

# Efecto de la elongación de tibia sobre el cartílago articular, el cartílago de crecimiento y el hueso trabecular. Estudio histomorfométrico en corderos

## Effect of tibial lengthening on the articular cartilage, growth cartilage, and trabecular bone. Histomorphometric study in lambs

RODRÍGUEZ, M. J.; RIPALDA, P.; MONTEJO, R., y FORRIOL, F.

*Laboratorio de Ortopedia Experimental. Departamento de Cirugía Ortopédica y Traumatología, Facultad de Medicina, Universidad de Navarra. Pamplona.*

**RESUMEN:** Se analizaron los cambios histomorfométricos en el cartílago articular, cartílago de crecimiento y hueso esponjoso de la extremidad proximal de la tibia de 24 corderos, con una edad comprendida entre 3 y 4 meses, después de una elongación tibial de tres centímetros con tres velocidades diferentes (1, 2 y 3 mm/día).

No se han encontrado diferencias morfológicas apreciables entre los controles y los grupos intervenidos. En el cartílago articular se encontró un aumento del área celular en las capas media (p < 0,01) y profunda (p < 0,05) de la tibia elongada a 1 mm/día y en la capa media de las tibias elongadas a 3 mm/día (p < 0,01). En los grupos elongados a 2 y 3 mm/día, aumentó el grosor de la capa más profunda que disminuyó en el grupo elongado a 1 mm/día. En el cartílago de crecimiento la altura total disminuyó en los grupos elongados a 1 y 3 mm/día, disminuyendo la altura de la capa proliferativa en ambos grupos y aumentando la hipertrófica en el grupo más lento. Se ha demostrado una disminución estadísticamente significativa del área de hueso trabecular en todas las zonas estudiadas y en todos los grupos.

Hay cambios en los tres grupos, el aumento de las solicitudes produce alteraciones en todas las estructuras de los huesos largos en crecimiento.

**PALABRAS CLAVE:** Elongación. Fijación externa. Cartílago articular. Cartílago de crecimiento. Hueso trabecular. Histomorfometría.

---

*Correspondencia:*

Dr. F. FORRIOL.  
Dpto COT  
Clínica Universitaria  
Apdo. 192  
E-31080 Pamplona  
e-mail: fforriol@unav.es

Recibido: Junio de 2000.

Aceptado: Septiembre de 2000.

**ABSTRACT:** A analysis was made of histomorphometric changes in the articular cartilage, growth cartilage, and cancellous bone of the proximal tibia in 24 lambs, age range 3-4 months, after tibial lengthening of three centimeters at three different rates (1, 2, and 3 mm/day).

No appreciable morphological differences were observed between the control and operated groups. The articular cartilage showed an increased cellular area of the medial (p < 0.01) and deep (p < 0.05) layers of the tibia lengthened 1 mm/day and of the medial layer of the tibia lengthened 3 mm/day (p < 0.01). In the groups with tibial lengthening of 2 and 3 mm/day, the thickness of the deepest layer increased; this layer decreased in the group with tibial lengthening of 1 mm/day. In the growth cartilage, total height decreased in the groups with tibial lengthening of 1 and 3 mm/day. The proliferative layer decreased in both groups and hypertrophic layer increased in the slower group. A statistically significant decrease in the area of trabecular bone was demonstrated in all the study zones and study groups. All three groups showed changes but increased demand produced abnormalities in all the structures of growing long bones.

**KEY WORDS:** Lengthening. External fixation. Articular cartilage. Growth cartilage. Trabecular bone. Histomorphometry.

---

Durante la elongación ósea, el cartílago articular, la fisis y el hueso esponjoso están sometidos a condiciones mecánicas anormales por la falta de apoyo de la extremidad elongada, la disminución de la movilidad articular y un aumento de solicitudes a compresión en las articulaciones al comprimir los extremos del hueso elongado contra los huesos vecinos. Por otro lado, aunque no se han estudiado las consecuencias de aumentar la velocidad de elongación so-

bre el hueso y el cartílago, la mayoría de los autores defienden la velocidad 1 mm/día. Si bien es cierto que al aumentar la velocidad de elongación se acorta el tiempo para conseguir la elongación deseada, posiblemente aumente también el tiempo de maduración y se produzca mayor tensión sobre las partes blandas.

