

# CALCÁNEO Y BIPEDESTACIÓN

UNIDAD DE NEURORTOPEDIA  
INSTITUT GUTTMANN/BCN  
INSTITUT DE PALEONTOLOGIA  
«M. CRUSAFONT»  
SABADELL

Autor: Dr. A. ISIDRO  
Dirección: Prof. A. VILADOT

## RESUMEN

*La Bipedestación apareció hace más de 3.5 M. a (Australopit afarensis). De las adaptaciones morfomecánicas derivadas de este cambio de locomoción y de postura destacaremos las del Calcáneo. Se analizan biométricamente 62 calcáneos de primates y homínidos y, los resultados, son comparados a los obtenidos por diversos autores.*

*Se subdivide el trabajo en 2 partes; en la 1ª se valoran los calcáneos de Primates no-antropomorfos, llegándose a la conclusión que los más parecidos a Homo, pertenecen a los Trepadores.*

*En una 2ª parte se analizan los pertenecientes a Póngidos y Homínidos, en los cuales se aprecian los estigmas adaptativos que derivarían de la consecución de la Bipedestación como son, el crecimiento de la zona posterior, a partir del incremento de la Tuberosidad Posterior y de la Sección Mínima Coronal, el crecimiento de la zona*

*media y la desaparición de la Troclea Peroneal, junto a la remodelación del complejo articular subastragalino, y la recesión de la zona anterior*

**Palabras Clave:** CALCÁNEO, BIPEDESTACIÓN, EVOLUCIÓN

## INTRODUCCIÓN

El Calcáneo es probablemente el elemento óseo de nuestro esquema anatómico cuyas modificaciones adaptativas más influyeron en la consecución de la *Bipedestación* como tipo de locomoción y la *Bipodalidad* como postura estática.

*«The calcaneous is the morphological kernel of the Foot»*

WEIDENREICH, 1923

NOTA: Este trabajo ganó el Premio Ciba-Geigy otorgado en el Congreso de la A. E. M. C. P. celebrado en Córdoba (abril 1992).

A partir de los primeros estudios de anatomía comparada (Weindenreich, 1923; Morton, 1926) diversos autores han continuado estudiando comparativamente los componentes del pie, clarificando paso a paso el significado morfo-mecánico de las adaptaciones puntuales, en cada uno de los elementos del pie.

(Christie & Ridley, 1989; Aiello, 1988; Lamy, 1986, Langdon, 1985, Latimer & Johanson & Lovejoy & Coppens; 1982, Prost, 1980, Viladot, 1970). Otros autores han ido más lejos intentando correlacionar cierto tipo de patología presente en el pie, con caracteres de falta de adaptación evolutiva. (Olson & Siedel, 1983).

Por lo que respecta al estudio del Retropié y en especial del Calcáneo, algunos estudios han aparecido en la literatura, principalmente tras la aparición de los restos de Homínidos Primitivos de África Austral y Oriental: Hadar, Middle Awash, Omo Koobi Fora, Kanopi, Lothagam, Baringo, Penini, Laetoli, Olduwai; todos ellos yacimientos de la Fosa del Rif y que corresponden a *Australopithecus*, *Homo Habilis* y *Homo Erectus*; y también los yacimientos de África del Sur como Makapansgat, Kromndaa, Swartrans, Sterkfontein, Taung, etc. (Gebo & Simons, 1987; Gebo, 1989; Lamy, 1986; Langdon, 1985; Latimer & Ohman & Lovejoy, 1987; Latimer & Lovejoy, 1989; Mchenry, 1986; Stern & Susman, 1983; Szalay & Langdon, 1986; White & Suwa, 1987).

El objetivo de este estudio es correlacionar datos morfológicos y biomecánicos de diversos calcáneos, tanto de primates actuales y extintos, como de Homínidos para dar una idea global de las modificaciones que aparecieron tras la consecución de la Bipedestación, dando a cada una de ellas el máximo de significado biomecánico.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se han analizado biométricamente un total de 62 Calcáneos de los cuales 55 pertenecen a Primates actuales (ver tabla nº 1) pertenecientes todos ellos a la Osteoteca del Parque Zoológico de Barcelona, siendo el resto moldes de Primates fósiles y Homínidos pertenecientes al Institut de Paleontología «M. Crusafont» de Sabadell/BCN y al Musée de l'homme de Paris.

**TABLA Nº 1**  
**Listado de Calcáneos**

GENERO y ESPECIE	FAMILIA	NÚMERO
<i>Alouatta palliata</i>	Atelidae	1
<i>Ateles Ater</i>	"	2
<i>Pan troglodites</i>	Pongidae	1
<i>Gorilla gorilla</i>	"	4
<i>Pongo Pigmaeus</i>	"	3
<i>Macaca silvanus</i>	Cercopithecidae	1
<i>Lemur fulvus mayottensis</i>	Lemuridae	2
<i>Cercopithecus diana roloway</i>	Cercopithecidae	1
<i>Cercopithecus nictinans</i>	"	1
<i>Erythrocebus patas</i>	"	6
<i>Galago crassicaudatus</i>	Galagidae	1
<i>Cercopithecus aethiops tantalus</i>	Cercopithecidae	1
<i>Periodotiticus potto</i>	Lorisidae	1
<i>Macaca fascicularis</i>	Cercopithecidae	1
<i>Cercopithecus petaurista</i>	"	1
<i>Cercopithecus ascanius</i>	"	1
<i>Lagothrix lagothrix</i>	Atelidae	1
<i>Cercocebus atys lunatus</i>	Cercopithecidae	1
<i>Cebus albifrons</i>	Cebidae	2
<i>Saimiri sciureus</i>	"	1
<i>Galago Senegalensis</i>	Galagidae	1
<i>Miopithecus talapoin</i>	Cercopithecidae	1
<i>Cercopithecus cephus</i>	"	1
<i>Mandrillus sphenx</i>	"	5
<i>Cebus apella</i>	Cebidae	4
<i>Hylobates lar</i>	Hylobatidae	2
<i>Cercopithecus spp</i>	Cercopithecidae	1
<i>Papio hamadyas</i>	"	4
<i>Cebus capucinus</i>	Cebidae	1
<i>Papio anubis</i>	Cercopithecidae	1

Origen: Osteoteca Parque Zoológico/BCN

Los resultados se obtienen tras mediciones de:

1. Longitudes absolutas y relativas de la Zona Anterior; Zona Media y Zona Posterior del Calcáneo.

2. Volumen de la Tuberosidad Posterior de Calcáneo (sólo en Póngidos adultos macho).

3. Sección Mínima Coronal en calcáneos de Póngidos. Realizado bajo cortes de T. A. C.

4. Radio de la Articulación Posterior Subastragalina (sólo en Póngidos). Dato aproximado obtenido mediante Cámara Clara, al carecer en la actualidad de un Analizador de Imágenes (Próximamente en el Dpt. de Vertebrados de la Facultad de Biología de U. C. B.

5. Ángulo de Sustentación Articular Posterior. (Sólo en Póngidos). Obtenido mediante cálculo goniométrico tras Radiología Convencional.

Asimismo se constatan Estigmas Tipo, definitorios o característicos del tipo de locomoción, en Primates no-anthropoides y, la presencia o no de modificaciones derivadas de la Bipedestación.

