos de los pies hacia el frente (MOORE *et al.*, 2010). En otros animales (invertebrados y vertebrados en general), la posición anatómica depende del grupo taxonómico, la morfología y el tamaño de la especie, no existiendo siempre una definición precisa de la misma. En estos casos se habla de posición anatómica relativa y por ello, a la hora de realizar descripciones anatómicas es muy importante explicar bien los términos en los que se define la misma. De modo general, en estos casos se suele tomar como referencia la “posición de vida” del animal. Por ejemplo, en los vertebrados cuadrúpedos toma la referencia del neuro-eje, en la postura en la que el animal está enhiesto, detenido y con sus miembros extendidos (Figura 3a; DYCE *et al.*, 2012).

La referencia anatómica en todos los vertebrados establece tres ejes: el craneo-caudal (neuro-eje), de la cabeza al extremo opuesto (cola o pies, según la forma de locomoción), el latero-lateral, de un lado al otro del cuerpo del organismo, y el ventro-dorsal, de la zona estomacal a la espalda. Estos tres ejes componen cuatro planos: el frontal o coronal, el sagital o lateral, los transversos y los oblicuos (Figura 3a-b; MOORE *et al.*, 2010; DYCE *et al.*, 2012). Estas referencias para el dibujo de la posición anatómica y la descripción constituyen una “rosa de los vientos anatómica” que forma parte del lenguaje universal de los mapas anatómicos. La aparición de la posición anatómica como estándar de la representación marca el paso histórico del dibujo artístico de la anatomía, que refleja un conocimiento, aunque en ocasiones producto de la experimentación, basado principalmente en lo estético e influido por el corpus de creencias del dibujante, al puramente científico, que evita crear ambigüedades en la representación y permite además la cuantificación de los elementos y sus áreas.

Finalmente, como en el caso de los mapas geográficos, en su lenguaje estandarizado, los mapas anatómicos suelen contar también, por un lado, con una escala que muestre la correspondencia entre las medidas en la representación y sus correspondientes en la realidad, y por otro, con una leyenda que descodifique la simbo-

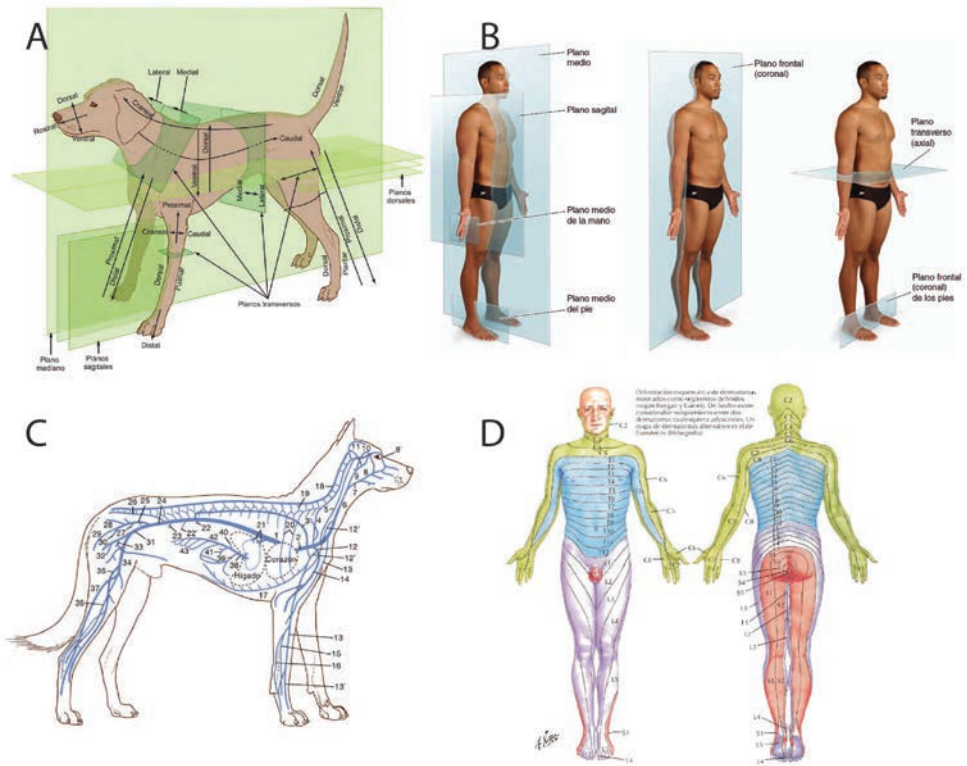


Figura 3. Ejemplos de planimetría anatómica y de lenguaje cartográfico anatómico estandarizado vertebrados cuadrúpedos y en humanos. (A) Planos, ejes y posición anatómica de referencia en perros (imagen tomada de DYCE *et al.*, 2012). (B) Planos, ejes y posición anatómica de referencia en humanos (imagen tomada de MOORE *et al.*, 2010). (C) Esquematación de los sistemas nervioso y circulatorio en perros (imagen tomada de DYCE *et al.*, 2012), en las que los trazos que representan los nervios y vasos sanguíneos están sobredimensionados. (D) Mapa de nervios cutáneos humanos por segmentos (imagen tomada de NETTER, 2007), en el que no se representan las inervaciones sino áreas de inervación.

logía utilizada para la transmisión de la información. La escala y la leyenda de los mapas anatómicos son sumamente importantes. Debido a la primera, dependiendo del tamaño (demasiado grandes o demasiado pequeños respecto a la medida de dicha escala), muchos elementos bien se representarán con trazos sobredimensionados (por ejemplo, el dibujo de los nervios respecto al sistema nervioso general de un organismo; Figura 3c) o, por el contrario, se representarán con trazos más simples; o bien no serán representados en él (por ejemplo, todas y cada una de las inervaciones en un tejido en el dibujo de un cuerpo; Figura 3d). La leyenda es la que aclararía el lenguaje gráfico que se utiliza en esa representación simbólica simplificada para la que la escala actúa como filtro.