Diferentes autores<sup>1,4,5,8,15,16</sup> parecen estar de acuerdo en que la velocidad de distracción ideal es de 1 mm/día, siendo opcional su aplicación en una sola vez, fraccionada en dos o cuatro veces o bien monitorizando el fijador para mantener una velocidad constante a lo largo de las 24 horas. Según White y Kenwright (1990), el realizar la elongación fragmentada o en una sola vez, no influye de forma significativa en la calidad radiológica del callo.<sup>28</sup> El aumento en la velocidad de elongación provoca una separación mayor de la habitual entre las trabéculas en formación, apareciendo microquistes que pueden formar grandes zonas de defecto trabecular que dificultan la maduración homogénea del callo.<sup>8,10</sup>

El objetivo del presente trabajo es analizar los efectos de la elongación a diferentes velocidades sobre las estructuras cartilaginosas y óseas de la extremidad del hueso a elongar.

### Material y método

Se ha efectuado una elongación de tres centímetros en 24 corderos, de entre tres y cuatro meses de edad, con cirugía bajo anestesia general con tiopen-totán sódico 2,5%, (10-15 mg/k peso), fentanil (0,0015 mg/k peso) y diacepán (0,2 mg/k) endovenosos, utilizando atropina IM (0,5 mg/k) como pre-medicación. Se empleó un fijador externo monolateral (Monotubo - Triax®, Stryker Trauma, Ginebra) con cuatro clavos (Apex®, 5 mm diámetro, Stryker Trauma, Ginebra), dos proximales y dos distales, insertados alejados del cartílago articular y del de crecimiento. La osteotomía se efectuó con una sierra osilante.

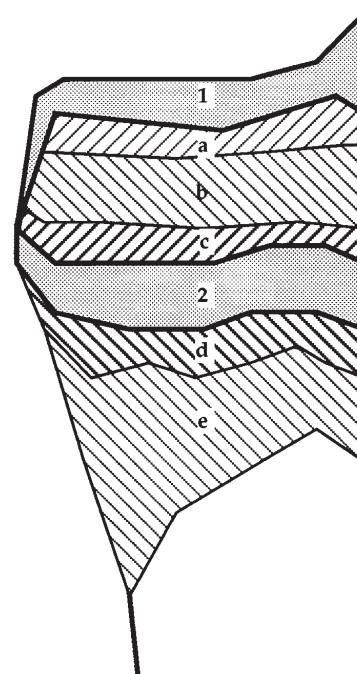
Siete días después de la cirugía se comenzó la elongación con tres velocidades diferentes según los grupos: en el grupo I, compuesto por ocho animales, a razón de 1 mm/día hasta alcanzar los tres centímetros; en el grupo II, también de ocho animales, a razón de 2 mm/día y en el grupo III, con otros ocho corderos, a razón de 3 mm/día. Una vez alcanzada la longitud de 3 cm de elongación en cada grupo se dejó madurar el callo por un periodo de dos meses hasta el sacrificio del animal.

La tibia contralateral se utilizó como control y fue tratada de la misma forma que la parte intervenida. Despues del sacrificio se extrajeron las porciones

proximales de ambas tibias y fijadas en formol tamponado al 4%. Con la sierra se cortó la parte proximal de la tibia en dos porciones, medial y lateral, utilizándose la primera para el presente estudio. Después de la decalcificación de las piezas con EDTA, durante cinco a seis semanas, comprobando el resultado radiológicamente, las diferentes porciones fueron incluidas en parafina y posteriormente cortadas a 4 µm con el microtomo. Se utilizaron las tinciones de Hematoxilina-eosina, Tricrómico de Masson y Azul alcián-PAS.

### Análisis morfométrico

El análisis morfométrico se realizó en la porción proximal de la tibia elongada y control, en el cartílago articular, cartílago de crecimiento y hueso esponjoso de la porción interna (Fig. 1). Para el estudio del cartílago articular se midió la altura de las capas superficial, media y profunda, así como el área de matriz y el área celular de cada una de ellas. En el cartílago de crecimiento se midieron la altura y el área de las capas de reserva, proliferación e hipertrófica. Por último, en el hueso trabecular se midió el área trabecular en cinco zonas: hueso subcondral, epifisario, epifisario próximo a la fisis, metafisario próximo a la fisis y metafisario. Además, se midió la longitud epifisaria. En los tres grupos intervenidos y en los con-



**Figura 1.** Esquema de las zonas estudiadas. 1. Cartílago articular. 2. Cartílago de crecimiento. a) hueso subcondral, b) hueso trabecular epifisario, c) hueso trabecular pre-fisario, d) hueso trabecular post-fisario, e) hueso trabecular metafisario.

troles respectivos se efectuaron mediciones en tres preparaciones consecutivas de cada animal midiendo cinco campos de cada zona o capa.