1. Presencia y Tamaño Relativo del Proceso Latero Plantar en relación con el Proceso Latero Medial.

2. Presencia y Tamaño de Tróclea Peroneal.

3. Amplitud Relativa del Sustentáculum Tali.

Todos los datos son cotejados con los obtenidos por los diversos autores anteriormente citados.

## RESULTADOS

Debemos diferenciar en este trabajo:

A: el estudio de las características presentes en los Calcáneos de Primates no-anthropoides en los cuales (basándonos en los estudios realizados por Szalay & Langdon, 1986 durante su excelente trabajo de paleo-anatomía comparada efectuado con motivo de la revisión del pie de *Oreopithecus bambolii*; y principalmente de Gebo, 1989); se desprende la correlación entre los caracteres del Calcáneo y el tipo predominante de Locomoción; ya que de uno de ellos deriva con toda probabilidad la bipedestación.

En este capítulo se efectúa el estudio biométrico de las Longitudes Relativas de las 3 zonas, ant. media y posterior, en que dividimos al Calcáneo. Se obvian los resultados numéricos y se centra el resultado en las características generales que, según el tipo predominante de locomoción, presenta el Calcáneo (ver tabla n° 2 y figura n° 1).

**TABLA N° 2**

**Características del Calcáneo (según tipo de locomoción)**

LEAPER	CLIMBER	QUADRUM.
LARGO	CORTO	MEDIO
Z.ANT +++	Z.ANT +	Z.ANT +
	Z. MED ++ (wide sust. tali)	
NO HEEL	POSTERIOR HEEL	NO HEEL
<i>Alouatta palliata</i>	<i>Hylobates klossi</i>	<i>Cercopithecus tal.</i>
0.34 / 0.33 / 0.33	0.19 / 0.43 / 0.38	0.29/0.27/0.44

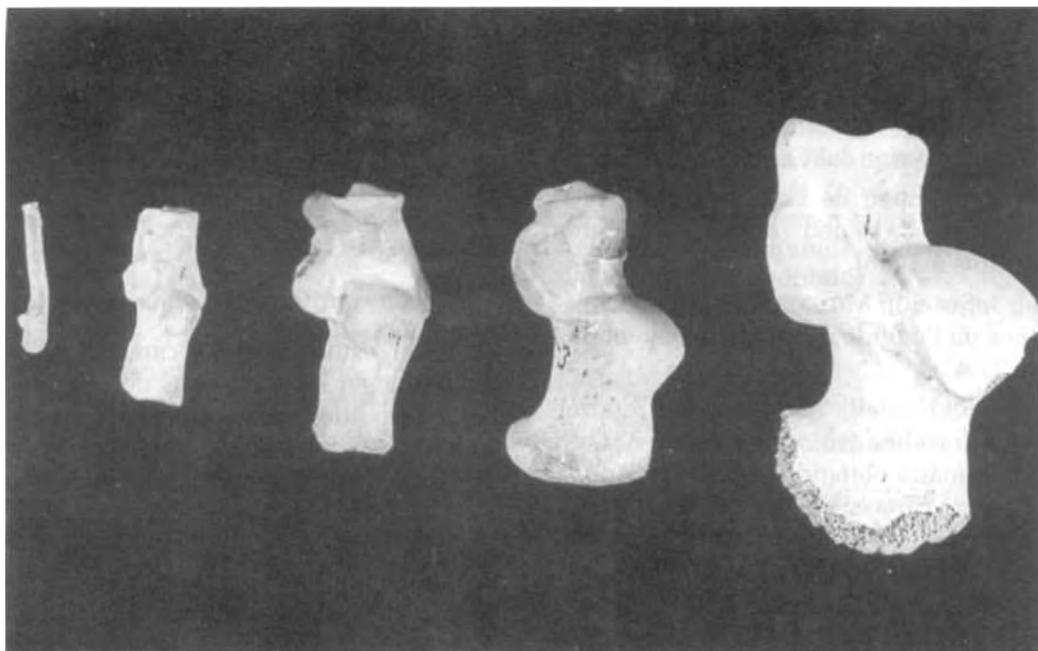


Fig.1. Imagen de la norma craneal de 4 calcáneos derechos y uno izdo., y que pertenecen de izquierda a derecha y de menor a mayor tamaño a *Galago senegalensis* (izdo.); *Erythrocebus patas*; *Mandrillus sphenx*; *Pongo pigmaeus*; *Gorilla gorilla*.

El número de Articulaciones Subastragalinas (ASA) es de 4 en cuatro de los calcáneos, y 3 en *Galago s.* Estas ASA. quedan claramente diferenciadas en *Erythrocebus* y *Mandrillus*, no siendo así en *Pongo* y *Gorilla*.

El Ángulo de Sustentación o grado de perpendicularidad de la ASA. postero-externa, es alto en *Gorilla g.* y *Pongo p.* (similar al de *Homo*), siendo más vertical en *Erythrocebus* y *Mandrillus*.

Como parámetro paralelo destacable citaremos la longitud relativa de la Tuberosidad Posterior, corta en el Póngido, extremadamente corta en el Prosomio y larga en los Cercopithecidos. Por el contrario se observa muy evidente el larguísimo cuerpo anterior de *Galago s.*, siendo evidente en *Erythrocebus p.*

*Ejemplares pertenecientes a la Osteoteca del Parque Zoológico de Barcelona.*

**B:** El estudio de los Calcáneos pertenecientes a Póngidos y Homínidos se basan en los trabajos de Latimer & Lovejoy, 1989, realizados con ocasión del exhaustivo estudio de los Calcáneos de *Australopithecus afarensis*, pertenecientes a las campañas de 1974 hasta el 1977 de la Formación Hadar en Etiopía.

De los resultados obtenidos en laboratorio y de su posterior correlación con los resultados de estos trabajos anteriormente citados, citaremos como Características Clave definitorias de un Calcáneo bípedo o con tendencia a ello:

1. Incremento de Volumen de la Tuberosidad Posterior.

El importante incremento del volumen de la zona tuberositaria posterior, definida como aquella zona situada por detrás de la carilla articular posterior, es un parámetro que está en relación directa con el Grado de Bipedestación que realiza el primate (ver tabla nº - 3 y figura nº 2).

Se desprende que, a pesar de su enorme corpulencia el Gorila macho adulto de 165 kg de peso, posee tan sólo un Volumen de la Tuberosidad Posterior de 27.3 cc (26.5 cc dato del autor), el cual contrasta con el de *Australopithecus afarensis* (AL. 333.55) que, con un peso en torno a los 35 kg, presenta un volumen de 29.8 cc.

