

Incluye videos

TOMO I

# La columna

según Rothman-Simeone  
y Herkowitz

Séptima edición

Steven R. Garfin  
Frank J. Eismont  
Gordon R. Bell  
Jeffrey S. Fischgrund  
Christopher M. Bono



# La columna

## según Rothman-Simeone y Herkowitz

SÉPTIMA EDICIÓN - VOLUMEN 1

### **Steven R. Garfin, MD**

Profesor y presidente distinguido  
Departamento de Cirugía Ortopédica  
Universidad de California, San Diego  
San Diego, California, EUA

### **Jeffrey S. Fischgrund, MD**

Profesor y presidente «Harry N. Herkowitz»  
Departamento de Cirugía Ortopédica  
Beaumont Health  
Royal Oak, Michigan, EUA

### **Frank J. Eismont, MD**

Profesor y presidente «Leonard M. Miller»  
Departamento de Cirugía Ortopédica  
Escuela de Medicina Miller de la Universidad  
de Miami  
Miami, Florida, EUA

### **Christopher M. Bono, MD**

Jefe, Servicio de Ortopedia para Columna  
Departamento de Cirugía Ortopédica  
Profesor asociado de Cirugía Ortopédica  
Escuela de Medicina de Harvard  
Hospital Brigham y de Mujeres  
Boston, Massachusetts, EUA

### **Gordon R. Bell, MD**

Personal emérito  
Exdirector, Centro para la Salud de la Columna  
Clínica Cleveland  
Cleveland, Ohio, EUA

2019



## VOLUMEN 1

### Sección I CIENCIA BÁSICA

<b>1 Desarrollo de la columna vertebral</b> .....	<b>3</b>
Christopher M. Bono, Amandeep Bhalla, Steven R. Garfin	
<b>2 Anatomía aplicada de la columna vertebral</b> .....	<b>17</b>
Christopher M. Bono, Amandeep Bhalla, Steven R. Garfin	
<b>3 Músculo esquelético: diseño arquitectónico, fisiología y función</b> .....	<b>57</b>
Samuel R. Ward, Anita Vasavada, Scott Delp, Richard L. Lieber	
<b>4 Musculatura espinal: anatomía y función</b> .....	<b>65</b>
Anita Vasavada, Samuel R. Ward, Scott Delp, Richard L. Lieber	
<b>5 Disco intervertebral: normal, envejecido y patológico</b> .....	<b>79</b>
Adam S. Olsen, James D. Kang, Nam Vo, Gwendolyn Sowa	
<b>6 Biomecánica del segmento de movimiento espinal</b> .....	<b>91</b>
William S. Marras, Prasath Mageswaran, Saifdar N. Khan, Ehud Mendel	
<b>7 Dolor de la raíz nerviosa en la hernia discal y la estenosis espinal</b> .....	<b>119</b>
Robert R. Myers, Björn Rydevik, Kjell Olmarker, Shinichi Kikuchi	
<b>8 Conceptos básicos en genética y degeneración del disco intervertebral y escoliosis</b> .....	<b>133</b>
Jason Pui Yin Cheung, Kenneth M.C. Cheung	
<b>9 Estudios de gemelos: aclarando las influencias genéticas y ambientales</b> .....	<b>145</b>
Michele C. Battié, Jaakko Kaprio	
<b>10 Resultados de la investigación de los trastornos de la columna vertebral</b> .....	<b>155</b>
Dipak B. Ramkumar, Adam M. Pearson, Kevin Spratt, James N. Weinstein	
<b>11 Análisis de elementos finitos</b> .....	<b>167</b>
Emily Walsh, M. Saeid Asadollahi, Raj Nangunoori, Jie Zheng, Daniel Cook, Boyle C. Cheng, Vijay K. Goel	

### Sección II DIAGNÓSTICO

<b>12 Historial del paciente y examen físico: cervical, torácico y lumbar</b> .....	<b>183</b>
Christopher J. Standaert, Stanley A. Herring, J. David Sinclair	
<b>13 Estudio por imágenes de la columna</b> .....	<b>201</b>
Todd M. Emch, Jeffrey S. Ross, Gordon R. Bell	
<b>14 Examen de electrodiagnóstico</b> .....	<b>241</b>
Jinny Tavee	
<b>15 Monitoreo neurofisiológico intraoperatorio de la columna vertebral</b> .....	<b>257</b>
Dileep R. Nair, Ajay Gupta	
<b>16 Identificación de los generadores de dolor</b> .....	<b>265</b>
Richard Derby, Lee Wolfer, Zachary McCormick	
<b>17 Discografía</b> .....	<b>301</b>
Eugene Carragee, Michael Stauff	

### Sección III ANATOMÍA QUIRÚRGICA Y ABORDAJES

<b>18 Columna cervical: abordajes quirúrgicos</b> .....	<b>317</b>
Hamid Hassanzadeh, Varun Puvanesarajah, Howard S. An	
<b>19 Anatomía de la columna cervicotorácica anterior</b> .....	<b>339</b>
Kenneth A. Hood, Shyam Shridharani	
<b>20 Abordajes laterales y posteriores para la columna lumbosacra</b> .....	<b>357</b>
Yu-Po Lee, Saif Aldeen Farhan, Nitin N. Bhatia	
<b>21 Fusión intersomática lumbar lateral</b> .....	<b>367</b>
Sina Pourtaheri, R. Todd Allen, John Attenello, Steven R. Garfin	
<b>22 Anatomía, resultados no quirúrgicos, inyecciones preoperatorias y prescripciones</b> .....	<b>383</b>
Jeffrey L. Chen, Timothy J. Furnish, Mark S. Wallace	

- 23 Dolor en la articulación sacroilíaca: fisiopatología y diagnóstico** ..... 397  
Alexandra Schwartz, Vinko Zlomislic, W. Carlton Reckling, Daniel Cher
- 24 Resultados del tratamiento no quirúrgico y quirúrgico para el dolor articular crónico sacroilíaco** ..... 405  
Alexandra Schwartz, Vinko Zlomislic, W. Carlton Reckling, Daniel Cher

## Sección IV PEDIÁTRICA

- 25 Dolor de espalda en niños y adolescentes** ..... 417  
Lori A. Karol, Lauren LaMont, Megan Mignemi
- 26 Escoliosis congénita** ..... 435  
Alexandra Miller Dunham, Paul D. Sponseller
- 27 Escoliosis idiopática** ..... 451  
Lawrence G. Lenke, Fernando E. Silva, Ronald A. Lehman Jr
- 28 Escoliosis neuromuscular** ..... 469  
Peter O. Newton, Pawel P. Jankowski, Burt Yaszay, Dennis R. Wenger, Scott J. Mubarak
- 29 Abordaje toracoscópico para condiciones de la columna** ..... 509  
Peter O. Newton, Kuan Wen Wu, Burt Yaszay
- 30 Cifosis pediátrica: enfermedad de Scheuermann y deformidad congénita** ..... 525  
Steven S. Agabegi, Dinesh P. Thawrani, Alvin H. Crawford
- 31 Espondilolisis y espondilolistesis** ..... 549  
Suken A. Shah
- 32 Traumatismo cervical, torácico y lumbar de la columna vertebral inmadura** ..... 565  
Jesse E. Bible, J. Alex Sielatycki, Joon Yung Lee, Clinton J. Devin
- 33 Columna vertebral inmadura y lesiones deportivas** ..... 589  
Jennifer J. Beck, Lyle J. Micheli
- 34 Anomalías congénitas de la columna cervical** ..... 609  
Robert F. Murphy, Daniel J. Hedequist, Michael P. Glotzbecker
- 35 Anomalías congénitas de la médula espinal** ..... 641  
Muhammad M. Abd-El-Barr, Kevin T. Huang, R. Michael Scott, Mark R. Proctor

## Section V TRASTORNOS DEGENERATIVOS CERVICALES

- 36 Trastornos de la columna cervical asociados con displasias esqueléticas y enfermedades metabólicas** ..... 663  
Bruce V. Darden II, Christopher O'Boynick, Jose Manuel Casamitjana

- 37 Fisiopatología, historia natural y síndromes clínicos de la enfermedad del disco cervical** ..... 677  
Sreeharsha V. Nandyala, A. Jay Khanna, Hamid Hassanzadeh
- 38 Mielopatías médicas** ..... 689  
Brandon L. Raudenbush, Olga Selioutski, Lawrence Samkoff, A. Jay Khanna, Addisu Mesfin
- 39 Manejo no quirúrgico de los trastornos degenerativos y discales** ..... 705  
Daniel Park, Jad G. Khalil, Michael P. Planalp
- 40 Manejo quirúrgico del dolor axial en el cuello** ..... 715  
Raj Rao, Satyajit Marawar
- 41 Radiculopatía cervical: manejo quirúrgico** ..... 727  
Sheeraz A. Qureshi, Steven J. McAnany, Dante Leven
- 42 Manejo de la mielopatía cervical: tratamiento quirúrgico** ..... 739  
Brett D. Rosenthal, Barrett S. Boody, Wellington K. Hsu, Alpesh A. Patel
- 43 Osificación del ligamento longitudinal posterior** ..... 763  
Bhavuk Garg, Alok Sharan
- 44 Reemplazo del disco cervical** ..... 771  
Abhishek Kannan, Wellington K. Hsu, Rick C. Sasso

## Sección VI ENFERMEDAD DEL DISCO TORÁCICO Y LUMBAR

- 45 Enfermedad del disco torácico** ..... 787  
Bradford L. Currier, Jason C. Eck, Frank J. Eismont, Barth A. Green
- 46 Enfermedad del disco lumbar** ..... 807  
Makarand V. Risbud, Gunnar B.J. Andersson
- 47 Herniaciones del disco lumbar** ..... 839  
Amandeep Bhalla, Christopher M. Bono, Andrew J. Schoenfeld, Steven R. Garfin
- 48 Reparación anular** ..... 869  
Gregory Lopez, Gunnar B.J. Andersson
- 49 Degeneración del disco lumbar: fusión intersomática lumbar anterior, degeneración y reemplazo del disco** ..... 873  
Robert Johnson, Richard D. Guyer
- 50 Fusión intersomática lumbar posterior** ..... 891  
William J. Molinari III, Nathan H. Lebowitz
- 51 Corpectomías posterolateral y lateral** ..... 907  
Raghav Badrinath, T. Barrett Sullivan, Steven R. Garfin, R. Todd Allen
- 52 Estabilización dinámica: ¿Qué es lo actual y qué es lo potencial?** ..... 917  
Dilip K. Sengupta

## VOLUMEN 2

## Section VII

## CIRUGÍA MÍNIMAMENTE INVASIVA

- 53 Fundamento de la cirugía mínimamente invasiva de columna** ..... 935  
Choll W. Kim, Steven R. Garfin
- 54 Abordajes posteriores mínimamente invasivos de la columna vertebral** ..... 945  
Choll W. Kim
- 55 Instrumentación lumbar posterior mínimamente invasiva** ..... 959  
Eiman Shafa, James D. Schwender
- 56 Técnicas de fusión lumbar posterior mínimamente invasivas** ..... 969  
D. Greg Anderson, Jonathan D. Krystal
- 57 Discectomía lumbar endoscópica posterolateral** ..... 983  
Christopher A. Yeung, Anthony T. Yeung
- 58 Dispositivos descompresivos de la apófisis interespinosa** ..... 995  
Clifford B. Tribus
- 59 Técnicas mínimamente invasivas de la columna cervical** ..... 1001  
Scott I. Lee, Vinko Zlomislac
- 60 Direcciones futuras en cirugía mínimamente invasiva de columna** ..... 1011  
Xiaobang Hu, Isador H. Lieberman

## Section VIII

## ESTENOSIS ESPINAL

- 61 Estenosis espinal: fisiopatología, diagnóstico clínico y diagnóstico diferencial** ..... 1019  
Chetan K. Patel, Eric Truumees
- 62 Manejo no quirúrgico de la estenosis espinal lumbar** ..... 1033  
Daniel Mazanec
- 63 Manejo quirúrgico de la estenosis espinal lumbar** ..... 1039  
Peter B. Derman, Jeffrey Rihn, Todd J. Albert
- 64 Espondilolistesis degenerativa** ..... 1059  
Andrew Z. Mo, Gordon R. Bell, Darren R. Lebl

## Section IX

## FUSIÓN ESPINAL E INSTRUMENTACIÓN

- 65 Técnicas y complicaciones de la cosecha de injertos óseos** ..... 1077  
Kenny Kwan, Kenneth M.C. Cheung

