

Morfometría vertebral en población española

ALFONSO OLMO, M.*; VILLAS TOMÉ, C.*; BEGUIRISTAIN GÚRPIDE, J. L.*; ZUBIETA ZÁRRAGA, J. L.**

*Departamento de Cirugía Ortopédica y Traumatología. **Unidad de Neuroradiología. Servicio de Radiodiagnóstico.

Clinica Universitaria de Navarra. Facultad de Medicina. Universidad de Navarra. Pamplona. Navarra.

RESUMEN: La morfología vertebral y pedicular condiciona el tamaño de los implantes pediculares tanto en anchura como en longitud y orientación del tornillo en el momento de su introducción. Se procedió a medir la anchura pedicular cortical y endostal, la angulación de los pedículos y la longitud del cuerpo vertebral, así como a valorar la forma del cuerpo vertebral en 45 pacientes españoles estudiados mediante TAC. Para este estudio los cortes pasaban por el pedículo de L3 en 8 vértebras, de L4 en 37 vértebras, de L5 en 44 vértebras L5 y de S1 en 40 vértebras. Se compararon estadísticamente los valores obtenidos entre varones y mujeres.

La anchura cortical aumentaba desde L3 con 8,7 mm hasta S1 con 21,3 mm, la anchura pedicular endostal desde 6,2 mm en L3 hasta 17,4 mm en S1, la angulación pedicular de 10,3° en L3 hasta 28,2° en S1 y la longitud del cuerpo vertebral desde 33,0 mm en L3 a 35,4 mm en S1.

Las vértebras lumbares desde L3 admitían, en la mayoría de los casos, tornillos pediculares de 5,5 mm. Por la forma y tamaño vertebral, en L5 y S1 se debe introducir los tornillos pediculares de modo convergente si se utilizan tornillos de más de 40 mm de longitud para evitar traspasar la pared anterior del cuerpo vertebral.

PALABRAS CLAVE: Columna lumbar. Pedículos. Tornillos pediculares. TAC.

El pedículo vertebral ha sido objeto de investigación, primero por los anatomistas clásicos de principios del siglo XX como Gallois y Japiot¹ en su trabajo «Architecture intérieure des vertèbres», y posteriormente por otros autores a

Correspondencia:

Dr. M. ALFONSO OLMO.
Clínica Universitaria de Navarra.
Facultad de Medicina. Universidad de Navarra.
Avda. Pío XII, 36. 31008 Pamplona. Navarra.
e-mail: malfonsool@unav.es

Recibido: Marzo de 2001.

Aceptado: Octubre de 2001.

Vertebral morphometry in the spanish population

ABSTRACT: Vertebral and pedicular morphology condition the width and length of pedicular implants, as well as the orientation of the screw introduced.

Pedicular cortical and endosteal width, pedicular angle, and the length of the vertebral body were measured in 45 Spanish patients studied by CT scan. The CT scan sections intersected the L3 pedicle of 8 vertebrae, L4 of 37 vertebrae, L5 of 44 vertebrae, and S1 of 40 vertebrae. The values obtained in men and women were compared statistically.

Cortical thickness ranged from 8.7 mm in L3 to 21.3 mm in S1. The pedicular angle ranged from 10.3° in L3 to 28.2° in S1 and the length of the vertebral body ranged from 33.0 mm in L3 to 35.4 mm in S1.

Lumbar vertebrae from L3 up generally admitted 5.5-mm pedicular screws. However, because of the shape and dimensions of L5/S1, when introducing screws longer than 40 mm at that level, we recommend to direct them in a convergent direction to avoid perforating the anterior wall of the vertebral body.

KEY WORDS: Lumbar spine. Pedicles. Pedicular screws. CT scan.

partir de la generalización del uso de los tornillos pediculares en la década de los 80, considerando su estructura desde distintos puntos de vista. Para Roy-Camille et al² «el pedículo es la parte más fuerte de la vértebra y es un cilindro de hueso cortical rodeando a un poco de hueso esponjoso»; para Misenheimer et al³ «contrariamente a la descripción de Roy-Camille el pedículo es sólo una delgada cáscara de hueso cortical lleno de hueso esponjoso y no una fuerte cortical con una pequeña cantidad de esponjosa».