2.1.2. Los mapas morfológicos de superficies

En el momento en que se estandariza el lenguaje de los mapas anatómicos se diversifican las posibilidades de investigación de la macroanatomía de los organismos. Se pasa de un estudio de los seres vivos a nivel individual, a un análisis que

integra a los organismos en conjunto (a nivel de especies y de poblaciones), es decir se empieza a adquirir un interés evolutivo y taxonómico en los estudios anatómicos. Entonces, en el siglo XVIII, una disciplina incipiente, la anatomía comparada, comienza a sentar las bases de la cartografía anatómica con perspectiva ontogenética y evolutiva. Esta disciplina es la encargada del estudio de las semejanzas y disimilitudes anatómicas de unos organismos con otros, para intentar establecer relaciones de parentesco entre ellos y para descifrar su historia de desarrollo (Ochoa & Barahona, 2009). En ella se realiza una cartografía anatómica de los organismos y sus estructuras, que establece los parecidos y diferencias entre unos y otros. Si bien las primeras aproximaciones a estudios de anatomía comparada fueron realizadas en el siglo XVIII, el apogeo de esta disciplina llega a comienzos del siglo XIX con el conocido debate que establecieron los naturalistas franceses Georges Cuvier (1769-1832) y Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844). Cuvier es considerado el fundador de la paleontología de vertebrados y un gran impulsor de la anatomía comparada gracias a su propuesta del principio de correlación de las partes, que explica cómo los diferentes elementos de los organismos están en relación unos con otros dentro de un ser vivo y no funcionan de manera aislada o independiente (Figura 4a; CUVIER, 1812). Por su parte, Saint-Hilaire, es conocido por sus teorías sobre la organización de los animales, como la teoría de los análogos, que enuncia la existencia de una correlación entre los elementos similares de todas las especies (Figura 4b; Saint-Hilaire, 1818). Si bien, tanto Cuvier como Saint-Hilaire estaban de acuerdo en la correlación de las partes de los organismos, sus argumentaciones divergían en la existencia de uno a varios planes corporales (GALERA, 2002; OCHOA & BARAHONA, 2009).

Una característica común de muchos de estos estudios realizados en el campo de la anatomía comparada, en los que se cartografían los organismos y sus partes, es que se trata de trabajos realizados con restos fósiles de huesos y dientes (Figura 4a-b). Este material procedente del registro paleontológico permite buscar la perspectiva evolutiva de la anatomía de los organismos vertebrados. Para estudiar los restos de organismos del pasado, ya sean arqueológicos o fósiles, hay que tener en cuenta los procesos postdeposicionales a los que han estado sometidos tras su muerte (FERNÁNDEZ LÓPEZ, 2000). Es posible recuperar los restos fósiles de tejidos blandos preservados y fosilizados con el paso del tiempo, pero lo habitual es encontrar sólo las partes formadas por tejidos biomineralizados, esto es: el esqueleto externo e interno, la dentición y las estructuras dérmicas mineralizadas (LYMAN, 1994). Estos pueden hallarse muy modificados por los procesos postdeposicionales, pero en ocasiones el resto fósil también puede mantener la morfología original, de modo que la anatomía y la estructura ósea se preservan (CHINSAMY, 2005), no sólo a nivel macroscópico, sino también a nivel microscópico, como se verá más adelante. De este modo, es habitual que los estudios en evolución de vertebrados se hayan centrado en los restos óseos y de la dentición, y es por esto que casi todos los estudios de mapeo de la anatomía comparada, que buscan un nexo evolutivo entre las especies, se realizaban con este tipo de materiales (Figura 4a-b).

Tiempo después del apogeo de la anatomía comparada, a principios del siglo XX, se desarrolla una nueva fase en el estudio de la forma orgánica, en la que resurge el interés por analizar la morfología de los seres vivos y sus procesos de crecimiento desde una perspectiva matemática. En estas investigaciones sobre el crecimiento y la forma de los organismos, se intenta aplicar, mediante ecuaciones teóricas y a través de la estadística, el mapeo de estructuras y la modelización. Un pionero de estos trabajos fue el biólogo y matemático inglés D'Arcy Wentworth Thompson (1860-1948). En su libro *On growth and form* ("Sobre el crecimiento y la forma"; THOMPSON, 2011), publicado por primera vez en 1917, abordó el estudio de la morfología de los organismos y sus procesos de desarrollo desde un punto de vista geométrico. Para realizar el mapeo de los seres vivos y sus estructuras se basó en el método de las