- 66 Principios de la fusión ósea** ..... 1085  
Terri A. Zachos, Nicolas S. Piuze, Thomas Mroz, Krzysztof B. Siemionow, George F. Muschler
- 67 Sustitutos óseos: ciencias básicas y aplicaciones clínicas** ..... 1123  
Jeffrey C. Wang, Zorica Buser
- 68 Estimulación eléctrica para la fusión espinal** ..... 1137  
Ilyas S. Aleem, Paul Glazer, Mohit Bhandari
- 69 Instrumentación cervical: anterior y posterior** ..... 1143  
Eric Truumees
- 70 Instrumentación torácica y lumbar: anterior y posterior** ..... 1187  
Eric Truumees

## Section X

## DEFORMIDAD EN EL ADULTO

- 71 Espondilolistesis isquémica en el adulto** ..... 1229  
Brian Kwon, Neel Shah, David H. Kim
- 72 Escoliosis en adultos** ..... 1239  
David Nelles, Kamran Majid
- 73 Desequilibrio sagital fijo** ..... 1261  
Evan J. Smith, Christine Piper, Joseph R. O'Brien

## Section XI

## TRAUMATISMO DE COLUMNA VERTEBRAL

- 74 Ciencia básica de la lesión de la médula espinal** ..... 1275  
Alexandre Rasouli
- 75 Lesiones de la columna cervical superior** ..... 1285  
Bobby K.-B. Tay, Frank J. Eismont
- 76 Lesiones en la parte baja de la columna cervical** ..... 1311  
Paul A. Anderson
- 77 Lesiones de la columna torácica y lumbar** ..... 1333  
Joseph P. Gjolaj, Seth K. Williams
- 78 Fracturas sacras** ..... 1365  
Carlo Bellabarba, Richard A. Lindtner, Richard J. Bransford
- 79 Tratamiento de pacientes con lesión de la médula espinal aguda** ..... 1389  
Rajiv Saigal, Matthew F. Gary, Allan D. Levi
- 80 Lesiones de la arteria vertebral asociadas con el traumatismo de la columna cervical** ..... 1399  
Adam L. Shimer, Alexander R. Vaccaro
- 81 Ortesis espinal para la enfermedad traumática y degenerativa** ..... 1409  
Michael J. Vives

<b>82</b>	<b>Rehabilitación de las lesiones de la médula espinal</b> .....	<b>1431</b>
	Andrew L. Sherman, Kevin L. Dalal	

## Section XII

### AFECCIONES VERTEBRALES

<b>83</b>	<b>Trastornos artríticos</b> .....	<b>1449</b>
	David G. Borenstein	
<b>84</b>	<b>Manejo quirúrgico de la artritis reumatoide</b> .....	<b>1467</b>
	Shari Cui, Scott D. Daffner, Sanford E. Emery	
<b>85</b>	<b>Espondilitis anquilosante</b> .....	<b>1487</b>
	Dheera Ananthakrishnan, Serena S. Hu	
<b>86</b>	<b>Tumores de la columna vertebral</b> .....	<b>1503</b>
	Umesh Metkar, Swamy Kurra, William F. Lavelle	
<b>87</b>	<b>Infecciones de la columna vertebral</b> .....	<b>1525</b>
	Jason C. Eck, Choll W. Kim, Bradford L. Currier, Frank J. Eismont	
<b>88</b>	<b>Trastornos óseos metabólicos de la columna vertebral</b> .....	<b>1585</b>
	Joseph M. Lane, Matthew R. Cohn, Tyler Kreitz, Mark F. Kurd	
<b>89</b>	<b>Osteoporosis: estrategias quirúrgicas</b> .....	<b>1611</b>
	Frank M. Phillips, Mark F. Kurd, Gregory D. Schroeder, Tyler Kreitz	

## Section XIII

### MÉDULA ESPINAL

<b>90</b>	<b>Tumores intradurales</b> .....	<b>1627</b>
	Ashish H. Shah, Jeremiah N. Johnson, Barth A. Green	
<b>91</b>	<b>Infecciones intradurales espinales</b> .....	<b>1641</b>
	Walter J. Jermakowicz, Samuel H. Cass, Allan D. Levi	
<b>92</b>	<b>Malformaciones vasculares de la médula espinal</b> .....	<b>1659</b>
	John E. O'Toole, Paul C. McCormick	
<b>93</b>	<b>Anatomía vascular de la columna vertebral, imagenología y tratamiento endovascular de enfermedades vasculares espinales</b> .....	<b>1673</b>
	J. Diego Lozano, Ajit S. Puri, Ajay K. Wakhloo	
<b>94</b>	<b>Siringomielia</b> .....	<b>1709</b>
	David M. Benglis Jr, Andrew Jea, Steve Vanni, Ashish H. Shah, Barth A. Green	

## Section XIV

### COMPLICACIONES DE LA CIRUGÍA ESPINAL

<b>95</b>	<b>Lesiones intraoperatorias de la médula espinal y la raíz nerviosa</b> .....	<b>1727</b>
	Theodore D. Koreckij	
<b>96</b>	<b>Lesiones de la columna vertebral</b> .....	<b>1739</b>
	Arya G. Varthi, Glenn Russo, Peter G. Whang	

<b>97</b>	<b>Complicaciones vasculares en la cirugía de columna vertebral</b> .....	<b>1747</b>
	Matthew L. Webb, Jonathan N. Grauer	
<b>98</b>	<b>Complicaciones de instrumentación</b> .....	<b>1783</b>
	Eric Truumees	
<b>99</b>	<b>Infecciones espinales postoperatorias</b> .....	<b>1807</b>
	Sohrab Pahlavan, Yu-Po Lee, Nitin N. Bhatia	
<b>100</b>	<b>Pseudoartrosis</b> .....	<b>1827</b>
	Neil N. Patel, Martin H. Pham, Andre M. Jakoi, Jeffrey C. Wang	
<b>101</b>	<b>Enfermedad del segmento adyacente</b> .....	<b>1839</b>
	David M. Montgomery	
<b>102</b>	<b>Síndrome de la cirugía fallida de espalda: perspectiva histórica</b> .....	<b>1851</b>
	Richard W. Easton	

## Section XV

### CIRUGÍA FALLIDA

<b>103</b>	<b>Cirugía de revisión de columna vertebral</b> .....	<b>1867</b>
	Michael J. Vives, Spencer Hauser, Saad B. Chaudhary	
<b>104</b>	<b>Artroplastia total de disco fallida</b> .....	<b>1889</b>
	Andrew K. Simpson, Jack E. Zigler	
<b>105</b>	<b>Deformidad postoperatoria de la columna cervical</b> .....	<b>1903</b>
	Andrew J. Pugely, Comron Saifi, K. Daniel Riew	
<b>106</b>	<b>Aracnoiditis y fibrosis epidural</b> .....	<b>1935</b>
	Robert F. Heary, Antonios Mammis	

## Section XVI

### DOLOR CRÓNICO Y REHABILITACIÓN

<b>107</b>	<b>Dolor crónico: ciencia básica</b> .....	<b>1943</b>
	Aldric Hama, Shyam Gajavelli, Elizabeth A. Dugan, Jacqueline Sagen	
<b>108</b>	<b>Estrategias psicológicas para el dolor crónico</b> .....	<b>1961</b>
	Sara Davin, Xavier F. Jimenez, Edward C. Covington, Judith Scheman	
<b>109</b>	<b>Estrategias farmacológicas para el dolor de espalda y radiculopatía</b> .....	<b>1973</b>
	Yashar Eshraghi, Nagy A. Mekhail	
<b>110</b>	<b>Terapia física: arte y ciencia de la práctica</b> .....	<b>1983</b>
	Eric A.K. Mayer, Ryan A. Tauzell	
<b>111</b>	<b>Restauración funcional en el dolor espinal crónico</b> .....	<b>1993</b>
	Tom G. Mayer, Randy Neblett, Peter B. Polatin	
<b>112</b>	<b>Procedimientos quirúrgicos para el control del dolor crónico</b> .....	<b>2023</b>
	F. Todd Wetzel, Charles N. Munyon, Michael Saulino	

## 4

## CAPÍTULO

## Musculatura espinal: anatomía y función

Anita Vasavada  
Samuel R. Ward  
Scott Delp  
Richard L. Lieber

### Anatomía y arquitectura de la musculatura espinal

La arquitectura de los músculos espinales es compleja y dramáticamente diferente de la arquitectura de los músculos de las extremidades. Por ejemplo, en lugar de distintas inserciones tendinosas para el hueso, muchos músculos espinales tienen muy poco tendón en sus extremos, pero tienen una disposición compleja de tendones internos y aponeurosis. Sus fijaciones son generalmente amplias, y muchos músculos espinales se ramifican y tienen inserciones en múltiples niveles vertebrales. Algunos músculos espinales tienen fascículos cortos y una gran fasciculación, mientras que otros tienen fascículos largos y paralelos. Todos estos factores afectan la capacidad de generación de fuerza y momento de los músculos (como se describe en el Capítulo 3), que en última instancia influye en el control del movimiento espinal y los mecanismos de lesión.

Los músculos espinales se pueden dividir en músculos intrínsecos, que conectan las vértebras entre sí o con el cráneo, y los músculos extrínsecos, que unen las vértebras a las extremidades, la cintura escapular, la caja torácica o la pelvis. Embriológicamente, los músculos intrínsecos se originan en el epímero y los músculos extrínsecos se originan en el hipómero. Los músculos intrínsecos reciben inervación de las ramas dorsales de los nervios espinales, mientras que los músculos extrínsecos están inervados por las ramas ventrales de los nervios espinales y generalmente tienen funciones relacionadas más con la porción proximal de las extremidades o la respiración.

### Músculos espinales intrínsecos en la columna lumbar, torácica o cervical

Los músculos intrínsecos de la columna están dominados por el erector de la columna, un grupo de músculos interdigitados que abarcan toda la longitud de la columna vertebral, desde el sacro y la cresta ilíaca hasta el cráneo. Otro grupo importante de músculos, los multifidos, son más cortos y más profundos, y se describen con más detalle más adelante. En la región toracolumbar, los músculos erector de la columna y multifido comprenden la mayor parte de la musculatura espinal. Estas dos unidades funcionales distintas tienen grandes

diferencias en la inervación que probablemente resulten en diferencias funcionales significativas,<sup>1</sup> aunque la función biomecánica detallada de estos grupos permanece parcialmente elucidada.<sup>2</sup> En lo profundo del multifido se encuentran incluso músculos más pequeños: los rotadores, interespinales e intertransversas. La región cervical está compuesta de otros músculos intrínsecos únicos (descritos más adelante).

El erector de la columna comúnmente se considera compuesto por tres músculos; de medial a lateral, son el espinoso, longísimo e iliocostal. La anatomía y la arquitectura de estos músculos varían entre los diferentes niveles de la columna vertebral. Por lo tanto, las palabras «lumbar», «torácica», «del cuello» y/o «de la cabeza» a menudo se agregan al nombre del músculo para describir la anatomía con mayor precisión. Aunque hay diversas definiciones de la composición del erector de la columna, el estudio de MacIntosh y Bogduk<sup>2</sup> proporciona la anatomía descriptiva más completa del erector lumbar de la columna hasta la fecha; Delp y colegas<sup>3</sup> proporcionaron las primeras mediciones arquitectónicas de estos músculos. Una descripción de la continuación del erector de la columna vertebral en la región cervical es discutida por Kamibayashi y Richmond.<sup>4</sup>

El músculo espinoso es la división más medial del erector de la columna. MacIntosh y Bogduk<sup>2</sup> describen al espinoso como principalmente aponeurótico en la región lumbar, pero Delp y cols.<sup>3</sup> obtuvieron mediciones de la arquitectura de las fibras musculares en la columna dorsal (Tabla 4.1). El espinoso está generalmente ausente en la región cervical.