Para el estudio estadístico, se compararon los parámetros medidos en las tibias, control y elongada, en cada uno de los grupos y se verificó la normalidad mediante el test de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors. Para la comparación de elongados y no elongados se utilizaron el test de la t de Student para muestras independientes si la variable en estudio seguía una distribución normal y los tests de U de Mann-Whitney si no la seguía. Para comparar el efecto de las tres velocidades de distracción, se utilizaron ANOVAS de un criterio, seguidos del test de comparación múltiple de Tukey, si la variable en estudio seguía una distribución normal y el de Kruskal-Wallis, seguido de la U de Mann-Whitney con ajuste de Bonferroni, si no la seguía. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS 6.1.

## Resultados

En las tibias sometidas a elongación no se observaron alteraciones morfológicas importantes comparando con las tibias no elongadas (Fig. 2).

En el cartílago articular (tabla 1) no se encontraron diferencias en el área de matriz extracelular. Se vio un aumento del área celular en las capas media ( $p < 0,01$ ) y profunda ( $p < 0,05$ ) de las tibias elongadas a 1 mm/día y en la capa media de las tibias elongadas a 3 mm/día ( $p < 0,01$ ).

La altura del cartílago articular no mostró diferencias en los diferentes grupos, ni en la longitud total, ni en las capas superficial ni media. Únicamente, en la capa profunda se observó un aumento en los grupos elongados a 2 mm/día ( $p < 0,01$ ) y 3 mm/día ( $p < 0,05$ ) y una disminución en el grupo elongado a 1 mm/día ( $p < 0,05$ ). La altura epifisaria total no presentó diferencias en ninguno de los grupos analizados.

En el cartílago de crecimiento (tabla 2), la altura fisaria total mostró una disminución en el grupo elongado a 1 mm/día ( $p < 0,05$ ) y en el grupo elongado a 3 mm/día ( $p < 0,001$ ). Midiendo individualmente las capas, se demostró que la capa germinativa perdió altura en el grupo elongado a 2 mm/día ( $p < 0,05$ ). Por su parte, la capa proliferativa disminuyó en el grupo elongado a 1 mm/día ( $p < 0,05$ ) y en el elongado a 3 mm/día ( $p < 0,001$ ). También se encontró un aumento de la altura en la capa hipertrófica del grupo elongado a 1 mm/día ( $p < 0,001$ ).

Como ocurre con la altura, también el área total disminuyó significativamente ( $p < 0,01$ ) en los gru-

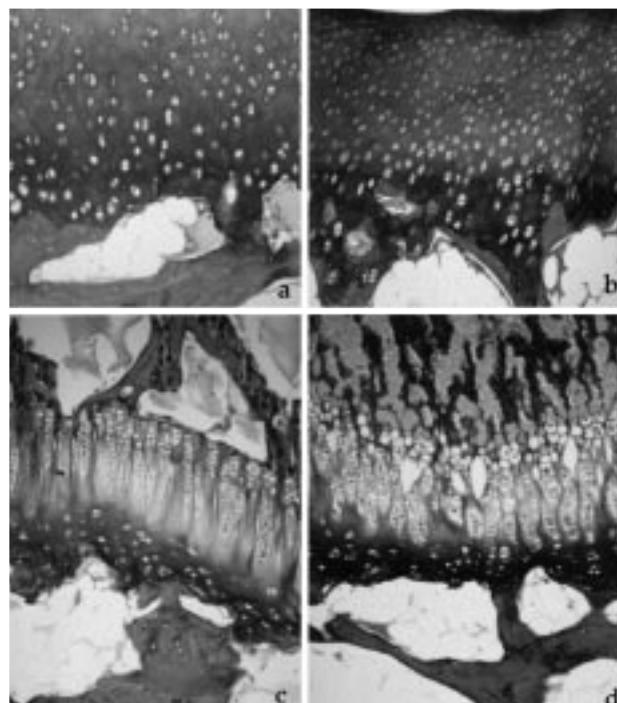


Figura 2. Cartílago articular a) control, b) elongado (3 mm/día) (Tricrómico de Masson,  $\times 100$ ). Cartílago de crecimiento, a) control, b) elongado (3 mm/día) (Tricrómico de Masson,  $\times 100$ )