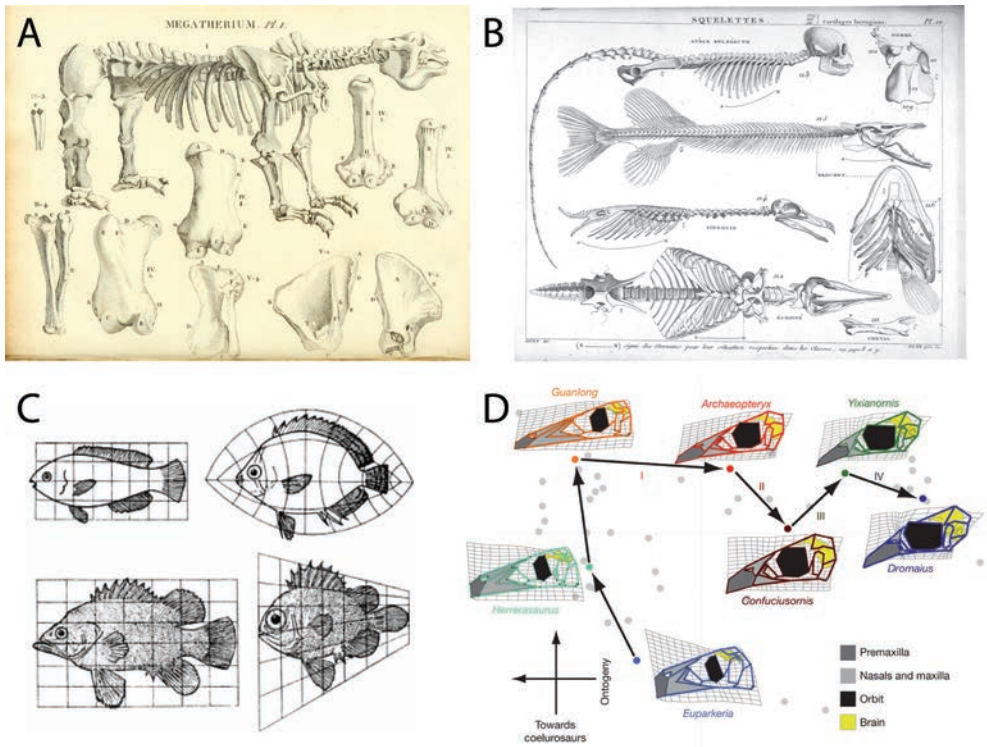


Figura 4. Recorrido histórico de los mapas morfológicos de superficie en macranatomía. (A) Ilustración de Georges Cuvier de un *Megatherium*, representando los puntos anatómicos de interés para la anatomía comparada (imagen tomada de *Recherches sur les ossemens fossiles de quadrupèdes*, CUVIER, 1812; digitalizada por *Smithsonian Libraries* y tomada de www.biodiversitylibrary.org). (B) Lámina de Étienne Geoffroy Saint-Hilaire mostrando la analogía entre los elementos anatómicos de varias especies (lámina de *Philosophie anatomique*, SAINT-HILAIRE, 1818; imagen tomada de www.biusante.parisdescartes.fr). (C) Sistema de mallas realizadas con sistema de coordenadas cartesianas de D’Arcy Wentworth Thompson, en la que se representa su idea de interpretar unas especies según las transformaciones morfológicas de otras (imagen modificada de THOMPSON, 2011). (D) Representaciones de morfometría geométrica que esquematizan la morfología y la filogenia de cráneos de aves y otros arcosaurios (imagen tomada de BHULLAR *et al.*, 2012).

coordenadas cartesianas empleado por los cartógrafos para transferir la información de la superficie esférica terrestre a un mapa (de un modo similar de utilización de estas coordenadas, por ejemplo, para la proyección del mapamundi de Mercator) (TOBLER, 1966). Su interés fue realizar esta cartografía anatómica para estudiar el cambio de la forma orgánica desde de la perspectiva del crecimiento de un organismo y a nivel evolutivo. En su trabajo establecía un sistema de coordenadas rectangulares (con ejes perpendiculares basados en X e Y) sobre el dibujo de un organismo, proponía una deformación de este sistema de coordenadas rectangulares (por ejemplo, alterando la dirección y la forma de la línea de los ejes) y analizaba la morfología de la forma orgánica resultante que estaba en el entramado de las líneas del nuevo sistema de coordenadas (Figura 4c). Para D’Arcy Thompson, la forma de los organismos se podía definir en términos de magnitud y dirección; y el crecimiento, se podía definir añadiendo a estos la dimensión del tiempo. De esta manera la morfología de los seres

vivos y su cambio a nivel de organismo y de especies podía mapearse y cuantificarse. Su objetivo era demostrar que formas diferentes, pero relacionadas, podían interpretarse y representarse como transformaciones las unas de las otras.

Las ideas de D'Arcy Thompson fueron muy innovadoras para su época y constituyeron el punto de partida teórico para el desarrollo de otra técnica (una de las más recientes) de cartografiado anatómico de superficie: la morfometría geométrica. Esta es una herramienta virtual para conocer las bases matemáticas (geométricas) de la forma orgánica, que se desarrolla a finales del siglo XX (BOOKSTEIN, 1997), gracias al progreso de la imagen virtual. Permite estudiar la forma de los organismos, en un espacio bi o tridimensional, mediante el uso de marcas o puntos considerados homólogos entre los diferentes organismos, y en los que la información sobre el tamaño, la posición y la orientación, son útiles para obtener el estudio de la forma en un contexto matemáticamente analizable. Estos puntos son interpretados de nuevo con un método cartográfico basado en las coordenadas cartesianas, como en el caso de los mapas morfológicos de D'Arcy Thompson (Figura 4c; THOMPSON, 2011). Partiendo de la identificación de estas marcas (llamadas en morfometría geométrica *landmarks*) o puntos singulares, la morfometría geométrica investiga las relaciones de cambio entre los espacios, no en términos de sus dimensiones, sino de la relación espacial entre sus partes (Figura 4d).

Hoy día la morfometría geométrica en su faceta de estudio tridimensional está en pleno auge, ya que abre perspectivas nuevas en el estudio de la evolución de la forma de los seres vivos. A modo de ejemplo, es una herramienta capaz de abordar problemas como el estudio de la transformación morfológica en estructuras tan complejas como la anatomía craneal y postcraneal de los arcosaurios (cocodrilos y aves; CHAMERO MACHO, 2011; BHULLAR *et al.*, 2012), o del cráneo y la caja torácica de los homínidos actuales y fósiles (BASTIR, 2004; GARCÍA-MARTÍNEZ, 2017).

2.1.3. Los mapas morfológicos del interior

El método tradicional para el estudio de la anatomía macroscópica (y microscópica) de los organismos se basaba en técnicas invasivas directas que permitían la observación de los sistemas y órganos que componen el cuerpo humano y de otros animales. Estas técnicas, muy útiles para la descripción y el mapeo de estructuras, eran la disección y el corte de secciones, y el posterior dibujo manual de los diferentes elementos (TSAFRIR & OHRY, 2001). Sin embargo, a finales del siglo XIX surge una técnica que revoluciona el estudio del interior de los organismos, permitiendo su estudio con estos aún vivos y de forma no invasiva, indirecta. Este punto de inflexión es el descubrimiento de los rayos X.