De caudal a rostral, el longísimo consiste en longísimo torácico, cervical y de la cabeza. El longísimo torácico se divide en porciones lumbares y torácicas. Los fascículos lumbares del longísimo torácico (longísimo torácico pars lumbar) se componen de cinco bandas que surgen de las apófisis transversas lumbares y se unen de forma caudal sobre la cresta ilíaca (Fig. 4.1A). Cada banda que surge de las vértebras L1 a L4 es en realidad un pequeño músculo fusiforme que tiene un tendón de inserción caudal alargado y aplanado. Las bandas de niveles más rostrales se adhieren más medialmente a la cresta ilíaca. La yuxtaposición de estos tendones ubicados caudalmente forma la aponeurosis intermuscular lumbar. Los fascículos del componente torácico del longísimo torácico (longísimo torácico pars torácico) surgen de todas las apófisis transversas torácicas y de la mayoría de las costillas, y se unen a las apófisis espinosas lumbares, el sacro o el ilion. Estos son músculos largos y delgados con tendones caudales

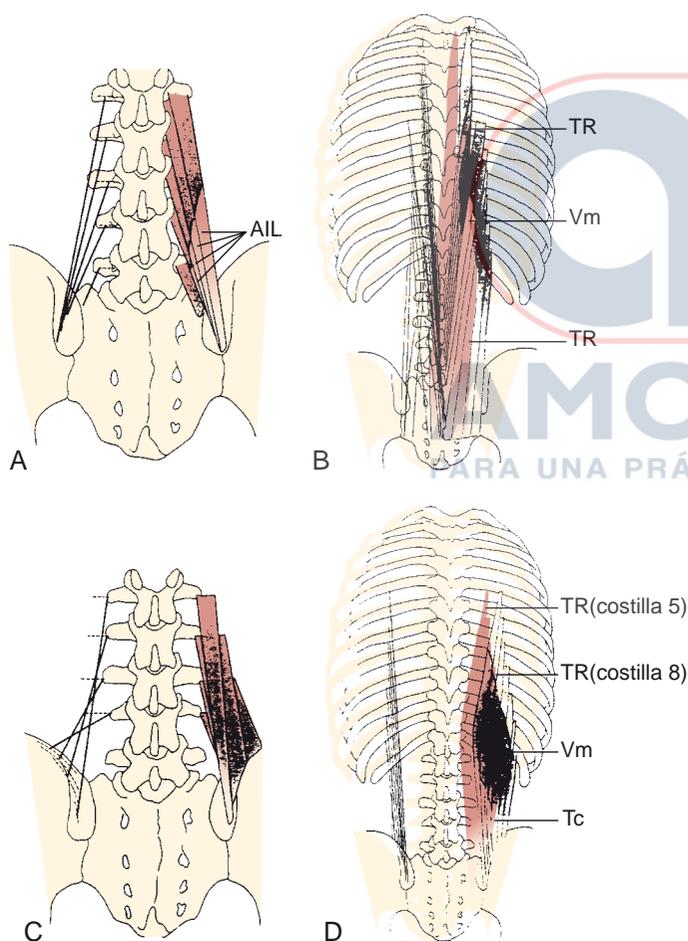
TABLA 4.1 Datos arquitectónicos de los músculos recto abdominal y de la columna lumbar

Músculo	Longitud musculotendón (cm)	Longitud músculo (cm)	Longitud del fascículo (cm)	Ángulo de fasciculación (grados)	Longitud de sarcómero ( $\mu\text{m}$ )	Longitud óptima de fascículo (cm)	Masa de fibra muscular (g)	ASTF ( $\text{cm}^2$ )
Recto abdominal	35,9 (1,9)	34,3 (2,7)	28,3 (3,6)	0 (0)	2,83 (0,28)	28 (4,2)	92,5 (30,5)	2,6 (0,9)
Cuadrado lumbar (proximal)	11,7 (1,7)	10,7 (1,3)	7,3 (1,3)	7,4 (2,9)	2,39 (0,21)	8,5 (1,5)	13,3 (5,2)	1,6 (0,6)
Cuadrado lumbar (distal)	9,3 (1,3)	8,1 (1,2)	4,7 (0,5)	7,4 (6,2)	2,37 (0,20)	5,6 (0,9)	7,3 (2,4)	1,2 (0,4)
Espinoso torácico	24,7 (1,5)	18,2 (3,2)	5,2 (0,4)	16 (3,8)	2,26 (0,17)	6,4 (0,6)	10,2 (6)	1,6 (0,9)
Longísimo torácico	42,6 (5,5)	34,7 (4,8)	9,6 (1,2)	12,6 (5,8)	2,31 (0,17)	11,7 (2,1)	73,4 (31)	5,9 (2,5)
Iliocostal lumbar	43,8 (4,3)	33,1 (9)	12 (1,7)	13,8 (4,5)	2,37 (0,17)	14,2 (2,1)	60,9 (29,9)	4,1(1,9)
Multífido	NA	NA	4,8 (1,7)	18,4 (4,2)	2,26 (0,18)	5,7 (1,8)	73 (12,4)	23,9 (8,4)

Los valores son medios (desviación estándar).

NA, no aplica; ASTF, área fisiológica de sección transversal.

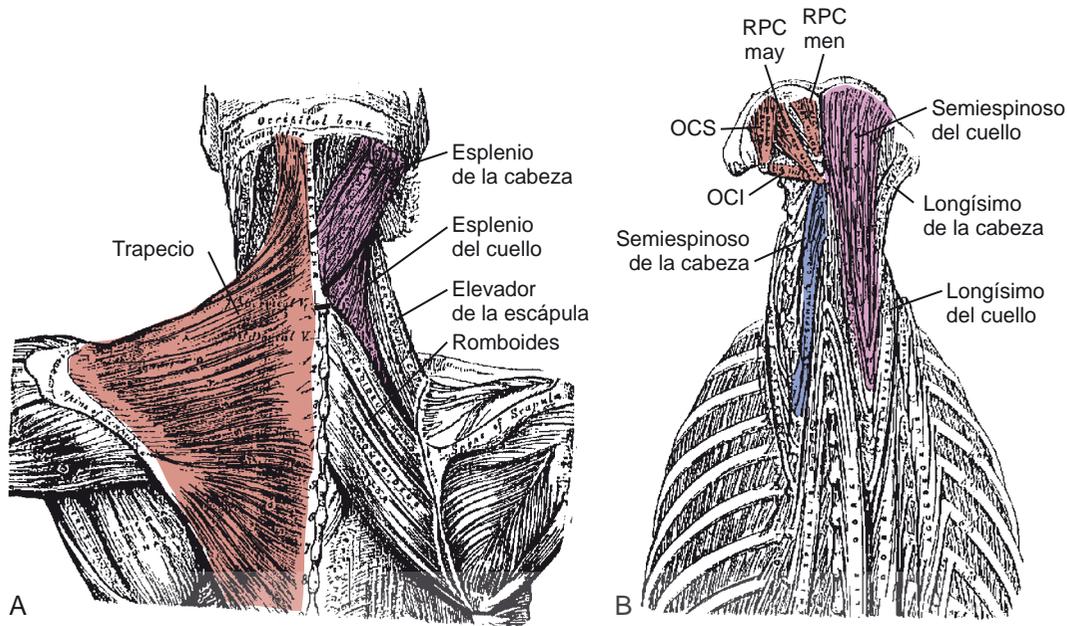
Modificado de Delp SL, Suryanarayanan S, Murray WM, et al. Architecture of the rectus abdominis, quadratus lumborum, and erector spine. *J Biomech* 2001;34:371-375; y Ward, SR, Kim CW, Eng CM, et al. Architectural analysis and intraoperative measurements demonstrate the unique design of the multifidus for lumbar spine stability. *J Bone Joint Surg Am.* 2009;91:176-185.



**FIG. 4.1** Esquema de regiones (A) lumbar y (B) torácica de longísimo torácico (división medial del erector de la columna vertebral) y esquema de regiones (C) lumbar y (D) torácica de iliocostal lumbar (división lateral del erector de la columna vertebral). Tc, tendón caudal; Vm, vientre muscular; AIL, aponeurosis intermuscular lumbar; TR, tendón rostral. (De Bogduk N. A reappraisal of the anatomy of the human lumbar erector spinae. *J Anat.* 1980;131:525-540; y MacIntosh JE, Bogduk N. The morphology of the lumbar erector spinae. *Spine.* 1987; 12: 658-668.)

pronunciados que se yuxtaponen para formar la fuerte aponeurosis del erector de la columna (véase LIA y Ct en la Fig. 4.1A-B), que limita los músculos paraespinales lumbares dorsalmente. En la región torácica superior y cervical, el longísimo del cuello conecta las apófisis transversas de las vértebras torácicas y cervicales, mientras que el longísimo de la cabeza se origina en apófisis transversas e inserciones en la apófisis mastoidea del cráneo (Fig. 4.2B).

Los fascículos lumbares del iliocostal lumbar (iliocostal lumbar pars lumbar) se encuentran laterales a los músculos longísimo torácico que surgen de la punta de las apófisis transversas de las vértebras L1 a L4 en la región lumbar, por lo tanto, se componen de cuatro bandas pequeñas y anchas (véase Fig. 4.1C) que se unen a la fascia toracolumbar y la cresta ilíaca. Los fascículos torácicos de iliocostal lumbar (iliocostal lumbar pars torácico) surgen de las costillas y se unen a la espina ilíaca y a la cresta, formando la parte lateral de la aponeurosis del erector de la columna. En contraste con el longísimo torácico más medialmente localizado, los tendones caudales son menos prominentes, dando al iliocostal lumbar un aspecto mucho más carnoso. Caudal a la costilla 10, el iliocostal lumbar y el longísimo torácico se encuentran uno al lado del otro, formando la aponeurosis del erector de la columna. Rostral a la costilla 9 o 10, iliocostal torácico separa el iliocostal lumbar y el longísimo torácico. En la región torácica superior y cervical, iliocostal del cuello conecta las costillas con las apófisis transversas de las vértebras cervicales. MacIntosh y Bogduk midieron las longitudes de los músculos y tendones en las porciones torácicas del longísimo torácico y iliocostal lumbar (Tabla 4.2).<sup>2</sup> También Delp y cols.<sup>3</sup> han informado la arquitectura detallada del erector de la columna lumbar, que incluye la longitud del tendón y el fascículo muscular, longitud del sarcómero y áreas fisiológicas transversales (AFT) (véase Tabla 4.1). Descubrieron que las longitudes de los fascículos eran aproximadamente 30 % de las longitudes musculares de estos músculos y que las longitudes del sarcómero medidas en cadáveres en posición supina generalmente eran más cortas que la longitud óptima, lo que puede implicar que el erector de la columna es capaz de desarrollar mayor fuerza en posiciones alargadas (es decir, en flexión).<sup>5</sup> Por lo tanto, este músculo está diseñado para restaurar la extensión de la columna desde la flexión. Aunque el longísimo y



**FIG. 4.2** Vista posterior de los músculos del cuello. (A) El lado izquierdo muestra el músculo superficial, el trapecio. Debajo del trapecio se encuentran el esplenio de la cabeza, el esplenio del cuello, el elevador de la escápula y los romboides. (B) El lado derecho muestra el semiespinoso de la cabeza, longísimo de la cabeza y longísimo del cuello, que se encuentran en la profundidad del esplenio de la cabeza. El lado izquierdo muestra semiespinoso del cuello y los músculos suboccipitales, que se encuentran debajo de semiespinoso de la cabeza. OCI, oblicuo de la cabeza inferior; OCS, oblicuo de la cabeza superior; RPC may, recto posterior mayor de la cabeza; RPC men, recto posterior menor de la cabeza. (Modificado de Gray H. *Gray's Anatomy*. Nueva York, Gramercy Books, 1977.)

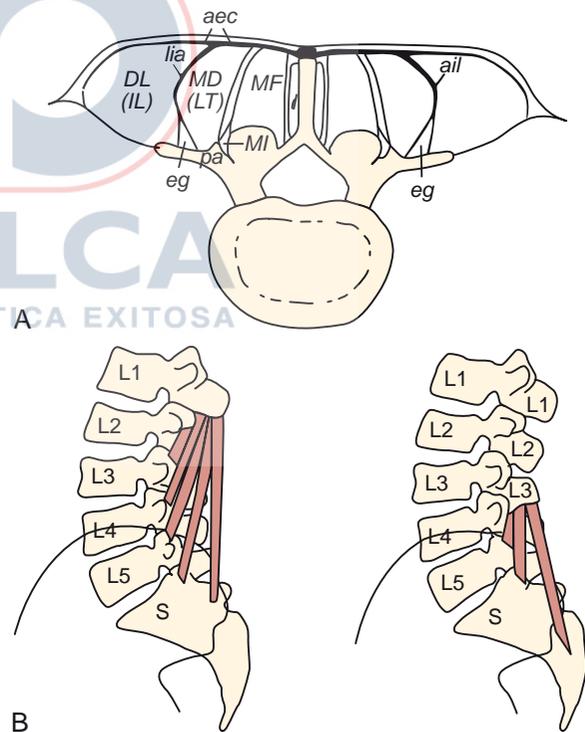
**TABLA 4.2** Datos de longitud de los músculos y tendones del erector de la columna lumbar

Músculo	Longitud del vientre muscular (cm)	Longitud del tendón rostral (cm)	Longitud del tendón caudal (cm)
Longísimo torácico pars torácico	9-12	3-4	Hasta 24
Iliocostal lumbar pars torácico	10-13	12-15	18-19

De MacIntosh JE, Bogduk N. The morphology of the lumbar erector spinae. *Spine*. 1987;12:658-668.

el iliocostal pueden tener diferentes funciones debido a su ubicación anatómica medial-lateral, sus distribuciones de tipo de fibra son similares, con aproximadamente 60 % de fibras tipo 1,<sup>6</sup> el tipo de fibra muscular más lenta. La anatomía detallada del erector de la columna proporcionada por MacIntosh y Bogduk<sup>2</sup> también proporciona información importante para estudios electromiográficos. Debido a que los fascículos torácicos del longísimo torácico e iliocostal lumbar se encuentran sobre los fascículos lumbares, los electrodos colocados a niveles vertebrales lumbares pueden no representar la actividad de los fascículos directamente unidos a las vértebras lumbares.