**TABLA III**  
**Tuberosidad post/volumen cc**

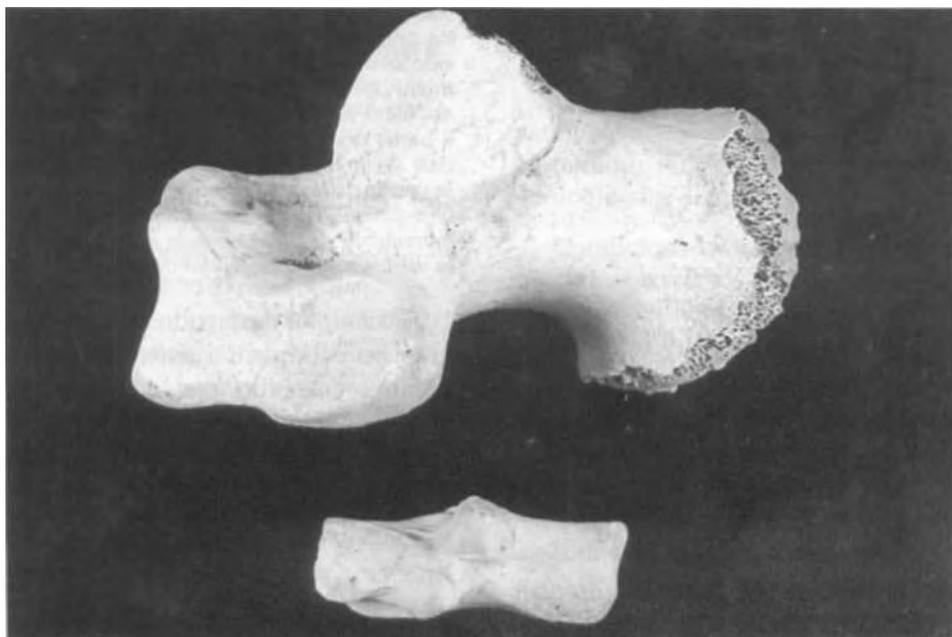
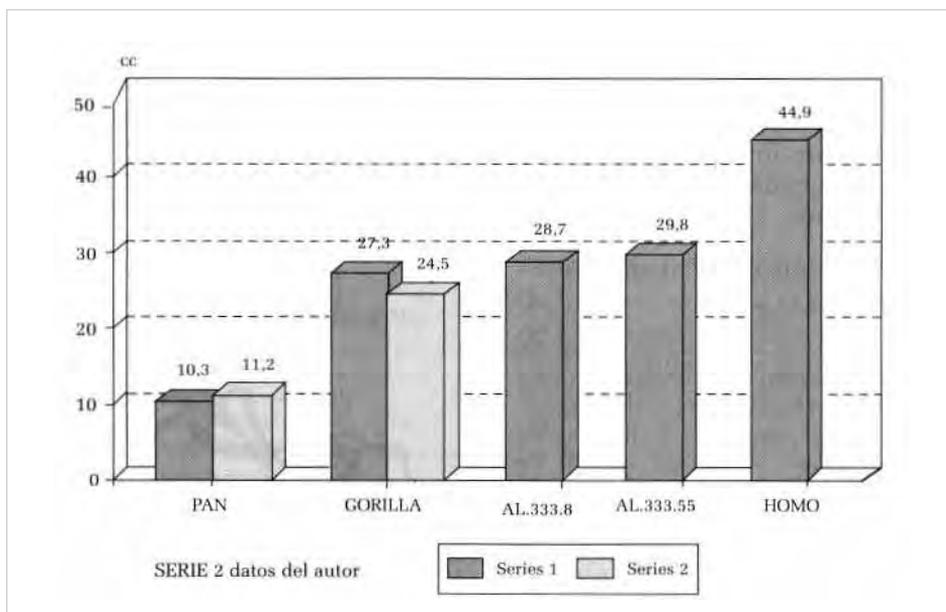


Fig. 2. Imagen correspondiente a 2 calcáneos derechos; el superior y más grande pertenece a Gorilla gorilla, el inferior y más pequeño pertenece a Erythrocebus patas.

Tras una simple observación, se aprecia la diferencia de volumen, tanto absoluto como relativo, de las tuberosidades posteriores de ambos calcáneos.

Gorilla g. posee un gran volumen tuberositario en comparación con Erythrocebus p. que es un primate cuadrumano terrestre, en tanto que Gorilla g. es habitualmente knucle-walker y por lo tanto, reparte su peso en mayor proporción que el anterior, sobre sus extremidades posteriores.

También queda evidente el importante «heel» o talón del calcáneo correspondiente a la zona medio inferior del Proceso Latero-medial de gorilla, ausente por completo en el caso de Erythrocebus.

Ejemplares pertenecientes a la Osteoteca del Parque Zoológico de Barcelona.

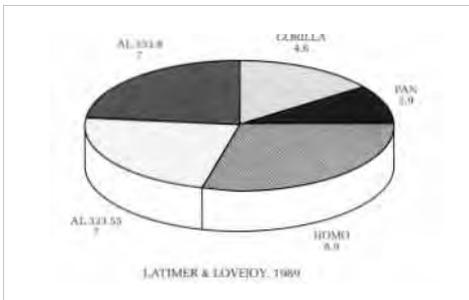
2.- Incremento de la Sección Coronal Mínima de la T. P. Los resultados obtenidos en este parámetro están incluidos (ver tabla nº 4). Destacaremos de ella, el dato obtenido tanto en el molde correspondiente a AL. 333.8, como en el AL. 333.55, ambos pertenecientes a *Australopithecus afarensis* que con 7 cm' quedan incluidos dentro del rango de *Homo Sap.*

3.- Formación del Proceso Latero Plantar (PLP)

El PLP es una formación ósea de localización latero externa situada entre el Proceso Latero Medial, presente en todos los Póngidos (talón) y, la Tróclea Peroneal.

**TABLA 4**

**Sección mínima coronal del calcáneo**



Esta formación o refuerzo óseo, incrementa en cerca de 150% la superficie de contacto del Calcáneo durante la Fase Talógrada de la Marcha Bípeda. (ver esquema n'-' 1).

El Proceso Latero Plantar sólo está presente en los géneros *Australopithecus* y *Homo*.

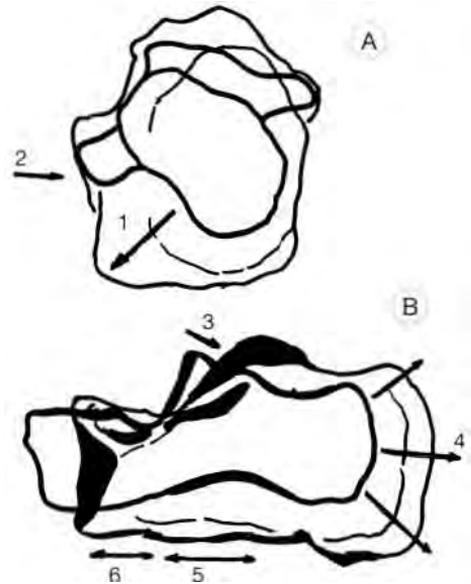
4.- Disminución de la Tróclea Peroneal

La Tróclea Peroneal es una formación ósea por donde discurre la vaina conjunta de los Tendones Peroneos.

A consecuencia del Talo Varo que presenta el Retropié en los Póngidos, es necesario delimitar un canal óseo para mantenerlos en su posición y evitar así su luxación.

**ESQUEMA 1**

**Cambios morfológicos en el calcáneo**



En negro se aprecian en (A) vista posterior del calcáneo de Póngido y en (B) vista lateral: en Rojo v, en tamaño extrapolado, las mismas vistas de *Homo*. En (1) se aprecia la formación de] P. L. P. a partir de P. L. M. En (2) se aprecia la asimilación de la T. Peroneal. En (3) el aplanamiento de la carilla articular posterior. En (4) el incremento de volumen de la Tuberosidad Posterior. En (5) el incremento de tamaño de la zona media y en (6) la disminución de longitud de la zona anterior.

