



Dr. Mauro Lastrico – Dra. Laura Manni

# Miembro inferior - pie

## 1. Pie

Relativamente al pie vendrán tomadas en examen las resultantes vectoriales sobre la articulación tibio-társica, sobre el arco medial plantar, sobre el arco anterior plantar y sobre el hallux.

### 1.1 Articulación Tibio-Társica

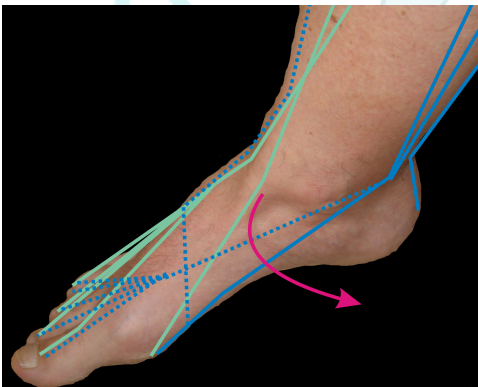
La dominancia vectorial sobre la articulación tibio-társica, tanto por número de músculos actuantes como por fuerza de trabajo y potencia expresable, está en dirección de la flexión plantar y supinación.

#### Dominancias Flexo-Extensoras

Flexión dorsal músculos:	Flexión plantar músculos:	Dominancia vectorial:
Tibial anterior	Tríceps sural	Flexión plantar
Extensor largo de los dedos	Peroneo largo	
Extensor largo del hallux	Peroneo breve	
	Flexor largo de los dedos	
	Tibial posterior	

Figura 22: Dominancias flexo-extensoras

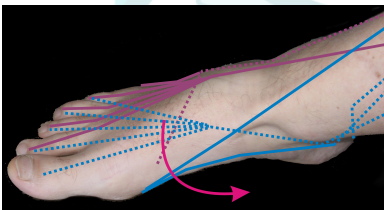
• Flexores dorsales tibio-társica: tibial anterior, extensor largo de los dedos y del hallux (verde) • Flexores plantares tibio-társica: tríceps sural, tibial posterior, peroneo largo y breve, flexor largo de los dedos (azul) • La dominancia vectorial está a favor de la flexión plantar



## Dominancias Prono-Supinadoras

Supinación   músculos:	Pronación   músculos:	Dominancia vectorial:
Tríceps sural	Peroneo largo	Supinación
Tibial posterior	Peroneo breve	
Flexor largo del hallux	Extensor largo de los dedos	
Flexor largo de los dedos	Peroneo tercero	
Tibial anterior		

Figura 23: Dominancias prono-supinadoras



- Pronación tibio-társica: peroneo breve y largo, extensor común de los dedos (violeta)
- Supinación tibio-társica: tríceps sural, tibial anterior, tibial posterior, flexor largo de los dedos y del hallux (azul)
- La dominancia vectorial está a favor de la supinación

## 1.2 Estrategias Adaptativas de la Articulación Tibio-Társica



Fig.1



Fig.2

En el caso en que los músculos actuantes sobre la articulación tibio-társica entren en exceso de tensión y en sucesivo acortamiento, las dominancias vectoriales en supinación y flexión plantar son tales de no poder ser balanceadas por los directos antagonistas.

En este caso, para poder apoyar la planta del pie al suelo en estación erecta, el sistema deberá utilizar estrategias adaptativas modificando la secuencia articular femoro-tibio-peroneal.

En presencia de acortamiento de los flexores plantares y de los supinadores, el apoyo al suelo de la planta del pie devendrá posible, fundamentalmente, a través de la hiperextensión en rotación interna de la rodilla.

Figura 24: Estrategia adaptativa

- El acortamiento de los flexores plantares y supinadores del pie no puede ser balanceado por los antagonistas directos (fig.1)
- El apoyo al suelo de la planta del pie (fig.2) puede ocurrir a través de la

hiperextensión en rotación interna de la rodilla

## 1.3 Arco Medial Plantar

Los músculos que son capaces de modificar el arco medial plantar est n subdivididos en tres grupos:

Músculos anteriores de la pierna: Tibial anterior, Extensor largo de los dedos, Peroneo largo.

Músculos posteriores de la pierna: Tríceps sural, Tibial posterior, Flexor largo del hallux, Flexor largo de los dedos.