Los músculos multifidos lumbares consisten en múltiples bandas separadas que surgen de cada apófisis espinosa vertebral y lámina, y se insertan de dos a cuatro segmentos por debajo del nivel de origen (Fig. 4.3B). El fascículo más corto de cada músculo se inserta en la apófisis mamilar de la vértebra localizada en dos segmentos caudales, mientras que los fascículos más largos y más superficiales se insertan secuencialmente en las vértebras posteriores tres o más segmentos inferiores (véase la Fig. 4.3). Por lo tanto, la banda más corta del multifido que surge de L1 se inserta en L3; las bandas posteriores se insertan



**FIG. 4.3** Disposición esquemática del músculo multifido en (A) corte transversal y (B) sección longitudinal. aa, apófisis accesaria; aec, aponeurosis del erector de la columna; eg, espacio lleno de grasa; I, interespinoso; IL, iliocostal lumbar; MI, medial intertransverso; DL, división lateral; ail, aponeurosis intermuscular lumbar; MF, multifido. (De Bogduk N. A reappraisal of the anatomy of the human lumbar erector spinae. *J Anat*. 1980; 131: 525-540.)

secuencialmente en L4, L5 y el sacro. Los músculos multifidos que surgen de las vértebras lumbares inferiores consisten en menos fascículos

debido a que disminuye el número de vértebras hacia el origen. Es de destacar el hecho de que todos los músculos multifidos que surgen de un nivel dado están inervados por la rama medial de las ramas dorsales primarias del nervio espinal a partir de un solo segmento (es decir, cada banda del músculo multifido está inervada de una sola rama dorsal). Esta inervación unisegmental tiene implicaciones para la electromiografía y el diagnóstico del dolor en las articulaciones cigapofisarias relacionado con la actividad anormal en los multifidos. Por ejemplo, las fibras mediales de los multifidos (es decir, aquellas inmediatamente laterales a una apófisis espinosa dada) surgen de la apófisis espinosa directamente arriba, mientras que las de los niveles superiores serán más laterales, pero todas las fibras del multifido que surge de una vértebra particular son inervadas por el mismo nervio.<sup>7</sup>

En la región cervical, los fascículos multifidos de las apófisis espinosas y las láminas de C2, C3 y C4 se unen a las cápsulas facetarias de dos apófisis articulares vertebrales adyacentes de C4 a C7; los fascículos de las apófisis espinosas y las láminas de C4 a C7 se unen a las apófisis transversas de las vértebras torácicas superiores.<sup>8</sup> La acción principal del multifido es la extensión, pero la naturaleza multisegmentaria del músculo así como la orientación tridimensional compleja las direcciones craneocaudal y mediolateral hacen de esta afirmación una sobresimplificación burda.<sup>9</sup> El multifido no es necesariamente un motor principal de la columna dorsal; más bien, su función es probable que produzca pequeñas estabilizaciones vertebrales. Su distribución de tipo de fibra de aproximadamente 60 % de fibras de tipo 1 respalda este papel postural. De hecho, las distribuciones similares del tipo de fibra entre los músculos multifidos y erectores de la columna sugieren funciones similares para estos dos grupos musculares.<sup>6,10</sup>

Un estudio reciente del músculo multifido reveló tres factores de diseño principales que le sirven bien para estabilizar la columna lumbar.<sup>5</sup> En primer lugar, la arquitectura del multifido está muy fasciculada, con fibras que se extienden solo alrededor de 20 % de la longitud del músculo. Por lo tanto, se empaqueta un gran número de fibras musculares en un volumen pequeño y, aunque el multifido tiene una masa menor en comparación con otros extensores lumbares, se predice que creará la mayor fuerza de extensión lumbar en un factor de dos (véase Tabla 4.1). Segundo, las pruebas mecánicas directas de las células musculares del multifido y el tejido conjuntivo extracelular revelaron que, si bien las fibras del multifido tienen las mismas propiedades mecánicas que los músculos de las extremidades, los haces de fibras, que incluyen tejido conjuntivo extracelular, son casi dos veces más rígidos. Por lo tanto, el multifido tiene una alta capacidad elástica pasiva que le conviene para resistir pasivamente la flexión de la columna lumbar. En tercer lugar, la longitud del sarcómero del músculo multifido, medida intraoperatoriamente, es relativamente corta cuando la columna está extendida, lo que sugiere que el músculo se fortalece a medida que se alarga. En otras palabras, a medida que la columna vertebral se flexiona, la fuerza de los multifidos aumenta, adaptándola para restaurar los ángulos de la columna vertebral hacia posiciones neutras o más extendidas.

Profundo al multifido hay músculos más pequeños que abarcan uno o dos segmentos vertebrales. Los rotadores se unen desde las apófisis transversas caudales a la base de las espinas rostrales a uno o dos segmentos de distancia. Los rotadores son prominentes en la región torácica; aunque algunos autores afirman que existen en la región lumbar,<sup>11,12</sup> MacIntosh y Bogduk no encontraron ningún músculo profundo en el multifido lumbar.<sup>7</sup> Del mismo modo, Anderson y cols.<sup>8</sup> no encontraron rotadores en la región cervical. Las interespinosas e intertransversas (que se encuentran en las regiones

lumbar y cervical) conectan las apófisis espinosas y transversas, respectivamente, de las vértebras adyacentes.

## Músculos espinales intrínsecos específicos de la columna cervical

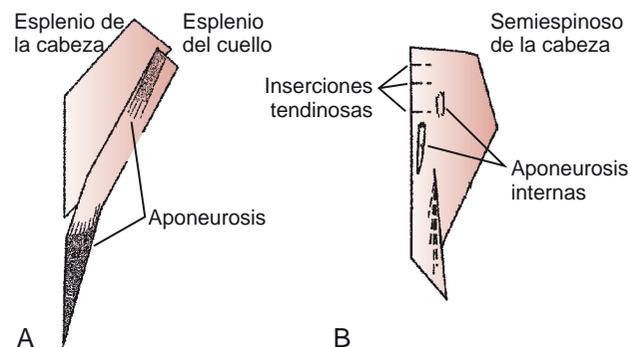
Debido a las diferentes demandas funcionales en la columna cervical (p. ej., grandes movimientos de la cabeza), esta región tiene músculos intrínsecos adicionales. Kamibayashi y Richmond cuantificaron la anatomía y la arquitectura de los músculos del cuello (Tabla 4.3).<sup>4</sup>

### Esplenio de la cabeza y cuello

El esplenio de la cabeza se origina en las apófisis espinosas de las vértebras cervicales inferiores y torácicas superiores, y se inserta en el cráneo cerca de la apófisis mastoidea (véase Fig. 4.2A). Contiguo, ligeramente más profundo y, a veces, inseparable está el esplenio del cuello, que se origina en las apófisis espinosas torácicas y se inserta en las apófisis transversas cervicales. Aunque tanto el esplenio de la cabeza como el esplenio del cuello funcionan en extensión, flexión lateral y rotación axial, el esplenio de la cabeza se orienta más oblicuamente que el esplenio del cuello, proporcionando una mayor capacidad de rotación axial para los movimientos del cráneo en relación con las vértebras. Las longitudes de los fascículos del esplenio de la cabeza y esplenio del cuello son similares, pero las longitudes de los tendones musculares no son similares. Esto ocurre porque el esplenio de la cabeza tiene aponeurosis cortas, mientras que el esplenio del cuello tiene aponeurosis largas (Fig. 4.4A).<sup>4</sup>

### Semiespinoso de la cabeza y cuello

El semiespinoso de la cabeza se origina en las apófisis articulares de las vértebras cervicales inferiores y las apófisis transversas de las vértebras torácicas superiores, y se inserta medialmente en el cráneo entre la línea nugal inferior y superior (véase Fig. 4.2B). El semiespinoso de la cabeza se caracteriza por patrones complejos de tendón interno e inserciones tendinosas en la porción medial, mientras que los fascículos en la porción lateral no se interrumpen (véase Fig. 4.4B).<sup>4</sup>



**FIG. 4.4** Arquitectura del esplenio de la cabeza, esplenio del cuello y semiespinoso de la cabeza. (A) Esplenio de la cabeza y esplenio del cuello. Obsérvese la aponeurosis en ambos extremos del esplenio del cuello. (B) Semiespinoso de la cabeza. La porción medial se caracteriza por inserciones tendinosas y aponeurosis internas que interrumpen los fascículos. (Modificado de Kamibayashi LK, Richmond FJR. Morphometry of human neck muscles. *Spine*. 1998; 23: 1314-1323.)

**TABLA 4.3** Parámetros morfométricos de los músculos del cuello humano

Músculo	N	MASA (g)		Rango de ángulo (grados)	LONGITUD MUSCULAR (cm)		LFN (cm), media (DE)	ASTF (cm <sup>2</sup> )	
		Rango	Media (DE)		Rango	Media (DE)		Rango	Media (DE)
Esternocleidomastoideo	9	21-50,5	40,4 (9)	0-20	16,5-21,2	19 (1,6)	10,8 (0,9)	1,81-5,26	3,72 (0,91)
Clavotrapezio		10,7-27,1	18,7 (4,5)	0-30	9-14,8	12 (1,9)	8,4 (2,1)	1,25-2,94	1,96 (0,62)
Acromiotrapezio		68,6-128,4	103,5 (23,5)	0-10	10-14,5	12,6 (1,7)	9,2 (1,8)	7,99-15,26	10,77 (2,38)
Romboides	9	18,8-58,3	40,9 (15,6)	0-5			7,2 (2)	1,76-9,93	5,84 (2,77)
Menor					6,5-12	8,7 (1,9)			
Mayor					5,3-13	8,2 (2,7)			
Recto de la cabeza posterior mayor	9	1,4-5,5	3,5 (1,2)	0-5	3-4,8		3,7 (0,7)	0,44-1,45	0,93 (0,33)
Recto de la cabeza posterior menor	9	0,6-1,6	1 (0,3)	0-5	2,6-3,1		1,9 (0,2)	0,28-0,83	0,50 (0,19)
Oblicuo de la cabeza superior	8	1-3,7	2,5 (0,9)	0-20	4,3-5,7		2,5 (0,5)	0,29-1,69	1,03 (0,46)
Oblicuo de la cabeza inferior	9	2,1-8,1	5,1 (1,8)	0-5	3,6-5,4	4,4 (0,6)	3,8 (0,8)	0,69-1,73	1,29 (0,54)
Largo de la cabeza	7	2,4-5,6	3,7 (1,2)	0-10	7,8-11,1	9,2 (1,4)	3,8 (1)	0,54-1,63	0,92 (0,35)
Esplenio	9	21,6-59,3	42,9 (13,8)	0-5			9,5 (2,3)	2,57-5,48	4,26 (1,04)
De la cabeza					9,5-15	12,3 (1,5)			
Del cuello					11,5-18,5	14,7 (2,3)			
Semiespinoso de la cabeza	9	21,3-55,8	38,5 (9,4)	0-20	13-20	11,7 (1,9)	6,8 (1,7)	3,93-7,32	5,40 (1,30)
Escaleno anterior	9	5,7-12,4	5,6 (3)	0-20	5,5-7,8	6,8 (0,9)	4,2 (1,3)	0,37-4,51	1,45 (1,23)
Escaleno medio	9	5,6-14,5	10,6 (8,0)	0-30	6,8-9,6	8,1 (1)	5 (0,8)	1,00-3,34	2,00 (0,73)
Escaleno posterior	9	4-23,5	10,6 (7,7)	0-20	7-10	8 (1,1)	6,2 (2,1)	0,59-3,15	1,55 (0,90)
Elevador de la escápula	8	16,5-38,9	24,6 (8,3)	0-5	13,2-17,5	15,1 (1,6)	11,3 (3,1)	1,39-3,24	2,18 (0,80)

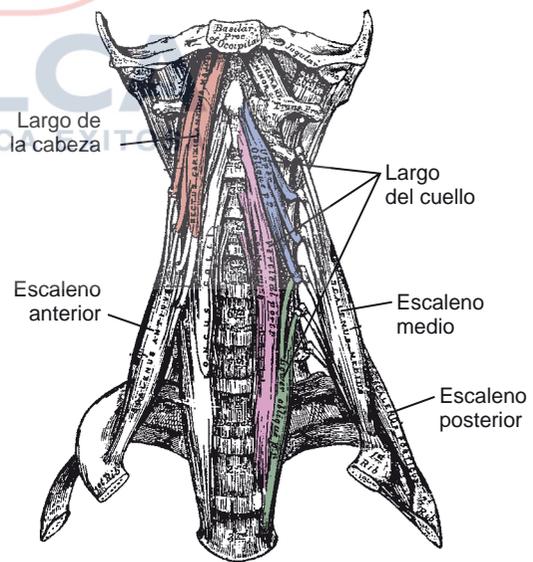
Los valores en cada columna representan el rango o el promedio de los valores individuales calculados en la muestra a la vez. LFN, longitud del fascículo normalizado; ASTF, área de sección transversal fisiológica; DE, desviación estándar. De Kamibayashi LK, Richmond FR. Morphometry of human neck muscles. *Spine*. 1998;23:1314-1323.

