

BIOMECÁNICA COMPARATIVA DE LA ARTICULACIÓN SUBASTRAGALINA EN LOS PRIMATES. GENERALIDADES

Servicio C.O.T. Hospital Sagrat Cor. Barcelona
Unitat Antropologia Biologica.
Fac. Ciencias. U.A.B. Bellaterra

A. ISIDRO LLORENS

RESUMEN

El autor estudia los tres movimientos de la articulación subastragalina en los diversos tipos de primates, analizando su evolución en relación con los cambios anatómicos que se producen en el pie hasta llegar a la bipedestación estricta.

INTRODUCCIÓN

La aparición del Complejo Articular Subastragalino, como entidad morfo-dinámica definida, aparece durante el período evolutivo de los denominados Reptiles Mamíferoides Avanzados (Therápsidos/Cynodontos), línea evolutiva paralela y coetánea al gran desarrollo de los Dinosaurios, y que se sitúa en torno a los 250 millones de años (tránsito Pérmico-Triásico). Estos animales, entre otros cambios importantes, inician la remodelación del retropie o tarso proximal, con la aparición de la Tuberosidad Posterior del calcáneo y una lenta y progresiva recolocación del calcáneo por debajo

del talus. (Ej.: *Eozostrodon TR.8* y *Diademodon DMSW R.191*, ambos en el British Museum). (Lewis; 1983).

Doscientos millones de años más tarde, durante el período Eoceno, aparecen en la tierra los primeros primates de aspecto moderno, los Prosimios (con anterioridad existieron los Primates Arcaicos o Primatomorpha / fam. Plesiadapidae).

Los primeros primates continúan habitando al Nicho Arbóreo, pero sustituyen las garras por uñas, aumentando sus terminaciones táctiles y sus dermatogli-fos plantares y Abduciendo mucho su Hallux, convirtiendo así su Pie en prehensor (Grasping-foot). La importancia derivada de la capacidad abductora del hallux, revierte en cambios de todo el Primer Radio, desde la articulación Metatarso - Entocuneiforme hasta, y muy especialmente, la disposición tridimensional del Complejo Articular Subastragalino, cuyo eje de movimiento diverge considerablemente del eje mayor del pie en comparación con otros Mamíferos Arborícolas cuyo pie es no-prehensor.

El Tipo de Locomoción y el Peso de cada primate en particular dará lugar a una morfología y biomecánica singular (Isidro, 1994); así primates cuya locomoción se basa casi exclusivamente en el Salto (*Galágidos* y *Tarsídios*), circunstancia por la cual el retropie propulsor necesita un brazo de palanca muy largo, así como gran estabilidad (sólo flexo-extensión), mostrarán su capacidad de prehensión (eversión - inversión) en articulaciones distales a la Subastragalina, como las MedioTarsianas (Fig. 1).

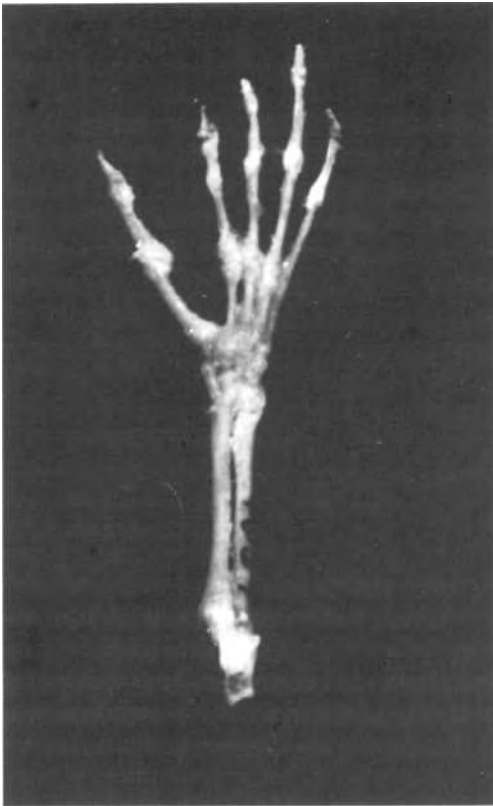


Fig. 1. *Pie de Galagoides demidovii, pequeño (70 gr.) prosimio saltador. Se observa el enorme desarrollo, en sentido sagital del Navicular y de la zona distal del Calcáneo. El Talus queda fuera de los movimientos de inversión-eversión los cuales tienen lugar en las articulaciones mediotarsianas.*

ANÁLISIS BIOMECÁNICO EN PRIMATES

La funcionalidad global de la Articulación Subastragalina (ASA.), es una de las más complejas en el conjunto articular de los Primates y por ende del Ser Humano.