La primera radiografía de la historia de la que se tiene constancia fue tomada por Wilhelm Röntgen en 1896 (1845-1923; RÖNTGEN, 1896). Se trataba de la mano de su esposa. Esto marcó un antes y un después para los estudios de macroanatomía puesto que permitía acceder a las estructuras internas de los organismos por primera vez, sin necesidad de diseccionarlos, y plasmarlas directamente sobre imágenes proyectadas en dos dimensiones. Esta propiedad de mostrar el interior de los objetos sin destruirlos convierte a la radiología en una disciplina de gran utilidad para muchas ciencias, desde la medicina y veterinaria, hasta la zoología, la arqueología, la antropología y la paleontología. De hecho, desde sus inicios, debido a que se trata de una técnica no destructiva, es una herramienta muy útil para el estudio de materiales arqueológicos y fósiles. Un ejemplo de ello es la colección de láminas radiográficas de cráneos de homínidos procedentes del registro fósil titulada *Atlas of radiographs of early man* (SKINNER & SPERBER, 1982; citado por COQUEUGNIOT, 2017). La aplicación de la radiología al estudio de materiales bioarqueológicos y paleontológicos

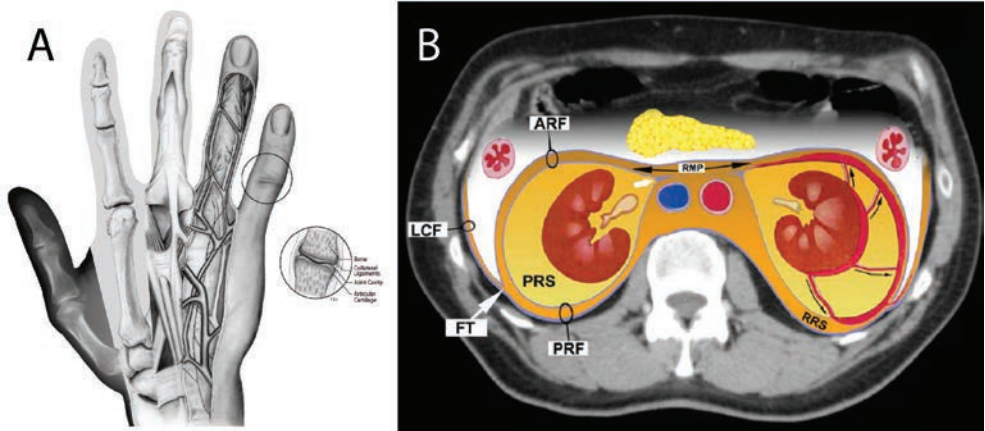


Figura 5. Mapas morfológicos del interior. Imágenes de técnicas basadas en rayos X. (A) Radiografía de una mano humana con varias reconstrucciones anatómicas de la estructura interna: unas realizadas sobre la propia imagen radiográfica (cartografía de los huesos en el dedo índice) y otras realizadas gracias a las técnicas de disección (cartografía de los cartílagos, vasos sanguíneos, nervios, músculos y piel, en los dedos corazón, anular y meñique) (imagen tomada de WHITE *et al.*, 2012). (B) Mapa de partes del sistema renal dibujado sobre una imagen del CT (imagen tomada de SCIALPI *et al.*, 2004).

se viene denominando en los últimos tiempos como paleoradiología (COQUEUGNIOT, 2017).

Sin embargo, la técnica de rayos X presenta límites para la visualización de las estructuras (HOUNSFIELD, 1980; COQUEUGNIOT, 2017). La primera limitación es que una radiografía muestra en dos dimensiones estructuras superpuestas de diferentes planos tridimensionales atravesados por los rayos X, es decir, que estas estructuras son proyectadas unas sobre otras, solapándose, en el paso de las tres a las dos dimensiones. La segunda es que, en el caso de los restos arqueológicos o fósiles, por estar rellenos en muchas ocasiones de los materiales del sedimento del que se extrajeron al excavar, las estructuras internas son poco visibles, especialmente si el sedimento tiene la misma densidad que el hueso arqueológico o fósil. A pesar de las limitaciones, la radiología clásica se sigue utilizando en numerosas disciplinas, incluidos los estudios anatómicos y patológicos, si bien en raras ocasiones se sigue empleando para el mapeo de estructuras anatómicas (Figura 5a). Los rayos X suponen un método de exploración transdisciplinar de los ‘espacios en blanco’ de la anatomía de los organismos vivos y fósiles.

En la segunda mitad del siglo XX, con la llegada de la revolución digital, se desarrolla una nueva técnica también basada en los rayos X que resuelve alguna de las restricciones de la radiología: esta es la tomografía computerizada o CT (HOUNSFIELD, 1980). Se trata de una herramienta que procesa por ordenador las imágenes de los rayos X por cortes o secciones virtuales paralelas. De este modo, se pasa de la proyección de varias imágenes bidimensionales solapadas (de varias secciones o cortes anatómicos), a la separación de cada uno de los planos de corte en varias imágenes bidimensionales separadas. El CT permite tomar varios planos radiográficos paralelos gracias a que se trata de una técnica asistida por ordenador, tomando las imágenes de rayos X desde diferentes secciones y ángulos radiográficos y siendo reconstruidas por operaciones informáticas. Se evita de este modo también el solapamiento en la imagen de materiales de diferentes o de la misma densidad. Además,

éstas pueden utilizarse para la reproducción en tres dimensiones de las estructuras anatómicas, lo que hace que su resolución se base no sólo en el pixel (*picture element*, unidad de imagen digital) como unidad de magnitud, sino también en el voxel (*volume element*, unidad de volumen digital) (COQUEUGNIOT, 2017).

Como en el caso de los rayos X, se trata de una técnica que resulta de gran utilidad para muchas ciencias, además de la medicina, como lo son la bioarqueología y la paleontología. El desarrollo de la radiografía y el CT cambia el concepto y la forma de construir los mapas anatómicos (Figura 5a-b). El dibujo de la planimetría anatómica gana precisión, además de permitirse el acceso a estructuras internas manteniendo la preservación de los especímenes vivos y fósiles originales. El progreso de estas técnicas conlleva a mejorar los análisis morfométricos, y la modelización de los procesos ontogenéticos y evolutivos.

2.2. Mapas de microanatomía

El estudio de la anatomía microscópica se desarrolla a comienzos de la Edad Moderna, a partir del auge y la proliferación de los estudios de macroanatomía desde un punto de vista más científico-analítico. El estudio de la microanatomía, sin embargo, posee un recorrido diferente a las investigaciones en anatomía macroscópica. En microanatomía se estudian los niveles de la organización biológica no observables a simple vista, como son el tejido, la célula y la molécula. De modo que su origen como disciplina está directamente ligado a la invención del microscopio y los primeros trabajos de exploración en histología (la disciplina científica encargada de estudiar los tejidos orgánicos, en relación a su estructura, su función y sus cambios con el desarrollo).