El semiespinoso del cuello (profundo al semiespinoso de la cabeza) se origina en las apófisis transversa torácica y se inserta en las apófisis espinosas cervicales de C2 a C5, con la mayor parte de su masa insertada en C2.

### Largo de la cabeza y cuello

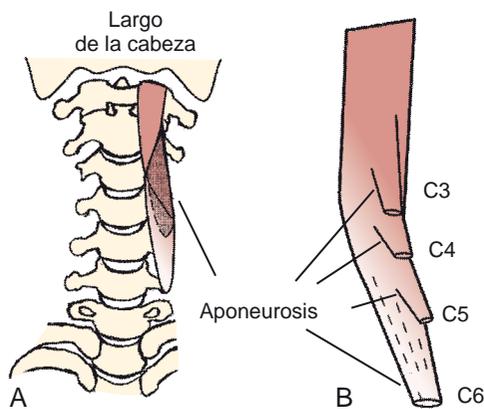
En el lado anterior de la columna vertebral, el largo de la cabeza se extiende desde la superficie anterior de las apófisis transversas hasta el baso-occipucio (Fig. 4.5). Debido a que se encuentra cerca de los cuerpos vertebrales, tiene solo un pequeño brazo de momento de flexión; la orientación superomedial podría proporcionar rotación ipsilateral. Su contraparte, el largo del cuello, tiene una estructura más complicada. Algunas fibras corren verticalmente a lo largo de los cuerpos vertebrales anteriores, otras fibras corren superolateralmente desde los cuerpos vertebrales torácicos a las apófisis transversas cervicales inferiores, y otras corren superomedialmente desde las apófisis transversas a los cuerpos vertebrales anteriores (véase Fig. 4.5). Por lo tanto, aunque todas las partes del largo del cuello tienen brazos de momento de flexión pequeños, las porciones superomediales y superolaterales tendrían brazos de momento de rotación ipsilaterales y contralaterales, respectivamente. El largo de la cabeza y cuello también se caracterizan por una aponeurosis que cubre gran parte del área superficial, de la cual los fascículos tienen tendones largos que se unen a las vértebras (Fig. 4.6).<sup>4</sup>

El largo de la cabeza y el largo del cuello están compuestos por 50 % de tipo 1 fibras por número y 61 % a 64 % de fibras de tipo 1 por área.<sup>13</sup>

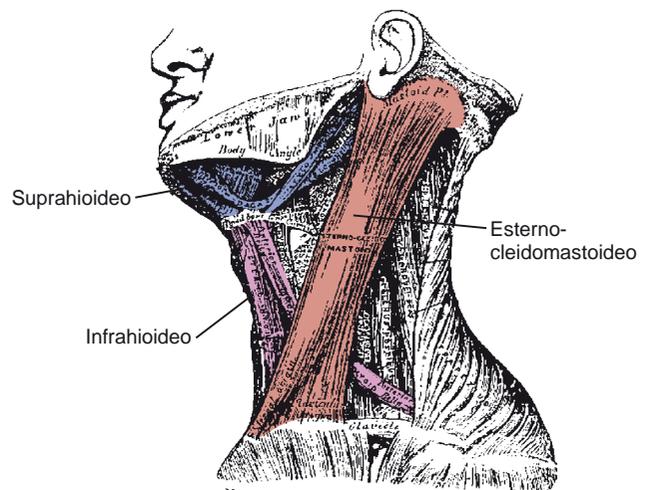


**FIG. 4.5** Vista anterior de los músculos profundos del cuello: largo de la cabeza, largo del cuello y escalenos. Note las tres partes del largo del cuello: oblicuo superior, vertical y oblicuo inferior. (Modificado de Gray H. *Gray's Anatomy*. Nueva York: Gramercy Books, 1977.)

Debido a sus pequeños brazos de momento, se considera que su función es postural. El área de la sección transversal del largo de la cabeza se correlacionó inversamente con la lordosis cervical, lo que sugiere una función estabilizadora.<sup>14</sup>



**FIG. 4.6** Arquitectura del largo de la cabeza. (A) Área superficial, con aponeurosis larga. (B) Superficie profunda, con tendones individuales para bajar las vértebras cervicales. (Modificado de Kamibayashi LK, Richmond FJR. Morphometry of human neck muscles. *Spine*. 1998; 23: 1314-1323.)



**FIG. 4.7** Vista lateral de los músculos esternocleidomastoideo y hoides. (Modificado de Gray H. *Gray's Anatomy*. Nueva York: Gramercy Books, 1977.)

## Músculos suboccipitales

Los músculos suboccipitales abarcan la región entre C2 y el cráneo (véase Fig. 4.2B). Los músculos recto posterior de la cabeza mayor y menor conectan las apófisis espinosas de C2 y C1, respectivamente, con el cráneo. El oblicuo superior de la cabeza está orientado en una dirección superoinferior entre la apófisis transversa de C1 y el cráneo, y el oblicuo de la cabeza inferior discurre principalmente mediolateralmente desde la apófisis espinosa de C2 hasta la apófisis transversa de C1. Estos cuatro músculos pueden contribuir a la extensión de la cabeza con respecto al cuello. Además, el recto posterior de la cabeza mayor y el oblicuo inferior de la cabeza están orientados para producir rotación ipsilateral, y la ubicación lateral del oblicuo superior de la cabeza implica una función de flexión lateral. El oblicuo superior de la cabeza tiene un tendón interno en la superficie profunda que hace que algunos fascículos tengan grandes ángulos de penetración.<sup>4</sup> En el lado ventral, el recto anterior y el recto lateral de la cabeza son músculos muy pequeños que conectan el cráneo con C1, presumiblemente con (pequeños) brazos de momento para flexión y flexión lateral, respectivamente.

## Músculos extrínsecos que unen las vértebras a la pelvis

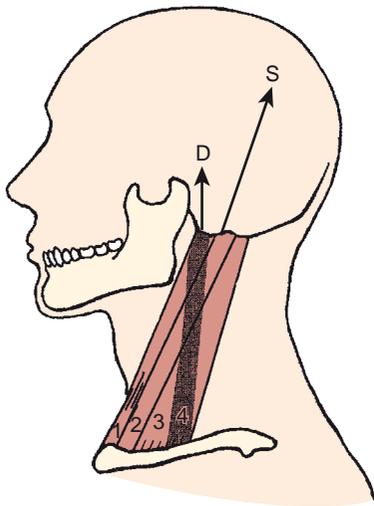
El cuadrado lumbar se une desde el ligamento iliolumbar y la cresta ilíaca a la 12da costilla y las apófisis transversas de L1 a L4. Ayuda en la flexión lateral de la columna lumbar. El componente proximal del cuadrado lumbar (es decir, el conjunto de fascículos que se extiende desde la cresta ilíaca hasta la 12da costilla y L1) tiene un brazo de mayor momento para la flexión lateral y tiene fascículos más largos que el componente distal del músculo. La evidencia electromiográfica muestra que el cuadrado lumbar tiene un papel dominante en la estabilización de la columna.<sup>15</sup>

El psoas mayor se une desde la superficie anterior de las apófisis transversas, los lados de los cuerpos vertebrales y los discos intervertebrales de todas las vértebras lumbares. Junto con el ilíaco, que surge del ilion, forman el iliopsoas, que se inserta en el trocánter menor del fémur

y es un flexor principal del muslo y el tronco. Los fascículos del psoas generalmente tienen la misma longitud, independientemente de su nivel de origen. Por lo tanto, debido a sus vínculos con un tendón común, los haces de niveles superiores son más tendinosos, mientras que el paquete de L5 permanece carnoso hasta que se une al tendón común.<sup>16</sup> El psoas es el músculo más grande en sección transversal en los niveles inferiores de la columna lumbar.<sup>17</sup> El análisis biomecánico muestra que el psoas tiene la capacidad de flexionar lateralmente la columna lumbar, generar fuerzas de compresión que aumentarían la estabilidad y crear grandes fuerzas de corte anterior en L5 a S1.<sup>18</sup> Sin embargo, si el psoas estuviera diseñado para movimientos de la columna lumbar, uno esperaría un diseño arquitectónico que constara de fascículos más largos que se unieran a segmentos más rostrales porque se someterían a una excursión más grande. Las longitudes uniformes del fascículo sugieren que el psoas en realidad está diseñado para flexionar la cadera;<sup>19</sup> estudios electromiográficos confirman que su función principal es la flexión de cadera.<sup>20</sup>

## Músculos extrínsecos que unen las vértebras o el cráneo a la cintura escapular o caja torácica

En la superficie anterior y lateral del cuello, el esternocleidomastoideo se origina en el esternón y la clavícula medial para unirse al cráneo en la apófisis mastoidea y línea nucal superior del occipucio (Fig. 4.7). Kamibayashi y Richmond<sup>4</sup> dividieron este músculo en tres subvolúmenes: esternomastoideo, cleidomastoideo y cleidooccipital. Los fascículos en la superficie superficial (porciones esternocleidomastoideo y cleidooccipital) se encuentran en paralelo. Sin embargo, la porción cleidomastoidea en la superficie profunda, que va desde la clavícula hasta la apófisis mastoidea, aumenta la proporción de fascículos musculares que ejercen fuerza sobre la apófisis mastoidea (Fig. 4.8).<sup>4</sup> La inspección superficial de la arquitectura muscular puede pasar por alto la disposición de estos profundos fascículos, que disminuirían la capacidad estimada de generación de momentos del esternocleidomastoideo en modelos biomecánicos en más del 30 %.<sup>21</sup>



**FIG. 4.8** Líneas de acción del esternocleidomastoideo, incluida la porción cleidomastoidea profunda. Las flechas indican diferencias en la dirección de extracción de los subvolumenes profundo (P) y superficial (S). (Modificado de Kamibayashi LK, Richmond FJR. Morphometry of human neck muscles. *Spine*. 1998; 23: 1314-1323.)

El esternocleidomastoideo tiene brazos de momento para flexión, rotación contralateral y flexión lateral, y se ha encontrado que está activo durante los movimientos en estas tres direcciones.

También en la superficie anterior del cuello, los músculos infrahioides (esternohioideo, esternotiroideo, tirohioideo) unen el hueso hioides, el cartilago tiroideo y el esternón, mientras que los músculos suprahioides (digástrico, estilohioideo, milohioideo y genihioideo) conectan el hueso hioides con la apófisis mastoidea y mandíbula (véase Fig. 4.7). En general, se considera que los músculos hioideos maniobran el hueso hioides para la deglución y mantienen la permeabilidad de las vías respiratorias, pero podrían generar un momento de flexión del cuello si los músculos infrahioides y suprahioides se activaran en concierto.

En la superficie posterior del cuello, el trapecio es el músculo más superficial (véase Fig. 4.2A). Se puede dividir en tres segmentos: el segmento rostral (también llamado clavotrapezio o trapezius pars descendens) se extiende desde la parte lateral de la clavícula hasta el occipucio o ligamento nuczal; la parte media (acromiotrapezio o pars transversa) se extiende casi perpendicular a la línea media en los niveles cervical inferior y torácico superior desde la parte lateral de la espina escapular; y la parte caudal (espinotrapezio o pars ascendens) se une a las apófisis espinosas de T4 a T12 desde la escápula. Su posición superficial significa que el trapecio tiene grandes brazos de momento para los movimientos de la columna vertebral y la cabeza; sin embargo, sus inserciones a la escápula significan que los movimientos del hombro también influyen en su función. Además, el clavotrapezio (que se adhiere al cráneo) tiene menos de una quinta parte de la masa del acromiotrapezio,<sup>4</sup> lo que indica que el trapecio tiene menos potencial de generación de momentos para los movimientos del cráneo de lo que generalmente se cree.