Apriorísticamente, hemos de reseñar que en el Hombre, este complejo articular, cuya movilidad global es escasa en comparación con otras articulaciones, presenta variaciones individuales notables. (Inman, 1976).

La ASA., posee cierto grado de movilidad tanto si el pie está apoyado en el substrato como cuando no lo está.

La complejidad de los movimientos que tienen lugar en la ASA. precisan de varios Ejes de Movimiento, aunque ya desde mediados del siglo XIX (Henke; 1855, 1858 y 1863), se demostró que el movimiento conjugado global de la ASA. podía ser reducido a un eje único (Eje de Henke). Modernamente, y en aras de facilitar la comprensión de la biomecánica a través de la radiocinemática, ha sido definido un eje de movilidad único (**Discrete Axis**) (Van Langelaan, 1983), por el cual, parte de cada movimiento de los que componen el repertorio funcional de la STJ, puede ser efectuado.

Este Eje Único discurre, en el Hombre, de próximo-lateral a disto-medial, y a su vez de próximo-plantar a disto-dorsal. (Lewis, 1980 citando a Shepard, 1951; Rose, 1986).

La diferencia básica de este eje con respecto al de los demás primates se centra en la inclinación disto-dorsal, situación influida principalmente por la posición de la zona anterior o distal del calcáneo.

El principal movimiento conjugado que se puede efectuar a nivel del Eje Único es el movimiento de Inversión/Ever-

sión. Este movimiento que, en el hombre, presenta un arco articular corto, se incrementa notablemente en otros primates; siendo muy alto por ejemplo en *Ateles* y *Pan sp.* (Fig. 2), intermedio en *Nasalis sp.* y escaso, poco mayor que en hombre, en *Macaca sp.*, siendo este último cuadrúmano terrestre y poco arborícola. (Rose, 1986). Durante el desarrollo del principal movimiento se produce una listesis de un hueso de retropie sobre el otro (Viladot; 1979), desplazamiento talo-calcáneo, en un movimiento denominado de «screw / unscrew - like mov.» o movimiento de atornillado-desatornillado el cual, debido a la posición tridimensional que tiene la articulación posterior con respecto al Eje único, en el pie izquierdo el movimiento es de atornillado, mientras que en el izquierdo es de desatornillado. (Manter, 1941).



Fig. 2. Radiografía del pie y del tobillo en máxima flexión plantar de un ejemplar subadulto de *Pan troglodytes* (Chimpancé).

El movimiento complejo que tiene la ASA. como ha sido mencionado con anterioridad es el de Inversión/Eversión, que a su vez puede desglosarse en 3 movimientos separados, los cuales poseen su propio eje y plano:

- 1.- Supinación/Pronación: con el eje paralelo al eje mayor del pie.
- 2.- Flexión Plantar/Flexión Dorsal: con el eje perpendicular al eje mayor del pie.
- 3.- Adducción o Rotación Medial/Abducción o Rot. Lateral: con el eje dorso-plantar. Las rotaciones mediales y laterales se efectúan con el pie en el substrato.

Ningún movimiento de los citados previamente puede efectuarse por separado.

La interrelación de estos tres ejes de movimiento conjugado y su aplicación sobre el Eje único da como resultado una serie de situaciones anómalas, como lo demuestra el caso del movimiento de pronosupinación el cual puede sobrepasar al de dorsiflexión plantar a causa de la alineación espacial del Eje único que es más próximo-distal que medio-lateral; o la circunstancia que se presenta debido también a que el eje, a su vez, es más próximo-distal que dorso-plantar, el componente de pronosupinación puede exceder al de ADD/ABD.

Inman (Inman, 1976), calculó los movimientos conjugados de la ASA. humana obteniendo los siguientes resultados: por cada 10° de pronosupinación hay 9° de ADD/ABD y aproximadamente unos 3° de plantarflexión-dorsiflexión.

Por lo que respecta a los demás primates, es de gran importancia para la medición de los grados de movilidad conjugada la longitud en el plano sagital que presenta la articulación distal o anterior de la ASA.; en primates con la zona distal del calcáneo, situada por delante del punto más anterior de la faceta proximal

de la ASA. y que se encuentra en relación con la superficie de la articulación distal de la ASA., el Eje Único está alineado en una posición más próximo-distal que medio-lateral.