Las dimensiones vertebrales, principalmente las dimensiones del canal lumbar, han sido estudiadas en profundidad con el fin de conocer causas y posibles tratamientos de la

estenosis del canal lumbar^{4,5}. El primer autor que se preocupó por conocer las características de los pedículos vertebrales con el fin de introducir tornillos pediculares fue Saillant, en el trabajo clásico «*Étude anatomique des pédicules vertébraux. Application chirurgicale*» en 1976⁶.

Los primeros trabajos fueron realizados sobre vértebras de cadáver, bien fresco^{3,6-8} o bien en esqueletos pertenecientes a colecciones osteológicas como la del Cleveland Museum of Natural History^{4,9} o de la Universidad de Nueva York en Buffalo¹⁰ mediante medición directa de los pedículos con calibradores. Posteriormente, con la llegada de la TAC, esta se ha utilizado para obtener las dimensiones vertebrales en pacientes vivos^{3,10-15}. Se comprobó que las mediciones con TAC eran equivalentes a las realizadas mediante medición directa^{3,13,14} comparando mediciones con calibradores en vértebras de cadáver a las que posteriormente se les practicó una TAC, observando una buena correlación.

Otros autores realizaron mediciones con TAC de los diámetros corticales y endostales^{3,12} dado que este último sería más preciso para concretar las dimensiones reales del tornillo que sería capaz de albergar el pedículo sin expandirlo, deformarlo o romperlo. Okuyama et al¹⁶, en 1994, demuestran que los cortes convencionales utilizados para la exploración de columna con TAC tienen poca precisión para medir los diámetros de los pedículos vertebrales. Por tanto, serán necesarios cortes más finos y dirigidos al pedículo para la valoración de la morfología vertebral con TAC.

Ferree¹⁷ estudió la morfología vertebral en la columna infantil y juvenil y determinó que a los 16 años la vértebra y la anchura pedicular alcanzaba su tamaño definitivo.

La forma vertebral fue estudiada por Van Schaik et al¹⁵, que por medio de la medida del ángulo externo formado por el pedículo y el cuerpo vertebral apuntaron las diferencias de la forma vertebral entre las últimas vértebras lumbares.

También en el sacro se han realizado estudios anatómicos en cadáver^{18,19} para conocer las estructuras en riesgo al introducir los tornillos pediculares y otros estudios que valoran tanto su anchura pedicular como la angulación de sus pedículos^{20,21}.

El objetivo de este trabajo es valorar la morfología vertebral en la población española mediante la medición con TAC de la anchura y angulación pedicular y la longitud de los cuerpos vertebrales así como el estudio de la forma de estos para introducir los tornillos pediculares de una manera más fiable mediante el control de la angulación, anchura y longitud de los tornillos.

MATERIAL Y MÉTODO

Se valoraron 8 vértebras L3, 37 vértebras L4, y 44 L5 y 40 S1 en un total de 45 pacientes que iban a ser intervenidos por patología lumbar crónica. Se desecharon aquellos pa-

cientes cuyos pedículos o cuerpos vertebrales habían sido modificados por alguna intervención previa.

Se realizó una TAC preoperatoria con cortes a través de los pedículos que se presuponía que iban a ser instrumentados, primero un topograma y posteriormente los cortes pediculares. Los cortes se eligieron en la mitad superior del pedículo, puesto que era la zona por donde se iba a introducir el tornillo.

El aparato de TAC utilizado, tanto para la valoración pedicular como para la valoración de los tornillos, fue el Somatom HiQ de Siemens y el Somatom HP de Siemens, utilizando una técnica de algoritmo de alta resolución con filtro óseo y ventana dirigida a estructuras óseas. Los cortes tomográficos empleados son de alta resolución, de 2 mm de espesor cada 2 mm, sin espacio muerto.

Los cortes tomográficos axiales se obtuvieron con una inclinación variable del emisor de rayos siguiendo los ejes paralelos al platillo epifisario superior. En el caso que la inclinación del corte fuese insuficiente por la lordosis del paciente, se anuló la medición.

La TAC se realizaba con el paciente en decúbito supino y las rodillas flexionadas, colocando un apoyo blando debajo de sus piernas para corregir la lordosis lumbar. El número de cortes realizados por pedículo era variable, dependiendo de la altura del pedículo pero los recogidos en imágenes eran de 2 a 4 cortes de la mitad superior del pedículo.

Se realizaron las siguientes mediciones:

a) *Ancho pedicular cortical*: midiendo la anchura del pedículo desde los bordes externos de las corticales pediculares medial y lateral en el punto más estrecho del pedículo y perpendiculares a su eje (fig. 1).

b) *Ancho pedicular endostal*: midiendo la altura del pedículo desde los bordes internos de las corticales pediculares medial y lateral en el punto más estrecho del pedículo y perpendiculares a su eje (fig. 1).