Otros tres músculos conectan la escápula con las vértebras cervicales y torácicas. El romboides mayor y el romboides menor se extienden desde el borde medial de la escápula hasta la línea media en los niveles torácicos superiores. Su principal función es la retracción de la escápula. El elevador de la escápula se extiende desde el borde superior de la escápula hasta las apófisis transversas de las vértebras cervicales superiores (véase

Fig. 4.2A). Al igual que el trapecio, las funciones de estos músculos están relacionadas con los movimientos del hombro.

Los músculos escalenos (escaleno anterior, medio y posterior) van desde las costillas hasta las apófisis transversas de las vértebras cervicales (véase Fig. 4.5). Debido a su ubicación lateral y a sus inserciones a las costillas, los músculos escalenos tienen brazos de momento sustanciales para la flexión lateral cervical; sin embargo, su función principal probablemente esté relacionada con la respiración. Se descubrió que los músculos escalenos estaban compuestos de un 52 % a un 72 % de fibras de tipo 1 por número y de un 76 % a un 84 % de fibras de tipo 1 por área. Aunque no son músculos posturales, el alto porcentaje de fibras tipo 1 probablemente esté relacionado con su función tónica en la respiración.<sup>13</sup> El serrato posterior superior e inferior también une la columna vertebral a las costillas. El serrato posterior superior se origina en la parte inferior del ligamento nuczal y en las espinas de las vértebras torácicas superiores, y se adhiere a las costillas 2 a 5. El serrato posterior inferior se origina en las espinas de las vértebras lumbares y torácicas inferiores, y se adhiere a las costillas 9 a 12. Estos músculos funcionan para elevar y deprimir las costillas, respectivamente.

El dorsal ancho surge de las apófisis espinosas de las seis vértebras torácicas inferiores y de las dos vértebras lumbares superiores, la fascia toracolumbar, la cresta ilíaca y las costillas inferiores para insertarse en el húmero. Las magnitudes de su fuerza y momento potenciales en la columna lumbar y la articulación sacroilíaca son pequeñas.<sup>22</sup> En general, se considera que mueve el brazo, pero si la extremidad superior estuviera fijada, su actividad podría mover el tronco (p. ej., como en las transferencias en silla de ruedas o en la locomoción con muletas).

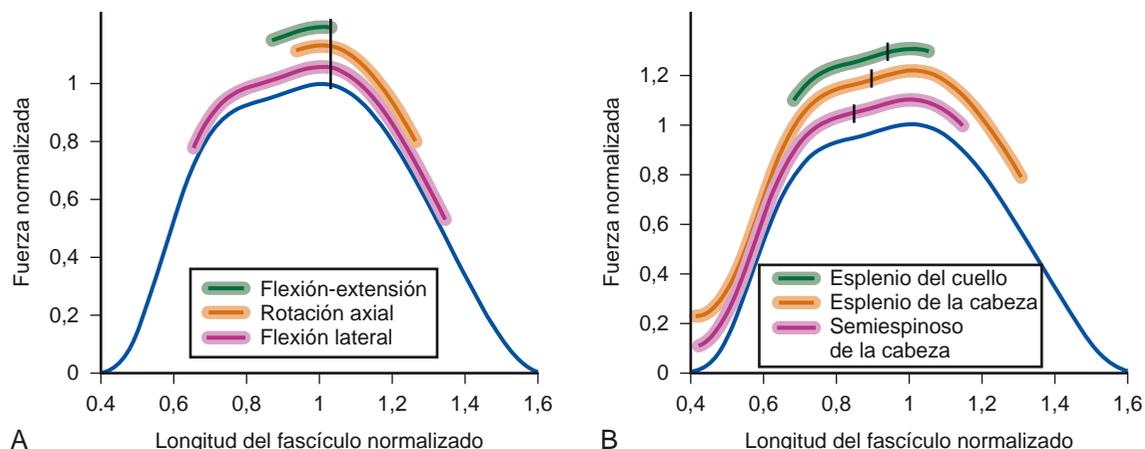
En resumen, los músculos espinales se caracterizan por una anatomía y arquitectura complejas, y las características biomecánicas importantes se revelan cuando su arquitectura se estudia en detalle. Sin embargo, queda por determinar la arquitectura de muchos músculos espinales y sus efectos sobre la función.

### Implicaciones de la anatomía y la arquitectura del músculo espinal para el control motor

Si bien la función de un músculo depende de la actividad muscular, el control neuronal de un músculo está influenciado por su arquitectura. Por lo tanto, la especialización arquitectónica de los músculos significa que el sistema nervioso no es el único medio disponible para modificar la fuerza muscular y la excursión. Aunque los estímulos neuronales pueden cambiar la fuerza muscular, la efectividad del estímulo neural se ve alterada por diferentes características arquitectónicas musculares. En otras palabras, los comandos del sistema nervioso son «interpretados» a través del diseño de los músculos para controlar la postura y el movimiento. Comprender tanto la biomecánica como el control neuronal de los músculos espinales, a través de modelos y estudios experimentales, es vital para comprender su papel en los mecanismos de dolor y lesiones.

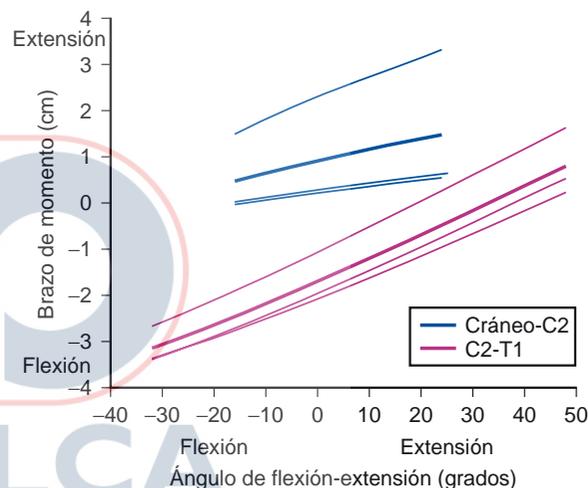
### Cambios en la longitud del fascículo con la postura

En la columna cervical, muchos músculos extensores experimentan grandes cambios de longitud en el rango de movimiento (RDM) de flexión-extensión. Un modelo biomecánico demostró que el esplenio de la cabeza, semiespinoso de la cabeza, semiespinoso del cuello,



**FIG. 4.9** Desplazamientos de longitud de fascículos en el rango de movimiento de flexión-extensión del cuello superpuesto sobre una curva de fuerza-longitud activa muscular normalizada. (Modificado de Vasavada A, Li S, Delp S. Influence of muscle morphometry and moment arms on the moment-generating capacity of human neck muscles. *Spine*. 1998; 23: 412-421.)

recto posterior mayor de la cabeza y recto posterior menor de la cabeza experimentan cambios en la longitud de los fascículos superiores a 70 % de la longitud óptima sobre el RDM completo.<sup>21</sup> El cambio en la longitud del fascículo depende tanto de la longitud óptima del fascículo del músculo como del brazo de momento. Por ejemplo, el esplenio de la cabeza y el esplenio del cuello tienen la misma longitud óptima del fascículo (véase Tabla 4.3), pero el esplenio de la cabeza tiene un brazo de momento mucho más grande que el esplenio del cuello. Por lo tanto, el esplenio de la cabeza experimenta cambios de longitud de fascículo más grandes que el esplenio del cuello en el mismo RDM (Fig. 4.9). Por otro lado, el semiespinoso de la cabeza tiene longitudes de fascículo más cortas, pero también un brazo de momento más pequeño que el esplenio de la cabeza. Por lo tanto, el semiespinoso de la cabeza y el esplenio de la cabeza experimentan grandes desplazamientos de longitud de fascículo similares en el rango de movimiento de flexión-extensión (véase Fig. 4.9). En ambos músculos, la longitud de los fascículos es extremadamente corta en posturas extendidas. Esto implica que el sistema nervioso central debe compensar la disminución asociada en el potencial generador de fuerza aumentando la activación o reclutando otros extensores del cuello.



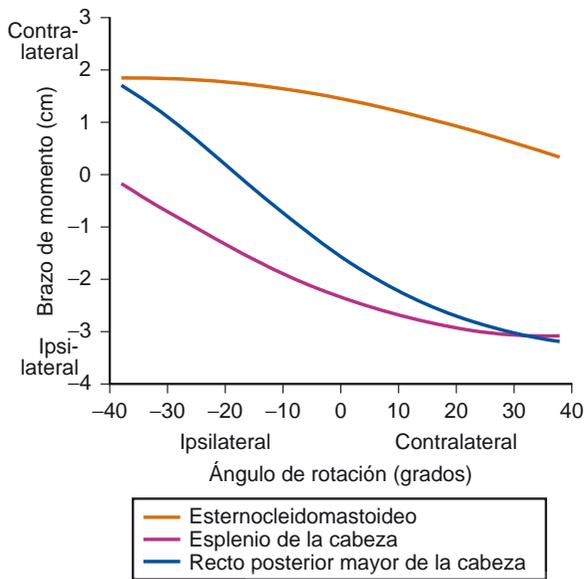
**FIG. 4.10** Brazos de momento de flexión-extensión esternocleidomastoideo. Las líneas claras indican subvolumenes individuales (esternomastoideo, cleidomastoideo y cleidooccipital), y las líneas oscuras indican un promedio ponderado por masa. (Modificado de Vasavada A, Li S, Delp S. Influence of muscle morphometry and moment arms on the moment-generating capacity of human neck muscles. *Spine*. 1998; 23: 412-421.)

### Cambios en el brazo de momento con la postura

Las diferentes partes de un músculo pueden tener diferentes brazos de momento, y la magnitud (y en algunos casos, la dirección) de estos brazos de momento cambia con la postura. Además, los músculos que cruzan múltiples articulaciones (como la mayoría de los músculos espinales) pueden tener diferentes funciones mecánicas en diferentes articulaciones. Un modelo biomecánico de los músculos del cuello<sup>21</sup> demostró que el brazo de momento del esternocleidomastoideo varía drásticamente para los movimientos de flexión y extensión (Fig. 4.10). Para los movimientos de las articulaciones cervicales superiores, el segmento cleidooccipital del esternocleidomastoideo en realidad tiene un brazo de momento de extensión que aumenta en posturas extendidas (véase Fig. 4.10); los otros dos subvolumenes del esternocleidomastoideo (que se unen a la apófisis mastoidea) tienen brazos de momento muy pequeño. Durante la flexión de las articulaciones cervicales inferiores, aumenta el brazo del momento de flexión del esternocleidomastoideo. Estos resultados indican que la

función del esternocleidomastoideo depende en gran medida de la postura y las articulaciones sobre las que el movimiento se produce. Además, el cambio en el brazo de momento de flexión esternocleidomastoideo en la región cervical inferior indica un efecto desestabilizador, porque potencialmente aumenta la capacidad de generación de momento de flexión del músculo en posturas flexionadas.

El mismo modelo<sup>21</sup> también mostró que para la rotación axial de la región cervical superior, muchos músculos tienen brazos de momento que varían de 2 a 3 cm pero permanecen en la misma dirección en todo el RDM (p. ej., esternocleidomastoideo, esplenio de la cabeza, Fig. 4.11). Para otros músculos, la dirección del brazo de momento cambia con la rotación axial. En la posición neutral, el recto posterior derecho mayor de la cabeza tiene un brazo de momento de rotación derecho; su magnitud aumenta en posturas giradas a la izquierda. Sin embargo, cuando la cabeza gira hacia la derecha, el brazo de momento disminuye en magnitud y finalmente cambia a un brazo de momento de rotación izquierdo. Estos



**FIG. 4.11** Brazos de momento de rotación axial para la región cervical superior. (Modificado de Vasavada A, Li S, Delp S. Influence of muscle morphology and moment arms on the moment-generating capacity of human neck muscles. *Spine*. 1998; 23: 412-421.)

resultados indican que el recto posterior mayor de la cabeza tiene un brazo de momento de rotación axial apropiado para restaurar la posición de la cabeza a la posición neutral desde las posiciones más giradas de la cabeza. Los brazos de momento de otros músculos, como el semiespinoso de la cabeza y el longísimo de la cabeza, muestran el mismo patrón, aunque sus brazos de momento son más pequeños. La implicación de estos hallazgos es que el brazo de momento proporciona una función «autoestabilizadora» para ayudar al sistema nervioso central a mantener la postura de la cabeza con rotación neutral (es decir, hacia adelante). Esta función es particularmente relevante en la región cervical superior, porque la mayor rotación axial ocurre entre C1 y C2.