Dichas particularidades nos conducen a que efectuando mediciones basadas en esta nueva reorientación en diferentes primates se obtiene que cada 10.º de pronosupinación van acompañados por 2.º de plantarflexión/dorsiflexión en *Ateles sp.*, 5.º en *Macaca sp.*, 8.º en *Nasalis sp.*, y 10.º en *Gorilla sp.* (Fig. 3).



Fig. 3. Vista craneal de las articulaciones subastragalinas del calcáneo de *Gorilla gorilla* y de *Erythrocebus patas*.

En los distintos primates, el Eje Único de movimiento es capaz de variar por lo que respecta a su alineación, en diferente grado, durante la ejecución de un mismo movimiento. Estudios realizados en Primates Africanos, con la excepción de los *Cercopithecidos*, han permitido demostrar que, durante los grados extremos de la inversión, el eje está orientado más próximo-distal que el Eje Único, mientras que durante la eversión forzada lo está más medio-lateralmente, situación condicionante que durante los últimos

grados de la inversión predomine el componente supinador siendo mínimo el componente de flexión-plantar; por el contrario, durante la máxima eversión lo que predomina es la dorsi-flexión, siendo escaso el grado de pronación.

La ASA. posee también cierto componente de Traslación o Lístesis, movimiento que se efectúa durante el movimiento conjugado a través del Eje Único. El grado de traslación, medido como distancia recorrida entre 2 puntos en sentido lineal durante el movimiento de rotación, depende principalmente de la orientación de la articulación distal del calcáneo, tomando como referencia el Eje Único. Estos dos ejes, el Único y el de la articulación distal calcánea, forman un Ángulo de Declinación, que a medida que se acerca a los 90º, el componente de traslación se acerca a 0, o sea en circunstancia de perpendicularidad de ejes.

En el hombre cuando su pie está en contacto con el substrato, el movimiento de traslación del componente rotacional que efectúa el talus sobre el Calcáneo se dirige hacia disto-medial durante la eversión y hacia próximo-lateral durante la inversión. Por lo que a los primates respecta, el grado de traslación, variable como hemos dicho debido al ángulo de declinación, es máximo en *Ateles sp.*, intermedio en los miembros de familia *Cercopithecidae* y mínimo en la familia *Colobinae*. Los movimientos conjugados de rotación y traslación, permiten que a través de un movimiento helicoidal el *Caput tali* se impacte en el Acetabulum pedis, región anatómica formada por, la carilla articular proximal del navicular para el talus y el complejo ligamentoso formado por el ligamento calcáneo-navicular plantar/spring-ligament, en situación de tensado. (Lewis, 1980 citando a McConail, 1945). (Fig. 4).

En el Ser Humano el componente de traslación que presenta la ASA., se da

únicamente en el 50% de los casos y durante los grados extremos de Inversión/Eversión. (Inman, 1976). El que podríamos denominar subcomponente de traslación dentro del movimiento global de la STJ, lleva inherente otro concepto biomecánico: la Direccionalidad, que acontece únicamente cuando hay contacto con un substrato.

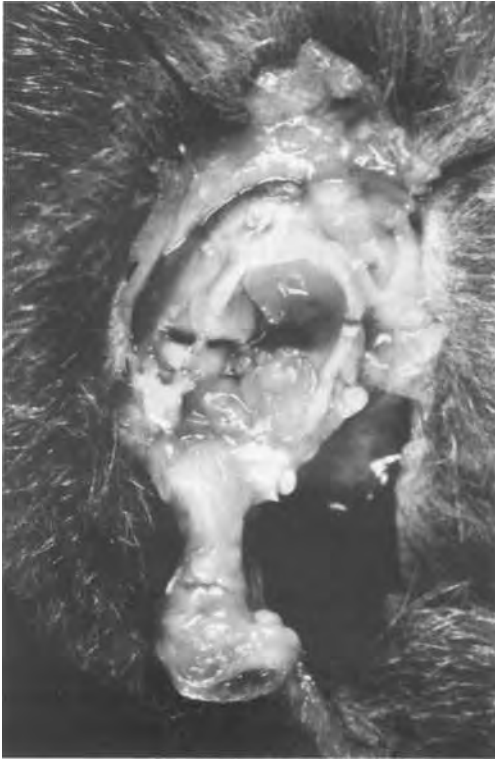


Fig. 4. Preparación anatómica del Acetabulum pedis una vez enucleado el talus, perteneciente a *Crytoprocta ferox*, pequeño carnívoro de la Isla de Madagascar. Obsérvese la continuidad de la articulación sustentacular del calcáneo con el ligamento calcáneo-navicular plantar, determinando una concavidad donde se impacta el caput tali.