Durante el desarrollo de la Bipedestación esta formación ósea va progresivamente regresando, por lo cual se deduce que a mayor Proceso Latero Plantar, menor Tróclea Peroneal. En algunos Homínidos coexisten las 2 formaciones.

5.- Complejo Articular Subastragalino

«Las articulaciones Subastragalinas presentan diferencias entre los Póngidos y el Hombre y son de gran importancia para analizar el desarrollo de la Evolución Humana».

Morton, 1924

El Complejo Articular Subastragalino se compone habitualmente de 3

superficies o carillas articulares. Las 2 anteriores o distales se encuentran localizadas en la zona antero-interna del Calcáneo, pudiendo estar juntas o separadas, articulándose con la cabeza y cuello del Talus, dependiendo de la orientación del Ángulo Cérvico-Troclear.

En la Bipedestación, juega un papel predominante la Articulación Posterior

**TABLA 5**

**Art. subastragalina post. (ASAPS)**

La horizontalización de la faceta articular de la ASAPS, indica un aumento en las sollicitaciones e implica una disminución de la movilidad.  
Las causas desencadenantes pueden ser

GÉNERO	A/ BP, B/> Peso	
	RADIO mm	ANG. SUSTENTACIÓN
PAN	14.2 (dS 3.1)	110° (dS 9.3)
GORILA	20.8 (dS 3.3)	100° (dS 8.2)
AL	24.5	82°
HOMO	26.2 (dS 3.2)	78.5° (dS 10)

modificado de LATIMER & LOVEJOY, 1989

**TABLA 6 (1)**

**Clasificación de los primates**

SUBORDEN	INFRAORDEN	FAMILIA
PROSIMIOS	LEMURIFORMES	INDRIDAEE DAUBENTONIIDAE LEPILEMURIDAE LEMURIDAE CHEIROGALIDAE GALAGIDAE LORISIDAE
	TARSIFORMES	TARSIIDAE

**TABLA 6 (2)**

**Clasificación de los primates**

SUBORDEN	INFRAORDEN	FAMILIA
ANTROPOIDEA	PLATIRRINOS	CALLITRICHIDAE CEBIDAE ATELIDAE
	CATARRINOS	CERCOPIITHECIDAE HYLOBATIDAE PONGIDAE HOMINIDAE

o Proximal, en ésta se definen 2 características claramente relacionadas con el Grado de Bipedestación.

5a) Aumento del Radio Articular

5b) Disminución del Ángulo de Sustentación

(Ver tabla nº 5)

**DISCUSIÓN**

Durante largo tiempo se ha tratado de hipotetizar sobre el aspecto y el tipo de locomoción predominante que desarrollaron nuestros ancestros. Dentro de la gran diversidad que configura el mundo de los primates (ver tabla nº 6), es básico saber de la coexistencia de diversos patrones de locomoción; entre los que destacaremos: a los Saltadores (Leapers ); los Cuadrumanos arborícolas (Q. Arb.); los Cuadrúmanos terrestres (Q. Ground); los Braquiadores (Brach); los Trepadores (Climbers); los Knucle-walkers (K-W) y los bípedos.

Estos diferentes tipos de locomoción están relacionados principalmente con: el tamaño del primate y con el nicho ecológico en el que habita.

Condicionado por -los tipos de locomoción observados en los primates actuales y, atendiendo a la posible cronofilogenia o esquema evolutivo de los Primates (ver tabla nº 7), citaremos las diferentes hipótesis con las que se ha tratado de predecir la apariencia de nuestros «potenciales» predecesores, extrapolándoles con los primates actuales.

Jones, 1940 identificó a los Tarsidios (Prosimios); Hooton, 1948 defendería la hipótesis de que nuestros ancestros no podían ser otros que los Póngidos; Washburn, 1968 añadió a lo anteriormente teorizado por Hooton, el patrón locomotor K-W, como sistema predominante de locomoción (actualmente la knucle-walking que desarrollan pan y gorilla es considerado un tipo mixto de locomoción el cual permite desplazamientos en suelo firme,

**TABLA 7**  
**Filogenia de los Primates**

PURGATORIUS	70 Ma
PLESIADAPSIFORMES	60 Ma
HAPLORRINOS	
PROTOSIMIOS	40 Ma
CATARRINOS	
AEGYPTOPITHECUS	30 Ma
PROCONSULIDAE	
DRYOPITHECIDAE	
KENYAPITHECUS	15 Ma
PRE-AUSTROLOPITHECIDOS	5 Ma
<i>AUS.afarensis</i>	3.5 Ma
<i>AUS.africanus</i>	3 Ma
<i>HOMO habilis</i>	
<i>AUS.robustus</i>	2 Ma
<i>HOMO erectus</i>	<i>AUS.boisei</i>
	1 Ma
<i>HOMO sap.arcaic</i>	
<i>HOMO sap. neandertal</i>	
<i>HOMO sap. sapiens</i>	

sin que por ello su mano pierda las capacidades arborícolas). Actualmente se cree que nuestro «hipotético predecesor», aquel que ocuparía el «agujero negro» filogenético del Mioceno Inferior entre el último Hominoide conocido *Kenyapithecus wickerii* (12 Ma.) y el primer *Australopithecus afarensis* (4/3.5 Ma.) (ver tabla nº 8); podría ser el de *Hylobates* (gibón) entre 9 y 13.5 kg de peso, y que su repertorio locomotor se fundamentase en 2 patrones principales: *Braquiación* y «*Vertical climbing*».

«La Braquiación preadaptó a nuestros ancestros a la Postura Erecta».

Keith, 1923; Morton, 1926

En el estudio se demuestra que los Calcáneos de Primates no-antropoides que más se aproximan a las características presentes en pies que realizan cierto grado de bipedestación son los corres-

Este esquema representa una visión global de la Evolución de los primates. Desde su primer representante, **Purgatorius ceratops** (Cretácico Sup. Montana / U. S. A.), hasta **Homo sapiens**.

Las cifras de la derecha corresponden a la secuencia cronológica aproximada de aparición de las diferentes familias y géneros, oscilando entre los 70 millones de años (MA.) para Purgatorius, hasta 1 Ma. que corresponde a la interfase entre **Australopithecus**.

**Boisei y Homo Sapiens arcaic.**

La columna superior izquierda, es la cadena evolutiva de **Prosimios y Simios**; en la columna medio central se encuentran **Simios** y **Póngidos de tendencia antropoidea**, desde **Aegyptopithecus del Mioceno Medio de AlFayum/Egipto** hasta **Kenyapithecus**, con toda probabilidad el primer **Hominoide**.

**Los Hominoides** debutan con **Aus. Afarensis**, y divergen en 2 grandes familias: **Australopithecus** y **Homo**.

En nuestro país los restos más antiguos corresponden al grupo **Adapidae** (entre **plesiadapsiformes** y **Haplorrininos**).

PD.- Las letras en cursiva corresponden a Géneros, mientras que el resto representan Familias.

pondientes a *los Trepadores o Vertical Climbers*.