En la columna lumbar, la postura también cambia la función mecánica de los músculos erectores de la columna vertebral. McGill y asociados<sup>23</sup> midieron los ángulos de fibra del longísimo torácico e iliocostal lumbar con la columna lumbar en punto muerto y completamente flexionada usando ultrasonido de alta resolución. Encontraron que la flexión cambia la línea de acción de estos músculos, disminuyendo su capacidad de resistir las fuerzas de corte anteriores. Este hallazgo es importante porque las cargas de corte anterior están relacionadas con el riesgo de lesión de la espalda.<sup>24</sup>

### Implicaciones de la anatomía del músculo espinal en las lesiones y el dolor

Hay al menos tres formas en que los músculos espinales pueden estar implicados en los mecanismos de lesión y dolor. En primer lugar, el músculo en sí mismo puede lesionarse debido a la contracción excéntrica, como se describe en el Capítulo 3. Esto puede ocurrir durante un movimiento impuesto (particularmente uno en el que la cinemática es anormal). En segundo lugar, las fuerzas musculares pueden alterar la distribución de la carga dentro de las estructuras anatómicas que se han relacionado clínicamente con el dolor. En tercer lugar, la actividad muscular puede alterar la rigidez espinal y la cinemática, lo que indirectamente afectaría las cargas y tensiones de

los tejidos blandos. La relación entre los músculos y la lesión se puede dilucidar mediante modelos biomecánicos, cuya validez depende del modelado preciso de la anatomía y la arquitectura.

### Lesión muscular como resultado de la contracción excéntrica

Como se señaló en el Capítulo 3, el alargamiento rápido del músculo es un mecanismo importante de lesión muscular. Un ejemplo de lesión muscular potencial debido al alargamiento impuesto ocurre durante el latigazo cervical. Durante la fase de retracción de la lesión por latigazo cervical, cuando la cabeza se traslada hacia atrás con respecto al torso, el músculo esternocleidomastoideo puede experimentar tensiones de alargamiento de 5 % a 10 % mientras está activo.<sup>25,26</sup> Durante la fase de rebote de la lesión por latigazo cervical, cuando la cabeza se traslada hacia adelante con respecto al torso, los músculos esplenio de la cabeza y semiespinoso de la cabeza pueden experimentar tensiones de alargamiento del 10 % a 20 %. Estas predicciones de las deformaciones musculares, basadas en un modelo biomecánico que incorpora la arquitectura muscular,<sup>21</sup> están por encima de los umbrales de la tensión que causa daño al músculo en alargamiento activo.<sup>27-29</sup>

### Músculos que alteran la distribución de carga en otras estructuras anatómicas

Debido a que los músculos están orientados principalmente de manera vertical, su activación produce la compresión axial de la columna vertebral. Las cargas de compresión en los discos y las articulaciones facetarias son una función de la fuerza muscular, el brazo de momento y la activación. Cuando se incluyó la anatomía detallada del erector lumbar de la columna en un modelo biomecánico,<sup>30</sup> la compresión predicha del disco y las cargas de corte se redujeron en comparación con un extensor muscular «equivalente muscular» comúnmente utilizado en muchos modelos. Este estudio destaca la importancia de crear una representación precisa de la anatomía muscular en modelos biomecánicos.

Las cargas compresivas pueden alterar gravemente la carga tisular, especialmente si se produce una cinemática vertebral anómala. Por ejemplo, el pliegue sinovial de la articulación facetaria puede verse afectado durante la cinemática anormal que ocurre durante el latigazo cervical.<sup>31</sup> Los músculos también pueden contribuir a la lesión al cargar estructuras pasivas directamente. Por ejemplo, el multífido cervical tiene uniones directas a los ligamentos capsulares facetarios;<sup>8,32</sup> la carga combinada del movimiento articular y las fuerzas musculares puede llevar a lesiones subcatastróficas en los ligamentos capsulares facetarios. Estas observaciones son importantes porque las articulaciones facetarias cervicales y los ligamentos capsulares se han aislado clínicamente como una fuente de dolor en el cuello.<sup>33</sup>

### Efectos musculares sobre la rigidez y estabilidad de la columna vertebral

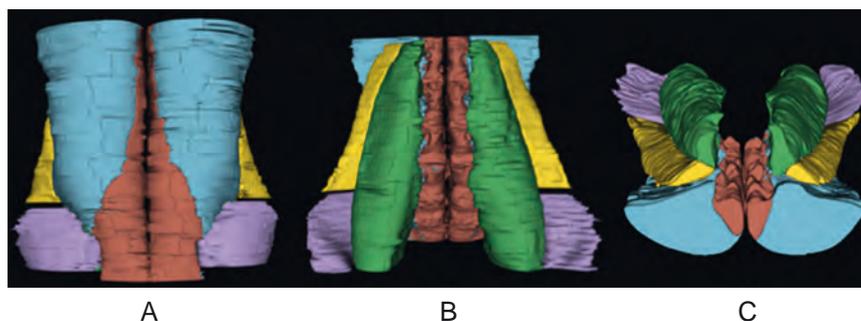
Durante mucho tiempo se ha reconocido que los músculos son necesarios para la estabilidad espinal. Sin embargo, no está claro qué

músculos contribuyen más a la estabilidad espinal; esta pregunta ha sido abordada en varios estudios teóricos y experimentales. Crisco y Panjabi<sup>34</sup> examinaron el papel de la anatomía muscular macroscópica (p. ej., el número de articulaciones cruzadas por un músculo) en la estabilización lateral de la columna lumbar utilizando un modelo matemático. Calcularon la rigidez muscular mínima necesaria para la estabilidad espinal y descubrieron que los músculos que abarcaban un solo cuerpo vertebral necesitaban la mayor rigidez (es decir, activación) para la estabilidad, mientras que los músculos que abarcaban el mayor número de vértebras eran más eficientes (requerían la menor activación). La estabilización eficiente (menor activación muscular) es importante porque implica menores cargas de disco. La modelación impulsada electromiográficamente por Cholewicki y McGill<sup>35</sup> sugirió que los músculos grandes pueden proporcionar el grueso de la rigidez a la columna vertebral, como sugirieron Crisco y Panjabi,<sup>34</sup> pero que la actividad de los músculos cortos intrínsecos también era necesaria para mantener la estabilidad. De hecho, los modelos biomecánicos han demostrado que puede producirse pandeo (pérdida de estabilidad) a partir de una reducción temporal de la activación de uno o más músculos intersegmentales.<sup>35</sup> Presumiblemente, los músculos intrínsecos pequeños son más adecuados para estabilizar los desplazamientos en una articulación única con un aumento mínimo de las cargas articulares en otros niveles. Del mismo modo, Winters y asociados utilizaron modelos computarizados y físicos de la columna cervical para demostrar que la activación de músculos grandes y largos provocaba inestabilidad, especialmente alrededor de la postura erguida.<sup>36,37</sup> Los autores también concluyeron que la activación de los músculos profundos era necesaria para la estabilidad de la columna vertebral. Este tipo de análisis demuestra la importancia tanto de la anatomía macroscópica como de la arquitectura de los músculos espinales en la estabilidad espinal. Sin embargo, quedan muchas preguntas importantes, como el efecto de la fatiga muscular en la estabilidad espinal y los mejores patrones de activación muscular para la estabilidad en la prevención y rehabilitación del dolor de espalda y cuello.

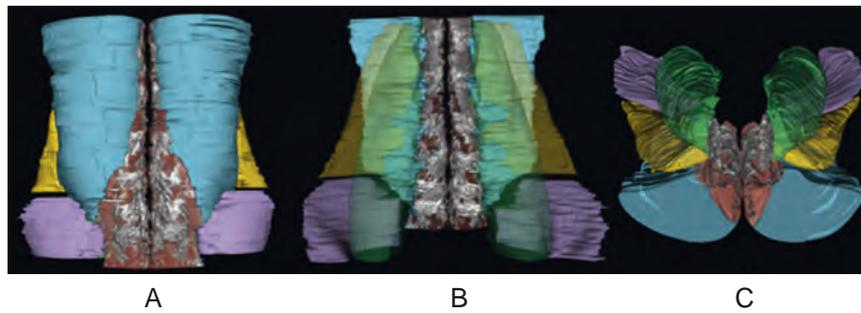
La fatiga muscular ha sido implicada en dolores de espalda y cuello,<sup>38</sup> el mecanismo puede estar relacionado con cargas alteradas en otras estructuras, disminución de la estabilidad espinal, acumulación de metabolitos o implicación de la mediación periférica y central del dolor. Los pacientes con dolor de cuello o radiculopatía cervical demuestran resistencia muscular cervical alterada y evidencia mioeléctrica de fatiga.<sup>39,40</sup> En pacientes con dolor, así como en sujetos sanos, la fatiga puede

conducir a diferencias en el control neuromuscular, incluidos patrones de activación alterados o flexo-relajación, que puede aumentar las cargas en tejidos pasivos.<sup>39,41</sup> Hay evidencia de transformaciones del tipo de fibra (del tipo 1 hacia tipo 2) en pacientes con dolor de espalda o cuello,<sup>42,43</sup> pero otros estudios han encontrado que los trastornos musculoesqueléticos de la columna vertebral no están relacionados con un cambio en el tipo de fibra.<sup>44,45</sup> Los estudios de tipo de fibra en estos músculos son extremadamente difíciles debido a su complejo diseño arquitectónico y la capacidad limitada para realizar biopsias musculares.

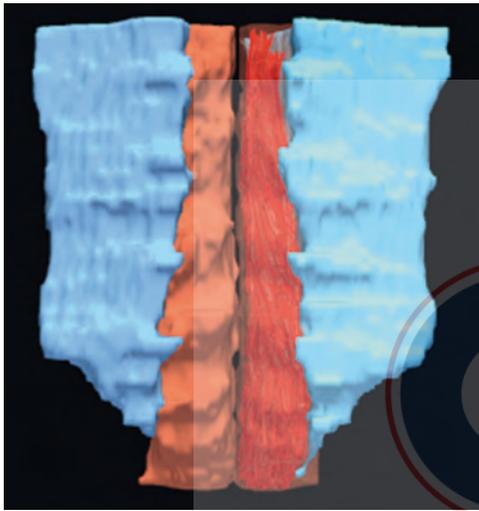
Aunque se han documentado las características arquitectónicas promedio de los principales músculos de la columna lumbar (véase discusión anterior y tablas asociadas), existe una necesidad creciente de generar datos arquitectónicos específicos del paciente para fines de diagnóstico, planificación quirúrgica y modelado musculoesquelético. Los avances recientes en IRM y procesamiento de imágenes permiten que estos músculos se visualicen rápidamente y se cuantifiquen en tres dimensiones de una manera que anteriormente era imposible con ultrasonido, resonancia magnética o tomografía computarizada (Fig. 4.12). Además, estas herramientas permiten que el tejido muscular se fraccione en compartimentos contráctiles y de grasa, lo cual es extremadamente relevante clínicamente, ya que la «calidad muscular» parece ser una característica importante en la columna lumbar y otros sistemas articulares sometidos a enfermedades crónicas. Como se puede ver en la Fig. 4.13, la fracción de músculo contenida dentro de los límites del músculo «normal» puede ser sustancialmente menor de lo esperado. Además, se ha encontrado infiltración grasa en los músculos del cuello en casos de lesión por latigazo con mala recuperación funcional<sup>46</sup> y la cantidad disminuye con el ejercicio<sup>47</sup>; la lesión del disco se asocia con un aumento del tejido adiposo y conectivo en el multifido lumbar y una disminución del tejido adiposo en la biopsia se ha asociado con un resultado positivo después de la cirugía.<sup>48</sup> Por último, en el Capítulo 3 discutimos la necesidad (y la dificultad) de cuantificar la fibra muscular o longitudes de fascículo en pacientes individuales. La resonancia magnética de difusión ténsil (MR-DTI) ahora permite las estimaciones de la longitud del fascículo en casos individuales (Fig. 4.14). Sin embargo, es importante observar que estas son longitudes de fascículo no normalizado (no fibra); por lo tanto, no pueden usarse para predecir la excursión o velocidad muscular, ni pueden usarse para calcular ASTF. Se requieren desarrollos futuros en métodos para medir la longitud del sarcómero para hacer estas normalizaciones. Sin embargo, estas son herramientas científicas emergentes que deben considerarse en el trabajo clínico y científico, ya que están más rigurosamente validadas.



**FIG. 4.12** Vistas del volumen del músculo de la columna lumbar tridimensional, específico del paciente, basada en imágenes de resonancia magnética, desde (A) posterior, (B) anterior y (C) inferior. Los músculos multifido (rojo), erector de la columna (azul), cuadrado lumbar (amarillo) y psoas (verde) se visualizan fácilmente.



**FIG. 4.13** Fragmentaciones tridimensional del volumen del músculo de la columna lumbar (músculos en colores y grasa en blanco), basadas en imágenes de resonancia magnética, desde (A) posterior, (B) anterior y (C) inferior. Multifido (rojo), erector de la columna (azul), cuadrado lumbar (amarillo) y psoas (verde) se visualizan y cuantifican fácilmente.