Tomando como punto de referencia el caput tali y debido a la gran oblicuidad dorso-plantar del Eje único, en el Hombre y en algunos primates superiores africanos, durante la inversión del pie

se detecta un componente de rotacionalidad lateral y medial. Factor que interviene en el no-avance del caput tali, en el grado que cabría esperar (a causa de la superposición de la rotación medial). Por otra parte el componente medial de la traslación durante la eversión está ampliado. Este no-esperado factor biomecánico, en los primates, es mínimo en la familia *Atelidae* y *Cercopithecinae*, medio en *Colobinae*, siendo máximo en el hombre.

El grado de contacto articular a través de cualquier movimiento conjugado de la ASA. lo podemos definir como Congruencia Articular. Durante el movimiento principal conjugado de eversión/inversión, la zona de contacto articular varía siendo máximo durante la inversión para *Ateles sp.*, y mínimo durante la eversión; a causa de la menor perpendicularidad entre el Eje único y el eje mayor de la articulación proximal del calcáneo. El caso contrario pasaría en *Gorilla sp.* cuyo ángulo se acerca a los 90°.

BIOMECÁNICA EN HOMÍNIDOS

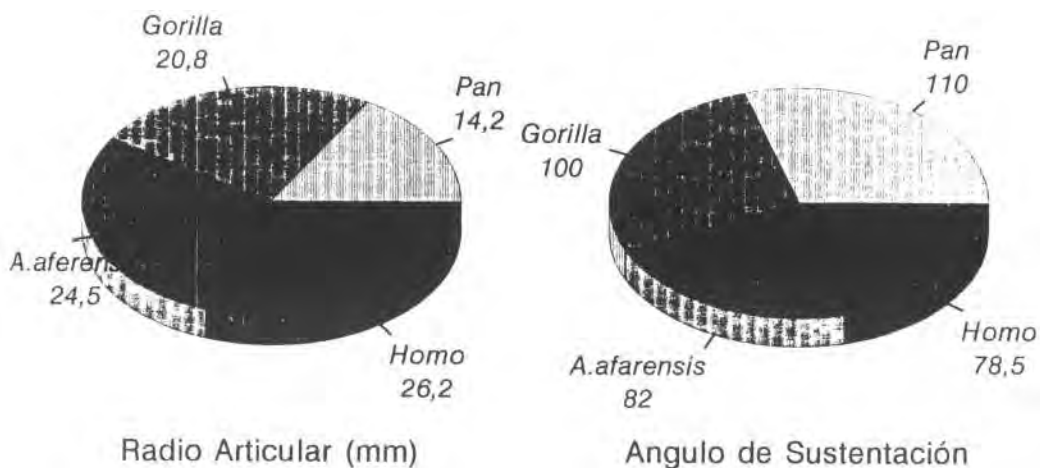
En un estudio efectuado con el objetivo de catalogar las implicaciones que para la evolución de la bipedestación, aparecen en el Calcáneo de *Australopithecus afarensis* (Latimer, B. & Lovejoy, C. O.; 1989), a través de obtenciones biométricas y analizando posteriormente su significado funcional, se llega a la conclusión de que la articulación proximal del calcáneo presenta una Convexidad, la cual es extrapolable a una sección de cilindro (o de cono, según los casos), en la cual es posible determinar su radio.

Después de múltiples análisis, el radio medio resultó ser en *Homo sapiens* de 26.2 mm. (DS: 3.2); en *Pan* es de 14.2 mm. (DS: 3.1); en *Gorilla* es de 20.8 mm. (DS: 3.3), siendo de 24.5 mm. en 2 indi-

viduos de *A. afarensis* (AL.333.8 y AL.333.55). Observándose claramente la relación entre el radio de la articulación proximal del calcáneo de *A. afarensis* con el del hombre.

También se determina el llamado Ángulo de Sustentación para la misma superficie articular que en *A. afarensis* (AL.333.8) es de 82°, en el hombre moderno 78.5° (DS. 10°), 100° (DS. 8.2°) para *Gorilla* y 10° (DS. 9.3°) para *Pan*. (Tabla 1).

La reducción de la convexidad (ángulo de sustentación bajo + radio del cilindro alto), tanto en el hombre como en *A. afarensis*, presentes en la articulación proximal del calcáneo, son consideradas como soluciones adaptativas a una restringida direccionalidad de las fuerzas que pueden actuar sobre la superficie articular. Esta menor curvatura reduce de una parte el stress articular y por otra el arco articular.