El microscopio fue inventado en 1590 por Zacharias Janssen (1585-1632; ULUÇ *et al.*, 2009). Poco después empezó a ser utilizado para la observación de las estructuras más pequeñas de los seres vivos y para la de los organismos imperceptibles a simple vista. Ejemplo de ello son los trabajos de Robert Hooke (1635-1703), con su obra *Micrographia* publicada en 1665 (HOOKE, 1665; citado por ULUÇ *et al.*, 2009), en la que aparecen por primera vez dibujos de plantas y animales y sus partes realizados a través de microscopía óptica; o los estudios de Marcello Malpighi (1628-1694), considerado el padre de la histología (ROMERO REVERÓN, 2011). La observación de los tejidos al microscopio se hace mediante el corte muy fino (del orden de la micra) de un tejido. Tras ello, este es situado en una lámina delgada transparente de un espesor que permita el paso de la luz. A través de la técnica de elaboración de láminas delgadas se pueden observar la estructura de los tejidos, la tipología de los mismos, su distribución y su organización. El desarrollo de esta herramienta fue fundamental tanto para la histología como disciplina, como para los estudios de anatomía comparada, que adquirieron una nueva perspectiva de exploración.

2.2.1. Métodos directos de mapeo

La histología se reveló desde sus inicios como una disciplina muy útil en el estudio de la historia del crecimiento y la evolución de las especies, desde un punto de vista actualista y también desde el histórico. Del mismo modo que la radiología se aplicó desde sus inicios al estudio de materiales arqueológicos y fósiles, denominándose paleoradiología, la histología aplicada al estudio de los restos del pasado se conoce como paleohistología (RICQLÈS, 2011). Es esta rama de la histología la que establece como una de sus bases principales, el mapeo y la cuantificación de las estructuras tisulares, para estudiar la microanatomía desde un punto de vista del desarrollo y la evolución de los organismos.

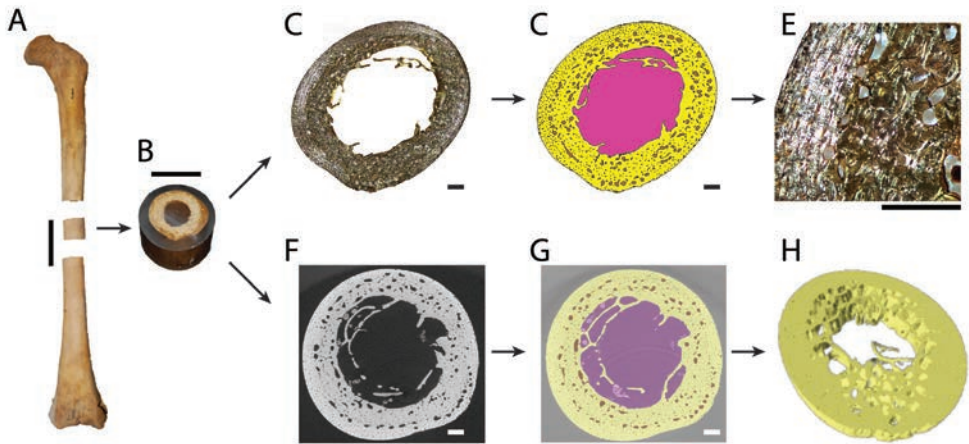


Figura 6. Estudio de un hueso (A-B) a nivel microscópico mediante mapas directos (lámina delgada, C-E) e indirectos (microtomografía, F-H). (A) Fémur humano infantil (de 2-3 años de edad aproximadamente) con un corte de dos cm en la sección media de la diáfisis (en el 50% del hueso) (escala = 5cm). (B) Sección del corte de la diáfisis embutida en resina para realizar las láminas delgadas de espesor micrométrico (escala = 2cm). (C) Montaje fotografías de la sección completa con el microscopio óptico de luz polarizada (escala = 1mm). (D) Mapa de las estructuras (compartimentos) del hueso realizada con herramientas de mapeo geográfico, en este caso ArcMap, de GIS (escala = 1mm). (E) Imagen detalle de la estratificación de los tejidos que se observan gracias a la microscopía óptica, lo que representa una ventaja en la observación respecto a los resultados obtenidos con microtomografía (escala = 1mm). (F) Imagen de un corte de alta resolución realizado con un escáner de microtomografía (μ CT) en una etapa previa al corte del hueso (A) en la que se observan las cavidades (compartimentos) del hueso (escala = 1mm). (G) Segmentación (mapa) de la imagen microtomográfica en la que se señalan las diferentes estructuras cartografiadas también para la lámina delgada (escala = 1mm). (H) Reconstrucción tridimensional de algunas de las capas de la imagen microtomográfica, lo que supone una ventaja respecto a la observación de estructuras en lámina delgada (siempre bidimensional). Imágenes modificadas de AUDIJE GIL (2015).

La paleohistología de vertebrados es una disciplina cuyo esbozo se origina en la primera mitad del siglo XIX, gracias a la observación de las primeras láminas delgadas de tejido óseo y dentario (AGASSIZ, 1833-1844; citado en CUBO & LAURIN, 2011), si bien antes, en el siglo XVII, se habían realizado observaciones con restos óseos de especies actuales (HAVERS, 1691, citado en FRANCILLON-VIEILLOT *et al.*, 1990). A pesar de que la paleohistología surge como disciplina a principios del siglo XX, se trata de una ciencia relativamente joven, cuyo desarrollo actual se ha visto muy favorecido, tras la revolución digital, por el uso de herramientas muy precisas para el procesamiento de las imágenes. Empieza alcanzar su máximo apogeo a partir de los años 80 del siglo XX, gracias a los trabajos de la que se podría denominar “escuela de París” (RICQLÈS, 2011), encabezada por investigadores como Armand de Ricqlès (n. 1938). En ella se reimpulsan los estudios pioneros del norteamericano Donald H. Enlow (1927-2014) en los años sesenta del siglo XX, y se establecen nuevas vías de colaboración con otros autores contemporáneos, como por ejemplo con el célebre paleontólogo John R. “Jack” Horner (n. 1946) (CUBO & LAURIN, 2011).