pos I y III. Analizando el área por capas, observamos que las capas germinativa y proliferativa disminuyen en el grupo I ( $p < 0,01$ ) y en el grupo II ( $p < 0,05$ ). Por su parte, la capa hipertrófica aumenta su área en los grupos I y III ( $p < 0,05$ ).

El área de hueso trabecular (tabla 3) disminuyó, de forma altamente significativa, en todas las zonas estudiadas de los especímenes elongados a 1 mm/día ( $p < 0,001$ ). En el grupo II encontramos diferencias estadísticamente significativas en el área de hueso metafisario ( $p < 0,001$ ), de hueso pre-fisario ( $p < 0,001$ ) y post-fisario ( $p < 0,05$ ). En el grupo III, las diferencias fueron en el área de hueso subcondral ( $p < 0,01$ ), epifisario ( $p < 0,001$ ), pre-fisario ( $p < 0,001$ ) y metafisario ( $p < 0,05$ ).

## Discusión

Las fuerzas que actúan sobre un hueso en elongación han sido analizadas en varios estudios; son fuerzas pequeñas pero mantenidas durante un largo periodo de tiempo.<sup>7,14,29</sup> La elongación ósea es un mecanismo lento y progresivo que permite la regeneración ósea y la adaptación de las partes blandas aunque las fuerzas de reacción en las articulaciones vecinas aumentan considerablemente.<sup>21</sup> En la zona fibrosa central del regenerado y en el frente de

Tabla 1. Histomorfometría en el cartílago articular

	1 mm/día			2 mm/día			3 mm/día		
	Media	DE	p	Media	DE	p	Media	DE	p
Longitud Capa Superficial (μm)									
control	57,78	7,12	NS	58,18	9,78	NS	49,19	6,72	NS
elongado	59,04	7,11		55,27	7,69		50,95	9,20	
Longitud Capa Media (μm)									
control	337,65	133,11	NS	323,50	126,83	NS	361,67	155,18	NS
elongado	285,50	126,52		329,23	176,00		416,47	174,52	
Longitud Capa Profunda (μm)									
control	172,44	49,50	*	141,97	43,04	**	138,97	27,77	*
elongado	146,08	40,58		179,94	52,03		168,17	62,30	
Longitud Total (μm)									
control	567,87	166,92	NS	523,65	161,47	NS	549,83	174,07	NS
elongado	490,62	162,57		564,44	181,57		635,59	200,39	
Longitud Epifisaria (μm)									
control	2.633,39	347,62	NS	2.413,82	58,15	NS	2.461,96	113,23	NS
elongado	2.501,17	226,75		2.484,82	383,88		2.421,27	79,15	
Área Matriz Capa Superficial (μm <sup>2</sup> )									
control	12.097,4	2.929,5	NS	14.645,7	2.035,4	NS	58.251,5	77.975,4	NS
elongado	12.672,0	1.969,2		14.729,1	2.858,8		15.531,2	5.973,8	
Área Matriz Capa Media (μm <sup>2</sup> )									
control	160.549,8	35.280,9	NS	168.520,5	41.510,6	NS	156.675,5	42.439,2	NS
elongado	158.272,7	28.983,5		187.646,7	10.016,3		172.732,6	25.706,8	
Área Matriz Capa Profunda (μm <sup>2</sup> )									
control	119.523,6	24.361,6	NS	101.412,7	27.929,4	NS	104.589,2	19.383,8	NS
elongado	118.540,4	25.797,5		113.861,3	35.829,6		100.892,7	22.632,1	
Área Celular Capa Superficial (μm <sup>2</sup> )									
control	1.014,8	506,8	NS	1.064,5	746,9	NS	2.257,7	3.074,2	NS
elongado	1.329,2	688,0		947,1	531,7		765,0	558,7	
Área Celular Capa Media (μm <sup>2</sup> )									
control	6.979,9	3.475,5	**	4.989,4	3.460,3	NS	5.193,7	2.492,9	**
elongado	11.936,0	6.654,2		6.198,8	3.954,0		7.674,6	3.422,0	
Área Celular Capa Profunda (μm <sup>2</sup> )									
control	7.877,4	4.029,0	*	6.252,8	3.573,0	NS	6.112,0	2.976,5	NS
elongado	10.045,7	3.696,8		6.181,1	3.889,2		5.798,6	1.688,4	