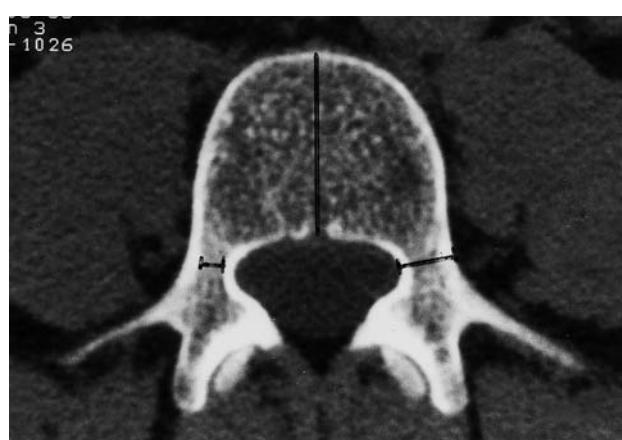


Figura 1. Medición de la longitud del cuerpo vertebral, ancho pedicular cortical y ancho pedicular endostal.

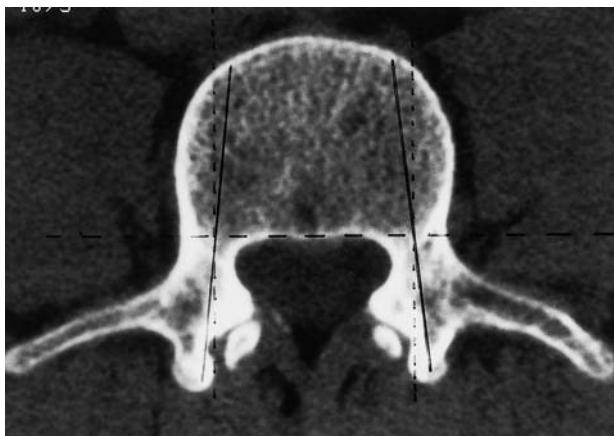


Figura 2. Medición del ángulo pedicular.

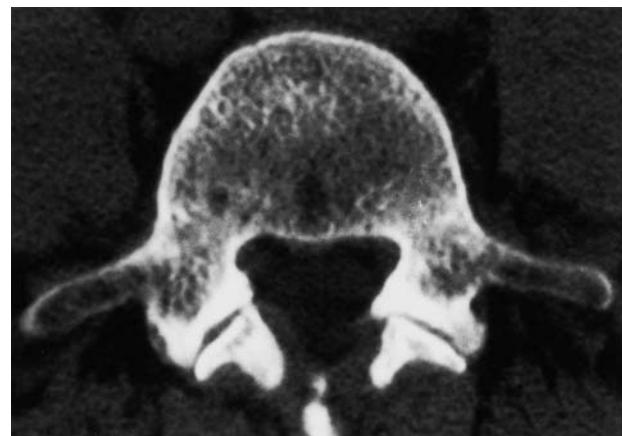


Figura 4. Vértebra L5 hemisférica.

c) *Longitud del cuerpo vertebral*: midiendo la distancia desde el borde externo de la cortical posterior hasta el borde externo de la cortical anterior del cuerpo vertebral en la línea sagital que pasa por la mitad de este (fig. 1).

d) *Ángulo pedicular*: el ángulo formado por una línea que pasa por el centro del pedículo siguiendo su eje y la línea sagital que pasa por la mitad del cuerpo vertebral (fig. 2).

e) *Forma de la vértebra*: según la forma del cuerpo vertebral se clasificaron en cuadrada (fig. 3), hemisférica (fig. 4), piramidal (fig. 5), rectangular o sacra (fig. 7), y dismórfica (figs. 6 y 8).

Para las mediciones de los diámetros se utilizó la regla que aparece en el lateral de cada imagen de TAC, dividida en cm. Primero se midió el parámetro deseado en la imagen de TAC mediante un calibrador o «pie de rey» Mitutoyo de una precisión de 0,1 mm y posteriormente se transportó la medición a la regla contigua, y por una regla de 3 se obtuvo cada valor. Para las mediciones de los ángulos se utilizó un goniómetro con una precisión de 1°.