La paleohistología se centra principalmente en el estudio de los restos óseos y de otras partes biomineralizadas puesto que, como ya se explicó con anterioridad,

debido a los procesos postdeposicionales y del enterramiento, es poco frecuente encontrar los restos de tejidos blandos con el paso del tiempo. En el caso de los tejidos biomineralizados la ventaja es que el proceso de fosilización puede preservar en muchos casos no sólo la estructura macroscópica sino también la microanatomía ósea (CHINSAMY, 2005), de modo que puedan observarse las tipologías y la distribución de tejidos y los cambios en dicha microestructura que se hayan podido producir con el paso del tiempo.

Las estructuras de la microanatomía ósea no permanecen inalteradas a lo largo de la vida, sino que el hueso experimenta durante el crecimiento numerosos cambios en su tamaño, forma y organización histológica (FRANCILLON-VIEILLOT *et al.*, 1990). Por un lado, el hueso es un tejido que se deposita en un tiempo determinado a lo largo de la ontogenia, componiéndose una “estratigrafía” de dicha deposición que registra sus cambios en el tiempo y el espacio. Por otro lado, el análisis de la densidad vascular, la forma, el tamaño y la orientación de las células y demás factores de la microestructura del tejido, también permite inferir las causas de las diferencias de forma y talla a nivel intra e interespecies (RICQLÈS, 2011). En paleohistología esos cambios en el tiempo y las semejanzas y diferencias en la microestructura ósea son cartografiados mediante técnicas de mapeo propias del análisis geográfico, para así descifrar el “mensaje” que el hueso posee en forma de historia ontogenética y evolutiva (Figura 6a-e). De hecho, en algunos trabajos se construyen mapas de la microanatomía de los huesos con el uso directo de sistemas de información geográfica (e.g., CAMBRA-MOO *et al.*, 2012; 2015; GARCÍA-GIL *et al.*, 2016). La paleohistología se emplea especialmente en la actualidad en estudios multifactoriales sobre los mecanismos que intervienen en la evolución de vertebrados con la idea de que el tejido óseo contiene señales en relación a la filogenia, la función, la fisiología y el crecimiento. Se trata de la disciplina que cartografía la anatomía y sus modificaciones con el paso del tiempo, a nivel microscópico.

2.2.2. Métodos indirectos de mapeo

La paleohistología es una disciplina muy útil en el mapeo de estructuras a nivel tisular, pero su principal inconveniente radica en que se trata de una técnica destructiva. Como sucedió para las investigaciones de macroanatomía, la búsqueda de métodos que permitieran analizar el interior de las partes de los organismos mediante técnicas no destructivas llevó a investigar en el desarrollo de herramientas para el mapeo indirecto de las estructuras microanatómicas. Así, surgen las técnicas de mapeo microanatómico que, de nuevo, son herederas directas de la radiografía y la tomografía y, por lo tanto, basadas también en las propiedades de los rayos X.

El aumento de la precisión de la tomografía está relacionado con el aumento de la resolución de los escáneres, es decir, por el tamaño del pixel/voxel. Como la resolución de los escáneres CT es insuficiente para mapear las estructuras más pequeñas de los organismos vivos e inertes, se idea una nueva técnica que permite un aumento progresivo de la precisión, conocida como microtomografía. La microtomografía es ideada en los años 80 del siglo XX por Jim Elliot (COQUEUGNIOT, 2017). Permite utilizar el principio de la tomografía para explorar las estructuras microscópicas, con una resolución de imagen que puede ser incluso nanométrica. Se trata de una técnica que empieza a ser muy utilizada en arqueología y paleontología a comienzos del siglo XXI, gracias a sus posibilidades de estudiar a nivel microscópico los restos óseos y de la dentición de vertebrados del registro arqueológico y fósil, sin necesidad de alterarlos. La microtomografía permite, además, la reconstrucción de imágenes en 3D de las estructuras a nivel microscópico lo que supone un avance, no sólo en el estudio de estructuras internas, si no en la relación de unas microestructuras con otras (Figura 6f-h).

Éstas técnicas abren un nuevo camino de oportunidades para el conocimiento de la estructura interna y las cavidades (lo que se denomina compartimentalización) de los materiales actuales y fósiles, en disciplinas como la bioarqueología, paleontología y también, en otras ciencias de estudio de biomateriales porosos. Su principal interés es la conservación de los ejemplares, sin embargo, las técnicas de paleohistología clásica, aplicadas para el análisis de las microestructuras siguen reteniendo su interés (AUDIJE-GIL *et al.*, 2017). La microtomografía, a pesar de su alta resolución de imágenes, aun no permite, entre otras cosas, observar las tipologías de tejidos. Únicamente permite acceder y observar las cavidades microscópicas. El progresivo y extraordinario crecimiento del registro arqueológico y paleontológico de las últimas décadas, ha provocado que se haya relajado la restricción de aplicar las técnicas de carácter destructivo, lo que ha supuesto toda una revolución en el estudio de los restos preservados. Hoy en día es infrecuente encontrar trabajos de investigación sobre microanatomía que no cuenten con algún mapeo microestructural realizado con alguna de estas técnicas (paleohistología o cualquiera de las técnicas basadas en los rayos X). Desde un punto de vista metodológico, la microtomografía y la paleohistología, lejos de ser aproximaciones concurrentes en el estudio de los materiales porosos, son herramientas complementarias (Figura 6a-h).

3. CONSIDERACIONES FINALES

Un mapa es una forma de comunicación en la que el mensaje sobre la información espacial se transmite mediante un lenguaje visual y escrito. De ahí que el término trascienda su significado original, que posee una connotación casi exclusivamente geográfica, a tratarse de una representación gráfica y simbólica de cualquier realidad espacial de la que se tenga conocimiento planimétrico. El universo se puede mapear a todos los niveles, desde el macrocosmos al microcosmos. La anatomía, como ciencia morfológica, que estudia la estructura, la forma, la topografía, la disposición, el cambio en los organismos vivos y fósiles, y que, por lo tanto, posee un matiz de estudio espacial de los organismos, se ha cartografiado también históricamente a varios de sus niveles (del macroscópico al microscópico).