p > 0,05 no significativo NS; p < 0,05 significativo \*; p < 0,01 muy significativo \*\*.

mineralización se han encontrado la mayoría de las células sanguíneas, viendo que alrededor de cada columna de hueso neoformado estaba rodeada por grandes sinusoides con osteoblastos en las superficies. Se ha encontrado una relación entre la velocidad de elongación y la vascularización en conejos, así como un aumento de vascularización con velocidades entre 0,7 y 1,3 mm/día, considerada la velocidad de elongación óptima.<sup>15</sup> A una velocidad menor (0,3 mm/día) no mejoró el potencial vascular y una velocidad más alta (2,7 mm/día) inhibió o redujo la angiogénesis en el tejido regenerado.<sup>1,16</sup> En el músculo, una velocidad de 1 mm/día produce pocos cambios degenerativos viendo alteraciones con velocidades mayores o cuando la elongación supera el 20% de la longitud inicial del hueso.<sup>6</sup>

Las acciones intermitentes estimulan el crecimiento mientras que cuando son continuas lo inhi-

ben.<sup>11</sup> Existe una relación entre las cargas y el grosor del cartílago articular.<sup>24</sup>

El cartílago está formado por células, condrocitos, imbuidos en una matriz extracelular abundante, por lo que las células contribuyen poco al volumen total de cartílago, algo menos del 10%,<sup>2</sup> siendo la matriz la que define sus propiedades mecánicas.<sup>17</sup> Hay trabajos experimentales en perros que han demostrado que una disminución de las cargas y del movimiento en una articulación produce una atrofia del cartílago, reduciendo su grosor y la síntesis de proteoglicanos.<sup>12,22</sup> El cartílago articular de la articulación de la rodilla en el cordero, no es tan grueso como en el hombre, presenta unos 2 mm de grosor y además, su densidad celular es mayor. Los condrocitos en su capa superficial son numerosos y más pequeños que en el caso del hombre.

**Tabla 2.** Histomorfometría en el cartílago de crecimiento

	1 mm/día			2 mm/día			3 mm/día		
	Media	DE	p	Media	DE	p	Media	DE	p
Longitud Capa Germinativa (μm)									
control	116,23	22,64	NS	110,10	25,93	*	93,87	21,17	NS
elongado	102,95	30,22		95,69	22,26		86,00	21,71	
Longitud Capa Proliferativa (μm)									
control	201,70	46,45	*	193,32	39,40	NS	243,15	49,56	***
elongado	176,46	35,34		193,58	39,39		194,37	30,06	
Longitud Capa Hipertrófica (μm)									
control	91,52	10,83	**	100,02	22,23	NS	96,87	17,77	NS
elongado	102,75	20,11		101,72	16,15		104,61	19,03	
Longitud Total (μm)									
control	409,45	43,20	*	403,44	45,72	NS	433,89	52,68	***
elongado	382,16	58,28		390,99	47,42		384,98	42,07	
Área Capa Germinativa (μm <sup>2</sup> )									
control	42.777,6	8.855,0	**	40.283,6	9.512,3	*	34.283,5	7.868,9	NS
elongado	35.878,2	9.468,0		35.110,3	8.438,7		30.445,2	9.170,6	
Área Capa Proliferativa (μm <sup>2</sup> )									
control	73.911,1	17.520,0	*	71.094,4	14.345,1	NS	87.425,3	17.190,1	***
elongado	64.904,2	12.122,0		71.443,1	15.101,3		70.964,3	11.054,5	
Área Capa Hipertrófica (μm <sup>2</sup> )									
control	34.068,7	4.520,6	*	36.482,3	7.815,7	NS	33.688,6	4.836,4	*
elongado	37.526,7	7.102,4		37.380,8	5.880,1		37.752,8	5.724,2	
Área Total (μm <sup>2</sup> )									
control	150.757,4	16.918,1	**	147.860,3	16.392,2	NS	155.397,4	18.369,8	**
elongado	138.309,1	17.367,4		143.934,2	17.903,7		139.162,4	15.286,8	

p > 0,05 no significativo NS; p < 0,05 significativo \*; p < 0,01 muy significativo \*\*; p < 0,001 altamente significativo \*\*\*.