La normalidad de las variables cuantitativas se verificó con el test de Shapiro-Wilks. Para las variables normales

(todas las mediciones vertebrales) los resultados se presentan como media \pm desviación típica, con los valores extremos entre paréntesis. Para la comparación de las mediciones vertebrales entre 2 grupos independientes (en los 2 sexos y en función de la forma de las vértebras), se empleó la prueba t de Student para muestras independientes. En este último caso, cuando las varianzas muestrales eran heterogéneas (test de Levene), se utilizó la corrección de Welch.

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS 9.0 para Windows, excepto los intervalos de confianza para los coeficientes de correlación de Pearson, que se obtuvieron con el programa Simcalc Beta 1.0, de Provalis Research. Se consideró significativo un valor de *p* inferior a 0,05.

RESULTADOS

Se valoraron 16 pedículos L3 (12 en varones y 4 en mujeres), 74 L4 (42 en varones y 32 en mujeres), 88 L5 (54 en varones y 34 en mujeres) y 80 S1 (50 en varones y 30 en



Figura 3. Vértebra L4 cuadrada.

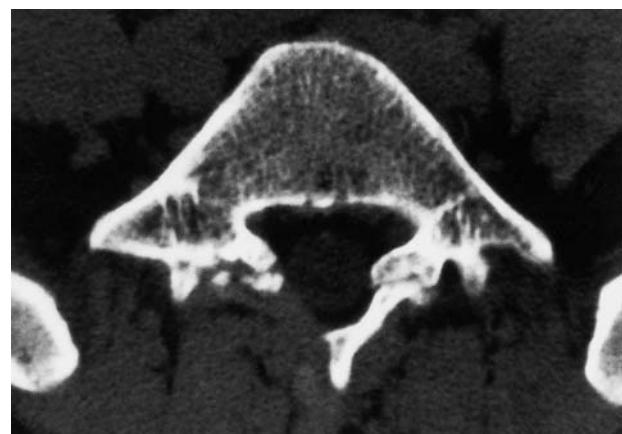


Figura 5. Vértebra L5 piramidal.

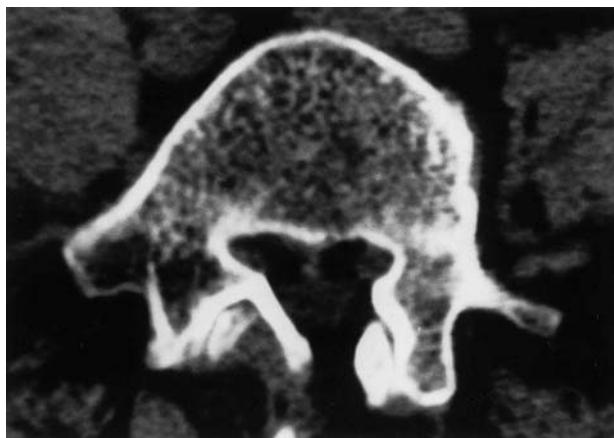


Figura 6. Vértebra L5 dismórfica. Se aprecia distinta angulación y anchura de los pedículos.

mujeres). Todas las vértebras L3 y L4 tuvieron una forma cuadrada o hemisférica, la mitad de las vértebras L5 tuvieron una forma hemisférica y la otra mitad una forma piramidal y la mayoría de S1 tenían una forma rectangular. Se observaron vértebras dismórficas, aunque en muy bajo porcentaje, en L5 y en S1 (tabla 1). La anchura pedicular cortical se incrementa progresivamente desde L3 (8,7 mm) hasta S1 (21,3 mm). La anchura pedicular endostal se incrementa desde L3 (6,2 mm) hasta S1 (17,4 mm). El ángulo pedicular se incrementó desde L3 (10°) hasta S1 (28°) (tabla 2).

En L5 se valoró el ángulo según la forma vertebral. Las vértebras piramidales (la mitad de L5) presentan un ángulo pedicular medio de 24° y las hemisféricas de 17° (tabla 2). La longitud del cuerpo vertebral se mantiene similar de L3 a L5 (33 mm) y en S1 se incrementa en 2 mm (35,4 mm) con tendencia a mayor tamaño en varones que en mujeres (tabla 2).