Músculos de la planta del pie: Abductor del hallux, Flexor breve del hallux, Aductor del hallux, Cuadrado de la planta.

**Acción específica de los músculos sobre el arco medial**

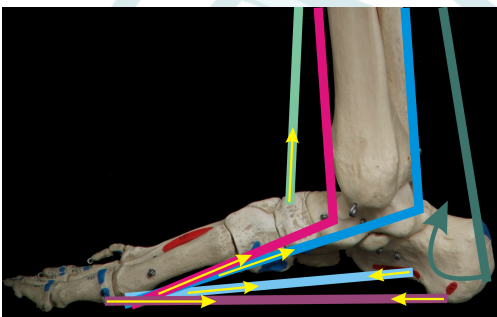
músculo	Acción en acortamiento	Efecto sobre el arco medial	Efecto sobre la rodilla
Tibial anterior	Supinación	Mayor cavismo	Varismo
Extensor largo de los dedos	Los tendones pasan bajo los retináculos de los músculos extensores. Tomando punto fijo a este nivel el músculo puede determinar la subluxación de los cuneiformes	Mayor cavismo	
Peroneo largo	El tendón se inserta al 1º hueso metatarsal y al hueso cuneiforme medial. Con este recorrido parece ser la cuerda de un arco (Kummer) que, si se acorta, mientras prona la tibiotársica aumenta y estabiliza la bóveda plantar	Mayor cavismo	Varismo
Peroneo breve	Insertándose sobre el V hueso metatarsal es un pronador de la tibiotársica pero no tiene ningún efecto directo o indirecto sobre el arco medial	Ningún efecto	Varismo
Tríceps sural	Fuerte supinador del calcáneo	Mayor cavismo como resultante mecánica de la supinación del calcáneo	Valgismo
Tibial posterior	Supinación	Mayor cavismo	Valgismo
Flexor largo del hallux Flexor largo de los dedos	Además de flexionar plantarmente el hallux y los dedos, flexionan plantarmente el pie y lo supinan	Mayor cavismo	
Abductor del hallux	Es el principal músculo de la eminencia plantar medial. Actúa como la cuerda de un arco tensa entre calcáneo y hallux que, acortándose, aumenta el arco medial	Mayor cavismo	

músculo	Acción en acortamiento	Efecto sobre el arco medial	Efecto sobre la rodilla
Flexor breve del hallux Aductor del hallux Cuadrado de la planta	Aunque más breves, relativamente al arco medial, actúan como el abductor del hallux	Mayor cavismo	

### 1.4 Particularidad Biomecánica del Arco Medial

Como evidenciado, los músculos actuantes sobre el arco medial plantar actúan todos en el sentido de su sostén.

En todas las articulaciones analizadas, aunque en desequilibrio vectorial, las fuerzas actuantes están en antagonismo entre sí.

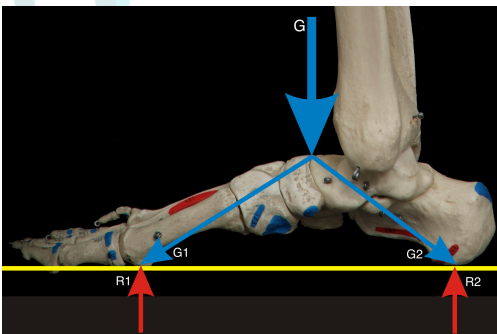


El arco medial presenta la particularidad de tener todos los vectores musculares en sumatoria de acción.

Figura 25: Vectores de sostén del arco medial

- Abductor del hallux: violeta
- Cuadrado de la planta: celeste
- Tríceps sural: verde oscuro
- Tibial posterior, flexor largo del hallux y de los dedos: azul
- Tibial anterior: magenta
- Extensor largo de los dedos: verde claro
- Las flechas indican las líneas de fuerza todas orientadas al sostén del arco medial

### Principio Ingenieril del Arco Medial



Desde un punto de vista "ingenieril" la cosa no sorprende: siendo el arco medial destinado a sostener el peso corpóreo entero (en estación erecta el baricentro corpóreo se descarga al ápice del arco medial) es comprensible que todos los "tirantes" actúen de soporte a los ligamentos y a la conformación en arco de los huesos.