**Tabla 3.** Histomorfometría hueso esponjoso

	1 mm/día			2 mm/día			3 mm/día		
	Media	DE	p	Media	DE	p	Media	DE	p
Área Hueso Subcondral (μm <sup>2</sup> )									
control	638.229,8	116.577,6	***	598.031,2	146.307,4	NS	591.594,9	121.708,7	**
elongado	440.825,3	175.726,7		556.219,3	193.696,1		494.372,3	116.688,9	
Área Hueso Pre-Epifisario (μm <sup>2</sup> )									
control	571.127,7	169.193,7	***	561.512,9	125.288,6	***	594.561,1	97.357,9	***
elongado	262.709,0	91.769,6		376.276,8	129.585,7		446.265,0	152.571,2	
Área Hueso Post-Epifisario (μm <sup>2</sup> )									
control	43.892,1	25.065,0	**	40.839,0	13.887,1	*	36.741,2	12.591,0	NS
elongado	28.006,2	9.987,9		30.644,6	13.547,6		36.437,9	20.443,0	
Área Hueso Epífisis (μm <sup>2</sup> )									
control	392.195,1	112.286,9	***	398.187,3	100.832,7	NS	406.663,3	148.465,4	***
elongado	206.622,1	57.593,1		335.598,7	129.484,8		272.790,1	81.819,2	
Área Hueso Metáfisis (μm <sup>2</sup> )									
control	420.508,7	142.390,5	***	450.587,4	166.548,2	***	478.028,6	207.127,4	*
elongado	247.677,3	98.570,2		304.338,7	109.923,2		357.702,8	156.270,8	

p > 0,05 no significativo NS; p < 0,05 significativo \*; p < 0,01 muy significativo \*\*; p < 0,001 altamente significativo \*\*\*.

Se han observado cambios morfológicos en el cartílago articular al poco tiempo de realizar una elongación femoral en perros<sup>26,27</sup> y tras elongar la tibia en conejos.<sup>13</sup> Stanitski, (1994), encontró, tras una elongación del 30% de la longitud del fémur, en pe-

rros, a una velocidad de 0,75 mm/día una fibrilación del cartílago articular, disminución de proteoglicanos en tres animales y necrosis del cartílago en otros dos, debido al aumento de las fuerzas más que a la falta de movilidad articular.<sup>25</sup> En otro estudio realizado

por el mismo equipo, también en perros, colocando un sistema protector de la articulación de la rodilla observaron una disminución de proteoglicanos sin evidencias de fibrilación o necrosis del cartílago articular.<sup>27</sup>

Se ha señalado un efecto negativo y rápido de la compresión continua sobre el cartílago articular con una tendencia a producir necrosis en el cartílago articular. Por su parte, Carter y cols.,<sup>3</sup> demostraron, con el método de elementos finitos, que la degeneración y la osificación del cartílago articular es un proceso que está regido por las solicitudes mecánicas, acelerándose con el aumento de las solicitudes en cizallamiento intermitentes e inhibiéndose por la aplicación de una presión hidrostática de forma intermitente. La ausencia de ésta lleva a una degeneración del cartílago y a un avance del frente de osificación desde el hueso subcondral hacia la superficie articular. Nakamura y cols.,<sup>18</sup> realizaron elongaciones en conejos a 1 mm/día, en dos veces y dando 120 vueltas/día, con una elongación del 10, 20 y 30% de la longitud del hueso. En todos los grupos elongados se observó un aumento de la concentración de glicosaminoglicanos.