Mod. Latimer & Lovejoy 1989

Tabla 1. Diferencias biométricas de la Articulación Proximal del Calcáneo entre Póngidos, *Australopithecus afarensis* y *Homo sapiens*.

La reducción de la movilidad de la ASA. se debe principalmente a 2 factores:

- 1.- Incremento de Peso.
- 2.- Bipedestación y Bipodalidad.

La combinación de, por una parte un aumento en las solicitaciones mecánicas derivadas del mayor peso y de una práctica habitual de bipedestación, unida a una relativa avascularidad del cartílago articular, proscriben aquello que sería otra solución

alternativa a este conflicto anatómico-biomecánico como sería el incremento de espesor del cartílago, circunstancia abocada al fracaso por falta de riego sanguíneo debida a la deficiente imbibición. (Latimer, B. & Lovejoy, C. O., 1989).

La diferencia entre la convexidad de *Homo* y *A. afarensis* puede ser debida a 3 principales factores:

- 1.- Menor peso en *A. afarensis* (de 28/30 kg. en «Lucy»).

2.- Cierta grado de capacidad arborícola.

3.- Coexistencia de un Genu Flexo durante esta bipedestación primitiva, circunstancia que disiparía en cierto grado la absorción de energía por parte de los elementos del retropie durante la fase talograda de la marcha, convirtiéndose así en un mecanismo de protección. Para algunos autores (**Latimer, B. & Lovejoy, C. O.; 1989**), la presencia en el calcáneo de *A. afarensis*, del Proceso Latero Plantar conjugado con la reducción de la convexidad de la superficie articular de la faceta proximal o posterior, constituirían inequívocas modificaciones cuyo objeto sería proteger superficies cartilaginosas articulares durante un «período de transición» en lo que a la locomoción respecta y cuyo punto final sería la consecución de la bipedestación estricta.

Estos cambios estructurales del retropie han debido producirse durante el suficiente número de generaciones como para permitir su incorporación al genotipo correspondiente.

BIBLIOGRAFIA

(1) HENKE, W.: *Die Bewegungen des Fusztes am Sprungbein*, Zschr. f rat Med, Neue Folge 7: 225-234, 1855.

(2) HENKE, W.: *Die Controversen fiber die Fuszgelenke*. Zschr. f rat Med, Reihe 2: 163-172, 1858.

(3) HENKE, W.: *Handbuch der Anatomie and Mechanik der Gelenke*. Leipzig: CF Winter, 1863.

(4) INMAN, V. T.: *The Joints of the*

Ankle. Baltimore: Williams & Wilkins Ed., 1976.

(5) ISIDRO-LLORENS, A.: *Anatomía y Biomecánica Comparada de la Articulación Subastragalina en Primates Extintos y Actuales*. Tesis Doc. U. Autónoma Barcelona, 1994.

(6) LATIMER, B. & LOVEJOY, C. O.: *The Calcaneus of Australopithecus afarensis and Its Implications for the Evolution of Bipedality*. Am. J. Phys. Anthrop. 78: 369-386, 1989.

(7) LEWIS, O. J.: *The Joints of the Evolving Foot. Part I: The Ankle Joint*. J. Anat. 130: 527-543, 1980.

(8) LEWIS, O. J.: *The Evolutionary Emergence and Refinement of the Mammalian Pattern of Foot Architecture*. J. Anat. 137: 21-45, 1983.

(9) MANTER, J. T.: *Movements of the Subtalar and Transverse Talar Joints*. Anat. Record. 80: 397-410, 1941.

(10) MCCONAIL, M. A.: *The Postural Mechanism of the Human Foot*. Proc. Royal Irish Acad. 50: 265-278, 1945.

(11) ROSE, M. D.: *Further Hominoid Postcranial Specimens from Late Miocene Nagri Formation of Pakistan*. J. Human Evol. 15:333-367, 1986.

(12) SHEPARD, E.: *Tarsal Movements*. J. Bone & Joint Surg. 33B: 258-263, 1951.

(13) VAN LANGELAAN, E. J.: *A Kinematical analysis of the Tarsal Joints. An X-ray/photogrammetric study*. Acta Orthop. Scand. 54. suppl. 1-129, 1983.

(14) VILADOT, A.: *Diez Lecciones sobre Patología del Pie*. Barcelona: Toray Ed., 1979.