Figura 26: Distribución de las fuerzas sobre el arco medial

- Si la alineación esquelética respeta la secuencia fisiológica, la fuerza global corpórea  $G$  está aplicada al ápice del arco medial
- De aquí se divide tridimensionalmente descargándose al borde lateral del pie, al arco anterior y al calcáneo donde encuentra las fuerzas, iguales y contrarias  $R$ , expresadas por el sólido de apoyo
- Las fuerzas  $G1$  y  $G2$ , y  $R1$  y  $R2$ , si no balanceadas por las fuerzas músculo-ligamentosas actuantes sobre el arco plantar, harían "acostar" el arco

### Principio Arquitectónico del Arco

Arquitectónicamente el arco es capaz de sostener grandes cargas verticales con tal de que las bases sean estables, en caso contrario el arco cede.

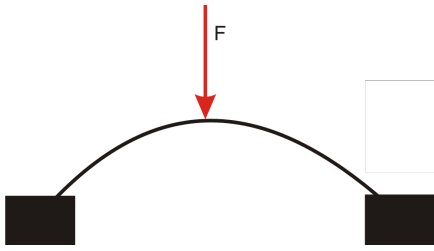


Figura 27: Estabilidad del arco con bases bloqueadas

- Si las bases están bloqueadas, la estructura en arco es capaz de sostener grandes cargas verticales como los pilones en los puentes romanos o las columnas en las bóvedas de las iglesias
- En la bóveda plantar las bases rígidas son sustituidas por tirantes capaces de mejor soportar las sollicitaciones dinámicas (como en los puentes modernos)

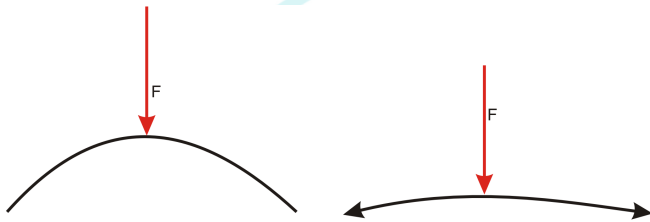


Figura 28: Cedimiento del arco con bases no sostenidas

- Si las bases no están sostenidas, la fuerza de la carga vertical hará "acostar" el arco

La acción muscular está entonces dirigida al sostén de las bases.

Además, no siendo el arco medial plantar

constituido por un único hueso, cosa que lo haría estable pero rígido e inadecuado a las sollicitaciones dinámicas, asume ulterior importancia la tensión músculo-ligamentosa que, si expresada al mínimo necesario, estabiliza dinámicamente la bóveda plantar.

## 1.5 Pie Plano

Puesto que la acción de todos los músculos actuantes está dirigida al sostén del arco medial, en ausencia de patologías específicas, el cedimiento de la bóveda plantar debe estar determinado por una deformación estructural ósea de relevante entidad, tal de impedir a los "tirantes" musculares formar el arco.



Cuando en cambio está presente parálisis neurológica periférica con consiguiente inactividad muscular u otro cuadro patológico específico, el cedimiento tiene obviamente otro origen.

Será entonces necesario diversificar, en presencia de una huella plana, si esta última está causada por verdadero platismo (con cedimiento de la bóveda

plantar) o por hipertrofia de los músculos de la bóveda plantar, y expresión de mecanismo adaptativo de otras problemáticas.

Figura 29 y 30: Pies con huella plana

### Evaluación Diferencial del Pie Plano

Primera indagación manual: La primera indagación será manual y dirigida a percibir la posición del arco:

- En caso de real cedimiento de la bóveda: astrágalo, navicular y cuneiformes aparecerán en posición horizontalizada.
- En caso contrario: el arco óseo aparecerá íntegro y la palpación pondrá en evidencia la hipertrofia de los músculos plantares.