En nuestro estudio no hemos encontrado una pérdida progresiva de cartílago articular en las tibias elongadas que muestre signos de degeneración articular y no podemos señalar si las diferencias encontradas son consecuencia de un proceso degenerativo temprano o alteraciones temporales producto de las fuerzas de compresión a las que está sometido el cartílago articular. Los cambios degenerativos iniciales del cartílago articular, cuando se aplican grandes fuerzas, se producen en la capa más superficial del mismo, sin embargo, cuando se efectúa una elongación las solicitudes aumentan de dentro hacia afuera, de la zona media del hueso hacia proximal y distal y esto puede explicar que haya alteraciones histomorfométricas en las capas más profundas del cartílago articular, en el cartílago de crecimiento y en el hueso esponjoso epifisario y metafisario. Los cambios más importantes encontrados en nuestro estudio han sido en el cartílago de crecimiento, especialmen-

te en animales elongados con la velocidad 1 mm/día. También se han encontrado diferencias en el grupo elongado a 3 mm/día y menos en el grupo con velocidad de 2 mm/día.

Con la elongación ósea se han visto cambios morfológicos en el cartílago de crecimiento, en conejos, como la reducción del grosor de las capas proliferativa e hipertrófica;<sup>13</sup> sin embargo, no se han descrito cambios fisarios después de las elongaciones óseas en revisiones clínicas.<sup>9</sup> Los daños que sufre el cartílago de crecimiento en la clínica son difíciles de evaluar ya que la elongación se realiza en extremidades con alteraciones del crecimiento y la técnica quirúrgica, compensa las alteraciones fisarias que se pueden producir.

Hemos observado una compensación en las capas del cartílago de crecimiento, ya que si bien hay una disminución de la capa germinal y proliferativa aparece un ligero aumento de la capa hipertrófica. La disminución de la altura y área de la capa germinativa, podrían explicar una disminución de la actividad fisaria por lo que se produce un aumento de su capacidad degenerativa.

El hueso trabecular también muestra alteraciones, especialmente en los animales elongados con poca velocidad, disminuyendo el grosor trabecular en todas las zonas analizadas. El incremento de las fuerzas sobre la epífisis y la metáfisis parece aumentar la reabsorción ósea bien por una mayor actividad de los osteoclastos o por inhibición de la función osteoblástica.

Se han encontrado cambios histomorfométricos en todos los grupos estudiados, la elongación de un hueso largo produce un aumento de las solicitudes, durante períodos de tiempo más o menos largos, en las extremidades de los huesos elongados. Es evidente una disminución del grosor del cartílago de crecimiento y del ancho de las trabéculas del hueso esponjoso de las zonas epifisarias y metafisarias. También hemos encontrado cambios en el grosor de la capa más profunda del cartílago articular. Todos estos cambios pueden ser temporales y adaptados a una nueva situación mecánica.

## Bibliografía

1. Aronson, J: Temporal and spatial increases in blood flow during distraction osteogenesis. *Clin Orthop*, 351: 124-131, 1994.
2. Buckwalter, JA: Articular cartilage. *AAOS Instructional Course XXXII*, CV Mosby, St Louis, 1983.
3. Carter, DR; Orr, TE; Fyhrie, DP, y Schurman DJ: Influences of mechanical stress on prenatal and postnatal skeletal development. *Clin Orthop*, 219: 237-250, 1987.
4. De Bastiani, G; Aldegheri, R; Renzi-Brivio, L, y Trivella, G: Limb lengthening by callus distraction (callostasis). *J Pediatr Orthop*, 7: 129-134, 1987.
5. Delloye, C; Delefortrie, G; Coutelier, L, y Vincent, A: Bone regenerate formation in cortical bone during distraction lengthening. *Clin Orthop*, 250: 34-42, 1990.