Por lo que respecta al significado biomecánico de las características presentes en calcáneos evolucionados hacia la bipedestación mencionaremos:

1. — Incremento del Volumen de la Tuberosidad Posterior. Zona que recibe hasta un 80% del peso corporal durante la Fase Talógrada de la marcha (Viladot, 1970). Necesidad de un fuerte punto de anclaje de, por una parte la Fascia Plantar (Lig. Plantare longum, necesario para el mantenimiento de la Bóveda Plantar); y por otro, la respuesta a los estímulos tracteros que efectúa el Tendón de Aquiles, hipertrofiado en el Hombre.

2. — Incremento de la Sección Coronal Mínima de la T. P. Actúa de brazo de palanca de las fuerzas que desde el eje talo-crural se dirigen a la Tuberosi-

dad posterior. La necesidad de una mínima sección coronal viene dada por el Cavus del pie humano; así en los primates cuadrumanos, la sección mínima coronal, coincide con la zona más posterior de la tuberosidad calcánea.

### 3.- Formación del Proceso Latero Plantar (PLP).

El significado biomecánico de esta formación podría explicarse de la siguiente forma: durante la marcha bípeda el pie se mantiene pronado a consecuencia del Genu valgo y de la horizontalidad o paralelismo con el suelo del Eje Talo-Crural. Esta pronación deriva en una necesaria rotación externa del retropié a través de su plano sagital.

Se ha mencionado anteriormente que la aparición de esta formación ósea

incrementa la superficie de contacto talar en aproximadamente un 150%, con respecto a la superficie de contacto talar de otros póngidos en marcha bípeda, a través del Proceso Latero Medial.

### 4.- Disminución de la Tróclea Peroneal.

La desaparición de esta prominencia ósea latero-externa en el Hombre se explica por el encajonamiento de la vaina que alberga a los Tendones peroneos por debajo y por detrás del Maléolo Peroneal, que en el hombre se encuentra hipertrofiado y es más largo que en la mayoría de primates.

### 5.- Aumento de Radio + Disminución del Ángulo de Sustentación de la Articulación Subastragalina Posterior.

**TABLA 8**

CRONO-FILOGENIA de la BIPEDESTACIÓN					
OLIGOCENO	MIOCENO inf	MIOCENO med	MIOCENO sup	PLIOCENO	
38	24	18	12	5	1.2
-----					
CERCOPIITHEC.					
PROPLIOPIT (Aegyptop)	q.arb + q.gr.			HOMO BP	
q.arb + cl			RAMAMORPH.		
susp. oc			knucle-walk		
			cl + gr. activ		
PROCONSUL				AUSTROLOP	
q.arb + cl				¿?	BP + cl.oc
palm-walker				cl + BP.oc	
PARAPITHEC			KENYAPITHEC		
q.arb + leap			q.ground + cl		
PLIOPITHECID					
q.arb + cl					
susp.oc					

### CRONOFILOGENIA DE LA BIPEDESTACIÓN

Este esquema trata de correlacionar, en el tiempo, diversos géneros y familias de primates con su correspondiente repertorio locomotor, encadenados para la consecución de la locomoción bípeda (BP).

Distribuidos en los diferentes períodos de aparición, quedan dispuestas las familias o géneros más representativos de primates. Debajo del nombre, y abreviado, aparecen las características de locomoción.

Subrayado y encadenado mediante flechas, se observa la posible cronología y filogenia.

La cadena empieza en el oligoceno con Propiopythecidae (Aegyptopithecus) - Proconsulidae - kenyapithecus - zona oscura del Mioceno Sup. - Australopithecidae - Hominidae en el Plio-Pleistoceno.

#### ABREVIATURAS

q.Arb: cuadrumano arborícola.  
q.ground: cuadrumano en suelo firme.  
susp. occ.: suspensión ocasional.  
leap: saltador arborícola.  
cl: trepador.  
palma-walker: palmígrado arborícola/terrestre.

Gr. activities: actividades manuales en suelo firme.  
Knucle-walker: pongid-like locomotion.  
bp: bipedestación.

Basado en textos de Brigitte SENUT, 1989

La mayor horizontalidad de las superficies articulares subastragalinas indica un incremento de sollicitaciones mecánicas a este nivel cuyas causas desencadenantes son 2 principalmente: 1/ un incremento de peso y 2/ práctica habitual de la bipedestación.

## CONCLUSIONES

La evolución del Calcáneo desde un «Hipotético Predecesor» arborícola habitante de los márgenes de la Fosa del Rif y que por motivos diversos «baja a suelo firme» (Coppens, 1983; Darwin, 1871, Day, 1986; Hewes, 1961; Hill & Ward, 1988; Hoorton, 1946; Howels, 1959; Leutenegger, 1987; Lovejoy, 1981; Lumley & Martin Bueno, 1984; Morton, 1926; Pickford, 1989; Rodman & Mchenry, 1980; Rose, 1984; Senut, 1982 y 1989; Sinclair & Leakey, 1986, Verhaegen, 1987, Washburn, 1987; Weaver, 1985; Wheeler, 1984; Wranghan, 1980, Zilhman & Brunker, 1979, y se adapta progresivamente a un nuevo tipo de locomoción: la Bipedestación, podría simplificarse en las siguientes aserciones:

Reducción relativa a la longitud total, reducción importante de la zona anterior, alargamiento y ensanche de la zona media, crecimiento desmesurado de la zona posterior mediante el incremento de volumen y de sección de la tuberosidad posterior al desarrollar el proceso latero plantar; desaparición de la tróclea peroneal y medidas morfomecánicas para la reducción de la movilidad en las articulaciones subastragalinas, principalmente en la posterior.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ABITOL, M.: Evolution of the Sacrum in Hominoids, *Am. J. Phys. Anthropol.* 74: 65/81, 1987.
2. ABITOL, M.: Sacral Curvature and Supine Posture, *Am. J. Phys. Anthropol.* 80: 379/389, 1989.
3. ALEXANDER, R. Mcn.: Estimation of Speeds of Dinosaurs, *Nature* 261: 129-130, 1976.
4. ARSUAGA, J. L.: Iliac Angular Measurements in *Australopithecus*. *J. Human Ev.* 10: 293/302, 1981.
5. ASFAW, B.: Proximal Femur Articulation in Pliocene Hominids. *Am. J. Phys. Anthropol.* 68: 535/538, 1985.
6. CHRISTIE, P. W.; RIDLEY, J. N.: Matematical Analysis of Articular Surfaces: Aplicacion to the Anatomy of Early Hominoids Ankle joint. *Hominidae: Proceedings of the 2nd Inter. Congress of Human Paleontology.* 61/66. Ed. Jaca Books/Milán, 1989.
7. COPPENS, Y.: *Le singe, l'Afrique et l'Homme.* Ed. Fayard/Paris, 1983.
8. DARWIN, Ch.: *The Descent of Man.* London, 1871.
9. DAY, M.: Bipedalism: Pressures, Origins and Modes. In *Major topics in Primate and Human Evolut.* Cambridge Univ. Press, 188/202, 1986.
10. DEMATHIEU, G. R.: Nouvelles Recherches sur la Vitesse des Vertebres, auteurs de Traces Fossiles. *Geobios* 19:3, 327/333, 1986.
11. FLEAGLE, J. G.; STERN, J. T.; JUNGERS, W. L.; SUSMAN, R. L.; VANGOR, A. K.; WELLS, J. P.: Climbing: A Biomechanical Link with Brachiation and with Bipedalism. *Symp. Zool. Soc. London*, 48: 359/375, 1981.
12. GALLUP, G. G.; SUÁREZ, S. D.: Optimal Reproductive Strategies for Bipedalism. *J. Human Ev.* 12: 193/196, 1983.
13. GEBO, D. L.; SIMONS, E. L.: Morphology and Locomotor the Foot in Early Oligocene Anthopoids. *Am. J. Phys. Anthropol.* 74: 83/101, 1987.
14. GEBO, D. L.: Locomotor and Phylogenetic Considerations in Anthropoid Evolution. *J. Human Evol.* 18: 201/233, 1989.