*Figura 31: Indagación palpatoria*

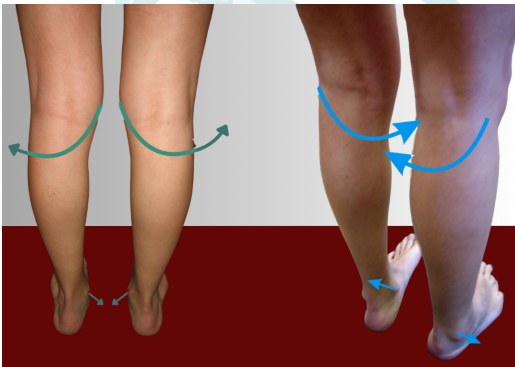
- Con la indagación palpatoria, es posible percibir el recorrido óseo del arco, distinguiéndolo de una eventual presencia de hipertrofia muscular

### **Mecanismo Adaptativo del Pie Plano**

En el caso en que el arco resulte íntegro, y la huella plana sea expresión de la hipertrofia muscular, se procederá analizando eventuales mecanismos adaptativos.

Ejemplo clínico: En estación erecta (siempre en el paciente precedente) se evidencia una importante rotación interna de los fémures.

Solicitando la corrección activa de la rotación interna femoral, los pies, y en particular el derecho, ponen en evidencia un hipercavismo.



*Figura 32: Test de desrotación femoral*

- Foto a la izquierda: además de la huella plana, es constatable una importante rotación interna femoral •
- Foto a la derecha: desrotando, activamente o pasivamente, el fémur, la carga gravita sobre el borde externo de los pies mostrando un exceso de cavismo

### **Mecanismo Compensatorio**

En este caso se asiste a un mecanismo de tipo adaptativo: con los fémures correctamente posicionados, los pies muestran un exceso de cavismo, con apoyo sobre el borde lateral por la tensión de los supinadores y de los músculos propios de la planta del pie.

Los músculos pronadores de la tibio-társica, siendo vectorialmente subdominantes respecto a los supinadores, no pueden balancearlos y permitir el apoyo fisiológico de la planta del pie al suelo.

Además, el mayor pronador, el peroneo largo, contribuye también él al exceso de cavismo.

Para permitir al pie un apoyo más funcional, entonces, a vicariar la acción de los pronadores intervienen los rotadores internos femorales y el calcáneo mostrará un valgismo no primario, consecuencia de la rotación interna del miembro inferior.

### **Implicaciones Clínicas**

En este caso, entonces, el aparente pie plano está causado por un pie cavo compensado hacia arriba a través de la rotación femoral y tibial, con el empleo de músculos no actuantes directamente sobre el pie.

Es a través del estudio lineal de los vectores musculares que es posible analizar si el balance articular puede ser asegurado por músculos antagonistas actuantes sobre la articulación o si, como en el caso del aparente pie plano, este balance ocurre a través del empleo de músculos actuantes en otro lugar.

En situaciones de este tipo, la corrección del aparente platismo con medios externos podría determinar compensaciones en agravamiento en otros distritos corpóreos.

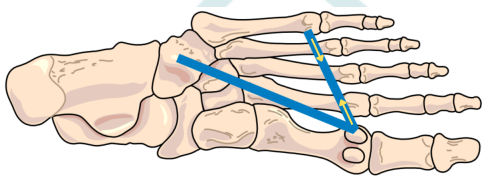
Esta aplicación, entonces, deberá ser evaluada no solo en el distrito esquelético de aplicación, sino sobre el sistema corpóreo entero.

## 1.6 Arco Anterior Plantar

Sobre el arco anterior las dominancias vectoriales se expresan de modo diverso respecto al arco medial.

### Sostén del Arco Anterior

Las bases del arco (I° y V° metatarso), además de por los ligamentos, están sostenidas solo por la cabeza oblicua del músculo aductor del hallux.



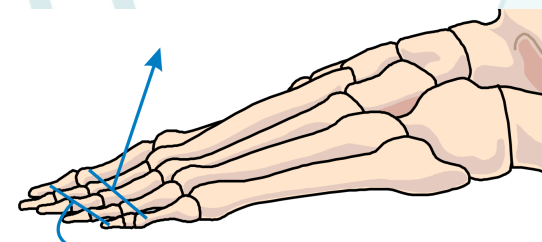
*Figura 33: Sostén del arco anterior*

- La porción oblicua del aductor del hallux (azul) es el único "tirante" de sostén de las bases (I y V metatarso) del arco anterior del pie (flechas amarillas)

### Acción de los Músculos sobre los Dedos

Todos los otros músculos actúan sobre los dedos:

- Extensor largo y breve de los dedos: flexionan dorsalmente los dedos.
- Extensor largo y breve del hallux: flexionan dorsalmente el hallux.
- Lumbricales e interóseos: flexionan dorsalmente la primera falange y plantarmente la segunda los primeros, aducen o abducen los metatarsos los segundos.
- Flexor largo de los dedos: flexiona plantarmente la última falange.