La historia de la ilustración anatómica ha estado directamente influida y ligada a los desarrollos históricos, sociales y tecnológicos de la humanidad. Cada nueva herramienta y técnica de cartografiado se ha erigido sobre la anterior: de la ilustración en los bocetos anatómicos clásicos, a la fotografía, la radiografía y la imagen digital. En el caso de los rayos X, por ejemplo, se observa claramente esta progresión, con el paso de la radiología, a la tomografía y de ésta a la aún más precisa microtomografía computerizada. Gracias a esta progresión la imagería basada en los rayos X, bidimensional y tridimensional, se ha vuelto imprescindible para el mapeo anatómico en numerosas disciplinas, como la zoología, antropología o la paleontología, puesto que permite visualizar el interior de los objetos a varios niveles, sin alterarlos.

A partir de la Edad Moderna, y especialmente a partir del siglo XX, se ha producido una conquista de los conocimientos sobre anatomía. De las primeras técnicas, en las que apenas se observaban meros “espacios en blanco” por explorar (de los que habla la cita de Joseph Conrad en del comienzo de este capítulo) a la innovación tecnológica y digital, que ha introducido una nueva dimensión en el concepto del modelo de mapeo anatómico. Es ineludible, que el perfeccionamiento de las técnicas de cartografiado clásico y moderno de la anatomía produzca rápidamente nuevos avances. La cartografía de los organismos se encuentra actualmente en una nueva época de “esplendor de la exploración”. De ahí que se haya alcanzado la realización del mapeo en la segunda y la tercera dimensión y, además, como se está comenzando a realizar en los últimos años, en una cuarta: el tiempo. Este último, es el caso de he-

ramientas como el ultrasonido y la ecografía 4D, que por el momento son técnicas aplicadas principalmente en medicina y veterinaria. En estas disciplinas, el estudio anatómico ha pasado del atlas clásico con información gráfica y descriptiva de la anatomía animal y humana, a dichos modelos tri y cuatridimensionales. Hoy en día, el estudio de la anatomía se ha convertido en un análisis muy versátil, utilizándose tanto las técnicas clásicas de investigación que siguen aportando información muy útil (e.g., estudios morfológicos clásicos de anatomía comparada, paleohistología), como las nuevas herramientas (e.g., morfometría geométrica, CT y microtomografía). De este modo, en el estudio anatómico confluyen lo tradicional, la renovación e innovación de metodologías, y el compromiso (o la promesa) de avances futuros.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto PEJ2014-A13668 del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (España).

BIBLIOGRAFÍA

- AGASSIZ, L. 1833-1843. *Recherches sur les poissons fossiles*. Imprimerie Petitpierre, Neuchâtel.
- AUDIJE GIL, J. 2015. Analyse de la microarchitecture du fémur humain en croissance normale et pathologique (cribra femoris): comparaison des apports de la paléohistologie classique et de la microtomodensitométrie. [Mémoire de Master 2 Sciences et Technologies, Mention Anthropologie biologique – Préhistoire, Spécialité: Anthropologie biologique]. Université de Bordeaux, Burdeos.
- AUDIJE-GIL, J., GARCÍA-GIL, O., CAMBRA-MOO, O., GONZÁLEZ-MARTÍN, A., RITTERMARD, C. & COQUEUGNIOT, H. 2017. Comparing the contributions of classical palaeohistology and μ CT: Strong and weak points of each technique. In: BARRIOS DE PEDRO, S., BLANCO MORENO, C., CELIS, A. DE, COLMENAR, J., CUESTA, E., GARCÍA-MARTÍNEZ, D., GASCÓ, F., JACINTO, A., MALAFAIA, E., MARTÍN JIMÉNEZ, M., MIGUEL CHAVES, C. DE, MOCHO, P., PAIS V., PARÁMO BLÁZQUEZ, A., PEREIRA, S., SERRANO MARTÍNEZ, A. & VIDAL, D., Eds. *A Glimpse of the Past. Abstract book of the XV Encuentro de Jóvenes Investigadores en Paleontología - XV Encontro de Jovens Investigadore em Paleontologia*, Lisboa.
- BASTIR, M. 2004. *Análisis de morfometría geométrica de la variación e integración morfológica en el cráneo humano y sus implicaciones para los homínidos de Atapuerca-SH y la evolución de los neandertales. Factores estructurales y sistémicos de la morfología del sistema cráneo-facial en homínidos*. [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.
- BHULLAR, B.A.S., MARUGÁN-LOBÓN, J., RACIMO, F., BEVER, G.S., ROWE, T.B., NORELL, M.A. & ABZHANOV, A. 2012. Birds have paedomorphic dinosaur skulls. *Nature*, **487**(7406): 223-226.
- BOOKSTEIN, F.L. 1997. *Morphometric tools for landmark data: Geometry and biology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- CÁCERES, R.D. 2004. La crisis del Modular, desde el Modular. *Massilia: anuario de estudios lecorbusieranos*, **3**(1): 171-183.
- CAMBRA-MOO, O., NACARINO, C., RODRÍGUEZ, M.Á., GARCÍA, O., RASCÓN, J., RELLO-VARONA, S., CAMPO, M. & GONZÁLEZ, A. 2012. Mapping human long bone compartmentalisation during ontogeny: A new methodological approach. *Journal of Structural Biology*, **178**(3): 338-349.
- CAMBRA-MOO, O., NACARINO-MENESES, C., DÍAZ-GÜEMES, I., ENCISO, S., GARCÍA, O., LLORENTE, L., RODRÍGUEZ, M.Á., AZA, A.H. DE & GONZÁLEZ, A. 2015. Multidisciplinary characterization of the long-bone cortex growth patterns through sheep's ontogeny. *Journal of Structural Biology*, **191**(1): 1-9.
- CHAMERO MACHO, B. 2011. *Patrones de modularidad en la evolución de arcosaurios: disparidad e integración morfológica en el post-cráneo de cocodrilos y aves*. [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.