**FIG. 4.14** El estudio por imágenes de tensor de difusión de resonancia magnética (MR-DTI) se pueden usar para generar mapas de tractografía de músculos individuales. Según la resolución de imágenes, estos tractos probablemente representan fascículos musculares (o más grandes), pero las propiedades de difusión en sí mismas están muy influenciadas por la geometría de la fibra muscular. En este ejemplo, una vista posterior de los volúmenes musculares tridimensionales muestra erectores espinales (azul) y músculos multifidos (rojo) bilaterales. El músculo multifido derecho tiene resultados de tractografía MR-DTI superpuestos sobre el volumen del músculo multifido que representa las orientaciones y longitudes de los fascículos.

## Resumen

La arquitectura muscular es un determinante importante, y con frecuencia pasado por alto, de la función muscular. Debido a que la arquitectura muscular interactúa con los sistemas esquelético y nervioso de maneras complejas, todos estos factores deben examinarse juntos para comprender completamente la función biomecánica de un músculo y su contribución a cualquier mecanismo de dolor o lesión. Los estudios anatómicos y arquitectónicos detallados han arrojado luz sobre las funciones de los músculos espinales, pero la arquitectura de muchos músculos espinales aún no se ha examinado. Estos datos son necesarios para modelos biomecánicos precisos, que deben utilizarse junto con estudios experimentales para dilucidar la función de los músculos espinales y su papel en los procesos patológicos de la columna vertebral. Esta información puede finalmente

ser utilizada para desarrollar mejores estrategias de prevención y rehabilitación.

## REFERENCIAS CLAVE

1. MacIntosh JE, Valencia F, Bogduk N, Munro RR. The morphology of the human lumbar multifidus. *Clin Biomech* (Bristol, Avon). 1986;1:196-204.  
*Esta serie de artículos describe la anatomía compleja pero altamente reproducible de la musculatura de la columna lumbar y torácica. Progresando de lo superficial a lo profundo y de lo torácico a lo lumbar, el extraordinario nivel de organización de esta musculatura es claramente evidente.*
2. Kamibayashi LK, Richmond FJR. Morphometry of human neck muscles. *Spine*. 1998;23:1314-1323.  
*Este artículo representa el primer estudio cuantitativo de la arquitectura muscular en la columna cervical. El trabajo destaca características arquitectónicas únicas de los músculos del cuello y proporciona datos para estudios comparativos y el desarrollo de modelos biomecánicos.*
3. Cholewicki J, McGill SM. Mechanical stability of the in vivo lumbar spine: implications for injury and chronic low back pain. *Clin Biomech* (Bristol, Avon). 1996;11(1):1-15.  
*Este artículo combina un modelo anatómico detallado de la musculatura lumbar con propiedades de tejido pasivo, modelado de puente cruzado y electromiografía para estimar las fuerzas musculares y la estabilidad de la columna vertebral. Los autores relacionan la estabilidad de la columna con los mecanismos potenciales de dolor lumbar y dolor.*
4. Ward SR, Kim CW, Eng CM, et al. Architectural analysis and intraoperative measurements demonstrate the unique design of the multifidus muscle for lumbar spine stability. *J Bone Joint Surg Am*. 2009;91(1):176-185.  
*Este artículo combina medidas arquitectónicas de especímenes de cadáveres, mediciones in vivo de la longitud del sarcómero intraoperatorio en posturas flexionadas y extendidas, y mediciones de la propiedad mecánica pasiva de la biopsia. Los resultados destacan la gran capacidad de generación de fuerza de los multifidos en las posiciones de la columna lumbar flexionada, lo que indica un diseño para la estabilización de la columna vertebral.*

## REFERENCIAS

1. Kalimo H, Rantanen J, Viljanen T, Einola S. Lumbar muscles: structure and function. *Ann Med*. 1989;21(5):353-359.
2. Macintosh JE, Bogduk N. 1987 Volvo award in basic science. The morphology of the lumbar erector spinae. *Spine*. 1987;12(7):658-668.

3. Delp SL, Suryanarayanan S, Murray WM, Uhlir J, Triolo RJ. Architecture of the rectus abdominis, quadratus lumborum, and erector spinae. *J Biomech*. 2001;34(3):371-375.
4. Kamibayashi LK, Richmond FJ. Morphometry of human neck muscles. *Spine*. 1998;23(12):1314-1323.
5. Ward SR, Kim CW, Eng CM, et al. Architectural analysis and intraoperative measurements demonstrate the unique design of the multifidus muscle for lumbar spine stability. *J Bone Joint Surg Am*. 2009;91(1):176-185.
6. Regev GJ, Kim CW, Thacker BE, et al. Regional myosin heavy chain distribution in selected paraspinal muscles. *Spine*. 2010;35(13):1265-1270.
7. Macintosh JE, Valencia F, Bogduk N, Munro RR. The morphology of the human lumbar multifidus. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1986;1(4):196-204.
8. Anderson JS, Hsu AW, Vasavada AN. Morphology, architecture, and biomechanics of human cervical multifidus. *Spine*. 2005;30(4):E86-E91.
9. Macintosh JE, Bogduk N. The biomechanics of the lumbar multifidus. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1986;1(4):205-213.
10. Thorstenson A, Carlson H. Fibre types in human lumbar back muscles. *Acta Physiol Scand*. 1987;131(2):195-202.
11. Donisch EW, Basmajian JV. Electromyography of deep back muscles in man. *Am J Anat*. 1972;133(1):25-36.
12. Gray H. *Gray's Anatomy*. New York: Gramercy Books; 1977.
13. Cornwall J, Kennedy E. Fiber types of the anterior and lateral cervical muscles in elderly males. *Eur Spine J*. 2015;24(9):1986-1991.
14. Mayoux-Benhamou MA, Revel M, Vallee C, et al. Longus colli has a postural function on cervical curvature. *Surg Radiol Anat*. 1994;16(4):367-371.
15. McGill S, Juker D, Kropf P. Quantitative intramuscular myoelectric activity of quadratus lumborum during a wide variety of tasks. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1996;11(3):170-172.
16. Bogduk N, Percy M, Hadfield G. Anatomy and biomechanics of psoas major. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1992;7(2):109-119.
17. McGill SM, Patt N, Norman RW. Measurement of the trunk musculature of active males using CT scan radiography: implications for force and moment generating capacity about the L4/L5 joint. *J Biomech*. 1988;21(4):329-341.
18. Santaguida PL, McGill SM. The psoas major muscle: a three-dimensional geometric study. *J Biomech*. 1995;28(3):339-345.
19. Gans C, Bock WJ. The functional significance of muscle architecture—a theoretical analysis. *Ergeb Anat Entwicklungsgesch*. 1965;38:115-142.
20. Juker D, McGill S, Kropf P, Steffen T. Quantitative intramuscular myoelectric activity of lumbar portions of psoas and the abdominal wall during a wide variety of tasks. *Med Sci Sports Exerc*. 1998;30(2):301-310.
21. Vasavada AN, Li S, Delp SL. Influence of muscle morphometry and moment arms on the moment-generating capacity of human neck muscles. *Spine*. 1998;23(4):412-422.
22. Bogduk N, Johnson G, Spalding D. The morphology and biomechanics of latissimus dorsi. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1998;13(6):377-385.
23. McGill SM, Hughson RL, Parks K. Changes in lumbar lordosis modify the role of the extensor muscles. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2000;15(10):777-780.
24. Norman R, Wells R, Neumann P, et al. A comparison of peak vs cumulative physical work exposure risk factors for the reporting of low back pain in the automotive industry. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1998;13(8):561-573.
25. Brault JR, Siegmund GP, Wheeler JB. Cervical muscle response during whiplash: evidence of a lengthening muscle contraction. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2000;15(6):426-435.
26. Vasavada AN, Brault JR, Siegmund GP. Musculotendon and fascicle strains in anterior and posterior neck muscles during whiplash injury. *Spine*. 2007;32(7):756-765.
27. Lieber RL, Friden J. Muscle damage is not a function of muscle force but active muscle strain. *J Appl Physiol*. 1993;74(2):520-526.
28. Macpherson PC, Schork MA, Faulkner JA. Contraction-induced injury to single fiber segments from fast and slow muscles of rats by single stretches. *Am J Physiol*. 1996;271(5 Pt 1):C1438-C1446.
29. Patel TJ, Das R, Friden J, Lutz GJ, Lieber RL. Sarcomere strain and heterogeneity correlate with injury to frog skeletal muscle fiber bundles. *J Appl Physiol*. 2004;97(5):1803-1813.
30. McGill SM, Norman RW. Effects of an anatomically detailed erector spinae model on L4/L5 disc compression and shear. *J Biomech*. 1987;20(6):591-600.
31. Kaneoka K, Ono K, Inami S, Hayashi K. Motion analysis of cervical vertebrae during whiplash loading. *Spine*. 1999;24(8):763-769.
32. Winkelstein BA, McLendon RE, Barbir A, Myers BS. An anatomical investigation of the human cervical facet capsule, quantifying muscle insertion area. *J Anat*. 2001;198(Pt 4):455-461.
33. Barnsley L, Lord SM, Wallis BJ, Bogduk N. The prevalence of chronic cervical zygapophysial joint pain after whiplash. *Spine*. 1995;20(1):20-25, discussion 26.
34. Crisco JJ 3rd, Panjabi MM. The intersegmental and multisegmental muscles of the lumbar spine. A biomechanical model comparing lateral stabilizing potential. *Spine*. 1991;16(7):793-799.
35. Cholewicki J, McGill SM. Mechanical stability of the in vivo lumbar spine: implications for injury and chronic low back pain. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1996;11(1):1-15.
36. Daru K. *Computer Simulation and Static Analysis of the Human Head, Neck and Upper Torso*. Tempe, AZ: Arizona State University; 1989.
37. Winters JM, Peles JD. Neck muscle activity and 3-D head kinematics during quasi-static and dynamic tracking movements. In: Winters JM, Woo SL-Y, eds. *Multiple Muscle Systems: Biomechanics and Movement Organization*. New York: Springer-Verlag; 1990. Multiple Muscle Systems: Biomechanics and Movement Organization.
38. Hamberg-van Reenen HH, Ariens GA, Blatter BM, et al. Physical capacity in relation to low back, neck, or shoulder pain in a working population. *Occup Environ Med*. 2006;63(6):371-377.
39. Zabihhosseinian M, Holmes MW, Ferguson B, Murphy B. Neck muscle fatigue alters the cervical flexion relaxation ratio in sub-clinical neck pain patients. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2015;30(5):397-404.
40. Halvorsen M, Abbott A, Peolsson A, Dederer A. Endurance and fatigue characteristics in the neck muscles during sub-maximal isometric test in patients with cervical radiculopathy. *Eur Spine J*. 2014;23(3):590-598.
41. Nimbarte AD, Zreiqat MM, Chowdhury SK. Cervical flexion-relaxation response to neck muscle fatigue in males and females. *J Electromyogr Kinesiol*. 2014;24(6):965-971.
42. Uhlig Y, Weber BR, Grob D, Muntener M. Fiber composition and fiber transformations in neck muscles of patients with dysfunction of the cervical spine. *J Orthop Res*. 1995;13(2):240-249.
43. Mazis N, Papachristou DJ, Zouboulis P, et al. The effect of different physical activity levels on muscle fiber size and type distribution of lumbar multifidus. A biopsy study on low back pain patient groups and healthy control subjects. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2009;45(4):459-467.

44. Brown SH, Gregory DE, Carr JA, et al. ISSLS prize winner: Adaptations to the multifidus muscle in response to experimentally induced intervertebral disc degeneration. *Spine*. 2011;36(21):1728-1736.
45. Crossman K, Mahon M, Watson PJ, Oldham JA, Cooper RG. Chronic low back pain-associated paraspinal muscle dysfunction is not the result of a constitutionally determined “adverse” fiber-type composition. *Spine*. 2004;29(6):628-634.
46. Elliott JM, Courtney DM, Rademaker A, et al. The rapid and progressive degeneration of the cervical multifidus in whiplash: an MRI study of fatty infiltration. *Spine*. 2015;40(12):E694-E700.
47. O’Leary S, Jull G, Van Wyk L, Pedler A, Elliott J. Morphological changes in the cervical muscles of women with chronic whiplash can be modified with exercise—a pilot study. *Muscle Nerve*. 2015;52(5):772-779.
48. Rantanen J, Hurme M, Falck B, et al. The lumbar multifidus muscle five years after surgery for a lumbar intervertebral disc herniation. *Spine*. 1993;18(5):568-574.