- Flexor breve: flexiona plantarmente la segunda falange.

La retracción de estos músculos determina una dominancia vectorial en flexión dorsal de la primera falange y en flexión plantar de la segunda y de la tercera.

*Figura 34: Acción sobre los músculos de los dedos*

- El acortamiento de los músculos actuantes sobre los dedos determina una resultante global en flexión dorsal de la primera falange y en flexión plantar de la segunda y de la tercera

### Mecanismo de Cedimiento del Arco Anterior

La flexión dorsal de la primera falange de los dedos determina un empuje mecánico sobre los metatarsos proyectándolos hacia el terreno.

A este empuje concurre, bajo carga, la porción de la fuerza global G que se descarga sobre el arco anterior.

En este caso, la fuerza que sostiene las bases del arco, la porción transversa del aductor del hallux, resulta subdominante.

Primero y quinto metatarso se alejan y el arco anterior se aplana.

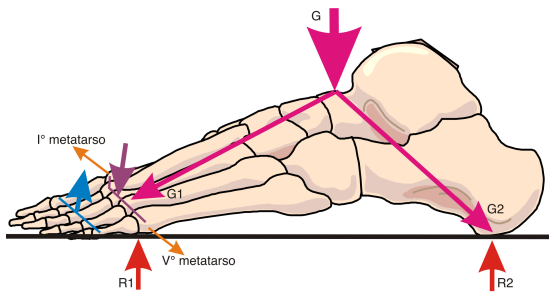


Figura 35: Cedimiento del arco anterior

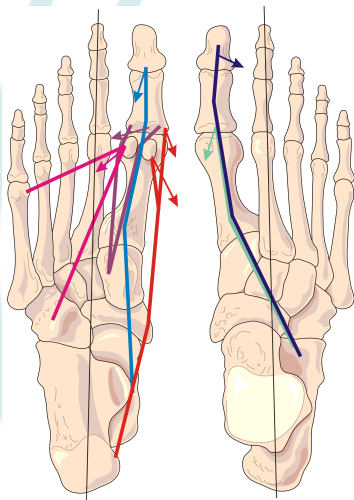
- La flexión dorsal de las primeras falanges (flecha azul) determina el hundimiento de los metatarsos (flecha púrpura) y el consiguiente alejamiento del primero y del quinto metatarso (flechas naranjas)
- La porción transversa del aductor del hallux resulta subdominante en balancear los empujes mecánicos y el arco cede
- Cedimiento del arco al que concurren las fuerzas G1 y R1

## 1.7 Hallux

La estabilidad látero-lateral del hallux está bajo el control de los músculos aductor y abductor del hallux, extensor largo y breve del hallux y flexor largo y breve del hallux.

### Acciones Específicas sobre los Músculos del Hallux

Considerando como referencia el eje del pie, extendido de centro del talón al segundo dedo:

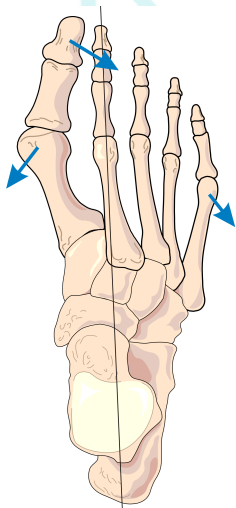


- Extensor largo y flexor largo del hallux: aducen la falange distal del hallux.
- Extensor breve y abductor del hallux: abducen el primer metatarso y la primera falange del hallux.
- Aductor y flexor breve del hallux: aducen el primer metatarso y la primera falange del hallux.

Figura 36: Músculos del hallux

- A la izquierda, visión plantar:
  - Abductor del hallux: rojo
  - Aductor del hallux: magenta
  - Flexor breve del hallux: violeta
  - Flexor largo del hallux: azul
- A la derecha, visión dorsal:
  - Extensor largo del hallux: azul oscuro
  - Extensor breve del hallux: verde

### Mecanismo del Hallux Valgo



El acortamiento sistémico de estos músculos determina una resultante y una dominancia vectorial que se expresa con la abducción del primer metatarso y con la aducción de la falange distal del hallux (hallux valgo).