- CHINSAMY, A. 2005. *The microstructure of dinosaur bone: deciphering biology with fine-scale techniques*. John Wiley y Sons, Baltimore.
- CONRAD, J. 1899. *El corazón de las tinieblas*, 21ª edición en español de 2005. Alianza Editorial, Madrid.
- COQUEUGNIOT, H. 2017. Paléo-i magerie par rayons X: une méthode d'exploration transdisciplinaire, de l'archéologie à la chirurgie. In: BALASSE, M. & DILLMANN, P., Eds. *Regards croisés: quand les sciences archéologiques rencontrent l'innovation*: 139-162. Archives contemporaines, Paris.
- CUBO, J. & LAURIN, M. 2011. Perspectives on vertebrate evolution: Topics and problems. *Comptes Rendus Palevol*, **10**(5): 285-292.
- CUVIER, G. 1812. *Recherches sur les ossements fossiles de quadrupèdes*. Deterville, Paris.
- DICCIONARIO ESENCIAL LATINO VOX. 2005. Mappa. Vox (Spes).
- DRAE. Mapa. *Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua* [en línea]. <http://dle.rae.es/?id=OJpDHMj> [Consulta: 09-05-2017].
- DYCE, K.M., SACK, W.O. & WENSING, C.J.G. 2012. *Anatomía veterinaria*, 4ª Edición. El Manual Moderno, México D. F.
- FERNÁNDEZ LÓPEZ, S.R. 2000. *Temas de tafonomía*. Departamento de Paleontología, Universidad Complutense de Madrid, Madrid
- FRANCILLON-VIEILLOT, H., BUFFRÉNIL, V. DE, CASTANET, J., GÉRAUDIE, J., MEUNIER, F.J., SIRE, J.Y., ZYLBERBERG, L. & DE RICQLÈS, A. 1990. Microstructure and mineralization of vertebrate skeletal tissues. Skeletal biomineralization: patterns, processes and evolutionary trends, 175-234.
- GALERA, A. 2002. Modelos evolutivos predarwinistas. *Arbor*, **172**(677): 1-16.
- GARCÍA, O., CAMBRA-MOO, O., AUDIJE-GIL, J., NACARINO-MENESES, C., RODRÍGUEZ, M.Á., RASCÓN, J. & GÓNZÁLEZ, A. 2016. Investigating histomorphological variations in human cranial bones through ontogeny. *Comptes Rendus Palevol*, **15**(5): 527-535.
- GARCÍA MARTÍNEZ, D. 2017. *Contributions to the study of the morphological, functional and evolutionary variability of the human thoracic skeleton*. [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.
- GRAY, H. 1918. *Anatomy of the Human Body, twentieth edition* [en línea]. Lea & Febiger, Philadelphia. <http://www.bartleby.com/107/> [Consulta: 09-05-2017]
- HAVERS, C. 1691. *Osteologia nova, or some new observations of the bones, and the parts belonging to them, with the manner of their accretion, and nutrition, communicated to the Royal Society in several Discourses*. Samuel Smith, London.
- HOOKE, R. 1972. *Micrographia*. Allestry, Londres.
- HOUNSFIELD, G.N. 1980. Computed medical imaging. *Medical physics*, **7**(4): 283-290.
- KEMP, M. 1998. Vincian velcro. *Nature*, **396**(6706): 25-25.
- LYMAN, R.L. 1994. *Vertebrate taphonomy*. Cambridge University Press, Cambridge.
- MOORE, K.L., DALLEY II, A.F. & AGUR, A.M.R. 2010. *Anatomía con orientación clínica*. Wolters Kluwer Health España, Barcelona.
- NETTER, F.H. 2007. *Atlas de Anatomía Humana*, 4ª Edición. Elsevier Doyma, Barcelona.
- OCHOA, C. & BARAHONA, A. 2009. El debate entre Cuvier y Geoffroy, y el origen de la homología y la analogía. *Ludus Vitalis*, **17**(32): 37-54.
- REAL ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA. 2012. *Diccionario de términos médicos*. Editorial Médica Panamericana, Madrid.
- RICQLÈS, A. 2011. Vertebrate palaeohistology: Past and future. *Comptes Rendus Palevol*, **10**(5): 509-515.
- ROMERO REVERÓN, R. 2011. Marcello Malpighi (1628-1694), founder of microanatomy. *Int. J. Morphol.*, **29**(2): 399-402.
- RÖNTGEN, W.C. 1896. On a new kind of rays. *Science*, 227-231.
- SAINT-HILAIRE, É.G. 1818. *Philosophie anatomique*. Rignoux, Paris.
- SCIALPI, M., SCAGLIONE, M., ANGELELLI, G., LUPATELLI, L., RESTA, M. C., RESTA, M. & RONTONDO, A. 2004. Emergencies in the retroperitoneum: assessment of spread of disease by helical CT. *European journal of Radiology*, **50**(1): 74-83.
- SKINNER, M.F. & SPERBER, G.H. 1982. *Atlas of radiographs of early man*. AR Liss, Nueva York.
- THOMPSON, D.W. 2011. *Sobre el crecimiento y la forma*. Ediciones Akal, Madrid.

- TOBLER, W.R. 1966. Medieval distortions: The projections of ancient maps. *Annals of the Association of American Geographers*, **56**(2): 351-360.
- TSAFRIR, J. & OHRY, A. 2001. Medical illustration: from caves to cyberspace. *Health Information & Libraries Journal*, **18**(2): 99-109.
- ULUÇ, K., KUJOTH, G.C. & BAŞKAYA, M.K. 2009. Operating microscopes: past, present, and future. *Neurosurgical focus*, **27**(3): E4.
- VESALIUS, A. 1543. *De humani corporis fabrica*. Ex officina Joannis Oporini, Basilea.
- WHITE, T.D., BLACK, M.T. & FOLKENS, P.A. 2012. *Human osteology*, third edition. Academic press, Oxford.

**NUEVAS
PERSPECTIVAS**

**NOVAS
PERSPECTIVAS**