15. HEWES, G. W.: Foot Transport and the Origin of Hominid Bipedalism. *Amer. Anthropol.* 63: 687/710, 1961.
16. HILL, A.; WARD, S.: Origin of the Hominidae: The Record of African Large Hominoid Evolution between 14 My and 4 My. *Yearbook of Physical Anthropol.* 31: 49/83, 1988.
17. HOORTON, E. A.: *Up from the Ape.* McMillan, Ed./New York, 1946.
18. HOWELLS, W.: *Mankind in the Making: The Story of Human Evolution.* Doubleday & Co. Garden City. Ed./NY, 1959.
19. JAANUSSON, V.: Balance of the Head in Hominid Evolut. *Lethaia* 20: 165/176, 1986.
20. JENKINS, F. A.: Chimpanzee Bipedalism: Cineradiographic Analysis and Implications for the Evolut. of Gait. *Science* 178: 877/879, 1972.
21. JOHANSON, D.; EDEY, M.: *Lucy. The Beginnings of Humankind.* Simon & Schuster Ed. 1981.
22. JOHANSON, D.; LOVEJOY, C. O.; KIMBEL, W. H.; WHITE, T. D.; WARD, S. C.; BUSH, M. E.; LATIMER, B. M.; COPPENS, Y.: Morphology of the Pliocene Partial Hominoid Skeleton (AL. 288.1) from the Hadar Formation, Ethiopia. *Am. J. Physic. Anthropol.* 57: 403/451, 1982.
23. JUNGERS, W. L.: Relative Joint Size and Hominoid Locomotor Adaptations with Implications for the Evolution of Hominid Bipedalism. *J. Human. Evol.* 17: 247/265, 1988.
24. LAMY, P.: The Settlement of the Longitudinal Plantar Arch of Some African Plio-Pleistocene Hominids: a Morphological Study. *J. Human. Evol.* 15: 31/46, 1986.
25. LANGDON, J. H.: Fossils and the Origin of Bipedalism. *J. Human. Evol.* 14:615/635, 1985.
26. LATIMER, B.; OHMAN, J. C.; LOVEJOY, C. O.: Talocrural Joiny in African Hominoids: Implications for *Australopithecus Afarensis.* *Am. J. Phys. Anthropol.* 74: 155/175, 1987.
27. LATIMER, B.; LOVEJOY, C. O.; JOHANSON, D.; COPPENS, Y.: Hominid Tarsal, Metatarsal and Phalangeal Bones Recovered from the Hadar Formation: 1974-1977, *Collect., Am. J., Phys, Anthropol.* 57: 701/719, 1982.
28. LATIMER, B.; LOVEJOY, C. O.: The Calcaneus of *Australopithecus Afarensis* and its Implications for the Evolution of Bipedality. *Am. J. Phys. Anthropol.* 78: 369/386, 1989.
29. LEAKEY, R.; WALKER, A.: *Homo Erectus Unearthed: a Fossil Skeleton 1.6 My Old.* *National Geographic* 168: 5 624/629, 1985.
30. LEUTENEGGER, W.: Origin of Hominid Bipedalism. *Nature* 325: 305, 1987.
31. LOVEJOY, C. O.: The Origin of Man. *Science.* 211: 341/350, 1981.
32. LUMLEY, H.; MARTIN BUENO, M.: *Origen y Evolución del Hombre.* Ed. Ministerio Cultura. Madrid, 1984.
33. McHENRY, H. M.: The First Biped: a Comparison of the *A. Afarensis* and *A. Africanus* Postcranium and Implication for the Evolution of Bipedalism. *J. Human. Evol.* 15: 177/191, 1986.
34. MORTON, D. J.: Evolution of the Man's Erect Posture. *J. Morphol. Physiol.* 43:147/149, 1926.
35. NORMAN, D.: *The Illustrated Encyclopedia of Dinosaurs,* Crescent Books/NY, 1985.
36. T. R.; SIEDEL, M. R.: The Evolutionary Basis of some Clinical Disorders of Human Foot: a Comparison Survey of the Living Primates, *Foot-Ankle* 3: 322/341, 1983.
37. PICKFORD, M.: A New Look ay *Kenyapithecus* based on Recent collections from Westwrn Kenya. *J. Human. Evol.* 14:113/143, 1985.
38. PICKFORD, M.: «Pre-Hominidis» . *Hominidae: Proceeding of the 2nd Int.*

Congress of Human Paleontology. 23/33. Ed. Jaca Book/Milan, 1989.

39. PROST, JH.: «Origin of Bipedalism». *Am. J. Phys. Anthropol.* 52: 175/189, 1980.

40. RAK, Y.: «Lucy's Pelvic Anatomy: its role in bipedal Gait». *J. Human. Evol.* 20: 283/290, 1991.

41. RODMAN, P. S.; MCHENRY, H. M.: «Bioenergetics and the Origin of Hominid Bipedalism». *Am. J. Phys. Anthropol.* 52: 103/106, 1980.

42. ROLLISON, J.; MARTIN, R. D.: «Comparative Aspects of Primate Locomotion, with Special Reference to Arboreal Cercopithecines». *Symp. Zool. Soc. London.* 48: 377/427, 1981.

43. ROSE, M.: «Food Acquisition and the Evolution of Positional Behaviour», in *Food acquisition and processing in Primates.* (Plenum, NY), 1984.

44. SENUT, B.: «Reflexions sur la Brachiation et l'Origine des Hominides à la lumière des Hominoides Miocenes et des Hominoides Plio-Pleistocenes». *Geobios.* 6: 335/344, 1982.

45. SENUT, B.: «La Locomotion des Pre-Hominides», in *Hominidae: Proceedings of the 2nd Inter. Congress of Human Paleontology.* 53/60. Ed. Jaca Book/Milan, 1989.

46. SINCLAIR, A. R. E.; LEAKEY, M. D.; NORTON-GRIFFITHS, M.: «Migration and Hominid Bipedalism», *Nature.* 324: 307/308, 1986.

47. SMITH, F. H.; FALSETTI, A. B.; DONNELLY, S. M.: «Modern Human Origins», *Yearbook of Phys. Anthropol.* 32: 35/68, 1989.

48. STERN, J. T.; SUSMAN, R. L.: «The Locomotor Anatomy of *Australopithecus Afarensis*», *Am. J. Phys. Anthropol.* 60: 279/317, 1983.