El cedimiento del arco anterior plantar, determinando la abducción, respecto al segundo dedo, del primero y del quinto metatarso, acentúa la desviación angular del hallux. Los dos cuadros se presentan a menudo en asociación.

Figura 37: Hallux valgo

- Considerando el eje centro del talón-segundo dedo, el acortamiento de los músculos actuantes sobre el hallux tienen una resultante global que determina la abducción del primer metatarso y la aducción de la falange distal
- Puesto que hallux valgo y aplanamiento del arco anterior plantar se presentan a menudo como cuadros asociados, además de la abducción del

*primero estará presente también la abducción del quinto metatarso*

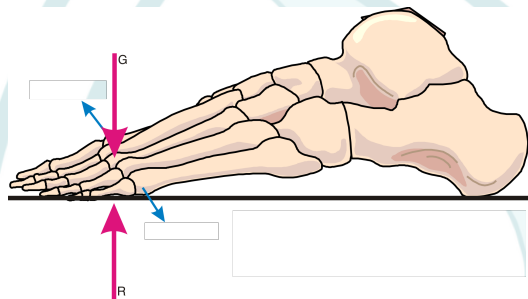
### **Evaluación de las Causas Primarias**

En sede evaluativa será importante también determinar si el cuadro asociado, valgismo hallux/ cedimiento del arco anterior, está determinado primariamente por el acortamiento selectivo de los músculos actuantes en estos distritos o es consecuencia de la anteriorización de la fuerza global G aplicada al baricentro corpóreo.

Esta fuerza, al contrario de lo que ocurre al arco medial, está contrastada por el solo aductor del hallux en su porción transversa.

El potencial expresable por el aductor del hallux es insuficiente para contrastar la fuerza del peso corpóreo entero y consecuentemente los metatarsos, del segundo al cuarto, en casos extremos podrían entrar en contacto con el suelo.

Una vez que el arco está aplanado, la fuerza global G se distribuye a todas las cabezas metatarsales donde viene balanceada por la fuerza R a su vez distribuida sobre todas las cabezas metatarsales.



*Figura 38: Anteriorización del baricentro*

- *El cedimiento del arco anterior plantar puede ser inducido, mecánicamente, por la anteriorización de la fuerza global G aplicada al baricentro corpóreo*

#### **Nota sobre la reversibilidad de los acortamientos**

Como para todos los distritos analizados, los acortamientos musculares descritos en el miembro inferior son potencialmente reversibles a través de apropiadas técnicas terapéuticas que actúen sobre los

mecanismos de remodelamiento tisular y recalibración propioceptiva.

La identificación correcta de las causas primarias, sean ellas proximales o distales, orienta la intervención hacia la resolución estable de las alteraciones.

## **2. Conclusiones del Capítulo**

El análisis del miembro inferior evidencia una jerarquía de complejidad que va de la sofisticada biomecánica de la cadera, a través del involucramiento de la articulación de la rodilla, hasta las específicas adaptativas del pie.

Particularmente significativa es la constatación de que en el arco medial plantar todos los vectores musculares actúen en sumatoria de acción a favor del sostén, diversamente de cada otra articulación corpórea donde existen antagonismos. Este principio ingenieril refleja la necesidad de sostener el peso corpóreo entero.

La comprensión de los mecanismos adaptativos, como el del "pie plano compensado" a través de rotaciones femorales, demuestra la importancia de una evaluación sistémica, que considere las interconexiones entre todos los distritos del miembro inferior, mientras la aplicación de los principios vectoriales confirma que las alteraciones observadas siguen precisas leyes físicas.

Las dominancias musculares determinan configuraciones esqueléticas previsibles: del mecanismo de inversión funcional de los flexores de la rodilla en carga, a la unicidad del arco medial donde todos los vectores convergen en sumatoria, hasta los mecanismos adaptativos que utilizan músculos distantes para compensar desequilibrios locales.