En la comparación de los resultados entre varones y mujeres se excluyeron las comparaciones en todos los parámetros en L3 debido al escaso tamaño muestral. En el nivel

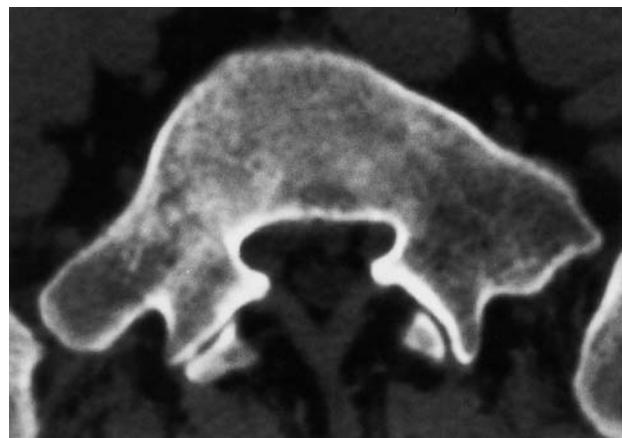


Figura 8. Vértebra S1 dismórfica.

L4 y L5 el único valor que mostró una diferencia significativa es la longitud o tamaño del cuerpo vertebral con $p < 0,001$, que fue mayor en varones que en mujeres. En S1 también fue el único valor que mostró una diferencia significativa ($p = 0,025$). El resto de parámetros estudiados no mostraron diferencias significativas entre varones y mujeres.

En cuanto a la forma de L5 se valoró si existían diferencias significativas entre los ángulos de las vértebras piramidales y las vértebras hemisféricas y cuadradas (agrupadas puesto que su morfología es similar a efectos de la introducción de los tornillos pediculares). Existieron diferencias significativas ($p < 0,001$).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son analizados teniendo como referencia el valor 5,5 mm puesto que es el diámetro de los tornillos pediculares de adulto que tiene la instrumentación CUN, utilizada y desarrollada en nuestro centro²². Según los resultados obtenidos respecto al ancho pedicular cortical, los pedículos desde L3 a S1 permiten alojar, en la mayoría de los casos, tornillos de 5,5 mm. En el nivel L3 se obtuvieron anchuras de 5 mm, lo que hace suponer una ruptura pedicular, o al menos una expansión del pedículo, utilizando tornillos mayores con su consiguiente pérdida de agarre. Scoles et al⁹ obtuvieron valores de 4 mm en L3. A niveles



Figura 7. Vértebra S1 rectangular.

Tabla 1. Forma vertebral

	Cuadrada hemisférica	Piramidal	Rectangular	Dismórfica
L3	100%	—	—	—
L4	100%	—	—	—
L5	45%	52%	—	3%
S1	—	10%	82%	8%

Tabla 2. Mediciones pediculares y cuerpo vertebral

	L3	L4	L5	S1
APC v + m (mm)	8,7 ± 2,2 (5-12)	11,5 ± 2,1 (6-17)	16,3 ± 2,5 (11-22)	21,3 ± 2,6 (14-29)
APC v (mm)	8,0 ± 2,0 (5-12)	12,0 ± 2,3 (6-17)	16,7 ± 2,7 (11-22)	21,6 ± 2,8 (15-29)
APC m (mm)	11,0 ± 0,8 (10-12)	10,9 ± 1,8 (7-15)	15,7 ± 2,1 (12-20)	20,9 ± 2,4 (14-27)
APE v + m (mm)	6,2 ± 2,1 (4-9)	8,2 ± 1,9 (4-12)	12,2 ± 2,3 (5-18)	17,4 ± 2,7 (10-27)
APE v (mm)	5,5 ± 1,8 (4-9)	8,6 ± 2,0 (4-12)	12,5 ± 2,6 (5-18)	17,7 ± 2,9 (10-27)
APE m (mm)	8,6 ± 0,7 (7,5-9)	7,6 ± 1,5 (4-11,5)	11,8 ± 1,7 (8-16)	17,0 ± 2,3 (12-22)
Ángulo P v + m (°)	10,3° ± 5,0 (2°-18°)	13,2° ± 4,9 (2°-28°)	20,8° ± 7,2 (8°-46°)	28,2° ± 7,2 (12°-44°)
Ángulo P v (°)	10,0° ± 5,3 (2°-18°)	12,1° ± 4,5 (2°-21°)	19,6° ± 7,4 (8°-46°)	27,0° ± 7,2 (12°-42°)
Ángulo P m (°)	11,2° ± 4,7 (6°-17°)	14,7° ± 5,0 (5°-28°)	22,7° ± 6,6 (11°-38°)	30,1° ± 6,9 (21°-44°)
LCV v + m (mm)	33,0 ± 3,5 (29-41)	32,4 ± 3,3 (26-41)	33,6 ± 3,1 (26-39)	35,4 ± 3,3 (28-42)
LCV v (mm)	33,6 ± 3,7 (31-41)	34,3 ± 2,7 (30-41)*	35,1 ± 2,6 (30-39)*	36,4 ± 2,7 (32-40)*
LCV m (mm)	31,0 ± 2,8 (29-33)	30,0 ± 2,4 (26-35)*	31,2 ± 2,4 (26-36)*	34,0 ± 3,7 (28-42)*

*Diferencias estadísticamente significativas.