6. **Deyne de, PG; Hayatsu, K; Meyer, R; Paley, D, y Herzenberg, JE:** Muscle regeneration and fibrous-type transformation during distraction osteogenesis. *J Orthop Res*, 17: 560-570, 1999.
7. **Forriol, FI; Goenaga, I; Mora, G; Viñolas, J, y Cañadell, J:** Measurement of bone lengthening forces; an experimental model in the lamb. *Clinical Biomechanics*, 12: 17-21, 1997.
8. **Forriol, F; Iglesias, A; Arias, M; Aquerreta, D, y Cañadell, J:** Relationship between radiologic morphology of the bone lengthening formation and its complications. *J Pediatr Orthop-Part B*, 8: 292-298, 1999.
9. **Hope, PG; Crawford, EJ, y Catterall, A:** Bone growth following lengthening for congenital shortening of the lower limb. *J Pediatr Orthop*, 14: 339-342, 1994.
10. **Iglesias, A; Forriol, F; Arias, M; Aquerreta, D, y Cañadell, J:** Distracción ósea. Estudio radiológico. *Rev Ortop Traumatol*, 42: 308-317, 1998.
11. **Jones, IL; Klämfeldt, A, y Sandström, T:** The effect of continuous mechanical pressure upon the turnover of articular cartilage proteoglycans in vitro. *Clin Orthop*, 165: 283-289, 1982.
12. **Kiviranta, I; Tammi, M; Jurvelin, J; Säämänen, AM, y Helminen, HJ:** Moderate running exercise augments glycosaminoglycans and thickness of articular cartilage in the knee joint of young beagle dogs. *J Orthop Res*, 6: 188-195, 1988.
13. **Lee, DY; Chung, CY, y Choi, IH:** Longitudinal growth of the rabbit tibia after callotasis. *J Bone Joint Surg*, 75B: 898-903, 1993.
14. **Leong, JCY; Ma, RYP; Clark, JA; Mech, MI; Cornish, LS, y Yau, ACM:** Viscoelastic behavior of tissue in leg lengthening by distraction. *Clin Orthop*, 139: 102-109, 1979.
15. **Li, G; Berven, S; Simpson, H, y Triffit, T:** Expression of BMP-4 mRNA during distraction osteogenesis in rabbits. *Acta Orthop Scand*, 69: 420-5, 1998.
16. **Ilizarov, GA:** Clinical application of the tension-stress effect for limb lengthening. *Clin Orthop*, 250: 8, 1990.
17. **Mow, VC; Kuei, SC; Lai, WM, y Armstrong, CG:** Biphasic creep and stress relaxation of articular cartilage in compression: theory and experiments. *J Biomech Eng*, 102: 73-84, 1980.
18. **Nakamura, E; Mizuta, H, y Takagi, K:** Knee cartilage injury after tibial lengthening. Radiographic and histological studies in rabbits after 3-6 months. *Acta Orthop Scand*, 66: 313-316, 1995.
19. **Nakamura, E; Mizuta, H; Otsuka, Y; Mizumoto, Y, y Takagi, K:** Leg lengthening and glycosaminoglycans in the rabbit knee. *Acta Orthop Scand*, 66: 33-37, 1995.
20. **Nakamura, E; Mizuta, H; Sei, A, y Takagi, K:** Knee cartilage injury in leg lengthening. Histological studies in rabbits. *Acta Orthop Scand*, 64: 437-440, 1993.
21. **Olney, BW, y Jayaraman, G:** Joint reaction forces during femoral lengthening. *Clin Orthop*, 301: 64-67, 1994.
22. **Palmoski, MJ, y Brandt, KD:** Running inhibits the reversal of atrophic changes in canine knee cartilage after removal of a leg cast. *Arthritis Rheum*, 24: 1329-1337, 1981.
23. **Salter, RB:** The biologic concept of continuous passive motion of synovial joints. *Clin Orthop*, 242: 12-25, 1989.
24. **Sokoloff, L:** Aging and degenerative diseases affecting cartilage. En: Hall, BK (Ed). *Cartilage*, vol 3. Academic Press, New York, 1983.
25. **Stanitski, DF:** The effect of limb lengthening on articular cartilage. An experimental study. *Clin Orthop*, 301: 68-72, 1994.
26. **Stanitski, DF:** Treatment of deformity secondary to metabolic bone disease with the Ilizarov technique. *Clin Orthop*, 301: 38-41, 1994.
27. **Stanitski, DF; Roszman, K, y Torosian, M:** The effect of femoral lengthening on knee articular cartilage: the role of apparatus extension across the joint. *J Pediatr Orthop*, 16: 151-154, 1996.
28. **White, SH, y Kenwright, J:** The timing of distraction of an osteotomy. *J Bone Joint Surg*, 72B: 356-361, 1990.
29. **Wolfson, N; Hearn, TC; Thomason, JJ, y Armstrong, PF:** Force and stiffness changes during Ilizarov leg lengthening. *Clin Orthop*, 250: 58-60, 1990.