49. SZALAY, F. S.; LANGDON, J. H.: «The Foot of *Oreopithecus*: an Evolution-

nary Assessment», *J. Human. Evol.* 15: 585/621, 1986.

50. TOBIAS, Ph. V.: «The Status of *Homo Habilis* in 1987 and some outstanding problems», in *Hominidae: Proceedings of the 2nd Inter. Congress of Human Paleontology.* Ed. Jaca Book/Milan, 1989.

51. TUTTLE, R. S.: «Knucle-Walking and the Problem of Human Origins», *Science.* 166:953/961, 1969.

52. TUTTLE, R. S.: «Evolution of Hominid Bipedalism and Prehensile Capabilities», *Phil. Trans. R. Soc. London.* B292: 89/94, 1981.

53. VERHAEGEN, M.: «Origin of Hominid Bipedalism», *Nature.* 325: 305 (II), 1987.

54. VILADOT, A.: «L'Evolution du Pie». *Actualités de Med. et Cirugie du Pied.* 9: 54/70, 1970. Edt. Masson.

55. WASHBURN, S. L.: «Behaviour and the Origin of Man», *Proc. R. Anthropol. Soc.* 21/27, 1967.

56. WEAVER, K. F.: «The Search of Our Ancestors: Stones, Bones and Early Man». *Nat. Geographic.* 168:5 560/623, 1985.

57. WHEELER, P. E.: «The Evolution of Bipedality and Loss of Functional Body Hair in Hominids», *J. Human. Evol.* 13: 91/98, 1984.

58. WHITE, T. D.; SUWA, G.: «Homind Footprints at Laetoli: Facts and Interpretations», *Am. J. Phys. Anthropol.* 72: 485/514, 1987.

59. WOLPOFF, M. H.: «Lucy's Lower Limb: long enough for Lucy to be fully Bipedal?», *Nature.* 304: 59/61, 1983.

60. WRANGHAM, R. W.: «Bipedal Locomotion as a Feeding Adaptation in *Gelada Baboons*, and its Implications for Hominid Evolution», *J. Human. Evol.* 9: 329/331, 1980.

61. ZILHMAN, A.; BRUNKER, L.: «Hominid Bipedalism: then and now», *Yearbook Phys. Anthropol.* 22: 132/162, 1979.

# UTILIZACIÓN DE SENSORES PIEZORRESISTIVOS PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES PLANTARES

HOSPITAL MIGUEL SERVET

\*Servicio de Traumatología y Ortopedia  
ZARAGOZA

\*\*Grupo de Bioingeniería.

Área de Tecnología Electrónica.

CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE ZARAGOZA

Proyecto coordinado de investigación subvencionado por la DGICYT-PM91-0142-CO2

A. J. M. PÉREZ GARCIA\*

J. E. LÓPEZ SOLER\*

J. MARTÍNEZ VILLA\*

C. ORRITE URUÑUELA\*\*

L. PÉREZ SERRANO\*

A. MARTÍNEZ ITURBE\*\*

---

## RESUMEN

*Se presenta un avance sobre las características de un método, basado en sensores piezorresistivos, para la medida de presiones plantares. La matriz utilizada proporciona una resolución espacial mayor que las actualmente empleadas, permitiendo su empleo como podoscopio electrónico y/o plataforma de fuerza para estudio de la huella y distribución de la carga plantar estática y dinámica.*

---

## INTRODUCCIÓN

Las técnicas para el estudio de las presiones plantares se vienen aplicando desde hace más de 100 años. Inves-

tigaciones recientes hacen uso de diversos tipos de sensores para la medida de la carga en el pie. Sin embargo, en la última década los estudios se han dirigido, generalmente, hacia el análisis de la marcha y aplicaciones en Medicina Deportiva y de Rehabilitación, sin apenas utilidad en el diagnóstico precoz de las alteraciones estáticas y funcionales del pie. Además los aparatos diseñados hasta el momento, en su mayoría, son demasiado complejos y de precio elevado, accesibles tan sólo a Centros de Investigación Biomédica y Centros de Alto Rendimiento Deportivo.

La aparición en la industria electrónica de sensores piezorresistivos constituidos por un polímero semiconductor, permite disponer de matrices, con

un reducido tamaño de elemento individual y gran número de éstos, haciendo especialmente ventajosa la aplicación de esta tecnología. Todo ello, ha motivado el desarrollo de este proyecto de investigación, para la construcción de un equipo orientado a estudios estáticos, que pueda sustituir al podoscopio convencional, de forma que la aplicación en la consulta diaria sea sencilla y de coste económico no muy elevado. De la misma forma puede ser utilizado para el estudio dinámico como plataforma de fuerza.

### CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ SENSIBLE

Básicamente está constituida por dos láminas finas superpuestas y unidas, en una de las cuales van serigrafados los electrodos correspondientes a cada elemento sensible y la interconexión entre éstos para configurar la forma de matriz. Sobre estos electrodos se dispone otra lámina en la que aparecen las secciones de polímero semiconductor. Cuando se presiona sobre una de ellas, la conductividad de este polímero varía y puede detectarse a través de los electrodos. En la figura 1 se puede observar un esquema de uno de estos sensores.

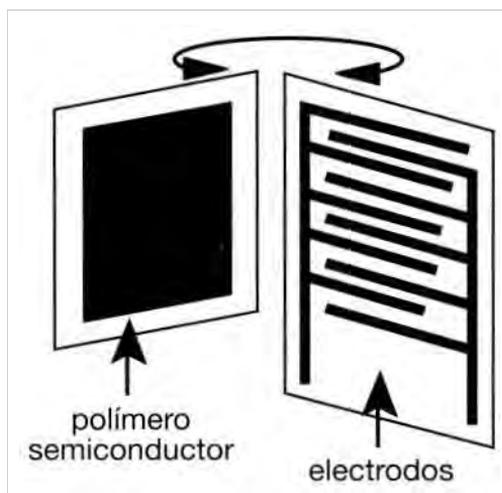


Fig. 1.

En principio ambas láminas admiten cualquier configuración, lo que posibilita la construcción de estos sensores en cualquier tamaño, forma y disposición, siendo ésta una característica muy ventajosa. Las características de la matriz que se usa en el diseño del prototipo son:

- Tamaño elemento: 0,5x0,5 cm<sup>2</sup>.
- Número de elementos: 2048 (64x32).
- Espesor: 0,2 mm
- Repetibilidad: ± 8% bajo 50N/cm<sup>2</sup> y 1 minuto de tiempo entre medidas. ±15% elemento a elemento.
- Efecto 'creep': 1% a 30 segundos. 10% en 2 minutos.
- Rango presión útil: 0,7kg/cm<sup>2</sup> hasta 7 km/cm<sup>2</sup>.
- Rango fuerza: 10 g hasta 20 kg.
- Temperatura de trabajo: -30° C hasta 170° C.
- Corriente máxima: 1mA/cm<sup>2</sup> de fuerza aplicada.
- Sensibilidad a la temperatura: inferior al -0,8%/°C entre 0° C y 60° C.
- Constante de inercia mecánica: 1-2 ms

Vida media: 10.000.000 de actuaciones (presenta cambio ±5%).

### ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

El esquema adoptado para la lectura de las 2.048 señales que proporciona la plataforma sensible consiste en multiplexar filas y columnas de forma que se obtenga un amplificador de ganancia variable. La ganancia final vendrá fijada por la impedancia que presente el elemento seleccionado en ese instante.

La impedancia que presenta un elemento de superficie  $S$  y bajo una fuerza  $f$  se puede aproximar a:

$$R = \frac{k \cdot f^m}{S}$$

Por tanto la salida proporcionada por los amplificadores se aproxima a una ley potencial frente a la fuerza que se aplica (a sección constante).

## CONTROL

Las tareas de control para la selección de filas y columnas y la conversión analógico digital son realizadas por un microcontrolador de 8 bits funcionando a 2Mhz (diagrama de bloques figura 2). Una RAM estática de 8kbytes

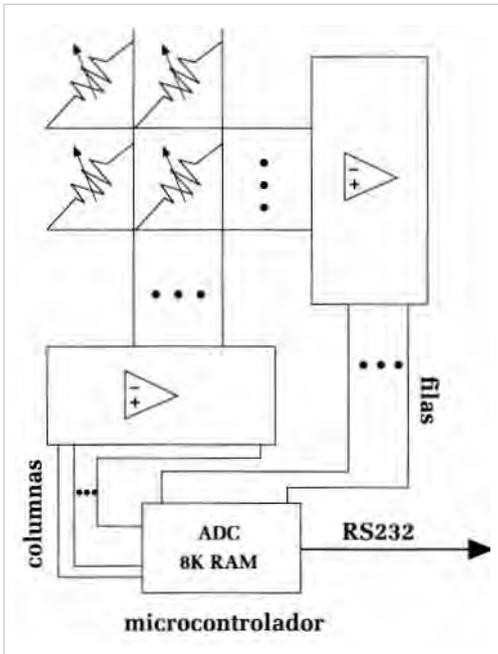


Fig. 2.

permite almacenar el muestreo de los sensores. Las 2.048 muestras pueden ser capturadas en 40 ms. Posteriormente se envían vía RS232 hacia un computador personal. El tiempo de muestreo es lo suficientemente rápido como para garantizar la validez de la lectura

una vez acomodado el pie sobre la plataforma: la constante de tiempo para un individuo en posición erecta y estática es muy superior. En cualquier caso, podría adoptarse una estrategia más conservadora, hacer 4 muestreos (8192 bytes) y enviar hacia el PC un promedio.

## ALGORITMOS DE INTERPOLACIÓN

El análisis de diversas técnicas de interpolación [3] parece indicar que dado el elevado número de datos disponibles, resulta más interesante la aplicación de métodos locales de interpolación frente a los globales.

Definiendo un mallado, de tamaño la distancia entre centros de los sensores, se ensaya una interpolación bilineal para cada rectángulo formado, que garantiza la continuidad:  $f(u, v) \in C(0)$ . Más concretamente resultan polinomios interpolantes del tipo:

$$f(u, v) = f(0,0) p_1(u, v) + f(1,0) p_2(u, v) + p_3(u, v) + f(p_4(u, v))$$

con:  $p_1(u, v) = q_1(u)q_1(v)$

$$p_2(u, v) = q_2(u)q_1(v)$$

$$p_3(u, v) = q_2(u)q_2(v)$$

$$p_4(u, v) = q_1(u)q_2(v)$$

y  $q_1(u) = 1 - u$        $q_2(u) = u$

para  $u \in [0, 1]$        $v \in [0, 1]$

aproximación que coincide con los valores de la función muestreada en las cuatro esquinas del rectángulo interpolador.

Usando interpolación bicúbica (de manera similar a la anterior), se garantiza  $f(u, v) \in C^{(1)}$ , y por tanto suavidad en los empalmes de los "placas" de interpolación. Para conocer el valor de las derivadas de la función en dirección  $u$  y  $v$  se usan reglas numéricas.

## DISCUSIÓN

En general, los dispositivos utilizados para la medida de presiones plantares, tienen como objetivo el registrar y medir fuerzas dinámicas, esto es, están orientados al estudio de la marcha [1] [4]. A lo largo de la bibliografía consultada, se encuentran como métodos más usados y con resultados más satisfactorios los basados en medios ópticos [1][2] o piezoeléctricos [5][7].

En los primeros lo costoso de los equipos es evidente, además de requerir instalaciones espaciales, siendo inviable en la práctica clínica diaria.

Los métodos piezoeléctricos han conseguido buenos resultados, e incluso existen algunos dispositivos comerciales desarrollados. Sin embargo, este tipo de sensores no son los más adecuados para el estudio que aquí se plantea, puesto que un material piezoeléctrico no permite la medida de una presión estática (comportamiento de condensador). Con los circuitos electrónicos adecuados pueden conseguirse frecuencias de corte en torno a los 0.01Hz [8]. En cualquier caso el acondicionamiento de señal resulta algo complicado (cargas eléctricas generadas muy pequeñas, gran sensibilidad ante el ruido...) y más aún si tenemos en cuenta que pretendemos realizar un estudio estático.

También se han aplicado métodos capacitivos [6] en análisis dinámicos y se mencionan equipos comerciales basados en este tipo de sensores [9].

Así pues, el método piezorresistivo más eficaz para el estudio estático y además permite el estudio dinámico como en los métodos piezoeléctricos, posibilidad a desarrollar en el proyecto de investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BEEG, R. K., WYTCH, R., MAJOR, R. E.: «A microcomputer based video vector system for clinical gait analysis». *J. Biomed. Eng.* 12: 383-387, 1990.
2. CAVANAGH, P. R., MICHİYOSHI, A.: «A technique for the display of Pressure distributions beneath the Foot». *J. Biomech.* 13: 69-75, 1980.
2. FRANKE, R.: «Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods». *Mathematics of Computation*; 38: 181-199, Jan. 1982.
4. GÓMEZ PELLICO, L., FORRIOL CAMPOS, F., DANKLOFF, C.: «Estudio cinético de la marcha normal». *Rev. Ortop. Traum.* 341B, 6: 699-703, 1990.
5. HENNING, E. M., CAVANAGH, P. R., ALBERT, H. T., MACMILLAN, N. H.: «A piezoelectric Method of Measuring the Vertical Contact Stress beneath the Human Foot»). *J. Biomed. Eng.* 4: 213-221, 1982.
6. MIYAZAKI, S., ISHIDA, A.: «Capacitive transducer for continuous measurement of vertical foot force». *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, 22: 309-316, 1984.
7. STARITA, A., BASTA, F., CARBONE, B., DARIO, P., DE ROSSI, D., PERFETTI, C. C.: *A computerized platform for the analysis of spatio-temporal foot-ground pressure patterns. XIV ICMBE and VII ICMP, ESPOO, FINLAND, 1985.*
8. WEBSTER, J. G.: *Tactile Sensors for Robotics and Medicine.* John Wiley & Sons, 1988.
9. ZHU, H., HARRIS, G. F., WERSTCH, J. J., TOMPKINS, W. J., WEBSTER, J. G.: «A Microprocessor-Based Data-Acquisition System for Measuring Plantar Pressures from Ambulatory Subjects». *IEEE Trans Biomed. Eng.* 38: 710-714, 1981.