Los valores están en mm salvo Ángulo Pedicular que viene en grados y vienen expresados como Media ± desviación típica y los valores extremos entre paréntesis.
APC: Anchura pedicular cortical. APE: Anchura pedicular endostal. Ángulo P: Ángulo pedicular. LCV: Longitud del cuerpo vertebral. v + m: varones y mujeres.

inferiores todos los pedículos son mayores de 5 mm aunque en L4 se observaron valores de 6 mm. Otros autores como Schwarzenbach et al²³ encontraron valores incluso menores de 6 mm en L4. En L5 y S1 no se apreció ningún valor por debajo de 10 mm, lo que facilita la introducción segura de tornillos hasta ese calibre. Los resultados del ancho pedicular cortical son similares a los de otros autores, como Saillant⁶ en su estudio realizado en cadáver y a Zindrick et al⁸ con TAC.

Respecto a los estudios realizados midiendo la anchura pedicular cortical dependiendo del sexo, sobre todo con TAC^{10,11,24}, se obtienen resultados similares, tendiendo a ser mayor la anchura pedicular en varones que en mujeres. El único estudio con cadáveres es el de Scoles et al⁹ y sus valores son los menores obtenidos de la serie de autores revisados.

En los resultados de este trabajo no se consideraron los pedículos de L3 separando el sexo debido al bajo número de casos en mujeres.

Los valores medios obtenidos de anchura pedicular endostal permiten alojar tornillos de 5,5 mm de L3 a S1, pero hay que tener en cuenta que de L3 a L5 se observaron anchuras endostales menores de 5,5 mm y que, según Mishenheimer et al³, ocurren cambios en un 83% de los pedículos cuando el diámetro endostal medido por TAC es sobrepasado por el del tornillo y en un 97% ocurren cambios en el tamaño externo del pedículo cuando el diámetro del tornillo es mayor del 80% del ancho pedicular cortical. Cuando se sobrepasa el diámetro endostal, este autor³ ha comprobado que ocurre progresivamente, primero una expansión del pedículo (por expansión plástica) y posteriormente una ruptura o fractura del pedículo por el paso de la terra o la rosca del tornillo. Sjöström et al²⁵ concluyen, según los datos obtenidos en su estudio, que los tornillos con un diámetro mayor de 65% del diámetro externo deforman el pedículo en un 85% de ocasiones.

En el presente estudio el ancho endostal de L3 es el 71% del ancho cortical, en L4 es también un 71%, en L5 es un 74% y en S1 es un 81%. No se han encontrado estudios que comparen la anchura endostal según el sexo del paciente. En los resultados de esta serie se ha observado una tendencia de mayor anchura en varones que en mujeres aunque estadísticamente no significativa (este dato, como ya se ha comentado, no es valorable en L3 debido al escaso número de pedículos según el sexo) como la anchura pedicular cortical. Respecto a estudios realizados en otras poblaciones^{3,12}, la anchura pedicular endostal es superponible en L3 y L4, pero en L5 nuestros resultados son 2 mm mayores y en S1 no se han encontrado estudios superponibles.

El incremento observado en el ángulo pedicular —desde L3 (10°) hasta S1 (28°)— está, en nuestra opinión, íntimamente ligado a la forma vertebral. Las vértebras cuadradas y hemisféricas (L3, L4 y la mitad de las L5) presentan un ángulo pedicular bajo (entre 10° y 17°) y en estos pedículos, la introducción de los tornillos puede hacerse en dirección perpendicular de atrás adelante, evitando la convergencia, sin riesgo de salida por el pedículo o el cuerpo vertebral. Las vértebras piramidales (la mitad de L5) presentan un ángulo pedicular medio de 24° y las hemisféricas-cuadradas de 17°, existiendo diferencias estadísticamente significativas, por lo cual será conveniente converger los tornillos pediculares o introducirlos rectos con una longitud máxima de 40 mm, para no sobrepasar la cortical anterior del cuerpo vertebral, puesto que la discriminación entre un tipo u otro de vértebra solo puede hacerse fiablemente por TAC. Para S1 ocurre algo similar, puesto que la media de angulación pedicular está en 28°, así que lo prudente es converger los tornillos pediculares o introducirlos rectos con una longitud máxima de 40 mm. En todos los estudios revisados^{7,8,12,14,26} el ángulo pedicular aumenta de L4 hasta S1 con valores que oscilan entre 14° y 20° para L4 y alrededor de 25° para S1, por lo que nuestros valores son similares.