Estos principios demuestran que también en el miembro inferior, sometido a las cargas de la estación erecta y de la deambulación, son los músculos acortados los que determinan las alteraciones esqueléticas, a través de mecanismos físicamente demostrables y potencialmente reversibles con apropiado tratamiento de las causas primarias.

### 3. Síntesis del capítulo

**Músculos mono-articulares de la cadera como ligamentos activos** Los músculos mono-articulares y con breve línea de fuerza actúan principalmente para la estabilización articular, comportándose como ligamentos dinámicos capaces de adaptarse a las sollicitaciones endo-articulares de la coxo-femoral.

**Alteraciones de la rodilla con repercusiones obligadas sobre la cadera** Valgismo, varismo, hiperextensión y flexión de la rodilla modifican necesariamente la distribución de las fuerzas en el acetábulo, creando compresiones localizadas y potenciales conflictos mecánicos a la articulación coxo-femoral.

**Síndrome del piriforme: doble mecanismo** Puede manifestarse tanto por rotación interna-abducción femoral (piriforme en tensión para contención) como por varismo de rodilla (piriforme en acortamiento para mantener eficacia). En ambos casos la posible consecuencia podría ser la compresión del nervio ciático.

**Progresión de los cuadros de alteración del eje de la rodilla** Secuencia de agravamiento: rotación interna-hiperextensión → flexión-rotación externa. Una rodilla aparentemente en buena posición podría haber agotado las primeras dos direcciones desembocando en las sucesivas.

**Arco medial: todos los vectores en sumatoria (en ausencia de patologías específicas)** Única articulación donde todos los músculos actúan para el sostén, sin antagonismo. Principio ingenieril para sostener el peso corpóreo entero al ápice del arco.

**Pie plano aparente como mecanismo adaptativo** Puede ser expresión de pie cavo compensado a través de rotación interna femoro-tibial. Los músculos no actuantes sobre el pie vicarian la acción de los pronadores insuficientes.

**Arco anterior: cedimiento por dominancia flexora de los dedos** La flexión dorsal de la primera falange determina un empuje sobre los metatarsos. El aductor del hallux (único sostén transversal) resulta insuficiente para balancear la dominancia.

**Hallux valgo: es el resultado de las dominancias musculares**

### Bibliografía

- [1] Neumann DA. *Kinesiology of the Musculoskeletal System*. 3rd ed. St. Louis: Elsevier; 2017. [2] Perry J, Burnfield JM. *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*. 2nd ed. Thorofare: Slack; 2010. [3] Hicks JH. The mechanics of the foot. II. The plantar aponeurosis and the arch. *J Anat*. 1954;88(Pt 1):25-30. [4] Sarrafian SK. *Anatomy of the Foot and Ankle: Descriptive, Topographic, Functional*. 2nd ed. Philadelphia: Lippincott; 1993. [5] Fuller EA. The windlass mechanism of the foot: a mechanical model to explain pathology. *J Am Podiatr Med Assoc*. 2000;90(1):35-46. [6] McKeon PO, Hertel J, Bramble D, Davis I. The foot core system: a new paradigm for understanding intrinsic foot muscle function. *Br J Sports Med*. 2015;49(5):290. [7] Perera AM, Mason L, Stephens MM. The pathogenesis of hallux valgus. *J Bone Joint Surg Am*. 2011;93(17):1650-61. [8] Nery C, Raduan F, Baumfeld D. Hallux valgus in adults: concepts and

treatment. *Rev Bras Ortop.* 2013;48(6):476-85. [9] Tong JWK, Kong PW. Association between foot type and lower extremity injuries: systematic literature review with meta-analysis. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2013;43(10):700-14. [10] Ridola C, Palma A. Functional anatomy and imaging of the foot. *Ital J Anat Embryol.* 2001;106(2):85-98. [11] Winter DA. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement.* 4th ed. Hoboken: Wiley; 2009. [12] Sahrman SA. *Diagnosis and Treatment of Movement Impairment Syndromes.* St. Louis: Mosby; 2002. [13] Felson DT. Osteoarthritis as a disease of mechanics. *Osteoarthritis Cartilage.* 2013;21(1):10-15. [14] Powers CM. The influence of abnormal hip mechanics on knee injury: a biomechanical perspective. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2010;40(2):42-51.