Respecto a los estudios realizados midiendo el ángulo pedicular según el sexo, los resultados obtenidos son superponibles a los de Olsewski et al¹⁰ con TAC. Los resultados de Scoles et al⁹ mediante medición directa presentaron angulaciones mayores que las obtenidas en esta serie siendo la angulación en mujeres mayor siempre que en varones. En este punto coincidimos con este autor ya que en las mediciones de todos los niveles vertebrales los ángulos son mayores que en varones (2,6° en L4 y 3,1° en L5 y S1). La causa de esta tendencia la desconocemos. A pesar de esta tendencia no se han encontrado diferencias significativas respecto al sexo en la angulación pedicular en ningún nivel vertebral.

La longitud del cuerpo vertebral se mantiene similar de L3 a L5 incrementándose levemente en S1. Berry et al⁴ y Panjabi et al⁷ realizan sus mediciones en cadáveres con métodos directos y Van Schaik et al¹⁵ en pacientes utilizando la TAC. Los valores obtenidos son similares aunque ligeramente mayores (entre 1 a 2 mm de L3 a L5) en los otros autores que en esta serie, y pensamos que puede deberse a que las mediciones que se han escogido de los 2 primeros autores^{4,7} son las que pasan por el platillo epifisario superior, donde la vértebra es más larga, y las de este trabajo pasan por la mitad superior del pedículo, donde la vértebra comienza a estrecharse. Van Schaik et al¹⁵ realiza los cortes de TAC a nivel de la mitad inferior del pedículo con cortes de 4,5 mm cada 4,5 mm y obtiene valores ligeramente superiores a los nuestros, lo que podría estar influido por la anchura de los cortes de TAC. Respecto a los estudios realizados midiendo la longitud del cuerpo vertebral dependiendo del sexo por Van Schaik et al¹⁵ y Xu et al²¹, el primero¹⁵ encuentra diferencias estadísticamente significativas entre sexos en los niveles vertebrales estudiados (L3 a L5); el segundo²¹ estudia la morfología sacra en 50 cadáveres y no encuentra diferencias significativas entre sexos, aunque obtiene valores 4 mm inferiores a los nuestros. En este estudio se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los valores obtenidos para los varones y para las mujeres, siendo los valores obtenidos constantemente mayores en varones que en mujeres, lo cual se puede interpretar como la posibilidad de introducir tornillos ligeramente más largos en varones (hasta 5 mm) que en mujeres. La longitud del cuerpo vertebral debe considerarse conjuntamente con la angulación pedicular y con la forma vertebral a la hora de decidir la longitud del tornillo y el ángulo de introducción.

Como conclusiones se podría establecer que:

- De L3 a S1 se pueden introducir tornillos pediculares de 5,5 mm de anchura con relativa seguridad, aunque en este estudio y otros²³ se encontraron en L3 y L4 diámetros corticales y sobre todo diámetros endostales menores.
- El tornillo no debería sobrepasar el ancho endostal ni el 70% de ancho cortical (puesto que entre el 20 y 30% del tamaño pedicular cortical es ocupado por el grosor de las corticales).

- El ángulo de introducción del tornillo recomendable para L3 y L4 es cercano a 0° (perpendicular a la cortical posterior) y alrededor de 20° de convergencia en L5 y S1.

Se pueden utilizar tornillos pediculares ligeramente más largos (5 mm) en varones que en mujeres, por la diferencia de longitud del cuerpo vertebral.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gallois M, Japiot P. Architecture interieure des vertebres. Rev Chir Orthop 1925;63:688-708.
2. Roy-Camille R, Saillant G, Mazel C. Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating. Clin Orthop 1986; 203:7-17.
3. Misenheimer G, Peek R, Wiltse L, Rothman S, Widell E. Anatomic analysis of pedicle cortical and cancellous diameter as related to screw size. Spine 1989;14:367-72.
4. Berry J, Moran J, Berg W, Steffee A. A Morphometric Study of Human Lumbar and Selected Thoracic Vertebrae. Spine 1987;12:362-67.
5. Postacchini F, Ripani M, Carpano S. Morphometry of the lumbar vertebrae: Clin Orthop, 1983;172:296-303.
6. Saillant G. Étude anatomique des pédicules vertébraux. Application chirurgicale. Rev Chir Orthop 1976;62:151-60.
7. Panjabi MM, Goel V, Oxland T, Takata K, Duranceau J, Krag M, et al. Human lumbar vertebrae: quantitative three-dimensional anatomy. Spine 1992;17:299-306.
8. Zindrick MR, Wilste LL, Doornik A, Widell EH, Knight G, Patwardhan A, et al. Analysis of the morphometric characteristics of the thoracic and lumbar pedicles. Spine 1987;12: 160-6.
9. Scoles P, Linton A, Latimer B, Levy M, Digiovanni B. Vertebral body and posterior element morphology: the normal spine in middle life. Spine 1988;13:1082-6.
10. Olsewski J, Simmons E, Kallen F, Mendel F, Severin C, Berens D. Morphometry of lumbar spine: Anatomical perspectives related to transpedicular fixation. J Bone Joint Surg 1990;72A:541-9.
11. Bernard T, Seibert C. Pedicle diameter determined by Computed Tomography. Its relevance to pedicle screw fixation in the lumbar spine. Spine 1992;17(6 Suppl):S160-3.
12. Cheung K, Ruan D, Chan F, Fang D. Computed tomographic osteometry of asian lumbar pedicles. Spine 1994;19:1495-8.
13. Krag M, Beynnon B, Pope M, Frymoyer J, Haugh L, Weaver D. An Internal fixator for Posterior Application to Short Segments of the Thoracic, Lumbar or Lumbosacral Spine. Design and Testing. Clin Orthop 1986;203:75-98.
14. Krag M, Weaver D, Beynnon B, Haugh L. Morphometry of the thoracic and lumbar spine related to transpedicular screw placement for surgical spinal fixation. Spine 1988;13:27-32.
15. Van Schaik J, Verbiest H, Van Schaik F. Morphometry of lower lumbar vertebrae as seen on CT scans: Newly Recognized Characteristics. Am Roentgenol 1985;145:327-35.
16. Okuyama K, Sato K, Abe E, Onuma S, Ishikawa N. Vertebral pedicle diameter as determined by computed tomography: inaccuracies observed by direct measurement of cadaveric lumbar spine. Skeletal Radiology 1994;23:551-3.
17. Ferree B. Morphometric characteristics of pedicles of the immature spine. Spine 1992;17:887-91.
18. Esses SI, Botsford DJ, Huler RJ, Rauschning W. Surgical anatomy of the sacrum. A guide for rational screw fixation. Spine 1991;16(6 Suppl):283-8.

19. Mirkovic S, Abitbol JJ, Steinman J, Edwards CC, Schaffler M, Massie J et al. Anatomic consideration for sacral screw placement. *Spine* 1991;16(6 Suppl):s289-94.
20. Morse BJ, Ebraheim NA, Jackson T. Preoperative CT determination of angles for sacral screw placement. *Spine* 1994; 19:604-7.
21. Xu R, Ebraheim N, Yeasting R, Wong F, Jackson T. Morphometric evaluation of the first sacral vertebra and the projection of its pedicle on the posterior aspect of the sacrum. *Spine* 1995;20:936-40.
22. Beguiristain JL, Villas C, Preite R, Martínez R, Barrios RH. Lumbosacral arthrodesis using pedicular screws and ringed rods. *Eur Spine J* 1997;6:233-8.
23. Schwarzenbach O, Berlemann U, Jost B, Visarius H, Arm E, Langlotz F et al. Accuracy of Computer-Assisted pedicle screw placement. *Spine* 1997;22:452-8.
24. Ebraheim NA, Rollins J, Xu R, Yeasting R. Projection of the lumbar pedicle and its morphometric analysis. *Spine* 1996;21: 1296-300.
25. Sjöstrom L, Jacobson O, Karström G, Pech P, Rauschning W. CT analysis of pedicles and screws tracts after implant removal in thoracolumbar fractures. *Spinal Disord* 1993; 6: 225-31.
26. Sim E. Location of transpedicular screws for fixation of the lower thoracic and lumbar spine. *Acta Orthop Scand* 1993; 64:28-32.